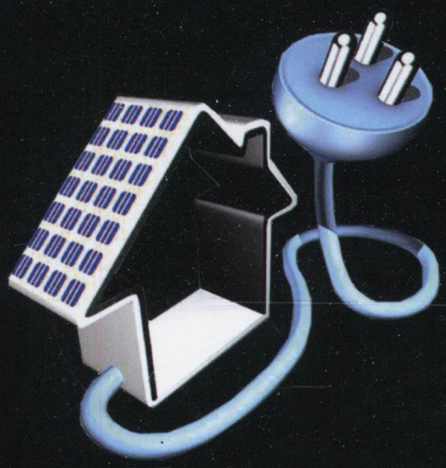
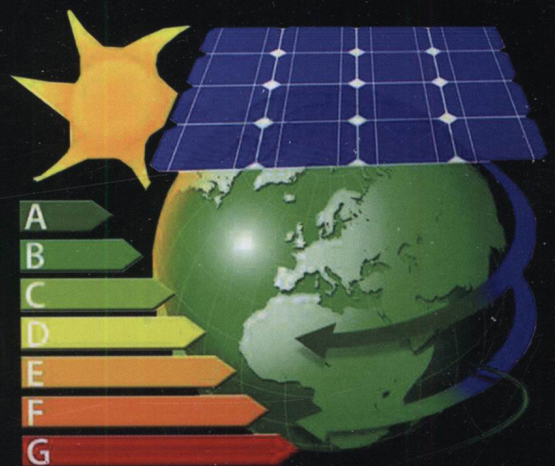


段光复 段伦 ◎ 编著

薄膜太阳电池及其光伏电站

BOMOTAIYANGDIANCHI JIQI GUANGFU DIANZHAN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

薄膜太阳电池及其光伏电站

段光复　段　伦　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书是作者多年从事光伏事业的经验总结，介绍了薄膜太阳电池及其光伏电站，主要由上篇、中篇、下篇三部分组成，共19章。上篇从第三章至第十章共8章，介绍了非晶硅、铜铟镓硒、砷化镓、碲化镉四大薄膜电池的工作原理、设计、制造工艺及设备、检测技术及设备、所用各种原材料；中篇从第十一章至第十六章共6章，介绍了适用于海拔3000m的光伏电站的大型并网逆变器、薄膜太阳电池光伏电站、各种储存光伏电能的方法、太空光伏电站、智能电网和电能质量；下篇从第十七章至第十九章共3章，介绍了10MW沙漠电站实例、光伏建筑一体化及分布式发电。

薄膜太阳电池及其光伏电站的建设，其技术上升的空间还很大，其核心技术还需要进行艰苦的研发和不断的完善，作者提出了研发方向及可能实现的路径。

光伏产业的发展要依靠自我进步，从而降低成本，降到与火电相近的程度，作者也介绍了降低成本的途径。

作者力求把薄膜太阳电池的理论说透，实践道明，让广大读者不但知其然，还知其所以然，凡涉及的太阳电池及其光伏电站专业名词及概念，均可在书中找到注解，从而引导具有大专及以上文化人士对薄膜太阳电池快速地从不熟悉到精通。

本书面向从事薄膜太阳电池产业的研发者、设计者、技术人员、商人、官员、大专院校师生以及热爱光伏事业的人群。

图书在版编目（CIP）数据

薄膜太阳电池及其光伏电站/段光复，段伦编著. —北京：机械工业出版社，2013

ISBN 978-7-111-41872-6

Ⅰ.①薄… Ⅱ.①段…②段… Ⅲ.①薄膜太阳能电池②光伏电站 Ⅳ.①TM914.4②TM615

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第053721号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：曲彩云 责任编辑：曲彩云 王 琪 张利萍

版式设计：霍永明 责任校对：刘志文

封面设计：赵颖喆 责任印制：张 楠

中国农业出版社印刷厂印刷

2013年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·38.25印张·948千字

0001— 3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-41872-6

定价：98.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

社服务中心：（010）88361066 教材网：http://www.cmpedu.com

销售一部：（010）68326294 机工官网：http://www.cmpbook.com

销售二部：（010）88379649 机工官博：http://weibo.com/cmp1952

读者购书热线：（010）88379203 **封面无防伪标均为盗版**

前　言

能源是人类社会生存和发展最重要的物质基础。能源有常规能源与新能源之分。常规能源如煤炭、石油、天然气，长期以来支撑和推动着人类社会的发展，但是常规能源有两大致命缺陷：一是近百年的大规模开采和使用，使它们日益枯竭，数量急剧减少，据统计，全世界煤炭可用220年，油气可用60年。因为常规能源是不可再生的，其供应紧张，导致国家与国家之间、地区与地区之间产生政治纠纷，甚至引起局部的冲突和战争。二是常规能源会产生温室效应，使地球变暖，《京都议定书》以法规的形式限制温室气体排放，并以支付履约费的形式，对超排国家进行处罚。新能源有太阳能、风能、核能、地热能、氢气等，按类别可分为太阳能、风力发电、生物质能、生物柴油、燃料乙醇、新能源汽车、燃料电池、氢能、垃圾发电、地热能、二甲醚、可燃冰、页岩气等，太阳能是其中的骄子。太阳辐射是分布广大的自然资源，方便就地开发利用。人们根据太阳辐射的特点，研制出了太阳电池。太阳电池是将太阳辐射的能量直接转换成电能的器件，它的特点是省去了将太阳光能先转换成热量再转换为电能的中间过程，只要有阳光照射，就可直接发电，其特点是：不需要燃料，没有振动，没有噪声，不会污染环境和破坏生态平衡，无人值守。

太阳电池按其所用材料分有晶硅太阳电池、薄膜太阳电池等，如图0-1所示；按其结构分为固定式、跟踪式、聚光式。本书只谈薄膜太阳电池。

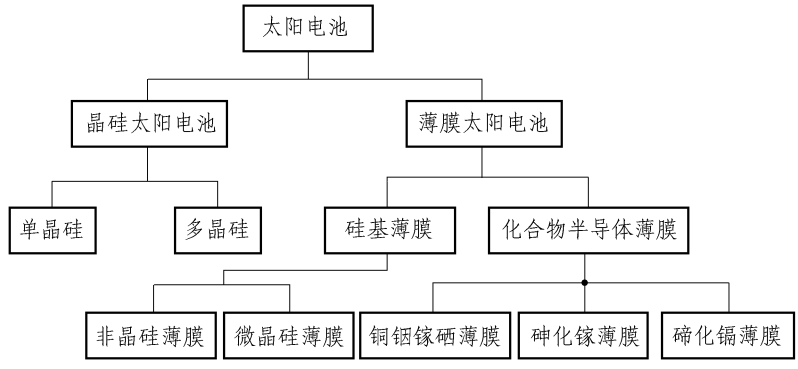


图0-1　太阳电池

薄膜太阳电池与晶硅太阳电池相比，各有千秋：薄膜太阳电池易于大规模生产，可以柔性化；铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳电池抗辐射性强，而晶硅太阳电池抗辐射能力较弱；非晶硅薄膜太阳电池厚度小于1μm就能充分吸收太阳光能，而多晶硅太阳电池需要25μm吸收太阳光能，还要150μm作为支撑体。薄膜太阳电池的特性是基于大量生产后的成本降低，成本竞争优势是长期的。其次，与晶硅太阳电池比较，非晶硅薄膜太阳电池的温度转换系数低，即转换效率较不受气温影响，且受照度影响也较小，即在低照度下仍可维持较佳的转换效率。理论及实践证明，在装设相同功率的发电机组情况下，非晶硅薄膜的年度总发电量比

传统结晶硅高出约10%。薄膜太阳电池还有一个重要的优点是适合作与建筑结合的光伏发电组件：双层玻璃封装刚性的薄膜太阳电池组件，可以根据需要，制作成不同的透光率，可以部分代替玻璃幕墙，而不锈钢和聚合物衬底的柔性薄膜太阳电池适用于建筑屋顶等需要造型的部分。它既具有漂亮的外观，又能发电，其透明导电薄膜还能很好地阻挡外部红外线的进入和防止内部热能散失。城市土地的稀缺性，决定了薄膜太阳电池具有更广阔的发展前景。太阳电池正走在不断进取、不断完善的过程中。

从长远角度考虑，薄膜太阳能光伏产业是一个具有前瞻性与可持续发展的行业。太阳能是各国政府大力支持的产业，金融危机后，是各国政府扩大投资、找寻成长产业推动需求、带动其他产业成长的重要行业，各国政府持续延长再生能源补助案。薄膜太阳能技术最主要的竞争优势则是在成本。薄膜材料需要的反应温度低，可以在玻璃、不锈钢板、陶瓷板、柔性塑料片上淀积，易于大面积生产。目前，在平板显示领域，基于大面积有源矩阵驱动的TFT-LCD工艺已十分成熟，从5代线（基板规格为1.1m×1.3m）起步，到8.5代（基板规格为2.2m×2.6m）生产线，2009年中国已有京东方科技集团股份有限公司、上海广电信息产业股份有限公司、昆山龙腾光电有限公司三家厂商的三条5代TFT-LCD面板生产线实现量产。

太阳电池发电需要阳光，安装电池板需要场地，兼有这两者，才能得到收益。对于大面积运用太阳电池来说，我国西北地区光照资源丰富，阳光充足，且是广阔的沙漠地带，有沙漠面积108万km^2，是理想的太阳能产业基地。

由于太阳电池的优越性，全球进军太阳电池的热浪，一浪高过一浪，许多国家无不争先恐后。在过去5年中（2007～2011年），世界太阳电池市场以平均每年40%的幅度增长。国际太阳能产业界预计，未来3～5年该市场会迎来爆发性增长。预计到2050年，世界能源供给中太阳能将占40%，石油仅占5%。

太阳能电站的建设成本目前还是很高的，尤其是沙漠光伏电站的建设投入很大，不是小资本能进入的，只有在政府优惠政策的扶持下，才能带来投资商的积极性，光伏事业也才能发展壮大。我国政府的态度是明朗和坚决的，扶持的力度是较大的。

事情总是两方面的，一方面太阳能是丰富、洁净、廉价，取之不尽、用之不竭，持续不断、使用最方便、适用范围最广泛的能源；但另一方面，太阳光转为电能依赖阳光照射，而四季变化、昼夜、阴晴、向背等，会造成阳光周期性、间歇性、随时性、区域性不均衡的缺点，接入电网后，会造成电网扰动，给敏感用户带来设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱，严重时造成系统硬件损坏、工作瘫痪等；再者，电池多数是串联或串并联组合使用，很难保证每个单体的特性一致。因此，要保证光伏电能的质量，就要克服这些缺陷，目前的办法有三个：一是采用适合于并网型光伏电站的逆变器；二是将白天发的电能储存起来，供夜晚使用；三是建立太空电站，从根本上解决阳光周期性、间歇性、随时性、区域性不均衡的缺点。本书对这三方面都作了介绍，介绍了优良的并网型、适用于海拔3000m的光伏电站的大型逆变器；还介绍了各种储存光伏电能的方法以及太空电站。能源转换不可避免地会发生巨大变革，今后人类从太阳取得的能源，要比现在世界上使用的全部能源大若干个数量级，但是发电不稳定、效率高低不等的缺陷，终是目前光伏电站正常使用中的难题。因此，光伏电站的储能及太空电站的成功建设将是光伏事业完善成熟的标志。

太阳电池的知识集光学、材料学、物理学、电化学、电子学、电工学、机械学、光电子

半导体、电子电力、现代电力系统和现代控制理论于一体，光伏产业有丰富的学术研究和基础理论，又与巨大的经济、政治和社会效益紧密结合。

希望本书能成为光伏产业科技进步的推进器。国家的扶持会年年递减，光伏产业的发展要依靠自我进步，从而降低成本，降到与火电相近的程度。本书介绍了降低成本的途径；介绍了污染的防治，太阳电池在制造过程中可能带来的污染现象是不容忽视的；介绍了晶体学方面的知识，要认清薄膜太阳电池，就要认清薄膜是如何成形、结晶、长大的，存在哪些缺陷，这些缺陷将如何克服，因此晶体学方面的知识是必不可少的；介绍了薄膜太阳电池的原理、设计、制造、运用、成本，介绍如何给不同的基体，如玻璃、不锈钢、塑料贴上薄膜，力求把薄膜太阳电池说透，但是有关薄膜太阳电池的理论介绍仅以知其然、知其所以然为界，不作进一步的拓深，以免冲淡撰写本书的本意。

本书有三个特征：

（1）全力贯彻相关法律法规。

（2）实用性强，着重实际运用和工程设计。

（3）内容全面。基本原理和基本概念清晰、准确、全面，理论实践相得益彰，以精炼的篇幅介绍了薄膜太阳电池产业链的全过程，快速训练光伏人才。太阳电池及其光伏电站内容深奥，要有相当的基础知识才能掌握这一门技术。为解决这一问题，本书作了探索，凡本书涉及的专业名词及概念，均可在本书找到注解，只要具备大专水平均可通过本书进入太阳能技术领域，自我修炼，可达到运用自如的水平。

本书介绍了近年来薄膜太阳电池取得的最新研究成果，力求总结近年来薄膜太阳电池发展的最新成就，从而为光明、美好、灿烂的新世界做贡献。

本书可作为从事薄膜太阳电池行业的技术人员、工人的学习培训资料，也可作为大专院校新能源专业师生的参考书，供大专院校物理、动力与能源、材料、太阳能、光电子信息等专业的师生参考；可供风险投资人员、政府官员、涉足太阳能的人员开拓视野，还可提供给欲投资薄膜太阳电池行业的商家，作为分析可行性研究报告的参考资料。本书囊括了必需的基础知识，从而使这项高深技术能为具有一般大专文化的人员所看懂。

太阳能政策、技术、市场发展得很快，本书不断地修改补充仍不能如意，往往又有新内容涌现而来不及更新，出版时会与现实有些距离，这是很遗憾又无奈的事。

本书编写过程中得到同行提供实验数据、参观实验室的帮助，在此表示感谢。由于本人水平有限，欠缺之处、疏漏之处甚至错误都在所难免，恳请广大读者批评指正，不吝赐教。

本书写作中得到薄膜电池应用专家彭立斌先生的指导，在编写中得到彭兰平女士的帮助，在此表示诚挚的感谢。

最后，本人对参考文献的作者表示衷心的感谢。

段光复　段伦

谨以本书献给教育我成长的段显斋、 段咫斋兄弟。

——段光复

目　录

前言

第一章　概述 …… 1
第一节　薄膜太阳电池现状 …… 1
第二节　国内外薄膜太阳电池制造现状 …… 9
第三节　薄膜太阳电池的发展方向 …… 20
第四节　我国发展太阳能的政策 …… 22
第二章　太阳辐射能的接收 …… 30
第一节　太阳及日地运动 …… 30
第二节　太阳辐射 …… 50

上篇　薄膜太阳电池

第三章　薄膜太阳电池的基础知识 …… 62
第一节　术语及基本概念 …… 62
第二节　薄膜 …… 86
第三节　薄膜生产工艺 …… 90
第四节　真空 …… 93
第四章　非晶硅薄膜太阳电池 …… 107
第一节　非晶硅薄膜太阳电池的性能 …… 107
第二节　单结、双结、三结非晶硅太阳电池 … 108
第三节　非晶硅薄膜太阳电池的制备 …… 111
第四节　非晶硅薄膜材料的光学特性 …… 115
第五节　单结非晶锗硅合金薄膜太阳电池 … 121
第五章　CIGS 薄膜太阳电池 …… 123
第一节　CIGS 太阳电池的性能 …… 123
第二节　CIGS 太阳电池的制备 …… 125
第三节　CIGS 太阳电池材料的特性 …… 128
第四节　CIGS 太阳电池的物理、光学、电学特性 …… 130
第五节　CIGS 太阳电池的类别 …… 132
第六节　CIGS 太阳电池的制造成本 …… 134
第七节　CIGS 太阳电池的发展方向 …… 135
第六章　GaAs 薄膜太阳电池 …… 137
第一节　GaAs 太阳电池的性能 …… 137
第二节　单结、双结、三结 GaAs 太阳电池 … 139
第三节　GaAs 太阳电池的制备 …… 141
第七章　CdTe 薄膜太阳电池 …… 146
第一节　CdTe 太阳电池的性能 …… 146
第二节　CdTe 太阳电池的制备 …… 147
第三节　CdTe 太阳电池的成本 …… 154
第四节　镉对环境的影响 …… 155
第五节　CdTe 太阳电池的前景展望 …… 157
第八章　薄膜太阳电池的制造设备 …… 158
第一节　薄膜沉积设备 …… 158
第二节　层压设备 …… 177
第三节　激光刻膜机 …… 179
第九章　薄膜太阳电池材料 …… 181
第一节　衬底用材 …… 181
第二节　各种半导体材料 …… 189
第三节　太阳电池组件密封胶 …… 228
第四节　气体导电浆料及靶材 …… 235
第五节　接线盒 …… 246
第六节　光伏电缆 …… 246
第七节　太阳电池工业用水 …… 248
第十章　薄膜太阳电池的检测技术及设备 … 249
第一节　太阳电池测量条件 …… 249
第二节　太阳电池测量仪器 …… 252
第三节　太阳电池性能参数的测量 …… 258
第四节　太阳电池组件的测量 …… 262
第五节　多结叠层太阳电池的测量 …… 265
第六节　空间太阳电池的测试 …… 266
第七节　取证 …… 271

中篇　薄膜太阳电池光伏电站

第十一章　光伏并网逆变器 …… 273
第一节　光伏并网逆变器概况 …… 273
第二节　最大功率点跟踪（MPPT） …… 274
第三节　正弦波脉宽调制（SPWM）技术 …… 280

第四节　逆变桥 …… 286
第五节　光伏并网逆变器的技术要求和试验方法 …… 299
第六节　国外光伏并网逆变器状况 …… 311
第七节　国内光伏并网逆变器状况 …… 316
第十二章　太阳电池的支架及支架基础 …… 321
第一节　工程地质 …… 321
第二节　支架基础 …… 329
第三节　支架 …… 332
第四节　沙漠电站用水 …… 337
第五节　恶劣气候的应对 …… 340
第十三章　储能 …… 342
第一节　储能概况 …… 342
第二节　各种储能技术 …… 345
第十四章　太空光伏电站 …… 354
第一节　太空光伏电站基础知识 …… 355
第二节　太空环境及空间碎片防治 …… 372
第三节　卫星轨道及太空行走 …… 388
第四节　太空运输 …… 395
第五节　测控系统 …… 408
第六节　温控系统 …… 412
第七节　GPS 及北斗星导航系统 …… 415
第八节　10GW 太空电站的建设 …… 429
第九节　世界太空电站建设现状 …… 435
第十五章　智能电网 …… 436
第一节　智能电网的定义及特征 …… 436
第二节　智能电网的建设 …… 441
第三节　智能电网的意义 …… 444
第四节　国内外智能电网的建设 …… 446
第五节　智能电网技术 …… 455
第六节　智能电网设备 …… 460
第十六章　电能质量 …… 469
第一节　电能质量的概念 …… 469
第二节　电能质量的改善 …… 475
第三节　电能质量监测 …… 485
第四节　电能质量监测设备 …… 486
第五节　国外解决电能质量案例 …… 491

下篇　实际运用

第十七章　10MWp 沙漠光伏电站 …… 494
第一节　工程设计基础 …… 494
第二节　太阳电池阵列的设计 …… 501
第三节　电气一次设计 …… 505
第四节　电气二次设计 …… 513
第五节　总平面布置及土建设计 …… 518
第六节　太阳电池支架及支架基础的设计 …… 520
第七节　给水排水设计 …… 522
第八节　采暖通风设计 …… 523
第九节　防风沙设计及电池板清洁 …… 525
第十节　工程消防设计 …… 526
第十一节　施工组织设计 …… 528
第十二节　环境保护 …… 532
第十三节　工程效益 …… 534
第十八章　光伏建筑一体化（BIPV） … 537
第一节　BIPV 概述 …… 537
第二节　国内外 BIPV 现状 …… 540
第三节　BIPV 的技术要求 …… 548
第四节　BIPV 的设计 …… 550
第五节　BIPV 的施工 …… 557
第六节　BIPV 的效益 …… 558
第七节　BIPV 的检测与调试 …… 559
第八节　BIPV 存在的问题 …… 561
第九节　BIPV 的发展趋势 …… 562
第十九章　分布式发电 …… 563
第一节　分布式发电概况 …… 563
第二节　分布式发电及光伏发电技术 …… 569
第三节　分布式发电管理 …… 576
第四节　分布式发电存在的问题 …… 577
附录 …… 579
附录 A　太阳电池标准 …… 579
附录 B　太阳能光伏产业“十二五”发展规划 …… 591
附录 C　防孤岛效应保护方案的选取 …… 598
附录 D　并网光伏发电专用逆变器技术参数 …… 599
附录 E　逆变器设计、制造相关标准 …… 600
参考文献 …… 602

第一章　概　　述

第一节　薄膜太阳电池现状

目前已产业化及正在研制的薄膜太阳电池有硅基薄膜太阳电池、铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳电池、碲化镉（CdTe）薄膜太阳电池、砷化镓（GaAs）太阳电池等七种。

一、硅基薄膜太阳电池

硅基薄膜太阳电池是非晶硅电池、非晶硅/微晶硅双叠层薄膜太阳电池非晶硅叠层、微晶叠层的薄膜电池，转化率可以达到9%。硅基薄膜电池是在玻璃、金属或塑料等衬底上沉积很薄的光电材料制成的，对硅的消耗量很少，薄膜电池平均消耗的硅仅为传统晶体硅太阳电池硅消耗量的1/200。由于硅基薄膜太阳电池在降低成本方面存在巨大潜力，所以引起了研究单位、企业界及各国政府的普遍重视，从而促进了硅基薄膜太阳电池突飞猛进的发展。

1. 非晶硅电池的特点与用途

（1）非晶硅电池的特点

1）用a-SiC或μC-SiC代替a-Si做窗口层，以改善电池的短波光谱响应。

2）采用梯度界面层，以改善异质结界面的输运特性。

3）采用μC-Si做n层，减少串联电阻。

4）用绒面SiO代替平面ITO，并采用多层背反射电极，以减少反射和透射损失，提高短路电流。

5）采用激光切割技术，实现了电池的集成化。

6）采用叠层电池结构，以扩展电池的光谱响应范围，提高转换效率。

7）采用分室连续沉积技术，以消除反应气体的交叉污染，提高电池的性能和重复性等。

所有这些技术的采用，使硅基薄膜电池的效率达到13.7%。

（2）非晶硅电池的用途

1）第一个非晶硅太阳电池于1976年研制出来，1980年就实现了商品化。如日本三洋电气公司1980年利用硅基薄膜太阳电池率先制成计算器，随后便实现了工业化生产，并把产品打入世界市场。由于非晶硅材料优越的短波响应特性，使其在计算器、手表等荧光下工作的微功耗电子产品中占据很大优势。随着硅基薄膜电池效率的不断提高，其应用的领域也不断扩大，从计算器、手表等弱光下应用扩大到各种消费品及功率应用领域，如太阳能收音机、太阳帽、庭院灯、微波中继站、航空航海信号灯、气象监测、光伏水泵及户用独立电源等。

2）薄膜具有弱光性。光伏建筑一体化应用的玻璃幕墙一般是垂直的，这样的光照角度必然影响其对光子的吸收，从而影响晶体硅的转换率。非晶硅太阳电池有光就可以发电，适用于商用建筑的屋顶、楼宇立面等。

3）非晶硅薄膜电池在25℃以上只有微弱衰减，特别适合用于高温、荒漠地区建设电站。

2. 非晶硅材料在光照时存在S-W效应及其改进

1）非晶硅材料在光照时存在S-W效应，即光致衰退现象。此外，非晶硅材料带隙较宽（带隙为1.7eV），使得材料本身对太阳辐射光谱的长波区域不敏感，这样一来就限制了非晶硅太阳电池的转换效率，难以吸收波长700nm以上的光，限制了其对太阳光的利用率。

2）S-W效应的改进。微晶硅材料被认为是一种非晶与微晶硅颗粒组成的混合相材料，其带隙调变可以通过制备过程中的氢稀释比调整实现，最低可接近单晶硅的1.1eV，因此，微晶硅材料制备不会带来额外的工艺复杂性，与现有的非晶硅技术兼容性更好。而且微晶硅材料稳定性高，微晶硅电池基本无衰退，采用非晶硅/微晶硅叠层电池相对于非晶硅电池而言，具有两方面优点：①拓宽电池长波光谱响应，提高太阳光的利用率；②降低了较不稳定的非晶硅顶电池厚度，有利于提高整体稳定性。因此，国际公认非晶硅/微晶硅叠层太阳电池是硅薄膜电池的下一代技术，是实现高效、低成本薄膜太阳电池的重要技术途径，是薄膜电池新的产业化发展方向。非晶硅的衰减在前期（比如前3个月）很快，一旦稳定之后，稳定性比晶硅要高而且非晶硅电池生产企业都会按照快速衰减之后的功率来销售。

3. 与晶硅电池比较

1）非晶硅薄膜电池具有弱光效应，在早、晚及阴天等弱光条件下，仍可产生电能，因此在同样地理和气象条件下，全年发电量比晶体硅电池高出10%～15%。

2）晶硅电池在温度超过25℃的情况下，发电功率会急剧衰减，而非晶硅薄膜电池在25℃以上只有微弱衰减，当室外温度超过50℃时，晶硅电池的发电功率会呈现大幅衰减，而非晶硅薄膜电池的热衰减则非常低，所以非晶硅薄膜电池的特性适合用于高温、荒漠地区建设电站。

3）薄膜和晶硅组件每生产100W电池组件，晶硅电池要消耗50W工业用电，而薄膜电池仅需8～9W，薄膜电池生产耗电仅为晶硅电池的16%，全面节能效果更好。

4）晶硅电池在生产过程中会有大量有害气体排放，而非晶硅薄膜电池生产中只有等离子增强化学气相沉积法（Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition，PECVD）环节会产生少量尾气，经焚烧炉处理就能阻止有害气体向大气排放。

5）薄膜电池生产流程短，只有4h，而晶体硅电池涉及几十个环节，时间长且成本高。

6）薄膜电池与晶体硅电池相比，最大也是最核心的优势是成本。要使光伏发电真正成为能源体系的组成部分，必须要大幅度地降低成本，薄膜太阳电池在降低成本方面具有很大的优势：

① 硅材料储量丰富（硅是地球上储量第二大元素），而且无毒、无污染，是人们研究最多、技术最成熟的材料。

② 耗材少、制造成本低。硅基薄膜电池的厚度小于1μm，不足晶体硅电池厚度的1/100，这便大大降低了材料成本；硅基薄膜电池采用低温工艺技术（200℃），这不仅可节能降耗，而且便于采用玻璃、塑料等廉价衬底。

③ 硅基薄膜采用气体的辉光效应分解沉积而成，通过改变反应气体组分可方便地生长各种硅基薄膜材料，实现PIN和各种叠层结构的电池，节省了许多工序。

④ 便于实现大面积、全自动化连续生产。非晶硅薄膜电池发电量高、成本低，就是占地面积大一些。

4. 效率的提高

目前非晶硅单层薄膜的光电转化效率为6%，光致衰退率可以控制在初始效率值的25%左右。也就是说，刚制备的电池组件的效率为8%，经过几个月的日照之后，其效率达到6%左右，并最终稳定在这个值。这种特性可以为当前的消费者所接受。非晶硅/微晶硅双叠层太阳电池可以达到8.5%的稳定效率，光致衰退更小。解决光致衰退问题的途径就是制备叠层太阳电池，叠层太阳电池是在制备的P、I、N层单结太阳电池上再沉积一个或多个PIN子电池制得的。

1）它把不同禁带宽度的材料组合在一起，提高了光谱的响应范围。

2）顶电池的I层较薄，光照产生的电场强度变化不大，保证I层中的光生载流子抽出。

3）叠层太阳电池各子电池是串联在一起的，底电池产生的载流子约为单电池的一半，光致衰退效应减弱。

美国应用材料公司拥有硅基薄膜全套技术和装备、微晶硅双结叠层技术，初期光电转换率达到8.5%，高于目前非晶硅单结技术6%的转换率，该技术成本为多晶硅、单晶硅电池的40%～50%，硅膜厚度不到2μm，耗用硅材料为多晶硅的1%，最新产品5.7m^2的硅基薄膜太阳电池，成为2010年全球单块面积最大的薄膜太阳电池。

非晶硅薄膜电池转换率低的问题，经过共同协作和努力能在近几年有大的突破。

5. 设备投资大

薄膜太阳电池生产线的价格是多晶硅太阳电池生产线的3倍多，而其中一些设备的价格是多晶硅太阳电池生产设备的10倍，初期设备投资很大，美国的应用材料公司、瑞士的欧瑞康以及日本的爱发科，这3家企业设备制造量较大。世界顶级半导体设备制造商有美国的应用材料公司、瑞典的Oerlikon公司、日本的日本真空公司、德国的莱宝真空公司、美国的EPV公司等。这些公司可以提供成套的非晶硅或者非晶硅/微晶硅双叠层太阳电池制造设备以及相匹配的生产制造工艺。美国的UnitedSolar公司、日本的Kenaka公司和三菱公司、德国的Schott公司等都已推出非晶硅薄膜太阳电池的生产线。

2009年8月，留美博士钱学煜等人在上海成立理想能源公司，用一年多的时间，完成了PECVD首台机的研发、中试、下线，并申请了10多项核心技术专利。该设备采用了创新的超高频射频技术、精密的真空和温度控制技术、快速的自动传输技术以及多腔多片的反应腔系统等，大大提高了产能，其产品性能优于国际一流设备，但价格远低于同等的进口设备。国外进口一台这样的设备要两三亿元人民币，自己生产的大概只需一亿元左右。一台设备年产能约有15MW，三台设备便可组成一条年产能近50MW的生产线。

6. 非晶硅薄膜电池的寿命

非晶硅薄膜电池从开发成功至今已近50年，非晶硅薄膜电池25年的使用寿命也为实践所证明。美国科罗拉公司在洛杉矶建设的一处非晶硅薄膜电池电站就已经正常运行了17年。欧洲TV（德国技术监督协会）和美国UL（保险商实验所）等认证机构对非晶硅薄膜电池进行了苛刻的模拟试验，也证明了薄膜电池具有25年使用寿命，且衰减率达到设计要求。可以说，25年是一个被实践证明、被科学检测证明的时限。另外，德国慕尼黑再保险公司对强生非晶硅薄膜电池实行20年品质承保，这也可以说明非晶硅薄膜电池是一个相当成熟的产品。

目前非晶硅薄膜太阳电池的国际龙头厂商为美国的UnitedSolarOvonic和日本的Kaneka。

当初因多晶硅原料缺乏，才转而投入薄膜太阳能的生产，现在多晶硅缺料的问题正在缓解，价格也大幅下降，这势必冲击各类薄膜电池在成本上的优势。其次，有资料显示，薄膜太阳电池的设备投资几乎是晶体硅电池设备投资额的10倍，投资回报周期也比后者长得多，筹资难度本就不低，受到金融危机影响，筹资难度将更趋增高。另外，非晶硅电池在技术上依然存在转换效率相对较低且有衰减、实际量产后的质量控制不易以及市场认知度相对较低等问题。现在市场竞争才刚开始，各路企业出现未跑先喘的大有人在。

二、铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳电池

铜铟镓硒薄膜太阳电池（简称CIGS太阳电池）具有性能稳定、抗辐射能力强的特点，光电转换效率目前是各种薄膜太阳电池之首，接近于目前市场主流产品多晶硅太阳电池的转换效率，成本是多晶硅太阳电池的1/3，是最有发展前景的薄膜太阳电池之一。20世纪80年代，美国波音公司开创了多元素金属共蒸发方法制备铜铟镓硒薄膜材料，使这类太阳电池光电转换效率最先突破10%，并将它放入太空进行考核验证，确立了该类电池开发应用的前景，1994年又取得CIGS太阳电池光电转换效率14.9%的世界纪录（小面积单体电池）。随后德国斯图加特大学、瑞典乌普萨拉大学、日本东京工业大学等高校研制的CIGS太阳电池，其转换效率也纷纷超过了17%。1999年，美国国家可再生能源实验室（NREL）将世界纪录提高到18.8%，2002年达到19.2%，2010年公布的数据已达到19.9%（面积为0.4cm^2）。但是，小面积电池（1cm^{2}左右）效率再高也不能作为产品应用于实际中去，研究人员从单纯追求高效率CIGS太阳电池的研究，转向研究大面积集成太阳电池组件（采用集成工艺技术将单体电池内部级联串接，构成高电压大面积太阳电池板）以及产业化技术。“溅射后硒化技术”比较容易实现均匀的大面积铜铟镓硒薄膜，可大大地提高吸收层制备的重复性。20世纪90年代，Shell Solar公司就已制备出3830cm^{2}铜铟镓硒电池组件，效率达11.2%，1999年达到12.3%，被称为铜铟镓硒电池工业化最成熟的技术。2001年开发了薄膜材料快速升温热处理技术，使后硒化工艺由70min降到十几分钟，不但提高了生产效率，而且使100cm^{2}面积电池组件的最高效率达到14.7%。2003年60cm×90cm面积组件的最高效率达到13.1%，输出功率为65W，基于三步共蒸发工艺制备的CIGS太阳电池的效率已达19.99%，是所有薄膜太阳电池中最高的。

在传统的CIGS太阳电池中，由于含有很少的重金属镉元素，使其不能成为真正的无污染“绿色”电池。选用无镉材料来替代缓冲层CdS薄膜是发展CIGS太阳电池的必然趋势。日本松下公司和Showa Shell Skiyu公司由Zn(O，S，OH)$_x$材料替代硫化镉过渡层取得巨大成功，他们研制的无镉CIGS太阳电池转换效率达到18.6%，并用于中试线生产工艺，所制备的集成组件也都实现了无镉，目前所用的无镉缓冲层包括ZnS、ZnSe、(Zn，Mg)O、In(OH)$_3$、In$_2$S$_3$、In$_2$Se$_3$、In$_2$ZnSe$_3$、SnO$_2$、SnS$_2$等。由美国能源部国家光伏中心（NCPV）与日本新能源和工业技术开发机构（NEDO）合作研制的无镉CIGS太阳电池效率达到18.6%，面积为3456cm^{2}的组件效率达到13.4%，二者均创造了无镉CIGS太阳电池效率的世界纪录，真正成为绿色高效薄膜太阳电池，被国际上称为下一代的廉价太阳电池，其无论是在地面阳光发电还是在空间微小卫星动力电源的应用上都具有广阔的市场前景，很多公司投入巨资置身于CIGS产业，有德国的Wuerth（伍尔特）、Surlfulcell，美国的Global Solar Energy，日本的Honda（本田）、Showa Solar Shell。电池组件商品进入市场的企业有德国的WürthSolar、Solibro，美国的GlobalSolar、Miasole，日本的Hond、ShowaShell等公司。我国台

湾企业新能公司投资7000万欧元与德国Centrotherm公司合作开发30MW CIGS电池生产线，以溅射后硒法制备电池的面积为1.1m×1.4m；我国台湾铼德、绿阳光电等公司自主开发，均已制备出不同面积的玻璃衬底CIGS组件，正在进行量产化开发。2010年全球产能超过760MW，显示了良好的发展势头。

南开大学以国家“十五”、“863”计划为依托，建设0.3MW中试线，制备出30cm×30cm、效率为7%的集成组件样品。2008年2月，山东孚日光伏科技有限公司宣布与德国的Johanna公司合作，独家引进了我国首条CIGSSe（铜铟镓硫硒化合物）商业化生产线，2010年量产效率达10%。2010年日本厂商昭和壳牌石油（ShowaShell）投入超过9亿美元，建造CIGS太阳电池厂，产能为1GWp。

CIGS太阳电池具有敏感的元素配比和复杂的多层结构。由于这种电池使用4种材料，因此要有准确的化学计量比，控制其晶相结构，控制成膜后的光学和电学特性，才能达到最好的光电效应，而要做到这一点很难，尤其是在大规模生产状态下很好地控制大面积产品的成分均匀性、重复性、稳定性和一致性，增强层间的附着力问题成为制约这种电池发展的关键所在。

另一个问题是，由于该种电池的原材料In和Ga都属于稀有金属材料，地球含量较低，这就导致在将来大规模生产后原材料的供应将成为一种隐忧。

三、碲化镉（CdTe）薄膜太阳电池

CdTe薄膜太阳电池技术，是薄膜电池中历史最久、被密集探讨最多的一种技术。CdTe是直接能隙半导体，其能隙宽度与太阳光谱有很好的匹配，而且它的能隙较宽，在较高的环境温度下也能正常工作，具有很好的抗辐射性能。此外，CdTe太阳电池由多晶的薄膜所构成，制备工艺相对简单。CdTe太阳电池应用前景非常广阔，尤其适用于高原及荒漠电站，外太空、深空间电源，以及用作聚光电池。国际上CdTe薄膜太阳电池的研究和制造十分活跃，美国国家可再生能源实验室（NREL）的小面积CdTe电池的最高效率记录为16.5%。该电池的技术特点是采用$CdSnO_4/ZnSnO_4$复合膜作为透明前电极。这种复合型明导电膜在退火后，$CdSnO_4$有很高的电导率，$ZnSnO_4$有恰当的电阻率，而在这两层之间可形成很薄的过渡层。另外一个典型的技术路线是采用Te/W_2Te_3作为背接触层，欧洲的多个研究小组采用该技术，如德国ANTEC公司、西班牙CIEMAT公司、瑞士ETH大学、比利时Gent大学、德国ISFH公司、意大利Parma大学、意大利SSE公司、英国Loughborough大学、瑞士Solaronix公司、德国DieterBonnet中心、德国达姆斯塔德技术大学、英国巴斯大学等，他们制备的小面积电池的最高转换效率在10%～13%之间。十多年来，众多研究机构对CdTe电池的污染问题进行了研究，认为在CdTe电池的生产过程中，镉污染容易控制，不会影响人体健康。即使遇到火灾，熔融的电池中释放的镉对环境的污染也很微小，而且在同样的发电量下，CdTe电池的重金属排放当量是最低的。因此，在重视环保的美国和德国等发达国家，CdTe太阳电池研究和产业化技术一直得到很好的发展。美国的FirstSolar公司是全球最大的CdTe太阳电池制造商，他们自主开发的蒸汽输运法，使CdTe薄膜电池生产线产能达到每年100MW。CdTe薄膜太阳电池原材料成本较低，规模化生产使得CdTe太阳电池的成本不断下降，从2005年的1.59美元/W降为1.19美元/W。截至2009年，FirstSolar公司的生产成本已经从2008年的93美分/W降至84美分/W。另外，该公司计划到2014年要将成本进一步降至0.52～0.63美元/W，与此同时要将转换效率升至12.5%，是目前所有太阳电池中生产

成本最低的。FirstSolar 公司除了在美国建有 90MW 的生产线、在德国建有 120MW 生产线，还在马来西亚和新加坡分别建有 240MW 和 120MW 的生产线。完成 2010 年的扩产计划后，其产能达到 1.2GW，转换效率达 10%。另一家已量产 CdTe 薄膜太阳电池的厂家为德国 AntecSolar，产能为 4MWp。除了 FirstSolar 和 AntecSolar 外，美国的 PrimestarSolar 跟 NREL 和美国能源部（DOE）合作，也投入 CdTe 薄膜太阳电池的生产，其生产技术较为简洁，主要为磁控溅射或近空间升华技术，产品重复性和一致性很好，电池效率目前为 7% ~8%，并且可以较为容易地提高到 10% 以上。德国的 ANTEC 公司有 8MW 的自动化生产线，生产面积为 1.2m×0.6m 的 CdTe 电池组件，平均效率为 6% ~7%。

我国的 CdTe 薄膜电池产业化技术也取得了一定的进步，但研究工作起步较晚。2001 年，四川大学太阳能组研制出了面积为 0.52cm^2 的 CdTe 太阳电池，转换效率达 11.6%。这项成果为我国 CdTe 太阳电池的发展做出了开创性的贡献，荣获中国高校技术发明二等奖。“十五”期间，小面积电池制造技术有了进一步提高，该组制备的电池效率达到 13.38%，再次创造出我国 CdTe 太阳电池的转换效率记录，接近国际领先水平，并开发了中试生产线关键设备，建立了全部由我国生产的设备构成的 0.3MW 中试生产线，在该中试线上研制了面积为 30cm×40cm 的串联集成组件，转换效率达 8.25%，已超出德国水平，使我国成为继美国、德国之后世界上第三个能生产 CdTe 太阳电池的国家，奠定了我国建立兆瓦级 CdTe 电池生产线的基础。

但是，关键原料 Te 的天然贮藏量有限，会限制 CdTe 薄膜太阳电池的发展，因此 CdTe 薄膜太阳电池可以在一定规模下，在晶体硅电池价格居高不下、高纯硅材料产能不够的情况下起到一个缓冲作用，真正大规模地生产并占有较大的市场份额是值得怀疑的。当硅基薄膜太阳电池克服了技术瓶颈高速发展之后，CdTe 电池将会停滞下来。

四、砷化镓（GaAs）太阳电池

GaAs 属于Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料，其能隙为 1.4eV，正好为高吸收率太阳光的值，因此是很理想的电池材料。GaAs 的转换率一般为 25% 左右，其主要应用在太空，转换率最高可以达到 35% 以上，并且具有抗辐射的特性。一般说来，热能对 GaAs 的影响不大，GaAs 等Ⅲ-Ⅴ族化合物薄膜电池的制备主要采用金属有机化合物化学气相沉积（Metal-organic Chemical Vapor Deposition，MOCVD）法和液相外延（Liquid Phase Epitaxis，LPE）技术，其中 MOCVD 方法制备 GaAs 薄膜电池受衬底位错、反应压力、Ⅲ-Ⅴ比率、总流量等诸多参数的影响。1998 年德国费莱堡太阳能系统研究所制得的 GaAs 太阳电池的转换效率为 24.2%，为欧洲纪录。另外，该研究所还采用堆叠结构制备 GaAs、Gasb 电池，该电池是将两个独立的电池堆叠在一起，GaAs 作为上电池，下电池用的是 Gasb，所得到的电池效率达到 31.1%。在此之前的世界纪录是波音全资子公司 Spectrolab 在 2009 年 8 月生产出的一款实验电池，聚光条件下转换率达到 41.6%。太阳电池转换效率最新的世界纪录是 42.3%，这是 2010 年 10 月 6 日美国 Spire 半导体公司宣布的最新成果。该公司研发的三结 GaAs 太阳电池的峰值效率达到了 42.3%，聚光条件相当于 406 个太阳砷化镓。

五、柔性衬底薄膜太阳电池

1. 柔性衬底薄膜太阳电池的特点

柔性衬底薄膜太阳电池是指在柔性材料（如不锈钢、聚酯膜）上制作的电池，以美国 uni-solar 公司采用不锈钢作衬底为例，不锈钢的厚度仅为 127μm，且具有极好的柔软

性，可以任意卷曲、裁剪、粘贴，即使弯成很小的半径，作数百次卷曲，电池性能也不会发生变化。而以高分子聚合物聚酰亚胺为柔性衬底制备的非晶硅太阳电池，器件总厚度约100μm（含封装层），功率质量比达到500W/kg以上，比不锈钢衬底非晶硅电池高出近十倍，是世界上最轻的太阳电池。从制备工艺上看，由于此结构电池采用卷对卷（roll to roll）工艺制造，便于大面积连续生产，降低成本的潜力很大，具有很强的竞争力。

2. 柔性衬底薄膜太阳电池的结构

柔性衬底太阳电池可采用单结或多结结构。单结结构因其稳定性差、效率低已较少采用，而稳定性好、效率高的多结、叠层太阳电池是柔性衬底太阳电池的发展方向，目前多采用三结太阳电池结构。三结太阳电池中，每一个电池都是由三个半导体结相互叠加而成的：底电池吸收红光；中间电池吸收绿光；顶电池吸收蓝光。对阳光光谱的宽范围响应是提高电池效率的关键。美国uni-solar公司的不锈钢衬底、三结非晶硅锗太阳电池结构，其小面积电池效率目前达到14.6%。

柔性衬底薄膜太阳电池与平板式晶体硅、玻璃衬底的薄膜电池等硬衬底电池相比，其最大的特点是质量轻、可折叠、不易破碎，并具有较高的功率质量比（>500W/kg），故能够安装在流线型汽车的顶部、房屋等建筑物的楼顶与外墙面以及对地观测的平流层飞艇表面，应用前景广阔。

我国柔性衬底薄膜电池的研究进展较慢。哈尔滨chrona公司在20世纪90年代中期曾研制出柔性聚酰亚胺衬底上的非晶硅单结薄膜电池，电池初始效率为4.63%，功率质量比为231.5W/kg，但此后进展不大。近年来南开大学在柔性衬底非晶硅薄膜电池方面的研究取得了一定的进展，他们在0.115cm^{2}的聚酰亚胺衬底上获得单结薄膜电池的初始效率为4.84%，功率质量比为341W/kg。柔性衬底电池的产业化方面，天津津能电池有限公司建有6MW非晶硅柔性电池生产线，30MW生产线已经开始了项目论证；新疆天富光伏光显有限公司在建1MW非晶硅柔性电池生产线，未来准备建立8MW生产线。这两家公司由于设备及技术从国外进口，预计电池成本偏高。总的来说，国内在柔性衬底方面的研究还处于刚刚起步的阶段，和国外的差距较大。

柔性CIGS薄膜太阳电池多沉积于金属箔（不锈钢、金属钛等）或高分子聚合物（多为聚酰亚胺）薄膜基底上，具有质轻、可卷曲折叠、不怕摔碰、抗辐射能力强等特点，而且允许以卷带方式连续化沉积，其材料成本和生产成本具有更大的下降空间，无论是军事还是民用，都具有广阔的市场前景和巨大的需求背景。美国NREL和日本松下电器公司在不锈钢衬底上制备的CIGS电池效率均超过17.5%，美国环球太阳能（Global Solar）公司0.4MW中试线［1ft（1ft=0.3048m）宽、卷到卷技术］，生产不锈钢衬底电池小面积效率为12.5%，德国HMI研究所采用共蒸发法在钛箔衬底上制备CIGS薄膜电池效率为16.2%。聚酰亚胺薄膜（PI）是发展高功率质量比的轻质柔性太阳电池首选衬底材料。目前，由瑞士联邦技术研究院研制的PI衬底小面积铜铟硒电池效率达到13.0%，是目前PI衬底太阳电池的世界纪录。德国HMI研究所、ZSW中心和美国特拉华大学能源转换学院（IEC）等机构制备的PI衬底CIGS电池效率达到了10%~12%。

六、染料敏化太阳电池

自从染料敏化太阳电池在实验室研究取得突破以来，引起企业界人士的极大关注。从专

利公布生效开始，即有澳大利亚、瑞士和德国等7家公司购买了专利使用权，并投入大量人力和物力进行产业化和实用化研究。我国在染料敏化太阳电池的基础研究和产业化研究上都与世界研究水平相接近。在国家自然科学基金的大力支持下，我国的高校和科研机构的研究人员广开思路，在基础研究上取得了很好的成绩。在国家863计划探索性项目的支持下，开展了各种电解质材料和电池结构的研究，并提出各种创新性的结构和思想，如福州大学魏明灯博士提出的染料敏化太阳电池与储能结合的思想，中国科学院物理所孟庆波博士提出的环境友好的复合电解质，清华大学林红博士提出的新型高效低成本叠层柔性薄膜太阳电池等，都是对染料敏化太阳电池各项关键技术和材料提出的新思路和方法。国家重点基础研究计划和纳米专项（973项目）先后三次对染料敏化太阳电池进行立项，中国科学院知识创新工程也把染料敏化太阳电池项目作为重要方向，重点解决目前染料敏化太阳电池所遇到的关键问题，并先后在基础科学问题和关键技术问题上取得突破。中国科学院等离子体物理研究所早在1994年就开始对染料敏化太阳电池进行研究和开发，并取得了相当的科研成果。特别是在科技部“十五”和“十一五”973项目的支持下，小面积太阳电池的实验室光电转换效率最高达9%，大面积电池组件（40cm×60cm）光电转换效率达5.7%，为目前国际较好的研究成果之一。在染料合成技术、纳米半导体薄膜研究、电池密封和电极研制上也取得一定的成果，设计合成了多种新型染料光敏化剂，并研究其吸附性能和空间效应对敏化性能的影响，综合了各项关键技术，制备出15cm×20cm的太阳电池组件，在室内1个太阳光照时效率为6.3%。中国科学院长春应用化学研究所在新型染料研究和离子液态电解质上取得突破，实现自主研发染料C101，效率达到11%，基于混合离子液态电解质电池的效率达到8.2%，从而在该领域具有一定的影响。另外，北京大学、清华大学、复旦大学、浙江大学、南京大学、吉林大学、武汉大学、天津大学、东南大学、华侨大学、河北科技大学、华南理工大学、华东理工大学等先后在染料敏化剂、纳米薄膜修饰和电池光电转换效率上取得了较好的结果。

在1992～1999年期间，以德国光伏研究所（INAP）和澳大利亚STA（后并入STI，现并入Dyesol公司）为典型的产业化研究机构进行了产业化前期的探索性研究。2001年5月2日，通过多年的实践，STI建立了世界上首条染料敏化太阳电池中试线。STI与中国科学院等离子体物理研究所合作生产的产品在2001年苏州APEC展览会上首次亮相，赢得国际同行的赞赏。2003年完成200m^{2}染料敏化太阳电池显示屋顶，集中体现了未来工业化的前景。2004年底，中国科学院等离子体物理研究所建立了500W染料敏化太阳电池示范系统，并保持长期有效的运行，为今后实现产业化打下了基础。

七、IBM廉价高效薄膜太阳电池

IBM公司材料科学家大卫·米兹及其研究团队在《先进材料》上发表了一份研究报告，宣告IBM成功研制出一款价格低廉、在成本上拥有绝对优势，但却拥有超高光电转换率的多元化合物薄膜太阳电池，该薄膜太阳电池的光电转换率达9.6%。这个数据并非实验室的一家之言，而是经由美国能源部正式测试并予以公布的。值得注意的是，此前用同样材料（不含铟、镓或镉的相关化合物）制成的薄膜电池光电转换率仅为6.7%。IBM新款薄膜电池的原料是铜、锌、锡、硒和硫黄5种原料的组合，全部都是相对常见、价格低廉的原材料。对于IBM的新型薄膜电池，从表面看，米兹的研究团队仅仅是替换了常规多元化合物薄膜电池中的几个原材料，但其精妙之处在于独特的制作工艺。常规的薄膜电池在制造

过程中，涉及在真空状态下的汽化喷涂和沉积，而这需要耗费大量的能量来实现；米兹和同事则大多是在液体和粒子的混合状态下进行操作，比如铜和锡是液态，而锌是粒子状态，这在电池制造过程中将大幅降低浸渍、喷涂和隙缝浇注的成本。这种技术还处于实验室阶段，尚未经历过实践检验，并且实验室里的光伏电池在“实战”中效率总会打折扣，以单晶硅太阳电池为例，它在实验室里的最高光电转换率达到了24.7%，但在量产后的实际应用中却降到了15%左右。因此，这种新型薄膜电池量产后的效率是多少，尚要拭目以待。

从转换效率和材料的来源角度讲，今后发展的重点仍是硅太阳电池，特别是多晶硅和非晶硅薄膜电池。由于多晶硅和非晶硅薄膜电池具有较高的转换效率和相对较低的成本，将最终取代单晶硅电池，成为市场的主导产品。提高转换效率和降低成本是太阳电池制备中考虑的两个主要因素，对于目前的硅系太阳电池，要想再进一步提高转换效率是比较困难的。因此，今后研究的重点除继续开发新的电池材料外应集中在如何降低成本上来，现有的高转换效率的太阳电池是在高质量的硅片上制成的，这是制造硅太阳电池最费钱的部分。因此，在如何保证转换效率仍较高的情况下来降低衬底的成本就显得尤为重要，也是今后太阳电池发展亟需解决的问题。近来国外曾采用某些技术制得硅条带作为多晶硅薄膜太阳电池的基片，以达到降低成本的目的，效果还是比较理想的。

综合比较几种薄膜电池的技术及其优缺点，在进行薄膜电池投资或研究时，应着重考虑以下两点：第一，原材料拥有量。当一种太阳电池作为替代型能源产品时，其应用规模将是巨大的，因此必须考虑其所用原材料在地球上的拥有量，以及电池工艺中的单位原材料使用量。从这个角度考虑，硅太阳电池将最终成为胜出的产品，硅在地球中的含量占到26%，仅次于氧，为地球上储量第二位的元素。因此，没有一种薄膜电池在长远来看可以和硅基薄膜电池相比，不论CIGS还是CdTe电池，其基本原材料中都含有储量不足的稀有金属，前景不容乐观。即使是新兴的像纳米染料二氧化钛太阳电池也因大量使用钛这种稀有元素而增加了对其原材料供应的忧虑。第二，技术进步的风险。目前各种薄膜电池都处在刚刚进入市场的阶段，前期一些厂家和研究单位为了开发技术和设备投入了巨大的人力和资金，因此新技术的设备制造成本和工艺成本都很高，使得薄膜电池生产线的价格居高不下，更为关键的是薄膜电池目前的技术进步很快，在电池厂商花巨资购买了昂贵的薄膜电池制造设备之后，在较短的时间内就有新技术出现，因此旧有设备就很可能遭到淘汰。这就使得薄膜电池设备的折旧过高，影响了薄膜太阳电池成本的降低。再有就是我国薄膜电池厂商的技术实力很弱，没有薄膜电池技术更新的能力，因此在新技术和新设备出现之后，厂家无力跟上技术进步，将面临重新购买新设备或者被淘汰出局的局面。

第二节 国内外薄膜太阳电池制造现状

一、国内薄膜太阳电池制造厂商

国内进入薄膜太阳电池产业的制造厂商很多，不断有人进入，有人退出，资料也不断更新，收集的也不全。表1-1为国内主要非晶硅薄膜太阳电池制造厂商。

我国薄膜企业众多，这里重点介绍十几家有代表性企业的状况，勾勒出我国薄膜太阳电池行业的外貌。

表 1-1 国内主要非晶硅薄膜太阳电池制造厂商

序号	公司名称	规模	效率及认证	采用技术
1	南通强生光电科技有限公司	500MW	6.5%	美国真空企业
2	常州源畅光电能源有限公司 大理源畅光电能源有限公司	200MW		源畅高科技、美国 c. m. i. 股份公司
3	江苏(南昌)百世德太阳能高科技有限公司(百世德全球最大)	1GW	8.5%	Applied Materials(全球顶尖设备供应商)
4	江苏综艺光伏有限公司	26MW		韩国周星工程公司
5	南京中电光伏科技有限公司			澳大利亚新南威尔士大学博士团队
6	无锡尚德电力控股有限公司			自制设备。2011 年关闭了上海 3 条薄膜太阳电池生产线
7	北京中锦阳电子科技有限公司	150MW		福建钧石
8	汉能控股集团有限公司	1GWW		铂阳太阳能
9	河北新奥集团股份有限公司	60MW	8% ~10%	美国应用材料公司整套设备
10	保定天威薄膜光伏有限公司	80MW	UL 认证	瑞士欧瑞康气相沉积设备
11	天津市津能电池科技有限公司	50MW		自制设备,南开大学双结
12	山东高密孚日集团 埃孚光伏制造有限公司	CIGS,240MW		德国 Eriksen 集团
13	烟台通用光伏能源有限公司(GSP)	100MW	单结/双结	日本爱发科设备商 美国富兰克林基金投资
14	青岛昌盛日电太阳能科技有限公司	CIGS 30MW		自制设备
15	临沂金光伏科技有限公司	CIGS		美国
16	福建钧石能源有限公司	1430MW		自制设备
17	杭州正泰太阳能科技有限公司	120MW		美国技术、瑞士欧瑞康
18	普尼(杭州)太阳能有限公司		21.1%	美国国家可再生能源实验室
19	杭州天裕光能科技有限公司	120MW	铝框	日本爱发科设备商
20	浙江慈能光伏科技有限公司	15MW	双结铝框	北仪创新
21	安徽普乐新能源有限公司	60MW		设备自主研发
22	广州市华茂能源科技有限公司	CIGS	14%	
23	深圳市拓日新能源科技股份有限公司(第一家上市公司)	50MW		自制设备
24	深圳市创益科技发展有限公司	25MW		自制设备
25	深圳杜邦光伏 杜邦太阳能有限公司	60MW		日本爱发科设备商 美国杜邦投资
26	深圳日月环太阳能实业公司	小非晶硅电池		美国技术
27	东莞宏威数码机械有限公司			制造太阳能电池生产设备
28	哈尔滨克罗拉太阳能电力有限公司	CIGS		中美合资美国普尼
29	四川中汉太阳能电力有限公司	500M(聚光)		四川汉龙、钟顺,自主研发
30	四川汉能光伏有限公司	1000MW		铂阳太阳能

（续）

序号	公司名称	规模	效率及认证	采用技术
31	成都旭双太阳能科技有限公司	200MW		中国台湾
32	四川凯迈布达太阳能电力有限公司			匈牙利合资
33	郑州保绿能源有限公司	500MW		福建钧石技术
34	江西赛维 BEST 太阳能高科技有限公司	1GW	8.5%	赛维 LDK 子公司
35	湖南共创光伏科技有限公司	50MW	9.5%	瑞士欧瑞康
36	黑龙江哈克新能源公司			美国
37	威海蓝星泰瑞光电有限公司	100MW		美国
38	尤尼索拉津能(天津)能源有限公司	75MW	三结	与美国联合太阳能有限公司合资
39	沈阳汉锋新能源技术有限公司	200MW		美国 AM2,AT

1. 强生公司（至 2010 年底，产能达到 500MW）

非晶硅薄膜电池因其沉积均匀度要求高，对设备及工艺要求也相对较高。目前一般企业只能生产第二、第三代小面积薄膜电池，转换效率较低，而国际上能够制造第五代薄膜电池设备的企业和生产第五代薄膜电池的工厂屈指可数。强生光电与美国著名的第三大真空设备制造公司合作，共同研发、改进和制造了全新技术的薄膜电池核心装备，提升第五代生产线，并与有关科研机构及跨国公司合作开发生产相配套的激光刻线、激光去边、真空溅射等关键设备，使整条生产线的精良性、先进性处于世界领先地位。强生光电投产的第五代薄膜电池生产线中的气相沉积设备，大量使用小型机器人和全程计算机控制系统，每小时采集的数据高达 36 万个，计算机系统对采集的电场、磁场、电流、气流、真空度等技术数据进行自动统计、筛选和调整，使其达到薄膜电池气相沉积的最佳控制效果，从而使薄膜电池转换效率超过 6.5%。由于该装备为强生光电与美国设备供应商结成合作伙伴共同研发、共同改进与制造，设备造价仅为同类引进设备的 25%，为我国大批量扩建低造价、高质量的薄膜太阳电池生产线，降低每瓦电池设备折旧费用提供了条件。强生光电始终把提高薄膜电池的转换效率和控制成本紧密挂钩，凡是可以提高转换效率但导致成本大幅增加的技术，强生光电都不会采用。强生光电在提高转换效率方面，实施两大技术方案：一是自行生产低电阻、高透光率的 TCO 玻璃，使用该项技术生产的导电玻璃，可以提高转换效率 0.4% ~0.5%；二是研发生产三层 PIN 结薄膜电池，可以在双结 PIN 工艺基础上，将转换效率再提高 0.4% ~0.5%。新技术将会使强生光电组件转换效率从目前 6.5% 进一步提升到 7% ~7.5% 的水平。1.1m×1.4m 面积的第五代薄膜电池，无论是对于薄膜电池设备制造还是薄膜电池组件生产，都是一个较好的规格，适合于建筑领域。同时，根据最新技术研发、改进、提升设备，强生光电整合一切方法控制和降低设备投入及产品制造成本，使薄膜电池生产线成为低成本、高质量生产线，成为今后一个阶段非晶硅薄膜电池的主流生产线。

2. 综艺股份

公司旗下江苏综艺光伏有限公司，首条 26MW 薄膜太阳电池生产线于 2009 年底正式投产。2010 年，综艺股份设立综艺（开曼）太阳能电力股份有限公司，以及参股投资欧贝黎新能源科技股份有限公司，形成了从薄膜太阳电池和晶体硅电池及组件的生产、销售，到光

伏电力系统集成包括建筑一体化应用的投资、设计、施工、运营一条龙的体系。

3. 新奥

新奥燃气在香港联交所上市，2007 年 8 月出售安瑞科能源收入 11.3 亿人民币；2008 年 11 月 8 日，从国际金融公司 IFC 获得融资 1.36 亿美元（其中 1500 万美元为股权投资，其余为贷款）；2008 年 12 月 20 日，与赤峰市政府签订框架协议，硅烷气生产基地落户于赤峰，一期投资 8 亿元人民币，年产硅烷气 1000t。

4. 天威保变

保定天威薄膜光伏有限公司的第一期生产设施造价 12 亿元人民币（1800 万美元），2009 年第 1 季度投入运行，2009 年 6 月 25 日产出了第一批非晶硅单结薄膜太阳电池组件。保定天威薄膜光伏有限公司目前正与林德共同对其气体设施和供应链进行更新。保定天威 2009 年在瑞士欧瑞康公司总部，与欧瑞康签署了战略合作协议书。欧瑞康升级的薄膜生产线，转换率由 6.5% 提高到 7%，新设备产能从原来的 45MW 提升到 60MW。

5. 孚日股份

孚日股份引进 Johanna 的 60MW 薄膜太阳电池项目生产线，2010 年 6 月生产出产品。

6. 杭州天裕光能科技有限公司

杭州天裕光能科技有限公司是一个私营高科技企业，致力于绿色能源开发，当前投资额为 22 亿元人民币（3.2 亿美元）。该公司从太阳能行业的主要设备供应商之一 Ulvac 引进了生产线，杭州的生产线总产能将达到 50MW，2010 年底实现 120MW 的产能。

7. 拓日新能

深圳市拓日新能源科技股份有限公司 2008 年 2 月 28 日在深圳上市，是深圳市高新技术企业，深圳市循环经济十佳先进企业，拥有国家级高技术产业化示范工程和深圳市高技术产业化示范工程。它生产单晶硅、多晶硅、非晶硅太阳电池芯片，太阳电池窗和光伏电池幕墙，太阳电池组件和供电系统，风力发电机组，太阳能热水器等产品。其产品已销往 51 个国家和地区，进入欧美八大超级市场和电站工程，企业品牌 TOPRAYSOLAR 在国际上具有较高的知名度，自主探索的“晶体硅太阳电池生产工艺”和“非晶硅太阳电池生产工艺”通过了深圳市科技成果鉴定。“拓日产业园”是国家财政部和建设部“可再生能源示范工程”，集屋顶电站、光伏幕墙、太阳能 LED 照明、风力发电机、地源热泵空调于一体，是广东省最全面的可再生能源示范工程。拓日以环保、节能、符合循环经济为宗旨，注重产品质量，先后通过了 ISO 9001 和 ISO 14001 质量环境体系认证。它还自主探索了国内最长的工艺路线，是行业中唯一一家不依赖国外设备和技术而生存与发展的自主创新、具有自主知识产权的企业。

该公司在非晶硅及晶硅电池方面基本都完成了产业链的布局。公司未来的增长点在于陕西 150MW 非晶硅项目、乐山的 200MW 晶体硅项目。在乐山拥有 15MW 的晶硅生产线，除了硅料需要购买以外，在铸锭、切片、电池片、电池组件等环节均实现了垂直整合，主要设备如单晶硅拉伸炉、多晶硅铸锭炉、开方机、切片机、焊接机等均已实现或者即将实现自产。由于多晶硅审批难，投资大，公司不计划介入硅料生产。陕西渭南在建的 150MW 薄膜生产线，实现了石英矿—石英砂—光伏玻璃—导电玻璃—镀膜—薄膜电池全产业链的贯通。第一条日投料 120t 的玻璃生产线已经投产，目前对外销售光伏玻璃，TCO 在线镀膜装置已经处于调试阶段，在非晶硅镀膜环节需要的 PECVD 设备也为公司自产。第二条玻璃生产线

目前也在建设中。陕西拓日新能公司规划薄膜产能 150MW，深圳产业园规划薄膜产能 50MW。合计晶硅和薄膜产能共 200MW。

该公司的晶硅和薄膜产品转换效率为 17% 和 6%，处于行业平均水平。研发队伍以公司董事长、总工程师为首，主要成员是成立初期就持续培养的技术人员，以及新加入的高校毕业生，团队比较稳定，研发投入占比 5% 以上。主要分为四个方向：①设备自制，拥有 150 人的研发团队；②应用级的产品研发；③光热研发；④光伏电池研发（目的是提高效率）及新型薄膜电池研发。

该公司在乌干达、美国和德国设有销售公司。公司低成本的自制设备均面向自用，不会考虑对外销售。

该公司目前的光伏建筑一体化（Building Integrated Photovoltaic，BIPV）主要是自身的办公楼和厂房屋顶项目，电力自用，项目在建设时获得了国家 17～18 元/W 的补贴。乐山厂区有 500kW 的晶硅光伏屋顶，深圳厂区 300kW 的晶硅屋顶每天可发电 1200 度（1 度 = 1kW·h）；渭南 3MW 薄膜的厂房屋顶项目，每个厂房 250kW，日发电量 1500 度，足够玻璃生产线的用电量。

8. 江西赛维百世德太阳能高科技有限公司

全球 2010 年第一条双线双结大面积硅基高效 8.5 代薄膜太阳电池项目——江西赛维百世德太阳能高科技有限公司在南昌高新区试产。该项目引进美国应用材料公司（APPLIED MATERIALS）产品，初期达到 8.5% 的稳定转换率，随后将提高至 12%。成本为多晶硅、单晶硅电池的 40%～50%，硅膜厚度不到 2μm，耗用硅材料仅为 1%。已经签订的来自美国、德国和西班牙等国的薄膜太阳电池采购订单超过 200MW（总价约 3.8 亿美元）。该公司在国内光伏市场刚刚启动之时，就抢占了先机，与中广核等联合体一举夺得了中国第一标——国家发改委 2009 年主持的国内第一个大型太阳能发电项目，即敦煌 10MW 并网光伏发电项目，依照合同，百世德公司成为该项目的唯一太阳能组件供应商。江西光伏产业在上游的发展有雄厚实力基础，物理提纯技术和硅锯屑回收技术上的发展和产业化加强了江西省在光伏产业上游的优势，并降低光伏产业成本；在中游硅片与光伏电池制造领域已形成稳定优势；在下游光伏应用领域，在光伏技术人才培养方面，南昌大学、南昌航空大学等省内高校有若干个研究组开展有关光伏材料研究工作，大部分都分布在新型薄膜电池领域，包括有机薄膜光伏电池材料、CIGS 薄膜电池、氧化锌薄膜和染料敏化电池材料，与当前光伏产业发展基本没有关联。南昌大学材料学院研究组与赛维 LDK 密切合作，在多晶硅材料与工艺方面开展了一系列研发与分析咨询服务工作，于 2007 年 2 月成立了南昌大学-LDK 太阳能研究中心，在国内产生了一定影响，是光伏业界产学研联合的一个极为成功的范例。江西赛维 LDK 近年来聚集了一批优秀的光伏材料与工艺技术人才，包括一些国际和全国知名的专家，但目前他们主要从事生产技术服务与管理工作，尚未开展以创新为目标、面向未来的研发活动。2008 年江西省太阳能材料工程技术研究中心依托江西赛维 LDK 公司成立，它将进一步强化江西光伏产业科技实力。南昌大学材料学院于 2007 年开始设立了“光伏材料与电池”硕士和博士培养方向，并开始招收研究生，2008 年建立了“太阳能光伏学院”。

9. 风帆股份

风帆股份与美国艾密欧公司在中国保定合资成立保定风帆光伏能源公司，投建非晶硅薄膜电池项目，项目总投资 10500 万元。

10. 金晶科技

这是目前国内主要的薄膜太阳电池所用的超白浮法玻璃的供应商，公司拥有优质浮法玻璃生产线 4 条，具有 2000 万重量箱/年的浮法玻璃年产能，系国内唯一能大规模生产超白玻璃的企业。

11. 安泰科技

安泰科技与德国 Odersun 公司合作薄膜太阳电池产业，获得 IEC 认证，生产线于 2010 年 6 月正式投产。

12. 中达股份

公司控股的常州钟恒新材料有限公司研制出一款价格低廉，但却拥有超高光电转换率的多元化合物太阳电池薄膜，凭借全新的制作工艺，该太阳电池薄膜的光电转换率高达 9.6%，并且在成本上拥有绝对优势。常州钟恒新材料有限公司是公司与香港鹏隆实业有限公司共同出资组建，为公司控股子公司。

13. 薄膜太阳电池标准工作委员会

2010 年 9 月 26 日，我国电子工业标准化技术协会薄膜太阳电池标准工作委员会在广东佛山市成立。薄膜太阳电池有了“中国标准”后，能够进一步规范行业发展，提高资源配置效率，也有利于我国光伏企业进一步参与国际竞争，谋求更多话语权。薄膜电池标准工作委员会除了制定我国薄膜太阳电池标准体系外，还培训薄膜太阳电池领域的标准化技术人才、推广使用关键标准以及向政府提供薄膜太阳电池领域的产业建议等。

我国是全球非晶硅电池的主要生产基地，有超过 30 家非晶硅薄膜电池厂商，共约 9.6GW 产能，其中一大半的转换效率为 6% ~7%，小半的转换效率高于 8.5%，最高的转换效率可以达到 9% ~10%，生产成本为约 0.8 美元/W。我国 20 世纪 80 年代中后期引进非晶硅电池技术，非晶硅电池产业一直处于稳步发展态势，进入 21 世纪后显示出快速发展的态势。我国在非晶硅薄膜电池方面具有品牌和规模优势，已经调试出稳定效率大于 8 % 的非晶硅/微晶硅叠层电池组件，近年来受益于世界光伏市场的拉动与薄膜电池产业技术不断走向成熟，特别是太阳能级多晶硅原料短缺的推动，加速了我国薄膜电池产业的发展。2004 年以前，我国薄膜电池产业以单结非晶硅电池为主。2004 年天津津能开始引进 2.5MWp 技术水平更高的微非叠层电池（a-Si/μc-Si）生产线。我国的硅基薄膜电池生产设备主要基于美国 EPV 公司的单室沉积技术，通过消化吸收、不断完善，我国的单室沉积非晶硅电池的设备水平和工艺完整与可靠性，均已超过国际同类水平。南开大学与福建钧石能源公司合作，2008 年建成我国首条非晶/微晶硅叠层电池中试线，并试制出效率超过 8% 的 0.79m^2 的非晶/微晶硅叠层电池组件，为我国建立兆瓦级的非晶/微晶硅叠层电池组件生产线奠定了很好的基础。

我国非晶硅电池产业进入快速发展时期，LDK 创办人彭小峰以个人名义投资百世德太阳能，成立总产能达 1GWp 的薄膜太阳电池厂。其余如常州源畅、赣能股份、烟台通用光伏等厂商，纷纷涉足薄膜太阳电池产业。2009 ~2010 年，随着河北新奥集团、南通强生光电、保定天威集团等大尺寸薄膜电池生产线的跟进，产能急剧上升。薄膜太阳电池占整个太阳电池产能的比例，到 2010 年接近 20%。

CIGS 薄膜电池方面，我国企业有望通过自主创新、引进设备或与国外设备企业合作等形式加快 CIGS 薄膜电池的产业化。CIGS 薄膜太阳电池在 20 世纪 80 年代开始起步，南开大

学在多方面支持下建立了“铜铟硒薄膜太阳电池试验平台与中试基地”，并在 CIGS 电池材料、器件的研究上及相应的工程技术上取得了多项突破，在玻璃衬底、不锈钢和聚酰亚胺柔性衬底 CIGS 电池方面均取得了标志性成果。表 1-2 为南开大学铜铟硒薄膜太阳电池的转换效率。

表 1-2 南开大学铜铟硒薄膜太阳电池的转换效率

电池种类	面积/cm^2	衬底技术路线	过渡层	转换效率(%)
无镉电池	0.87	玻璃共蒸发	ZnS	11.4
柔性电池	0.87	不锈钢共蒸发	CdS	10.63
	0.12	聚酰亚胺共蒸发	CdS	9.23
	0.87	玻璃后硒化	CdS	11.63
电池组件	83	玻璃共蒸发	CdS	8.93

注：样品采用中电集团十八所的标准测试，测试条件为 25℃，AM1.5 光谱，光强 1000W/m^2，由南开大学实验室测试，测试仪器用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所生产的 TM2500D 型太阳光模拟器，美国 KEITHLEY2420 数源表及相应的测试软件。中电集团十八所的国家计量站提供的单晶硅二级标准太阳电池，测试条件为室温，AM1.5 光谱，光强 1000 W/m^2。

南开大学光电子薄膜器件与技术研究所研制的小面积非晶硅/微晶硅叠层电池的效率达 11.8%，10cm×10cm 组件的效率为 10.5%。采用高频与高压耗尽技术，微晶硅薄膜的沉积速率在 1.0nm/s 以上，开发 80cm×40cm 玻璃衬底 CIGS 薄膜太阳电池连续制造技术，为 60cm×120cm 玻璃衬底 CIGS 薄膜生产线开发研制提供科学数据。其他研究单位，如北京大学、清华大学、上海大学、中电集团十八所、上海空间电源研究所、中科院深圳现代技术研究院、上海技术物理所、上海硅酸盐研究所等，也进行了大量的基础研究。我国众多单位紧密合作、联合攻关，取得了一些成果，有些成果已跨入国际先进行列。另外，中国科学院半导体研究所在硅基薄膜材料稳定性及其高效非晶硅电池研究方面、中国科学技术大学研究生院在硅基薄膜生长和输运机理方面，都取得了多项研究成果。

二、中国台湾薄膜太阳电池制造厂商

表 1-3 为中国台湾薄膜太阳电池制造厂商。

表 1-3 中国台湾薄膜太阳电池制造厂商

序号	公司名称	规模/MW	效率及认证	所在地区,采用技术
1	大亿光能股份有限公司	200	8%	中国台湾,美国 NanoPV 技术
2	富阳光电股份有限公司	40	单结	中国台湾,瑞士欧瑞康
3	联相光电股份有限公司		9.1%	中国台湾(济宁建厂)
4	绿能科技	45	8.5 代	中国台湾,美国应用材料公司
5	鑫笙能源科技有限公司			中国台湾,美国 EPV 技术
6	旭能光电股份有限公司			中国台湾
7	宇通光能		8%	中国台湾,a-Si/μc-Si
8	新能公司	30		中国台湾,CIGS,德国 Centrotherm 公司

中国台湾新能公司投资 7000 万欧元与德国 Centrotherm 公司合作开发 30MW CIGS 电池生产线，以溅射后硒法制备，电池面积为 1.1m×1.4m。中国台湾绿能科技与美国应用材料公司（Appliedmaterials）合作，直接投入 8.5 代玻璃基板的薄膜生产线。

三、国外薄膜太阳电池制造厂商

1）表 1-4 为国外薄膜太阳电池制造厂商。

表 1-4 国外薄膜太阳电池制造厂商

序号	公司名称	规模/MW	效率及认证	采用技术
1	Ascent Solar	6～10（2011 年）	电池效率 14%，组件效率 12.1% IEC 61646	美国，CIGS（轻、柔、高效）
2	Abound Solar（原 AVA Solar）	200	12%～13% UL1703 安全标准、IEC 61646 非晶硅光致衰减测试标准、IEC 61215 组件质量认定标准 IEC 61730—1 光伏系统安全鉴定——第一部分结构要求	美国，CdTe（大规模应用场合）
3	DayStar Technologies			美国，CIGS
4	EPV Solar，Inc，www. epv. net			美国，A-Si Tandem
5	Energy Conversion Devices，Inc	150	8%	United Solar Ovonic（主营屋顶、建筑）
6	First Solar，Inc，www. firstsolar. com	1GW +	0.7 美元/W，7%	美国，CdTe
7	Global Solar Energy，Inc，www. globalsolar. com		10%	美国，CIGS
8	HelioVolt，www. heliovolt. net		电池 14%，组件 12% IEC 61646，IEC 61730，UL 1703	美国，CIGS
9	ISET，www. isetinc. com	30	10%～12%	美国，ink-based CIGS
10	Miasolé，www. miasole. com		15.7% 经美国国家可再生能源实验室（NREL）确认 UL1703、IEC 61646、IEC 61730	美国，CIGS
11	Nanosolar，www. nanosolar. com		IEC 61646、IEC 61730，UL1703，	输出电压可达 1500V，美国，CIGS
12	PrimeStar Solar（GE Energy），www. primestarsolar. com		UL 1703 IEC 61646 德国莱茵实验室 TUV Safety CLASS Ⅱ CE Mark	美国，CdTe
13	Signet Solar，www. signetsolar. com		IEC 61646 德国莱茵实验室 TUV Safety CLASS Ⅱ	美国，A-Si Single
14	SoloPower，Inc，www. solopower. com	300 +	11% UL 1703	美国，CIGS
15	United Solar Ovonic，LLC，www. uni-solar. com			美国，A-Si/A-SiGe/A-SiGe
16	XsunX，www. xsunx. com			美国，A-Si/a-SiC
17	Xunlight 丫Corporation，www. xunlight. com			美国，A-Si/A-SiGe/nc-Si
18	ANTEC Solar Energy International AG，www. antec-solar. de			德国，CdTe

（续）

序号	公司名称	规模/MW	效率及认证	采用技术
19	AVANCIS GmbH & Co. KG（Shell Solar），www. avancis. de	120	15.5%，经美国国家可再生能源实验室（NREL）确认 ISO 9001：2000 ISO 14001：2004 OHSAS 18001：2007 IEC 61646 IEC 61730 CLASS A UL 1703	德国，CIS
20	CALYXO GMBH（Q-Cell），www. calyxosolar. com	60		德国，CdTe（美国 SOLAR FIELDS 首先研发），Q-CELL 投资
21	CSG Solar AG，www. csgsolar. com	13（2008 年）	IEC 61646 IEC 61730	德国，Poly-Si
22	Ersol Thin Film，www. ersol. de			德国，A-Si Single，a-Si/μc-Si
23	Inventux Technologies AG，www. inventux. com		10%，TUV	德国，A-Si/μc-Si
24	Johanna Solar，www. johannasolar. com	Bosch 收购		德国，CIGSSe
25	Malibu GmbH			德国，A-Si/μc-Si
26	ODERSUN AG，www. odersun. de			德国，CISCut
27	Q-cells SE	135	13%，IEC 61646、IEC 61730、UL1703	CIGS
28	SCHOTT Solar GmbH，www. schott. com/solar		UL1703	德国，A-Si/μc-Si
29	Solibro GmbH，www. solibrosolar. com	25～30	9%～11%	德国，CIGS（Q-cell ag 和 SOLIBRO AB 合资）
30	SONTOR GMBH（Q-Cell），www. qcells. de/cmadmin _2 _1303_0. html			德国，A-Si/μc-Si
31	SULFURCELL Solartechnik GmbH，www. sulfurcell. de	35	12.6% IEC 61646 IEC 61730 IEC 61701（耐盐腐蚀） DIN 50916：1995	德国，CIS
32	Sunfilm AG，www. sunfilmsolar. com			德国，A-Si/μc-Si
33	Würth Solar GmbH & Co. KG，Deutschland，www. wuerthsolar. de	30（2008 年）		德国，CIS
34	Fuji Electric Systems，www. fesys. co. jp/eng			日本，A-Si/A-SiGe

（续）

序号	公司名称	规模/MW	效率及认证	采用技术
35	Honda Soltec Co. Ltd，http://world. honda. com/SolarCell/index. html		13%	日本，CIGS
36	Kaneka Solartech，www. kaneka. co. jp	30 + 55	IEC 61646	日本，A-Si/Poly-Si
37	Mitsubishi Heavy Industries，Ltd，www. mhi. co. jp/power/e_a-si		IEC 61646 IEC 61730	日本，A-Si/μc-Si
38	Sanyo Amorton，www. us. sanyo. com/solar	600 （2010 年）		日本，A-Si Single
39	Sharp Electronics，www. sharpusa. com	160， 1GW 在建		日本，A-Si/μc-Si/a-Si GaAs
40	Showa Shell Sekiyu K. K，www. showa-shell. co. jp	900 （厂址 Miyazaki）	17.2%（实验室效率 2011 年） 组件 12.2% IEC 61646 IEC 61730	日本，CIS
41	Pramac SpA，	35 （计划 75）	10% IEC 61646 IEC 61730	意大利，A-Si/μc-Si
42	T-Solar Global	45（2010 年）	IEC 61646 IEC 61730	西班牙，A-Si/μc-Si
43	HelioGrid，www. heliogrid. com			匈牙利，A-Si Tandem
44	HELIODOMI，www. heliodomi. gr	5（5CIGS 扩建中）		希腊，A-Si Tandem
45	SolarMorph			新加坡，A-Si/μc-Si
46	Lambda Energia，www. lambdaenergia. com			墨西哥，A-Si/a-SiC
47	Moser Baer Photo Voltaic，www. moserbaerpv. in	50	7.3% IEC 61215、IEC 61730	印度，A-Si Single
48	Solar Plus			葡萄牙，A-Si Tandem
49	Bangkok Solar，www. bangkoksolar. com	50（2008 年）	IEC 61646	泰国，A-Si Tandem

注：效率及认证可参见附录 A。

2）非晶硅薄膜太阳电池方面。美国的 United Solar Ovonic 和日本的 Kaneka 是非晶硅薄膜太阳电池的国际龙头厂商。

日本夏普和三菱公司已实现非晶硅/微晶硅叠层太阳电池产业化生产，生产线产能 30MW 以上，组件效率稳定。夏普在大阪新工厂年产量为 6000MWp。

研究微晶硅底电池技术的有美国联合太阳能公司、瑞士微技术研究所（IMT）、德国余利希光伏研究所（JülichIPV25）以及日本先进技术研究中心（NAIST）、荷兰乌特勒支大学

(Utrecht) 等。表 1-5 为国际硅基薄膜电池的主要研究单位及成果。表中所列为上述研究机构的代表性成果，这些成果代表了其所在领域的最高水平。

表 1-5 国际硅基薄膜电池的主要研究单位及成果

时间	初始效率(稳定效率)(%)	沉积速率	研 究 单 位
2010 年	(12.52)	1 ~ 1.5nm/s	美国联合太阳能公司(United Solar Ovonic LLC)
2009 年	12.83	10 ~ 25A/s	日本三菱重工(MHI)
2009 年	8.3	6.75nm/min	德国德雷斯顿大学(Dresden)
2009 年	6.4	3.2nm/s	荷兰乌特勒支大学(Utrecht)
2009 年	10(9.47)		瑞士欧瑞康(Oerlikon)
2008 年	8.8		瑞士洛桑理工学院(IMT)
2009 年	11.7	5A/s + 25A/s(顶电池沉积速率 + 底电池沉积速率)	德国余利希光伏研究所(Jülich)
2009 年	8.2 ~ 9.5	13 ~ 45nm/min	日本爱发科(Ulvac)
2009 年	10.7(9.3)		美国 Sunfilm(AMAT 设备)
2009 年	8.2		美国 T2Solar
2007 年	13.5		日本三洋(Sanyo)

3) 薄膜 CdTe 电池方面。美国的 First Solar 公司是全球最大的 CdTe 太阳电池制造商，转换效率已达 11%，成本降低至 0.76 美元/W，产能在 2010 年约达到 1.4GW，2011 年、2012 年分别达到 2.1GW 、2.7GW。在工艺、技术、市场份额和规模效应等方面，First Solar 公司已经占据了绝对优势，他们自主开发的蒸汽输运法，使生产成本成为目前所有太阳电池中最低的。First Solar 公司除了在美国建有生产线，在德国建有 120MW 生产线，还在马来西亚和新加坡分别建有 240MW 和 120MW 的生产线。德国的 ANTEC 公司有 8MW 的自动化生产线，生产面积为 1.2m × 0.6m 的 CdTe 电池组件，平均效率在 6% ~ 7% 之间。

4) CIGS 薄膜电池方面，有德国的 WürthSolar、Solibro，美国的 GlobalSolar、日本的 Honda、Showa Shell 等。日本厂商昭和壳牌石油 (ShowaShell) 投入超过 9 亿美元，建造 2010 年全球最大的 CIGS 薄膜太阳电池厂，产能 1GWp。全球有上百家企业从事 CIGS 技术的研发，如 Johanna Solar (德国)、Wurth Solar (德国)、Global Solar (美国)、Showa Shell (日本)、Honda Soltec (日本) 等公司。CIGS 电池具有敏感的元素配比和复杂的多层结构，工艺和设备要求十分严格，被国际光伏界认为是技术难度比较大的一种太阳电池。实验室技术在发达国家趋于成熟，转换效率已达 20.3%。CIGS 电池的吸收层 CIGS 薄膜是一种多元化合物多晶半导体材料，其多元组分配比和分布，以及合适的晶相结构是电池制备的难点，由此产生了不同的技术路线，如真空蒸发的一步法以及先金属预置层后硒化的两步法。表 1-6 为 2010 年 Cu(In, Ga)Se_2 太阳电池的世界纪录。表 1-7 为全球 CIGS 薄膜太阳电池组件的技术指标。

表 1-6 2010 年 Cu(In, Ga)Se_2 太阳电池的世界纪录

效率(%)	面积/cm^2	特征	公司名称	备注
19.9 ± 0.60	419	玻璃衬底(电池)	NREL	
16.6 ± 0.4	16.0		Uppsala	
15.2	900		Showa Shell	无镉,组件

表 1-7 全球 CIGS 薄膜太阳电池组件的技术指标

机构	国别	面积/cm^2	转换效率 η(%)	技术路线
Würth Solar	德国	6500	13.0	蒸发
Advancis	德国	5400	12.8	后硒化
Showa Shell	日本	3450	13.6	后硒化
Honda Solar	日本	9965	12.7	后硒化

5）林德集团提供制造薄膜太阳电池所需的大宗和特种气体（其中包括大批量硅烷和氢气，用于沉积太阳电池板的大面积玻璃板上的硅光吸收层），是大宗气体和特种气体全球规模最大的供应商，参与63%的行业项目，占有全球36%的晶体硅市场份额。在我国，林德集团占有50%以上的薄膜市场份额。林德集团当地子公司联华林德与保定天威薄膜光伏有限公司、杭州天裕光能科技有限公司和新奥光伏能源有限公司分别签订了长期合同。林德集团将创新技术投入太阳电池制造的材料生产和利用中，最终实现降低太阳电池生产的单位功率成本，并且实现太阳能电力的电网平价这一全球行业目标。

6）欧瑞康太阳能是领先的薄膜硅光伏解决方案供应商。在新加坡设立亚洲中心，已生产超过300000块太阳能电池。欧瑞康太阳能在经验和技术方向，在端对端薄膜硅光伏市场上是领先者。太阳能行业拥有着几十亿美元的商业机会，欧瑞康太阳能于2010年将瑞士Truebbach的生产规模扩展两倍，并已建立完整的中试线作为研发和工艺模块发展单元的一部分。这条新的中试线促进了研发速度，并使得客户工程师能在真实环境下进行培训。欧瑞康专家们完成了新的薄膜硅光伏工厂的产量提升，先进的欧瑞康太阳能生产线确保了薄膜硅电池最高效的生产成本优势，端对端解决方案包含了整个生产过程，从玻璃清洗、在线检测到成品测试。欧瑞康太阳能提供整套的服务包，除了设备外，还有整个用于质量控制的计量系统、电池生产的“后端”和享有专利的工艺技术。至关重要的是欧瑞康太阳能独有的TCO层，用于捕获进入光伏薄膜的光，使转换效率最大化。欧瑞康太阳能在按时交货、产能提升时间和电池效率等方面有较好的承诺，而且它有对于未来实现平价上网所做的清晰的、透明的路线。欧瑞康太阳能对于其技术资产具有很强的知识产权保护，拥有35个以上的专利体系，包含了薄膜电池和生产技术上的系统和工艺领域。微晶硅叠层是减少太阳能能源生产成本以及短期内达到平价上网的重要一环，2011年其他提供太阳能电池生产设备的制造商还不能够和欧瑞康太阳能先进的、独有的微晶硅技术相匹配。

第三节 薄膜太阳电池的发展方向

过去几年，薄膜电池产量的年增速均保持在100%以上，2009年全球薄膜电池产量为1.644GW，2011年全球薄膜电池产量达到5.29GW，2014年全球薄膜电池产量将达到9.5GW，预计未来几年全球薄膜电池占光伏总产量的比例会增至25%。虽然近一段时间我们看到，随着晶硅太阳电池产能不断加大，晶硅电池价格一路走低，甚至已接近薄膜太阳电池的价格，为7元人民币/W。薄膜太阳电池最初发展的原动力是晶硅价格过高，现在虽然晶硅价格降下来了，薄膜太阳电池成本低的优势暂时失去，但薄膜太阳电池已成气候，占据了相当市场，其他优势有目共睹。薄膜太阳电池产业已成高速旋转、无法停止、有着巨大质

量的飞轮。

薄膜太阳电池将向以下几方面发展。

1）光致变化效应消除。非晶硅电池效率的光致不稳定性，是由非晶硅材料微结构的亚稳态属性决定的，为了获得高效率、高稳定性的硅基薄膜太阳电池，双结电池微晶化的硅基薄膜太阳电池及非晶硅、微晶硅相结合的多结电池为主要的太阳电池产品，即用 μc-Si 薄膜代替 a-Si 做电池的有源层，该电池在长期光照下没有任何衰退现象。因此，高稳定、高效、低成本、大面积优质的微晶化硅薄膜材料、结构经过优化设计的薄膜电池占据半个市场。

2）低温晶化技术完善。低温晶化技术的完善，使沉积速度提高、工艺能耗降低、快速光热退火和金属诱导选择晶化技术进步，从而使生产效率大幅度提高。

3）薄膜太阳电池的应用范围增大。随着薄膜太阳电池效率的不断提高、生产规模的不断扩大以及成本的大幅度下降，太阳能光伏发电技术成为全球减排温室气体的重要技术手段，吉瓦级的薄膜光伏电站比比皆是。

4）薄膜太阳电池在下列领域中应用：

① 硅基薄膜电池在任何形状的衬底上制作，柔性衬底的硅基薄膜电池直接做成屋瓦式太阳电池。

② 透射部分可见光的硅基薄膜太阳电池做成小汽车的太阳顶及房屋的窗玻璃。

③ 具有很高功率质量比（300W/kg）的、很薄的、不锈钢衬底的硅基薄膜太阳电池出现。这种电池用于城市遥感用平流层气球平台和军用无人驾驶巡航飞机的能源系统。

④ 集成型硅基薄膜太阳电池子组件，具有高的输出电压，便于组装和连接。

⑤ 晶硅、薄膜电池在各自的优势应用领域上拓展市场空间。晶体硅太阳电池主要应用于太阳能屋顶建设；薄膜太阳电池主要应用于光伏建筑一体化（BIPV）及沙漠电站。

5）硅基薄膜电池具有原材料丰富、无毒、无污染、能耗低、质量轻、稳定、工艺路线短、成本低、弱光应用性强的特点，非常适合大型光伏电站建设，已经成为薄膜电池发展的方向和主流。

6）染料敏化电池的生产成本最低，已有产业化工程。

7）薄膜太阳电池建造的太阳能电站其发电成本已经与当地火电成本相当，在 0.6 美元/W 以下。

8）2010 年是薄膜电池高速增长的开始，作为薄膜电池最主要原材料的是超白玻璃和气体，薄膜电池行业的高速增长将带来对超白玻璃和气体的巨大需求。未来，我国必将成为薄膜太阳电池的“世界工厂”。全球的薄膜光伏市场将经历一个势不可挡的上升趋势。薄膜太阳电池的生产份额将在2020 年达到38%。从长远看，薄膜光伏（PV）电池技术将超越晶硅太阳电池光伏技术。

9）四种完全不同的薄膜技术——硅薄膜电池、CIGS 薄膜电池、CdTe 薄膜电池、GaAs 薄膜电池的基本技术和设备相对稳定，在不更替设备的情况下，通过工艺技术改造，使薄膜光伏技术不断进步。

10）国产非晶硅薄膜太阳电池成套生产设备稳步发展。在技术创新方面，非晶硅薄膜太阳电池生产线设备及工艺技术水平得到提升，研究薄膜太阳电池组的薄膜太阳电池实验中心配备了太阳电池 IPCE（光电转换效率）测量系统、太阳电池电流电压特性测试系统等多种高精尖检测设备。太阳电池大生产线设备中的主要设备国产化，如扩散炉、等离子刻蚀

机、石英管清洗机、低温烘干炉、管式 PECVD、快速烧结炉、平板式 PECVD、组件生产用的层压机等。

11）薄膜太阳电池在大型光伏电站、BIPV 等应用需求推动下将迅猛发展。产业形成规模后，解决了不同的薄膜太阳电池各自的问题：转换效率偏低及衰减、存在环境安全问题、原材料资源稀缺问题。从技术路线发展看，硅基薄膜太阳电池中的非晶硅/微晶硅双结叠层电池得到肯定。这种非晶硅与微晶硅叠层的基本结构将成为未来硅薄膜太阳电池的主流发展方向。

上网电价与传统火电厂电价持平，加上政府的财政补贴，薄膜太阳电池企业将会长期稳步发展。

12）高效新型薄膜太阳电池用铜、锡、锌、硒等作为原材料来代替昂贵的铜铟镓硒化合物或 CdTe。

13）提高太阳电池转换效率有以下几方面的突破：

① 有机光伏技术。标准平板电池不论是用有机材料还是无机材料制成的，部分阳光会通过反射损失掉。为了减少这个损失，电池制造商将电池涂上了抗反射涂层，或者蚀刻电池的表面以增加光子吸收。美国维克森林大学的物理学教授 David Carroll 通过在构成电池基础的聚合物基质上加上一层垂直的光纤作为阳光捕捉装置。这层光纤像粗糙的胡子茬一样从表面突出，阳光能从任何角度进入光纤顶端，光子在光纤内部弹跳，直到它们被周围的有机电池吸收。此举可以增加一半太阳光的吸收，效率增加 15%。

② 由纳米微粒组成的新型表面，让太阳电池能捕捉更多阳光，能够吸收 99% 的光子，吸收的波长范围在 300 ~ 900nm 之间。

③ 光和热同时发电。太阳电池中的活性材料只能与特定的光谱发生反应，大多数的硅太阳电池只能将阳光中 15% 的能量转化为电力，而一半以上太阳能以热量的形式浪费掉了。有一种涂覆有铯金属薄层的氮化镓半导体材料，这种材料能够使光和热同时发电，比现有的太阳电池技术效率更高，在不用聚光的情况下效率达到 41%。

第四节　我国发展太阳能的政策

国家能源局、工业与信息化部等多个部委参与了《新兴能源产业发展规划》的起草，未来十年我国新能源投资将达 5 万亿元。这一规划重点支持的领域集中在风能、太阳能、核能、生物质能、水能、煤炭的清洁化利用、智能电网等七大方面。

根据规划，预计到 2020 年，我国新能源发电装机 2.9 亿 kW，约占总装机的 17%。其中，核电装机将达到 7000 万 kW，风电装机接近 1.5 亿 kW，太阳能发电装机将达到 2000 万 kW，生物质能发电装机将达到 3000 万 kW。

对于新能源产业的发展，一个重要的后台建设就是要发展智能电网。根据规划，坚强智能电网是以坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，以智能控制为手段，包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节，覆盖所有电压等级，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合，是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。

据规划预计，新兴能源产业规划实施以后，到 2020 年将大大减缓对煤炭需求的过度依

赖，能使当年的二氧化硫排放减少约780万t，当年的二氧化碳排放减少约12亿t。规划期累计直接增加投资5万亿元，每年增加产值1.5万亿元，增加社会就业岗位1500万个。

为保证新能源产业的投资，有关方面在规划的指导下将设计产业金融支持方案，即从国家层面上形成一个较为完整的新能源产业金融支持体系，这个体系包括投资基金、银行信贷、股票市场、企业债券。

我国的光伏产业已有相当的基础：有12GW的超大输电线路工程；掌握了产业链各环节的关键技术，并有所创新和发展；有些设备开始出口；已经成为全球第一大光伏电池生产国，产量占全球40%；光伏企业的综合竞争力不断提高，并成长为国际新能源市场上举足轻重的力量和全球光伏产品的主要生产国。光伏产业已成为我国为数不多的、可以与国际企业站在同一起跑线上参与竞争的产业，是我国最有希望在全球范围内培育竞争优势的战略性新兴产业之一。

新兴战略性产业进入门槛较高，创新能力的建设，产业竞争力的提高，由低端制造向产业链高端的设计、研发、品牌、营销、管理等环节延伸等有重重难关，需要政府给予强有力的支持，政府要补贴光伏企业，要引导、鼓励更多民间资本积极参与，创造公平竞争的环境，消除民营企业的进入障碍。

一、政府对光伏企业财政补贴的原因

1. 补贴的作用

中国可再生能源学会副理事长、中国太阳能学会光伏分会主任赵玉文2002年从世界银行争取了2500万美元的补贴，不少公司都是依赖其中的几十万甚至几万美元生存下来的，才有今天几大光伏企业。补贴的作用可见一斑。

2. 不补贴无法做

光伏发电的投资成本过高。按照2010年的成本，光伏非晶硅装机投资成本为每千瓦18000元左右，光伏多晶硅装机投资成本为每千瓦23000元左右，常规火电的投资成本为每千瓦3000~4000元，光伏投资成本是常规火电投资成本的6倍以上，没有补贴，没有人愿意做光伏发电站，也没有人能做得起。

3. 补贴是为了最后不补贴

煤炭贮备不断减少，煤炭价格不断上扬，导致火电的价格也不断上升，五大电力集团实际上是亏损运行，2010年总计亏损137亿元，这样下去，20年以后，火电价格终会超过光伏发电价格了。假设现在对光伏发电一分钱都不补，等光伏发电那一天到来，等大家自觉自愿地用光伏电力，那样的话，政府将来的支出更大，而且大到政府付不起的程度，因为到那时候，我们会因为买不起煤电，又因为光伏技术全由国外控制，建不起光伏产业，而使国家陷入困境。而有了补贴就不一样了，有了到位的补贴，光伏发电的规模就会上升，随着技术的进步，光伏发电的价格就可以下降。国家对风电的补贴已经证实了这一点，开始时，风电的补贴价格高达1.5元/kW·h，现在，绝大多数的风电补贴已经下降到了0.6元左右。再看火电实际成本，宁夏火力发电的上网电价是0.38元，但国家购买火力发电的成本并不那么便宜，据测算，一个火电厂，每发出一度电，政府（无论是德国、法国还是中国）要拿出0.6~1.2元的额外成本来处理这个电厂所发出的电力造成的环境问题，包括二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘污染、林木污染和冷却水排放的污染。也就是说，国家为一个电厂所支付的电价最低达到0.9元/kW·h。而在沿海等离煤炭产区较远的地方，这个价格达

到 1 ~ 1. 6 元/kW · h。因此，如果光伏发电降到每度电 1 元，实际上就已经低于火电了。

4. 光伏全方位补贴

我国西部地区日照充足，光伏发电量除满足当地所需外，还可输送到外地。但光伏发电不稳定，国内乃至国外现有的电网技术都不能输送，所以必须有稳定电流。这就需要在光伏发电站之外另建发电站，这些也需要政府补贴。另外，技术突破、储能问题也需要有政府科技资金的扶持。

二、国内外光伏行业补贴现状

1. 国外光伏行业的补贴

1991 年日本政府开始对光伏进行补贴。他们动员老百姓在屋顶安装光伏电池，每装一户，按每千瓦多少钱来补贴（ 大约 7 万日元)。这就是所谓的百万屋顶计划，实施了 10 年，日本的光伏产业并没有大的飞跃。这与日本刚好从 20 世纪 90 年代初期步入长期衰退有关。2009 年 4 月开始，日本政府对太阳电池设备购买进行补贴，每千瓦太阳电池补贴 7 万日元，以促进太阳能的使用。2009 年我国光伏市场规模约为 160MW，而日本早在 2006 年底光伏发电累计装机容量就已达到 1760MW，其中户用光伏系统的安装量达到 36 万户，累计装机容量达到 1254MW，在 2006 年居世界之首。这就是光伏补贴的日本模式。

美国从 2000 年开始，从加利福尼亚这个“阳光灿烂的地方”开始了光伏补贴。他们除了固定补贴之外，又开辟了一个新的选择，用免税的方式进行补贴。政府规定安装了光伏屋顶的，其安装费用从当年的收入中扣除，按扣除后的金额来缴纳个人所得税。除了装机补贴外，美国还对研究机构、光伏公司进行补贴，即对科研、投资、装备等各个方面给予补贴。这就是光伏补贴的美国模式。

2004 年，德国政府开始讨论光伏补贴的问题，除了装机、抵税、政府研发资助、投资优惠等方式外，还确立了一个具有划时代意义的政策，那就是对于光伏发电给予上网电价补贴，并按地面电站和屋顶电站的不同，制定了不同的补贴额度，地面为 0. 48 欧元/kW · h，屋顶为 0. 57 欧元/kW · h。而当时，德国的火力发电上网电价才 0. 03 欧元/kW · h。这个政策出台后，一下子使德国的光伏装机容量迅速上升，很快就超过日本、美国，成为光伏第一大国。德国从 2005 年开始对光伏发电补贴，补贴逐年减少，到 2009 年，地面电站下降到了每度电 0. 33 欧元，下降了 31% 。而光伏电站的成本，2004 年是每千瓦 1 万欧元，到 2009 年，降到了 3000 欧元，下降了 70% 。也就是说，如果 2005 年在德国建光伏电站按 0. 57 欧元能够赚钱的话，那么，现在在德国建地面电站的电价，只要有 0. 15 欧元就够了。前一段德国政府宣布将光伏补贴下降 16% 。德国在制定了《上网电价法》以后，光伏市场快速启动并拉动技术和产业快速发展。数据显示，2009 年德国新增光伏发电容量 3800MWp，总装机容量达到 9134MWp，形成了巨大的经济效益和社会效益，并呈现出显著的环境效益。这就是光伏补贴的德国模式，也称为上网电价补贴。

无疑，从日本政府到美国、德国政府，对于光伏产业都进行了力度较大的补贴，补贴方式并不一样，从效果上看，德国模式是最好的，这个政策也带动我国太阳电池出口，促使我国的尚德、林洋、阿特斯、天威、赛维、昱辉、天合等公司迅速崛起，一举成为世界光伏前几十强企业，而且纷纷在海外上市。

2. 国内光伏行业的补贴

1）2009 年光伏发电特许权招标，中标价 1. 09 元/kW · h。

2）2010 年，13 个项目 280MW 招标，中标价 0.73 元/kW·h。

3）2009 年公布了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》、《关于加快推进太阳能光电建筑应用的实施意见》、《金太阳示范工程财政补助资金管理暂行办法》，按照装机容量给予 50% ~70% 的补贴，称为“金太阳工程”。对屋顶光伏系统，按装机容量补贴每瓦 15 ~20 元，2009 年补贴标准原则上定为每峰瓦 20 元。

4）2010 年 10 月公布《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》。

5）各省公布了各自的补贴政策。甘肃按照 1.09 元/kW·h 定出了自己的标杆电价；宁夏按 1.3 元/kW·h 定出了自己的电价；江苏定出了地面电站 1.4 元/kW·h，屋顶电站 2.4 元/kW·h，建筑一体化电站 2.9 元/kW·h。各地的电价差异较大，这是因为对于一个装机容量一定的电站来说，由于各地的日照时间不一样，在各地每天的发电量是不同的。我国西北、云南、华南日照时间较长，而华北、东北、华东次之，最差的是四川，不过，四川的西昌、二滩、攀枝花由于地势高，年日照时间也能达到 2900h 以上。

6）光伏发电在全国全面铺开，国家发改委要求：

① 各省做好未来五年地面太阳能独立电站、屋顶光伏电站、建筑一体化光伏电站规划，确定装机容量，实现并网发电，完善并网技术规程。

② 道路、公园、车站、广场、加油站等公共设施照明中强制推广使用光伏电源。政府无偿提供太阳能光电技术在建筑领域应用的设计、施工、验收及规程等方面的技术培训和推广。

③ 鼓励发展太阳能路灯、交通信号灯、庭院灯、草坪灯、太阳能计算器和玩具等系列产品。

④ 将太阳能应用产品列入政府采购目录，并积极组织实施。

在一系列扶持政策的激励下，人们对于太阳电池行业的投资热情被激发，2009 年我国光伏装机容量达 600MW，2010 年达到 900MW。

三、何种补贴方式适合我国国情

纵观国内补贴政策，可以看出国家发改委在进行种种探索，找寻适合中国国情的补贴方式，归纳如下：

1. 一事一论方式

到 2008 年底，上海崇明、内蒙古鄂尔多斯两个项目得到了每度 4 元的电价补贴。国家发改委文件上注明，对类似项目的补贴，将采取一事一议的方式。国家发改委批复宁夏发电集团太阳山光伏电站等四个光伏发电项目临时上网电价为 1.15 元/kW·h。我国在 2009 ~2010 年公布了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》、《金太阳示范工程财政补助资金管理暂行办法》、《关于加快推进太阳能光电建筑应用的实施意见》。这些办法都属于这种一事一议的方式。

2. 光伏电站特许权招标方式

特许权招标可看做是国家对光伏成本进行价格摸底。2009 年国家能源局第一次招标，对甘肃省敦煌 10MW 光伏发电项目进行特许权招标，最后由中广核集团联合比利时 Enfinity 公司、江苏百世德太阳能科技公司竞得，中广核控股，中标价 1.09 元/kW·h。2010 年第二次光伏并网项目特许权招标，招标总规模从 10MW 提升到 280MW，覆盖西部 6 个省（区）13 个项目，13 个项目所处地带日光充足，资源都很好，特许经营期 25 年。此次招标

于2010年6月下旬启动，并于2010年8月10日正式开出技术标，中标电价全部低于1元/kW·h，最高电价为0.9907元/kW·h，最低电价仅为0.7288元/kW·h。中国电力投资集团公司揽到7个项目，华能集团中标两个项目，国电集团中标两个项目。

3. 上网电价方式

上网电价方式是最有效、最具可操作性、最科学的方式，拿到上网电价，标志该光伏发电企业正式得到电网认可，成为发电行业的正规军，光伏企业期盼这种方式早日实施。上网电价是由两部分组成的，一部分是当前的电力价格，另一部分是国家对光伏产业的补贴。前一部分随电力价格正常上升，后一部分不断下降，最后降为零，即国家不再补贴。补贴下降的速度，取决于三个因素：第一，光伏发电随着补贴引发的规模增加，导致的成本下降的速度；第二，国家财政需要发放的补贴额；第三，火力发电的成本上升速度，也就是石油和煤炭涨价的速度。因为补贴是递减的，最后是取消补贴，按现在的保守估计，也就是补贴9年，2020年取消补贴。我们可以试算一笔账，看一看到底国家需要补贴多少，才能建起光伏产业和市场。设定条件如下：

1）按2011年不变价，全国上网电价平均值为0.45元/kW·h。

2）全国平均年峰值日照小时数为1560h。全国各地年日照小时数为1000～3200h不等，平均数为2160h。年峰值日照小时数就是指太阳电池所在平面某段时间能接收到的太阳辐射量，转换为1000W/m^2条件下的等效小时数，经计算2160h转换后为1560h，所以取全国平均年峰值日照小时数为1560h。

3）光伏发电系统的效率：

① 电池老化衰减逐年按0.9%计算，25年效率为$(1-0.009)^{25}$，取平均数$(1-0.009)^{12.5}$。

② 系统综合老化效率（包括尘埃遮挡、线路损耗、逆变器效率、变压器等电器效率）取79.5%。

③ 光伏发电系统的效率为$0.795\times(1-0.009)^{12.5}=0.7056$。

4）年发电量（kW·h）为装机容量×0.7056×1560/1000=装机容量×1.1，装机容量单位为W。

5）上网电价第一年按1.15元/kW·h补贴，逐年递减10%。

6）装机容量按十二五规划，2020年达到20GW。

表1-8为2011年—2020年补贴情况。

表1-8　2011年—2020年补贴情况表

年份	装机容量/GW	年发电量/亿kW·h	上网电价/(元/kW·h)	实际补贴价/(元/kW·h)	补贴总额/亿元
2011	2	22	1.15	0.7	15.0
2012	6	66	1.04	0.59	38.9
2013	10	110	0.93	0.48	52.8
2014	12	132	0.84	0.39	51.48
2015	15	165	0.75	0.30	49.5

（续）

年份	装机容量/GW	年发电量/亿 kW·h	上网电价/(元/kW·h)	实际补贴价/(元/kW·h)	补贴总额/亿元
2016	16	176	0.68	0.23	40.48
2017	17	187	0.61	0.16	29.92
2018	18	198	0.55	0.10	19.8
2019	19	209	0.50	0.05	10.45
2020	20	220	0.45	0.00	0.00
	小计				308.33

说明：实际补贴价是光伏发电上网价减去正常的火电上网价0.45元/kW·h。

9年间政府总补贴是308.33亿元。我国光伏发电刚刚起步，比重很低，补贴是完全补得起的。我国光伏应用经过几年摸索，已到了一个可以确定电价的时期，上网电价延缓公布，多少让企业心中没底。从第二次招标的情况看，其方法也不利于其他资本进入。因此，国家公布上网电价法是对光伏产业最大的扶持。这将有利于培育国内光伏发电应用市场，可以促进太阳能企业采用先进技术，降低成本，也能减少国家对光伏产业的补贴。

4. 电力业务许可证发放

国家电力监管委员会山东省电力监管专员办公室下发2010年第35号行政许可决定书，准予2010年亚洲最大的薄膜太阳能光伏电站——济宁华瀚光伏能源有限公司取得发电类电力业务许可证。这是全国第一家太阳能发电站取得发电类电力业务许可证。

5. 我国光伏产业10年发展历程

2001年国家推出“光明工程计划”，旨在通过光伏发电解决偏远山区用电问题。

2003年英利、无锡尚德相继投产，成为我国第一批现代意义的光伏组件生产企业。

2004年德国公布光伏并网政策，使我国光伏组件出口激增。无锡尚德成功登陆纽约证券交易所，成为我国第一个在海外上市的民营新能源企业。

2005年《可再生能源法》通过，鼓励风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源的开发和利用。

2007年《可再生能源中长期发展规划》公布，提出到2020年光伏总装机容量实现2000MW。

2008年《可再生能源法》修订案提出可再生能源补贴标准。

2009年国家开始实施“金太阳”工程，对并网光伏发电项目给予50%或以上的投资补助。国家能源局实施了甘肃省第一批光伏发电项目特许权招标，总装机容量为10MW。

2010年“全国能源工作会议”正式提出光伏产业定位：科学规划、适度发展、启动国内太阳能发电市场。国家能源局实施第二次光伏发电项目特许权招标，我国光伏电价进入1元时代。

2011年国家发改委确定的价格：2011年7月1日以前核准建设、12月31日建成投产尚未核定价格的太阳能光伏发电项目，上网电价统一核定为1.15元/kW·h。2011年7月1日及以后核准的太阳能光伏发电项目，以及2011年7月1日之前核准但2011年12月31日仍未建成投产的项目，除西藏自治区外，上网电价均按1元/kW·h执行。

四、税收改进

一直以来，全球光伏产业主要依靠政府补贴得以发展，欧洲各国尤其是德国政府用高昂补贴来维持高增长。金融危机后，不少欧洲国家的财政赤字急剧扩大，财力大不如前，使得对光伏产业的补贴也有些力不从心，甚至削减补贴，但是此举并没有影响我国光伏产业的发展。

光伏产业不仅涉及技术，还涉及资源、经费、政策、产业规划等诸多方面，需要加强联动，整合优势资源；加强技术研发与应用示范结合，发挥协同效应，实现技术的转化和产业应用；加强国际合作，充分利用好国外技术、资源、人才和市场，谋求开展以我为主的国际合作，实现我国新能源技术与产业的跨越发展。以每瓦 2 美元计算，投资一个 50MW 的光伏电站，需要投入 1 亿美元，而投资收益期至少在 10 年以上。虽然其利润相对高而且收益比较稳定，但是需要企业有强大的融资能力做保障。太阳能企业向下游扩展已经成为一种发展趋势，大部分的组件企业开始在海外进行电站投资，一方面是电站目前具有良好的投资回报率，另一方面是可以为自身的组件销售提供稳定的渠道来源，避免组件的滞销。

最近，多个光伏发电规模大的国家调整了电价补贴政策，主要是为了适应光伏发电成本快速下降的趋势，避免市场过热和行业暴利，控制政府的经济代价。但近年来光伏发电成本下降幅度高于补贴下调幅度，光伏发电仍然具有较强的投资吸引力。特别是日本福岛第一核电站核泄漏事件引发了部分国家对核电前景的担忧，同时也推高了政府及电力行业对光伏发电发展的预期。预计国外光伏发电规模、增速有可能放缓，但其增长速度仍将高于风电。在国际市场需求不足的情况下，我国光伏产品制造企业会将市场重点转向国内。国内光伏产品价格竞争将更为激烈，有可能进一步带动发电成本快速下降。

《太阳能发电发展“十二五”规划》将光伏发电装机容量目标确定为到 2015 年达到 2100 万 kW，到 2020 年达到 5000 万 kW。其中，分布式电站规模到 2015 年为 1000 万 kW，到 2020 年为 2500 万 kW。由于我国光伏发电起步晚、基数小，“十二五”及“十三五”期间的发展任务艰巨。

五、我国光伏发电产业存在的主要问题

1）在政府一系列鼓励可再生能源发展的政策激励下，很多地方纷纷制定光伏发电规划，加快发展当地的新能源产业基地，但是没有充分考虑当地的社会经济状况、太阳能资源以及电网消纳等诸多因素，缺乏光伏发电与经济社会需求、电网等诸多方面的统筹协调，局部存在“一窝蜂”现象。

2）光伏发电产业链的关键环节——多晶硅产业出现了低水平重复建设、产能过剩倾向。

3）我国太阳能光伏发电成本虽然已经大幅下降，但仍然明显高于常规火电和风力发电。2009 年，我国火电、水电、风电和核电的平均上网电价分别约为 0.38 元/kW·h、0.25 元/kW·h、0.55 元/kW·h、0.43 元/kW·h，而太阳能发电在 1 元/kW·h 左右，单纯从经济效益的角度来看，光伏发电还不具备竞争力。如果没有国家强有力的政策支持，我国光伏发电的市场很难迅速扩大。

4）国内对光伏发电产业的激励政策还不到位。2009 年公布的《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》和《金太阳示范工程财政补助资金管理暂行办法》都只是暂时性投资财政补贴措施，存在无法保障长期可靠运行的隐患，且补贴力度不够，投资者无法获

得合理利润，导致很多项目搁浅。

5）技术标准和规范不全面、不完整，且发布滞后。在我国已颁布实行的光伏技术标准中，大部分是光伏产品的技术标准，缺少规范光伏发电性能质量、并网技术标准和电网调度方面的管理规程，缺乏符合建筑要求的光伏产品质量标准。

目前，国际上光伏标准公布速度加快，近一年来公布了大量新的关于光伏发电系统方面的标准。而我国许多已经制定校核完成的光伏标准发布迟缓。

缺少强制性标准。国家相关部门已经制定的一系列光伏组件、并网逆变器、接入系统方面的相关标准基本上均为推荐标准，与强制标准相比，实际执行效果难以得到保证。

6）全球光伏产能增长特别是产能过剩将导致光伏产品价格下降，进而推动发电成本降低。事实上，在技术进步及规模效应影响下，光伏发电成本近年来呈快速下降趋势。2010年，北欧、南欧和中东地区大型地面光伏电站发电成本已分别降至0.29欧元/kW·h、0.15欧元/kW·h和0.12欧元/kW·h。我国光伏发电成本也已从2000年的42～47元/kW·h下降至2010年的1.5元/kW·h左右。

7）近年来，光伏电池价格不断下降，同时厂商数量不断增加，这些因素在很大程度上导致了光伏产业的巨大亏损。据统计，2011年光伏电池每瓦出厂均价下降了40%左右，较2008年下降了近70%。2011年第三季度，我国光伏产业八大企业均出现亏损。我国光伏电池产量年增长率连续7年保持100%以上，而厂商数量更是达数百家之多，产量占全球总产量的近一半，其中九成以上用于出口。受欧债危机影响，市场需求萎缩至产能的一半以下。

六、几点建议

1）实行投资融资激励政策。降低项目建设的资本金比例，扩大企业融资的渠道和规模。延长贷款期限，降低贷款利率。

2）出台促进光伏发电系统规模化发展的政策。对于太阳能资源丰富、适宜建设大规模并网光伏发电系统的地区，建议国家以地区为单位择优选择开发商。这样可有效防止开发过程中的无序和重复，以实现区域整体效益最大化。

3）当前由新技术、新产品引发的产业更新换代越来越快，我国晶硅电池产量已居世界第一，投入总量更是以百亿、千亿元计，需密切关注新技术可能引发的产业变革，提前做好足够的核心技术储备。

第二章　太阳辐射能的接收

第一节　太阳及日地运动

一、名词解释

1. 太阳常数

将太阳辐射看作是稳定的，太阳常数表征到达地球大气层顶部的太阳辐射量的数值，定义为地球大气层外，位于日地平均距离处，地球大气层上界垂直于太阳辐射束平面的单位面积（$1m^2$）单位时间（1s，1W = 1J/s）内所接收到的太阳辐射的全谱总能量，其值为 $1367W/m^2$ 或 $4921kJ/(m^2 \cdot h)$，这是 1981 年 10 月世界气象组织通过的最新数值。

2. 恒星

由炽热气体组成的、能自己发光的球状或类球状天体称为恒星。恒星都是气体星球，银河系中的恒星大约有两千亿颗。恒星是处于运动中的，因为距离人类太遥远，不借助于特殊工具和方法，很难发现它们在天上的位置变化，古代人以为它们是固定不动的星体，把它们叫做恒星，意思是“永恒不变的星”。离地球最近的恒星是太阳。

3. 光源色

光源色是光源照射到白色光滑不透明物体上所呈现出的颜色。由各种光源（标准光源：白炽灯、太阳光、有太阳时所特有的蓝天的昼光）发出的光的长短、强弱、比例不同，形成不同的色光，如：普通灯泡的光所含黄色和橙色波长的光多，而呈现黄色味；普通荧光灯所含蓝色波长的光多，则呈蓝色味。从光源发出的光，由于其中所含波长的光的比例上有强弱，或者缺少一部分，从而表现成各种各样的色彩。除日光的光谱是连续不间断（平衡）的外，日常生活中的光，很难有完整的光谱色出现，这些光源色反映的是光谱色中所缺少颜色的补色。检测光源色的条件：要求被照物体是白色、不透明、表面光滑。自然界的白色光（如阳光）是由红、绿、蓝 3 种波长不同的颜色组成的。人们所看到的红花，是因为绿色和蓝色波长的光线被物体吸收，而红色的光线反射到人们眼睛里的结果。同样的道理，绿色和红色波长的光线被物体吸收而反射为蓝色，蓝色和红色波长的光线被吸收而反射为绿色。3 种原色中的任意两种相互重叠，就会产生间色，3 种原色相互混合成为白色，所以又称为“加色法三原色”。

4. 银河系

银河系（the Milky Way 或 Galaxy）是指主体部分投影在天球上的亮带，中国古称银河（天河、天汉）。它是一个由 1000 多亿颗恒星、数千个星团和星云组成的盘状恒星系统，直径约为 100000 多光年，中心厚度约为 12000 光年。银河系为一 SBbc 棒旋星系，有两个主要旋臂——英仙臂和盾牌座-半人马座旋臂。

5. 绝对星等

绝对星等（Absolute magnitude，M）是假定把恒星放在距地球 10 秒差距（32.6 光年）

的地方测得的恒星的亮度，用以区别于视星等（Apparent magnitude，m）。它反映天体的真实发光本领。如果绝对星等用 M 表示，视星等用 m 表示，恒星的距离化成秒差距数为 r，那么 $M = m + 5 - 5\lg r$。

6. 视星等

晴朗的夜晚，点点繁星有明有暗，天文学家用“视星等”来区分繁星的明亮程度。整个天空肉眼能见到的大约有 6000 多颗恒星。将肉眼可见的星分为 6 等。肉眼刚能看到的定为 6 等星，比 6 等亮一些的为 5 等，依此类推，亮星为 1 等，更亮的为 0 等以至负的星等。例如，太阳是 -26.8 等，满月的亮度是 -12.6 等，金星最亮时可达 -4.4 等。星等差 1 等，其亮度差 2.512 倍。1 等星的亮度恰好是 6 等星的 100 倍。在地球量度星的亮度等级，物体越近显得越亮，物体越远显得越暗，例如近的烛光比远的街灯显得还要光亮些。视星等不能作为量度真实光亮度的指标，视星等只能量度物体表面上的光亮度（于地面上接收到的光量），恒星的真正亮度要用光度表示。光度用每秒辐射多少尔格（尔格/秒）来表示。这不仅适用于光学波段，也适用于其他波段，如红外、紫外、射电、X 射线及射线波段。光度就是恒星每秒钟辐射的总能量，恒星的光度由它的温度和表面积决定，温度愈高光度愈大，恒星的表面积愈大光度也愈大。恒星的大小和温度是决定恒星光度的两个重要物理量。

7. 巨星、矮星

天文学家把光度大的恒星称为巨星，光度小的称为矮星，光度比巨星更强的称为超巨星。从表面积愈大光度也愈大的规律可以知道，光度大的巨星，体积也大，光度小的矮星，体积也小。太阳是一颗黄色的矮星，相比之下光度比较弱。但还有比它更弱的矮星，如著名的天狼星伴星是一颗白矮星，它的光度还不到太阳的万分之一。

8. 视直径

以角度做测量单位时，从一个特定的位置上观察一个物体得到视直径。视直径只是被观测的物体在垂直观测者视线方向中心的平面上产生的透视投影的直径。由于它是在观测者的角度下按比例的缩影，因此与物体真实的直径会有所不同。但对一个在遥远距离上的盘状天体，视直径和实直径是相同的。

9. 主序星

在赫罗图上，恒星的分布不是随机的，而是集中在几个区域内，最显眼的是自左上角到右下角沿对角线的一条窄带，大多数恒星，包括太阳都在从左上至右下的这一条对角线上，这条对角线被称为主星序，主星序上的恒星就被称为主序星，主序星一生都处于氢燃烧阶段。

10. 赫罗图

1911 年，丹麦天文学家赫兹伯仑和美国天文学家罗素先后发现恒星的光度与表面温度有一定的联系。他们把光度与温度作成一个图，图的横坐标表示恒星的光谱型，因恒星的光谱型与表面温度有关，因此横坐标也就表示恒星的表面温度；纵坐标表示恒星的绝对星等，因绝对星等是光度的一种量度，因此纵坐标也表示恒星的光度。他们把大量的恒星按照它们各自的光谱型和绝对星等在图上点出来 ，发现点的分布有一定的规律性。图的左上方到右下方大致沿着对角线点的分布很密集，成带状，占总数的 90%。天文学家把这条带称为主星序，带上的恒星称为主序星。主星序表明，大多数恒星，表面温度高，光度也大；表面温度降低，则光度随之减小。但是，在图的右上方，有一个星比较密集的区，这里的星光度很

大，但表面温度却不高，呈红色，这表明它们的体积十分巨大，所以叫红巨星。图中巨星的上面是超巨星。图的左下方也有一个星比较密集的区 ，这里的星表面温度很高，呈蓝白色，光度却很小，这表明它们的体积很小，所以叫白矮星。这张图反映了恒星演化的一种规律性，人们称它为赫兹伯仑-罗素图 ，简称赫罗图。赫罗图是天文学家研究天体演化的重要工具。

11. 地轴

贯穿地球中心与南北两极相连的线称为地轴，也是地球的自转轴，与公转时的轨道面的法线倾斜成23°27′的夹角。公转时自转角的方向始终不变，总是指向天球的北极。

12. 黄道

地球除绕地轴自转外，又沿椭圆形轨道绕太阳进行公转，此椭圆形轨道称为黄道。在黄道平面内，长半轴约为1.52×10^8km，短半轴约为1.47×10^8km。

13. 赤黄角

地球的赤道平面与黄道平面的夹角称为赤黄角，在一年中任一时刻都保持为23°27′(23.45°)。

14. 赤纬角δ

正午时的太阳光线与地球赤道平面间的夹角称为太阳赤纬角，简称赤纬。取从赤道向北为正方向，而向南为负方向，赤纬角δ的变化范围为$-23.45°\sim23.45°$。

15. 四季

地球处于运行轨道的不同位置时，阳光照射到地球上的方向就不同，形成地球的四季变化。

① 夏至：6月22日，太阳光线正射北回归线，赤纬角$\delta=23.45°$，白昼最长，北半球夏季开始。夏至过后，白昼逐渐缩短。

② 冬至：12月22日，太阳光线正射南回归线，赤纬角$\delta=-23.45°$，黑夜最长，北半球冬季开始。冬至过后，白昼逐渐增长。

③ 春分：3月21日，太阳从赤道以南到达赤道，太阳正射赤道，赤纬角$\delta=0$，北半球春季开始。视运动中，太阳出于正东而落于正西，白昼和黑夜等长。春分过后，白昼逐渐增长。

④ 秋分：9月23日，太阳从赤道以北到达赤道，正射赤道，赤纬角$\delta=0$，北半球秋季开始。秋分过后，白昼逐渐缩短。

16. 天球

包含所有天体的单一球体叫天球。选择不同的位置作为天球的坐标原点，可构造出不同的坐标系：赤道坐标系——地球中心与天球球心重合；地平坐标系——观察者的位置与天球球心重合；黄道坐标系——太阳中心作为天球球心；银河坐标系——银河中心与天球球心重合。

17. 地平坐标系的要素

1）地平圈：设想天空是一个巨大的半球，覆盖在辽阔的地平面上，并与地平线相交成一个大圆圈，即为地平圈。

2）天顶：通过观察者的垂直轴向上与天球的交点。

3）天底：在天球上与天顶在同一直径上的对应点。

4）天极：地球两极相应的天顶。

5）垂直圆：通过观察者、天顶及天底的任何大圆。通过天极的垂直圆是子午圈。

6）子午圈（meridian）：地平坐标系或赤道坐标系中的大圆，即在地平坐标系中经过北天极的地平经圈，或在赤道坐标系中经过天顶的赤经圈。它是地平坐标系和第一赤道坐标系中的主圈。子午圈是天球上经过北天极、天顶、南点、南天极、天底和北点，并与天球相交的大圆。天体运动经过子午圈称为中天。上子午圈是子午圈在地平圈上的一半，下子午圈是在地平圈下的另一半。通俗的说法是，在天上从南→天顶→北顺序通过的一个假想大弧，亦称为天球子午圈，而在地平线下通过天底却看不见的另一半大圆则称为下子午圈。因为观测者所在地固定的话，地平经圈与天极也是相对固定的，夜空出现星座、恒星会因为地球的自转依序东升，经过子午线然后西落。因为星座与天体在周日运动中，若经过上子午圈之时（即上中天），地平方位角最高，天体经过的大气厚度最少，抖动与消光也相对最少，因而也是最容易观测的时候。在普通天文观测上，观星者可以活动星图来推测某星座或某目标天体的最佳观赏时间。我们亦可以利用恒星的赤经来定义地方恒星时，并且精确测量或计算天体将于何时经过子午圈。图 2-1 为天球。

7）天球赤道：垂直于地轴的大圆。它是地球赤道面的投影与天球相交所确定的大圆。

8）时圈：垂直于天球赤道并经过太阳的大圆，也叫赤纬圈。

9）高度角：太阳与观察者所处地平面的夹角，向天顶方向取为正，向天底方向取为负。

10）方位角：太阳与观察者连线在地平面上的投影线与南北方向线之间的夹角。图 2-2 为太阳角度的标定。

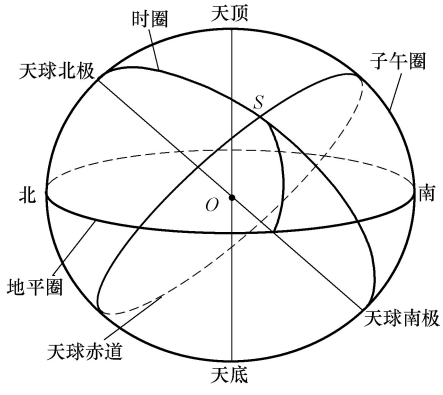


图 2-1　天球

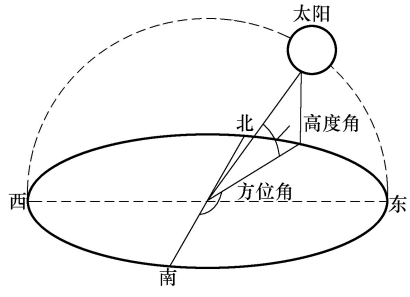


图 2-2　太阳角度的标定

18. 视运动

假定地球是静止的，太阳围绕地球转动。

19. 太阳风

日冕层中的带电粒子脱离太阳的引力飞向宇宙空间，形成带电粒子流，即太阳风。

20. 真太阳时

每天 24h 的概念称为平均太阳时间或标准时间，有了这个假设，人类可以有规律地生活。实际上一年 365 天每一天的长短都是不同的，记录这种时间的系统叫真实太阳时间。每一天长度的计算是两次日照没有影子之间的那个时间，即太阳连续两次通过观察点最高之处之间的确实时间。每天的长短根据太阳与地球之间的距离来确定，与太阳的距离短，地球自转一天的时间就短，与太阳的距离长，地球自转一天的时间就长。一年中最短的时间，只有 23 小时 44 分钟；一年中最长的时间，有 24 小时 14 分钟。

21. 时差 E

真太阳时与平均太阳时之差称为时差，用 E 表示。

22. 子午线

子午线也称为经线，是人类为度量方便和科学研究而假设出来的辅助线。地球上经过地轴的平面与地表相交而成的大圆称为经线圈，经线圈被南、北极点分成的半圆称为经线。英国伦敦格林尼治天文台原址，作为计算经度的本初，定为 0°经线，向东划分 0 ~ 180°为东经度，向西划分 0 ~ 180°为西经度。

23. 东、西半球的划分

原本是以本初子午线（0°经线）和 180°经线作为东西半球分界线的，但是本初子午线将非洲分成了两部分，为了将同一大洲分在同一半球，国际上规定用西经 20°和东经 160°来分界。西经 20°向东走 180°到东经 160°，这半个球是东半球；从东经 160°向东走 180°回到西经 20°，这半个地球是西半球。东经是往东度数增大，往西度数减少；西经是往西度数增大，往东度数减少。有一口诀：

面对西经 20 度，左西半球右东半球；面对东经 160 度，左东半球右西半球。

二、太阳的基本知识

（一）太阳的特性

太阳是距离地球最近的恒星，是银河系的一颗普通恒星，是太阳系的中心天体，是一个热气体（严格说是等离子体）球，其特征如下：

半径：6.96×10^5 km（约为地球直径的 109 倍）。

体积：是地球的 130 万倍。

质量：1.989×10^{30} kg（约为地球质量的 33 万倍）。

温度：5770 K（表面），1500 万 K（核心）。

日地平均距离：14960 万 km（499.005 光秒或 1 天文单位）。

总辐射功率：3.83×10^{26} J/s

平均密度：1.409 g/cm^3。

年龄：约 45.7 亿年。

在银河系内一千多亿颗恒星中，太阳只是普通的一员，它位于银河系的对称平面附近，银道面之北的猎户座旋臂上，距离银河系中心约 26000 光年（1 光年约等于 9.4608×10^{12}km），即沿着距银河系中心 26000 光年的近乎圆形轨道运行。太阳有自转及公转，自转周期在日面赤道带约 25 天，两极区约为 35 天；公转周期约为 2.5 亿年，每 2.5 亿年绕银河系中心公转一周，公转速度为 250km/s。太阳的总体外观性质是，光度为 3.83×10^{26} W，绝对星等为 4.8，黄色 G2 型矮星。由于太阳比其他恒星离我们近得多，其视星等达到 -26.8，成为地球上看到最明亮的天体。太阳因自转而呈轻微扁平状，与完美球形相差 0.001%，赤道半径与极半径相差 6km（地球这一差值为 21km，月球为 9km，木星为 9000km，土星为 5500km），差异虽然很小，但测量这一扁平性却很重要，因为任何稍大一点的扁平程度（哪怕是 0.005%）将改变太阳引力对水星轨道的影响。太阳的质量构成是 71% 的氢、27% 的氦和其他元素占 2%。太阳圆面在天空的角直径为 32 角分。

（二）太阳的形成

恒星也有自己的生命史，它们从诞生、成长到衰老，最终走向死亡。太阳所处主序星阶

段，通过对恒星演化及宇宙年代学模型的计算机模拟，已经历了大约 45.7 亿年，它还可以继续燃烧约 50 亿年。

按星云说理论，45.7 亿年前，在沿着旋涡状银河系的一条旋臂向外延伸很远的地方，一团巨大的气体云在其自身引力作用下不断收缩，在这收缩过程中，气体粒子获得的引力势能通过互相碰撞，转化为粒子的动能，使气体的温度升高，在旋转中，星云质量增大，密度增大，逐渐形成一个圆盘，约 2 万年后，中心部分的温度上升到 10^6K，发生氘（dao，氢的同位素之一）反应，核燃料被点燃，由圆盘变成球体，成为一颗恒星——太阳，氘反应过程可持续 10^5 年左右，即为太阳的少年期；此时，中心温度越来越高，而表面温度则变化不大，以至中心和表面温度相差越来越大，产生的能量以辐射和对流的方式向周围散发，逐步形成一个辐射核心，此时为太阳的青年期；当恒星中心部分的温度上升到 10^7K、中心密度达到约 10^5kg/m^3 时，发生聚变反应（四个氢原子聚变成一个氦原子），太阳进入相对稳定的主序星阶段，此时为太阳的中年期，目前正处于这个时期，年龄大约 45.7 亿年。当经过 10^{10}年，内部的氢燃料接近消耗完毕，氢聚变只能在一个壳层中进行，太阳表面有效温度降低，只有 4500K 左右，而变成红巨星，此时太阳进入了老年期。老年期的太阳中心部分的温度上升到 10^8K 时，氦燃烧后的渣滓又能成为燃料继续燃烧，太阳的体积也将开始不断膨胀，直至将地球吞没，在经过一亿年的红巨星阶段后，由热产生的强烈脉动会抛掉太阳的外壳，形成行星状星云，失去外壳后剩下的只有极为炽热的恒星核，太阳将突然坍缩成一颗白矮星，再经历几亿年，在漫长的时间中慢慢冷却和暗淡，然后在黑暗的宇宙里遨游。这就是中低质量恒星的典型演化过程。太阳在聚变反应过程中，一方面不断在释放核能来维持核聚变条件，另一方面又通过辐射或对流等方式不断地向周围散失能量，只有当聚变反应释放的能量大于向周围散失的能量时，核聚反应才能循环下去。在太阳的核心，每秒能将超过 400 万吨物质转化为能量，生成中微子和太阳辐射，以这个速度计算，太阳形成以来已经将大约 100 个地球质量的物质转化成了能量。图 2-3 为太阳。

（三）太阳的组成

太阳由里向外分别为核反应区、对流区、大气层。图 2-4 为太阳的组成。表 2-1 为太阳各区特性。

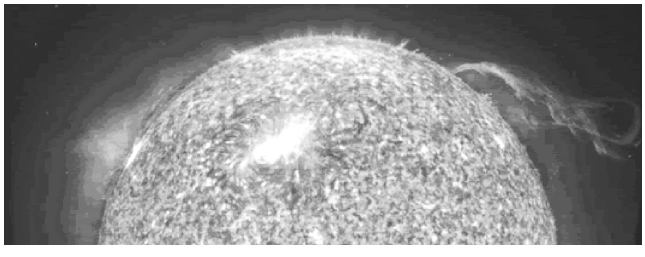


图 2-3　太阳

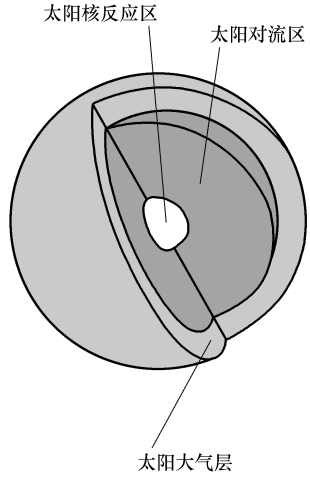


图 2-4　太阳的组成

表 2-1 太阳各区特性

项目	核反应区	对流区	大气层
范围	0 ~ 5.99 × 10^5 km（球体）	5.99 × 10^5 ~ 6.92 × 10^5 km（球壳）	对流区外 500km（球壳）
成分	宇宙原始部分及重元素（氢 70%，氦 28.5%，重元素 1.5%）	等离子体	氢、氦、钙，低电离氢原子
温度	太阳核：1.5 × 10^7 K 辐射区：5 × 10^5 K	5 × 10^3 K	6 × 10^3 K
密度	太阳核：158g/cm^3 辐射区：0.079g/cm^3	10^{-8} g/cm^3	为水的几亿分之一
反应	轻核聚变	湍流、对流传导能量	辐射散发能量

1. 核反应区

太阳的核反应区不停地进行热核反应，所产生的能量以辐射方式向宇宙空间发射，其中二十二亿分之一的能量辐射到地球，成为地球上光和热的主要来源。

2. 对流区

在对流区能量主要靠对流传播，里面的部分观察不到，只能通过理论计算来确定。

3. 大气层

太阳的大气层从内向外分为光球、色球和日冕 3 层。

（1）光球层 光球就是实际看到的太阳圆面，它有一个比较清楚的圆周界线，是大气最低的一层，即一般用白光所观测到的太阳表面（厚度仅 500km 左右）区域，我们接收到的太阳能量基本上是光球发出的，因此太阳的光谱实际上就是光球的光谱。图 2-5 为光球。就可见光以及一部分紫外和红外波段来说，它是一条明亮的连续光谱，连续光谱主要是由负氢离子产生的，在自由电子被氢原子吸附时，释放出多余的能量，这种能量的释放是连续的，因此产生连续光谱。连续光谱的能量在光球中主要靠辐射过程传播，上面叠加着大量的吸收线（即夫朗和费线）。太阳光谱中的夫朗和费线非常多，在 2935 ~ 13495Å（1Å = 10^{-10} m）的范围内共有 26000 多条。它们是由各种元素的原子的吸收或散射引起的。吸收线含有太阳大气（主要是光球）的温度、密度、压力、化学成分、磁场、速度场等信息。吸收线都是原子在吸收光球辐射后由下能态向上能态跃迁产生的 。连续光谱和吸收线都在光球中形成，但是一些强线（如氢的 Ha 和钙的 H）的中心部分是在色球中形成的，这是因为那里的吸收系数很大，光球辐射不能直接射出。至于 1700Å 以下的紫外、远紫外、X 射线以及远红外区和射电波段的辐射，则是由色球和日冕产生的。

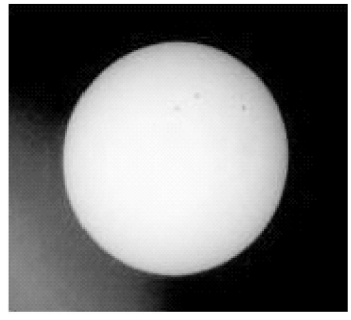


图 2-5 光球

光球各处的温度、压力、密度等物理参数都不相等，因而呈现出一定的结构。由于实际情况十分复杂，只能在一系列简化假设下建立光球的结构模型。常用的假设是：光球为平行平面层，即在同一水平层次各种物理参数都有相同的数值，换句话说，每个参数都只是高度的函数；光球处于流体静力学平衡状态，即没有大规模的物质流动；米粒组织、黑子、光斑等不均匀结构可以一概忽略不计；存在局部热动平衡，因此常用的物理定律 ，如普朗克定

律、玻耳兹曼分布、萨哈公式等，都可以应用；不考虑磁场的影响，等等。经过长期的研究，天文工作者已建立了不少光球结构的模型。

光球的表面是气态的，气体平均密度只有水的几亿分之一。光球厚达500km，极不透明。图2-6为光球表面。按理说，光球气体这么稀薄，应该是非常透明的了，实际上却不然。虽然几厘米的一薄层气体宛如一片轻纱那样透明，但500km厚的气体就像成千上万层轻纱重叠在一起，其效果就像一道墙壁，变成不透明的了。因此，人们难以看到光球层几百千米深度以内的太阳辐射。虽然整个说来光球是明亮的，但各部分亮度却很不均匀，如不考虑活动区和米粒组织，容易看出光球上各部分的亮度是不同的：日面中心区最亮，越靠近边缘越暗。这种现象被称为临边昏暗。如果把天文望远镜对准太阳（千万注意，绝对不能直接用眼睛看，那样会灼伤眼睛，导致失明），将太阳在望远镜中的像用滤光片减弱光亮后，就可以看到光球表面了。这时，太阳圆面的中间部分要比边上亮一些。这就能观察到临边昏暗现象了。通过对临边昏暗现象的观测，可以推导出光球的温度分布。图2-7为临边昏暗。

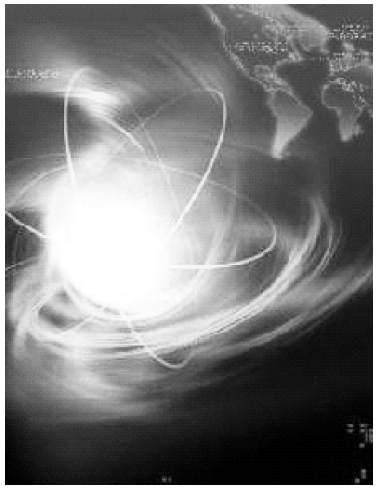


图2-6　光球表面

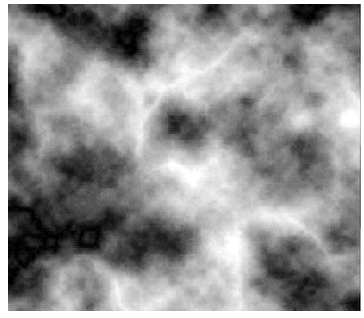


图2-7　临边昏暗

在光球层的表面有的明亮有的深暗。这种明暗斑点是由于这里的温度高低不同而形成的，比较深暗的斑点叫做太阳黑子，比较明亮的斑点叫做光斑。偶尔还有白光耀斑，它们的亮度、物理状态和结构都相差悬殊。

太阳圆面中间部分发出来的光，是从太阳较深处发射出来的，而太阳圆面边缘发射来的光则是从太阳较浅、温度较低的大气层中发出的。光球的温度随高度而不同，从内部向外，温度逐渐降低。在光球与色球的交界处，温度降到最低值，只有4000多摄氏度，但接着又逆升，在日冕中竟高达上百万摄氏度。光球的物质密度约为$10g/cm^3$，气体压力大致等于$10^{-4}N/cm$。光球上层的温度只有4500多摄氏度，越往下，温度就越高，到光球底层，约达到6000多摄氏度。

在光球还分布着米粒组织、太阳黑子和光斑。这些活动现象有着相差悬殊的亮度、物理状态和结构。

1）米粒组织。光球上密密麻麻地分布着极不稳定的斑斑点点，被称为米粒组织，如图

2-8 所示。米粒组织是太阳光球层上的一种日面结构，呈多角形小颗粒形状。米粒组织的温度比米粒间区域的温度约高 300℃，因此显得比较明亮易见。虽说它们是小颗粒，实际的直径也有 1000～2000km。如果用高速摄影机为这些米粒拍摄一部影片，在银幕上可以看到它们的种种“舞姿”，老的米粒组织消逝的同时，新的米粒组织又在原来位置上很快地出现，这种连续现象就像我们日常所见到的沸腾米粥上不断上下翻腾的热气泡。它们变化很快，几分钟以后，就被新的“米粒”取代了，非常壮观。米粒向上运动的速度达 0.5km/s。有人认为米粒在日面上有不规则移动，速度为 4km/s 左右。米粒组织可能是光球下面气体对流产生的现象。天文学家估计日面上的米粒总数约有几百万个。米粒的迅速移动说明米粒组织是从光球层下面升起来的气流，表明了光球实际上是其下面的、沸腾的太阳对流层的顶部。另外，还有超米粒组织，其直径与寿命要大得多。

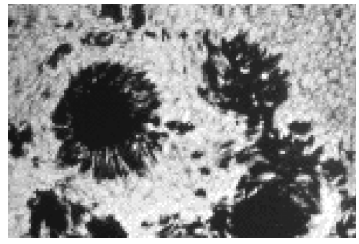


图 2-8　米粒组织

2）太阳黑子。在光球上常常可以看到很多黑色斑点，它们叫做太阳黑子。4000 年前古时候祖先肉眼都看到了像 3 条腿的乌鸦的黑子，太阳黑子在日面上的大小、多少、位置和形态等，每天都不同。太阳黑子是光球层物质剧烈运动而形成的局部强磁场区域，也是光球层活动的重要标志。图 2-9 为太阳黑子。这些太阳黑子是光球层上的黑暗区域，它的温度大约为 4500K，而光球其余部分的温度约为 6000K。倘若能把黑子单独取出，一个大黑子便可以发出相当于满月的光芒。但在明亮的光球反衬下，就显得很黑。发展完全的黑子是由较暗的核（本影）和围绕它的较亮部分（半影）构成的，形状像一个浅碟。黑子是光球层上的巨大气流旋涡，大多呈现近椭圆形，太阳黑子是太阳活动的最明显标志之一。太阳黑子的突出特点是具有强大的磁场，范围从小太阳黑子的 500Gs（高斯）到大太阳黑子的 4000Gs 不等。日面上黑子出现的情况不断变化，这种变化反映了太阳辐射能量的变化。太阳黑子的变化存在复杂的周期现象，平均活动周期为 11.2 年。长期观测太阳黑子就会发现，有的年份黑子多，有的年份黑子少，有时甚至几天到几十天日面上都没有黑子。黑子最多的年份称为太阳活动极大年，最少的年份称为太阳活动极小年。天文学家们早就注意到，太阳黑子从最多或最少的年份到下一次最多或最少的年份，大约相隔 11 年。也就是说，太阳黑子有平均 11 年的活动周期，这也是整个太阳的活动周期。天文学家把太阳黑子最多的年份称为太阳活动高峰年，把太阳黑子最少的年份称为太阳活动低峰年。

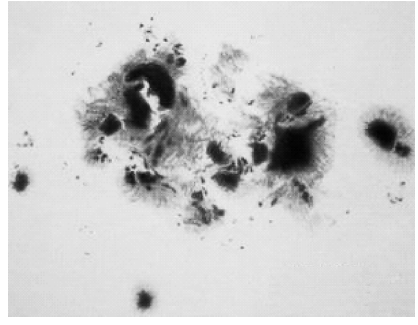


图 2-9　太阳黑子

3）光斑（耀斑）。光球上还有一些比周围更明亮的区域，叫光斑。它与黑子常常相伴，也是一种最剧烈的太阳活动。一般认为发生在色球层中，所以也叫色球爆发。其主要观测特征是，日面上（常在黑子群上空）突然出现迅速发展的亮斑闪耀，其寿命仅在几分钟到几十分钟之间，亮度上升迅速，下降较慢。特别是在太阳活动峰年，光斑出现频繁且强度变强。光斑对地球空间环境造成很大影响。太阳色球层中一声爆炸，地球大气层即刻出现缭绕余音。光斑常在太阳表面的边缘“表演”，却很少在太阳表面的中心区露面。因为太阳表面

中心区的辐射属于光球层的较深气层，而边缘的光主要来源于光球层较高部位，所以光斑比太阳表面高些，可以算得上是光球层上的“高原”。此外，光斑对气象和水文等方面也有着不同程度的直接或间接影响。正因为如此，人们对光斑爆发的探测和预报的关切程度与日俱增，正在努力揭开光斑的奥秘。

4）太阳上的化学元素。通过太阳光谱线的证认，可以定性地知道太阳上有哪些化学元素，但还应定量地测出太阳上各种元素的含量。定量研究的经典方法是生长曲线法。这条曲线表示某一元素的谱线的等值宽度与产生该谱线起始跃迁能态的原子数之间的关系。在已知生长曲线的情况下，只需由观测的谱线轮廓求出等值宽度，便可得到相应的原子数。由同一元素的若干条谱线求得一系列相应的原子数，从而求和得出该元素的原子总数。对一系列元素进行这样的工作，便可测定太阳的化学成分。有一种新的方法是光谱综合法。它的主要内容是采用包括化学含量在内的一系列物理参数，计算一定波长范围内所有谱线的轮廓，并与观测进行对比，如果不尽符合，就调整化学含量或其他参数，直到比较符合为止。表 2-2 为太阳光球的化学成分。该表列出了光球中各种元素的相对含量 A 的常用对数。表中没有列出氦的含量，因为光球光谱中没有氦线。但通过色球和日珥的光谱研究，得出氦和氢的含量比为 63∶1000。太阳大气各层由于经常处于运动状态，化学成分应当基本一致。因此，这个数字也可代表光球的氦含量。

表 2-2　太阳光球的化学成分

原子序数	元素	lgA	原子序数	元素	lgA
1	H	0.00	22	Ti	−7.26
3	Li	−11.40	23	V	−7.90
4	Be	−10.94	24	Cr	−6.30
5	B	−9.20	25	Mn	−6.80
6	C	−3.43	26	Fe	−4.60
7	N	−3.94	27	Co	−7.50
8	O	−3.17	28	Ni	−5.72
9	F	−7.44	29	Cu	−7.55
10	Ne	−4.55	30	Zn	−7.58
11	Na	−5.76	31	Ga	−9.16
12	Mg	−4.46	32	Ge	−8.68
13	Al	−5.60	37	Rb	−9.37
14	Si	−4.45	38	Sr	−9.18
15	P	−6.57	39	Y	−10.38
16	S	−4.79	41	Nb	−9.70
17	Cl	−6.35	42	Mo	−10.10
18	Ar	−5.27	44	Ru	−10.43
19	K	−6.95	45	Rh	−10.45
20	Ca	−5.67	46	Pd	−10.43
21	Sc	−8.93	47	Ag	−11.33

（续）

原子序数	元素	lgA	原子序数	元素	lgA
48	Cd	-10.03	68	Er	-11.24
49	In	-10.29	69	Tm	-11.57
50	Sn	-10.29	70	Yb	-11.19
51	Sb	-11.25	71	Lu	-11.16
55	Cs	-10.21	74	W	-9.43
56	Ba	-10.20	76	Os	-11.25
57	La	-10.19	77	Ir	-9.79
58	Ce	-10.36	79	Au	-11.68
59	Pr	-10.37	80	Hg	-9.00
60	Nd	-10.18	81	Tl	-11.80
62	Sm	-10.34	82	Pb	-10.13
63	Eu	-11.51	83	Bi	-11.20
64	Gd	-10.88	90	Th	-11.18
66	Dy	-10.89	92	U	-11.40

（2）色球层　紧贴光球以上的一层大气称为色球层，平时不易被观测到，过去这一区域只是在日全食时才能被看到。当月亮遮掩了光球明亮光辉的一瞬间，人们能发现日轮边缘上有一层玫瑰红的绚丽光彩，那就是色球。图 2-10 为玫瑰色的色球层。

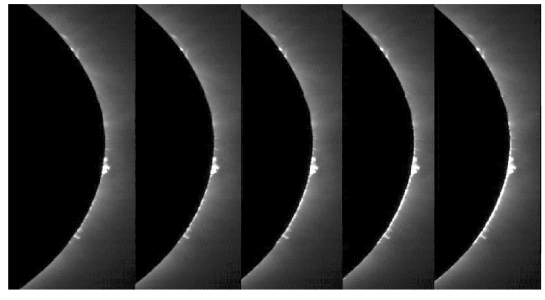


图 2-10　玫瑰色的色球层

色球层厚约 8000km，它的化学组成与光球基本上相同，但色球层内的物质密度和压力要比光球低得多。日常生活中，离热源越远处温度越低，而太阳大气的情况却截然相反，光球顶部接近色球处的温度差不多是 4300℃，到了色球顶部温度竟高达几万摄氏度，再往上，到了日冕区温度陡然升至上百万摄氏度。人们对这种反常增温现象感到疑惑不解，至今也没有找到确切的原因。在色球上人们还能够看到许多腾起的火焰，这就是天文上所谓的日珥。日珥是迅速变化着的活动现象，一次完整的日珥过程一般为几十分钟。同时，日珥的形状也可说是千姿百态，有的如浮云烟雾，有的似飞瀑喷泉，有的好似一弯拱桥，也有的酷似团团草丛，真是不胜枚举。天文学家根据形态变化规模的大小和变化速度的快慢将日珥分成宁静日珥、活动日珥和爆发日珥三大类。最为壮观的要属爆发日珥，本来宁静或活动的日珥，有时会突然“怒火冲天”，把气体物质拼命往上抛射，然后回转着返回太阳表面，形成一个环状，所以又称为环状日珥。

（3）日冕　黑暗的太阳外围是银白色的光芒，像帽子似地扣在太阳上，因此称为日冕。简单来说，日冕是一个结构，是太阳最外围大气，厚度达到几百万公里以上（广义的日冕可包括地球轨道以内的范围）；日珥则是在太阳的色球层上产生的一种非常强烈的太阳活动，是一种现象、一种活动。平时要观测日冕，需要用特别的日冕仪。日冕的范围很大，用日冕仪只可以观测到接近太阳表面的那部分日冕，一般叫做内冕。它的边界离太阳表面约有

3 个太阳半径那么远，或者说约为 200 万 km。在此以外的日冕叫做外冕，它向外延伸到地球轨道之外。日冕的物质非常稀薄。内冕密度稍微大一些，但它的密度也低于地球大气的十亿分之一，几乎接近真空。日冕的形状很不规则，有时候呈圆形，有时候呈扁圆形，结构也很精细，在太阳赤道四周有很多向外流动的“冕流”伸向远处，太阳极区则有一些纤细的羽毛状的“极羽”。

2002 年 5 月 15 日，美国航空航天局公布了一张日冕环景象的照片。这一壮观景象是因太阳磁场增强并穿过光球层和色球层，影响到日冕层产生的。增强后的磁场控制日冕层的离子流并呈现拱形或环形的管状形态。日冕环形态多样，大多数体积巨大，其跨度往往超过数个地球。

当发生日全食时，月亮会在太阳表面投下一个被灰蓝色光环围绕着的圆盘状阴影，这一灰蓝色的圆环即为日冕，它常被描写成异常绚丽的飘带。起初，天文学家们还无法确定这种灿烂的光芒到底是来自太阳还是月亮，但他们很快就找到了答案，即来自太阳。

所谓“日冕”的光芒实际上来自于太阳的外部大气层，其亮度只有太阳本身的百万分之一，因此只能在发生日食时才能被看到。日冕产生的光辉只有整个月球反射太阳光的一半，在发生日食时，正是日冕发出的光芒才未使整个世界陷入一片黑暗。

1931 年，法国天文学家博纳德弗第南德李奥特发明了日冕仪，这一发明使人们在阳光普照时也能够对日冕产生的光线进行观测。在这一仪器的帮助下，我们最终发现日冕是太阳的一部分。

当时，人们在对日冕进行研究时发现，日冕产生的谱线并不属于光谱中的某一范围。1868 年，法国天文学家皮埃尔 J. C. 詹森在印度对一次日食进行观测时，曾对日冕谱线进行了记录，并将记录寄给了英国天文学家约瑟夫诺曼洛克伊尔，他是一位公认的光谱学专家。通过认真的研究，洛克伊尔认为这些谱线意味着在太阳大气中存在一种未知的新元素，他将其命名为“氦”，这个称谓在希腊语中意思是“太阳”，也就是“太阳中含有的元素”的意思。不过，这论断没过多久就被推翻了。1895 年，苏格兰化学家威廉姆雷姆塞发现在地球上同样存在“氦”。而“氦”是已知的唯一一种最先被发现于地球以外的天体上的元素。

日冕还产生其他一些奇特的谱线，但这并不意味日冕中还存在什么未知的元素。反之，这些谱线说明日冕中所含元素的原子中都含有不同数量的电子，而在高温条件下，某些电子将脱离原子的束缚。1942 年，瑞典物理学家本杰特爱德兰认为日冕中的某些特殊谱线是铁、碳和镍原子在失去电子的情况下产生的。日冕的温度很高，其数值达百万数量级，这并非臆想，而是以日冕发射的高能量 X 射线为依据的。不过，这种超高温仅仅集中在日冕的个别原子中，而且这些原子广泛分布于整个日冕中，其热量总和并不高。

日冕并没有突出的边缘，而是不断延伸，逐渐与整个太阳系融为一体，并在延伸的过程中逐渐减弱，直至对行星的运动无法构成任何可观的影响为止。太阳蕴含的热量将驱使带电粒子沿不同方向向太阳外部迸射，向外膨胀运动，使得热电离气体粒子连续地从太阳向外流出而形成太阳风。太阳风是一种连续存在，来自太阳并以 200 ~ 800km/s 的速度运动。这种物质虽然与地球上的空气不同，不是由气体的分子组成，而是由更简单的比原子还小一个层次的基本粒子——质子和电子等组成，但它们流动时所产生的效应与空气流动十分相似，所以称它为太阳风。太阳风的作用使各彗星的尾部均指向背离太阳的方向。同时，构成太阳风的带电粒子还会不断撞击各个行星，而且如果行星上具有南北极（正如地球上那样），那么带电粒子将由其北极向南极运动。

日冕的温度非常高，可达 200 万℃。不可思议的是，离太阳中心最近的光球，温度是几千摄氏度。稍远些的色球，温度从一万摄氏度到几万摄氏度。而距离太阳中心最远的日冕，温度竟然高达百万摄氏度。这一反常的现象意味着什么，科学家们目前还未找到合理的解释。

日冕物质抛射一般在几分钟至几小时内，从太阳向外抛射的一团日冕物质，剧烈地改变了日冕在白光波段的宏观形态，以及相应的磁场位形。观测上定义日冕物质抛射为，日冕仪在天空投影平面内遮光板以外所观测到的向外传播的日冕亮结构。通过近年来的研究，越来越多研究者倾向于把光斑和日冕物质抛射联合起来地看待，即认为它们是同一过程（太阳大气中的磁重联过程）在太阳不同层次上的具体反映。

太阳看起来很平静，实际上无时无刻不在发生剧烈的活动。传统上讲，太阳分为活动太阳和宁静太阳两部分。现在的研究发现，宁静太阳也是存在太阳活动的，只是尺度较小。太阳表面和大气层中的活动现象，主要有三种，即活动日珥、光斑和日冕物质抛射。后两者抛射出大量的等离子体和磁场结构以及能量，使太阳风大大增强，造成许多地球物理现象，例如极光增多、大气电离层和地磁的变化。太阳活动和太阳风的增强还会严重干扰地球上无线电通信及航天设备的正常工作，使卫星上的精密电子仪器遭受损害，地面电力控制网络发生混乱，甚至可能对航天飞机和空间站中宇航员的生命构成威胁。因此，监测太阳活动和太阳风的强度，适时作出“空间气象”预报，越来越显得重要。图 2-11 为太阳的结构。

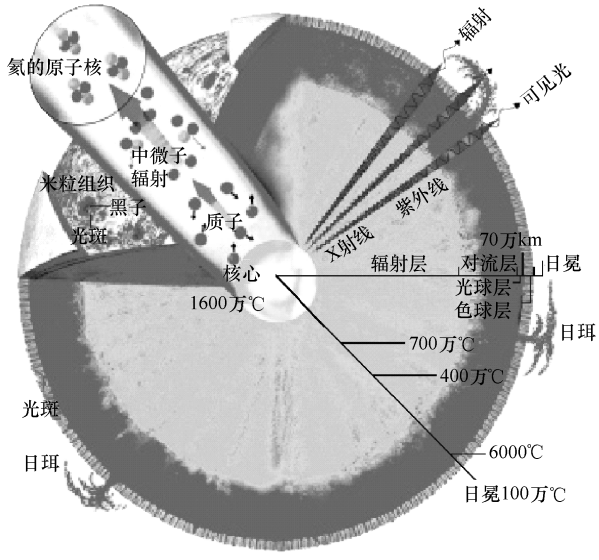


图 2-11　太阳的结构

（四）太阳光

1. 太阳光的特性

1666 年英国物理学家牛顿做了人类首次用三棱镜分离太阳光束的实验，将太阳光分解为光谱，由此证明，真正的太阳光不是红绿蓝 3 种颜色，也不是 7 种颜色，而是由从红外到紫外之间的所有连续波长的光波组成的，如果非得说有多少种颜色，那就是无穷多种。而太阳的白光是由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光组成的，我们可以做个实验，在一个房间里放上各种各样的花卉，当太阳光照进来时，我们会感到满眼五彩斑斓。然后，我们拉下窗帘，房间里立刻漆黑。此时，当我们打开红灯时，我们仅会看到红花，因为只有红花反射红光，其他花的颜色都将红光吸收了。同样，打开黄灯时，我们只会看到黄花。做完这个实验，我们就会得出这样一个结论，只有集各种单色光于一体的太阳光照射时，我们才会感受绚丽，才会看到全部色彩。

英国天文学家威廉·赫歇尔在太阳光中发现了红外线。1824 年，夫琅禾费发现了太阳

光谱中的谱线，1868 年又在太阳光谱中发现了一种新的元素，取名为氦（helium，意为太阳神），次年又发现了新的谱线，认为是另外一种元素，定名为 coronium，后证明这只是普通元素的高电离态谱线。1908 年，美国天文学家海耳发现黑子具有很强的磁场。1930 年发明了日冕仪，使得随时观测日冕成为可能。1938 年，汉斯·贝特提出了恒星内部质子-质子链反应和碳氮氧循环两种核反应过程，阐明了太阳的能源机制。20 世纪 70 年代以来，空间天文的迅速发展大大促进了对太阳的研究。1971 年，OSO-7 卫星观测到了日冕物质抛射，1975 年 Deubner 奠定了日震学的基础。美国的天空实验室搭载的 X 射线望远镜观测了太阳的 X 射线辐射。1980 年 SMM 卫星首次在硬 X 射线波段对光斑进行了成像。1990 年，美国发射了尤里西斯号探测器观测太阳的极区。其他太阳观测卫星还有美国 1995 年发射的 SOHO 卫星、1998 年发射的 TRACE 卫星、2002 年发射的 RHESSI 卫星、2006 年发射的 STEREO 卫星，日本 1991 年发射的阳光卫星（Solar-A）、2006 年发射的日出卫星（Solar-B）等。

到了 20 世纪 70 年代，气象观测站增多了，人们发现撒哈拉大沙漠东部阳光最多，那里年平均日照时数达 4300h，也就是说，每天大约有 11 小时 45 分钟的时间能见到阳光。撒哈拉大沙漠东部为什么日照会如此之多呢？因为这里是世界上最干燥的地方，没有能遮住阳光的云层；加上这里纬度低，日照时间长，因而成了世界上阳光最多的地方。

太阳光照角度运动规律：在同一天里，太阳从东边升起，西边落下，中午 12 时升至最高点，但是太阳并不是每天都从正东升起，正西落下，在不同的季节里，日出、日落的方向变化较大。四季变化规律：地球如陀螺自转的同时绕太阳公转，因地轴与公转轨道面有一倾角 67.5°，与轨道面垂线夹角 23.45°，使地球上有了四季、昼夜。

太阳光是由于太阳发生热核聚变反应产生强烈光辐射，核反应“燃烧”发出的光，经很长的距离射向地球，再经大气层过滤后到地面，它的可见光谱段能量分布均匀，所以是白光。太阳光是最重要的自然光源，当光线随时间的推移以及天气发生变化时，都会直接影响物象的色彩。太阳由各种光源发出的光，光波的长短、强弱、比例的不同，形成不同的色光，称为光源色。

光具有“波”的性质。比如说，水面波、沿绳索传播的波，还有声波等，都是波。光谱中所包含的各种色光之所以显示不同的颜色，其实是它们的“波长”不相同的缘故。所谓波长，是指一列波的波峰（波的最高点）与波峰之间或者波谷（波的最低点）与波谷之间的距离。太阳光分为可见光和不可见光。可见光是指肉眼看到的，如太阳光中的红、橙、黄、绿、青、兰、紫七色彩虹光；不可见光是指肉眼看不到的，红外线和紫外线都是人眼看不见的光，但是它们也是太阳光中所包含的光。

到达地球大气上界的太阳辐射能量称为天文太阳辐射量。

图 2-12 为太阳光波长。地球大气上界的太阳辐射光谱的 99% 以上在波长 0.15～4.0μm 之间。大约 50% 的太阳辐射能量在可见光谱区（波长为 0.4～0.76μm），7% 在紫外光谱区（波长 <0.4μm），43% 在红外光谱区（波长 >0.76μm），最大能量在波长 0.475μm 处。红外线的波长是 0.77～1000μm，分近红外线、中红外线、远红外线等，其中远红外线波长为 2.5～30μm，占红外线光波的 20% 左右，靠近红光的光所含热能比例较大，紫光所含热能比例小。就光显现的颜色而言，按照红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的顺序，光的波长依次越来越短。经过光的透射、折射、反射及物体的吸收，仅剩很少的一部分还维系着地球上一切生物的生存，包括人类的成长和生命的延续，因此远红外线被称为“生育光线”。由于太阳

辐射波长较地面和大气辐射波长（约 3 ~ 120μm）小得多，所以通常又称太阳辐射为短波辐射，称地面和大气辐射为长波辐射。

太阳活动和日地距离的变化等会引起地球大气上界太阳辐射能量的变化。地球上除原子能和火山、地震以外，太阳能是一切能量的总源泉。

太阳光是可见光波段内的电磁波，当太阳光被物体吸收时，光能就转换为热能。该热能被水吸收后，水温就升高，这就是太阳能热水器能够热水的前提条件。黑色物体吸收光最多，灰色物体吸收光较少，白色或镜面反射物体吸收光最少。

除了太阳光之外，还有其他各种光源，例如我们日常生活中使用的灯光，它是人工光源，比阳光弱得多，而且所含的可见光比例也和阳光不同。一般白炽灯发出的光常偏红、黄色光，而荧光灯发出的光则偏蓝色光。

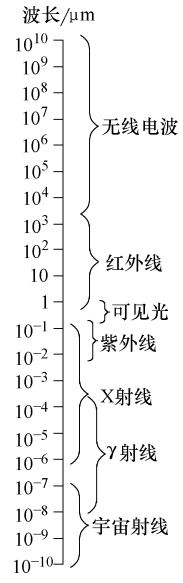


图 2-12　太阳光波长

2. 太阳光对日常生活的影响

1）太阳每时每刻都在向地球传送着光和热，有了太阳光的照耀，使整个世界姹紫嫣红，才使地面富有生气；疾风劲吹，江水奔流，花开果熟，万物生生不息。有了太阳光，地球上的植物才能进行光合作用。植物的叶子大多数是绿色的，因为它们含有叶绿素。叶绿素只有利用太阳光的能量，才能合成种种物质，这个过程就是光合作用。据计算，整个世界的绿色植物每天可以产生约 4 亿吨的蛋白质、碳水化合物和脂肪，与此同时，还能向空气中释放出近 5 亿吨的氧，为人和动物提供了充足的食物和氧气。

2）直射的阳光过于明亮而使人不舒服，特别是在直射阳光下阅读白色报纸的时候有可能造成永久性的视觉损伤，为了减轻阳光的照射强度，可以戴太阳镜；汽车、头盔、帽子也装备了护目镜等遮挡物来阻碍阳光从低角度直接射入眼睛。在一些较冷的国家，大多数人更喜欢阳光相对灿烂的日子晒太阳取暖。在热一些的国家，人们更愿意待在屋内保持清凉，利用遮光帘、遮阳篷、百叶窗或窗帘以阻挡阳光进入室内；如果外出，也喜欢待在树或阳伞等遮挡的荫凉下。

3）日光浴是一项流行的休闲活动，人直接坐在或躺在阳光下来享受阳光。人们通常在舒适而阳光充足的地方进行日光浴。一些包括海滩、露天游泳池、公园、花园、人行道、咖啡馆等在内的公共场所是公认的日光浴去处。日光浴者通常只穿少量的衣服或穿泳衣。另外，在裸体主义流行地区，一些日光浴者更喜欢一丝不挂地享受阳光。对于许多非黑种人来说，日光浴的主要或附加作用是使他们的肤色变深一些（晒成一身古铜色），这在一些文化中被认为是经常户外运动、经常度假的结果，因此被认为是美丽而健康的。一些人喜欢裸体日光浴的另一个原因是他们希望全身均等地接受阳光的照射。在井下长期作业的矿工，日光浴可使其恢复和保持健康，因而日光浴一度成为一种时尚。皮肤颜色变深的本质原因是皮下黑素细胞中的黑色素增多，而这是身体结构对过度紫外线（来自太阳或人造太阳灯）的自然反应。因此，一旦人不再暴露在这些紫外线下，随着时间的流逝，黑色就会逐渐消失。黑色或较暗肤色的人则表现着一种从他们远古祖先（居住在热带地区，例如非洲）那里得来的进化优势。晒太阳不能过度，过度晒太阳对头发有损害，还会导致皮肤粗糙。太阳光线里

含有一定量的紫外线成分，当皮肤长时间暴露在紫外线下，皮肤容易被烧伤，更严重者还可引起皮癌。阳光照在我们的皮肤上，会使皮下血管扩张，血流旺盛，增加有毒物质的排泄和抵抗力，还会使唾液和胃液的分泌增加，肠胃蠕动加强，促进食欲和消化。皮肤还能在阳光的照射下，将一些化学物质，如麦角醇、胆固醇等，制造出维生素 D。这种维生素以及钙和磷，是我们骨骼的重要成分，少了它们，就会得软骨病。阳光对小孩子来说更是重要，因为他们正在快速地成长发育中，而骨骼是支持全身的重要角色，一旦缺乏阳光让身体形成维生素 D，那么小孩的发育一定会产生严重的问题。

4）地球上的能源直接或间接依靠日光供给，绿色植物可转日光能成化学能，而植物可为动物所食用，草食性动物又被肉食性动物所食用，于是基于营养的关系而将环境中的各种生物联系起来，成为食物链。

5）阳光中的紫外线有很强的杀菌能力，一般细菌和某些病毒在阳光下晒半小时或数小时，就会被杀死。

三、日地运动

1. 日地关系

在太阳系中，八大行星以不同的公转速度和自转速度围绕太阳运动，而太阳又以 250/km/s 的公转速度带动着整个太阳系围绕银河系公转和自转。地球在围绕太阳公转时具有一定的运动轨道（速度为 30km/s），平均轨道半径为 1.5 亿 km。地球的运动轨道是以太阳系中的太阳作为参照对象建立的，并非是地球在宇宙空间中的真实运动路线。地球在围绕太阳运动的同时，太阳也在围绕银河系运动，这就使地球在空间中的运动路线不可能是重复路线，即不可能形成圆周形轨道。根据地球和太阳相对运动的形式，把地球的运动路径称为地球运动轨迹是具有科学性、合理性、真实性的。既然地球的运动路线不是圆周形，那么地球的运动路线又是什么形状呢？

从整体讲，地球既要以 30km/s 的速度沿自己的公转路径运动，还要以 250km/s 的速度沿着太阳公转路径相对运动。从个体讲，太阳的公转速度是 250km/s，地球的公转速度是 30km/s，它们各自在自己的公转路径上运动。太阳在自己的公转路径上大约运动 2.5 亿个地球年才回到原来的相位上，也就是一个太阳年相当于 2.5 亿个地球年。那么太阳在一个地球年中所运行的路径约为 78.84 亿 km，它相对于一个太阳年所运行的路径（1791000 万亿 km）是极其微小的。所以，把太阳在一个地球年运行的路径近似为一条直线。

太阳公转速度为 250km/s，它一天运行的距离为 2160 万 km。地球公转速度为 30km/s，它一天运行的距离为 259.2 万 km。经过计算，可以绘出地球一天运动的轨迹及一年中的运动轨迹。地球运动轨迹是一个不交、不叠、不完全螺旋形。同样可以绘制日水、日金……日海在太阳系中的运动轨迹图。如果把它们叠加在一起，就是一个完整的太阳系八大行星运动轨迹图。

日地距离随着地球运动向位上的变化而变化，其最大值约为 15210 万 km，最小值约为 14710 万 km。

从日地运动轨迹图可知，地球在围绕太阳公转时，随着公转向位上的变化，使日地距离也在发生变化，即形成近日点和远日点。那么，近日点、远日点又是如何产生的？近日点、远日点是基本不变的，数亿年来也是如此，地球的近日点、远日点并非是其他星体造成的。它主要是受星系公转速度力的影响而产生的。假设太阳只自转，不公转，地球在围绕太阳公

转的路径上不可能存在近日点、远日点。那么，太阳公转时地球又如何产生近日点、远日点呢？地球在太阳系中不仅受到太阳自转产生的公转速度，而且还受到整个太阳系公转速度影响着。地球在星系中就好比一个人拿着链球，一边旋转，一边在奔跑。当链球旋转到身后的时候，手上的拉力增大，即链球的向心力就增大。当链球旋转到身前的时候，手上的拉力减小，即链球的离心力就增大。现在分析，地球在日地轨迹图中，运动到太阳后面的时候，地球除受到太阳引力 G 的作用外，还受到星系速度力 V 的影响，即向心力增大，使地球在逐渐靠近太阳，并形成近日点。当地球运动到太阳前面的时候，同样地球除受到太阳引力 G 的作用外，还受到星系速度力 V 的影响，即离心力增大，使地球逐渐远离太阳，并形成远日点。所以说，地球近日点、远日点是由太阳系具有的公转速度力造成的。

日地轨迹图和太阳系星体轨迹图能及时反映星体在空间的运动轨迹和运动位置。

地球始终以自身的地轴由西向东自转，每转一圈为一昼夜，或称一个太阳日，对应太阳时 24h，我们看到太阳每天早上从东方升起，傍晚从西方落下，地球自转同时，还要沿着一个椭圆形轨迹绕太阳公转，转一圈一年，一年中每个太阳日长短不一，最长的与最短的相差 51s，所以太阳时不能作为时间标准供人们使用。另外，由于地球不停地自转，使每一时刻世界各地的时间都不相同，它们之间的差值取决于两地经度之差，与纬度无关。国际协议规定，整个地球经度每 15°差为一个时区，共分 24 时区，以英国伦敦格林尼治天文台所在子午线处的太阳时作为世界钟表时间的标准，称之为世界时。我国版图东西方向经度共占 63°（东经 72°～135°），我国采用东经 120°经圈上的钟表作为全国的标准时间，称之为北京时间，北京时间比世界时提前 8 小时。由于北京地区处于东经 116°19′，所以标准的北京时间比实际的北京地区的钟表时晚 15min。但如以一年为周期，太阳时和钟表时的总时间是一样的，只是太阳时遵循地球自转和公转规律非均匀分布，而钟表时均匀分布而已。

2. 日地关系的确立

为了准确地表达日地关系，人们以不同的参照物为原点，设定了地理坐标、天球坐标、黄道坐标、银河坐标等，其中天球坐标又分为赤道坐标、水平坐标及黄道坐标。本书介绍地理坐标和天球坐标。

（1）地理坐标　地理坐标以地球地心为原点，以地球的自转轴为中心轴（地轴），用纬度和经度来表明地球表面上该点的位置。

1）南极、北极：地轴与地球表面的两个交点。

2）赤道。以地心为原点，作垂直地轴的圆周线，称为地球赤道，赤道面将地球分为南半球和北半球。

3）纬度。由地球上任意点作平行于赤道的圆周线，称为地理坐标的纬度线，纬度线上任意点指向地心的铅直线与赤道面间的夹角称为该纬度线的纬度。赤道的纬度为 0°，北极纬度分别为南纬 90°和北纬 90°。

4）经度。由地球上任意点过南北极，作垂直于赤道的圆周线，称为地理坐标的经度线（又称为子午线）。国际上规定，英国伦敦格林尼治天文台所在子午线的经度为 0°，由此称之为初子午线，而其他经度线的平面与初子午线平面的夹角称为该经度线的经度（L）。初子午线将地球分为东经和西经（各 180°）。

（2）天球坐标　天球坐标表明太阳所处位置。天球是人们站在地球表面，仰望天空四周无限远处所确定的一个假想球面，太阳就在这球面上作周期运动。天球也以地球的地心作

为球心，它实质就是套在地球外面的一个以日地平均距离为半径的同心大球。所以天球坐标许多物理量都和地理坐标物理量相对应，只是针对的球面不同而已，例如赤道→天赤道、南北极→南北天极、地轴→天轴、纬度→赤纬度、子午线→天子午线等。天球坐标又分为赤道坐标、水平坐标及黄道坐标。天球坐标用来标明太阳所处的位置。

1）赤道坐标：以天赤道与天子午圈的交点为原点，以天赤道为水平基本圆，以天极 P 为基本极；太阳位置用时角和赤纬度这两个相互垂直的角度标定。图 2-13 为赤道坐标。

2）地平坐标：以天子午线和真地平线的交点为原点，以真地平线为水平基本圆，以天顶 Z 为基本极；太阳位置用太阳天顶角（或太阳高度角）、太阳方位角这两个相互垂直的角度标定。图 2-14 为地平坐标。

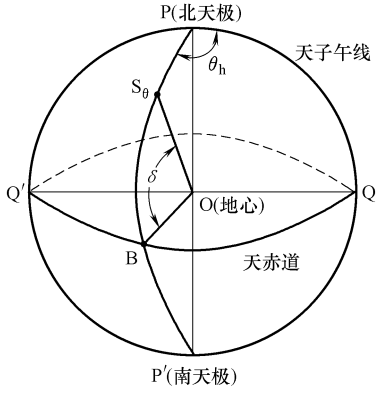


图 2-13　赤道坐标

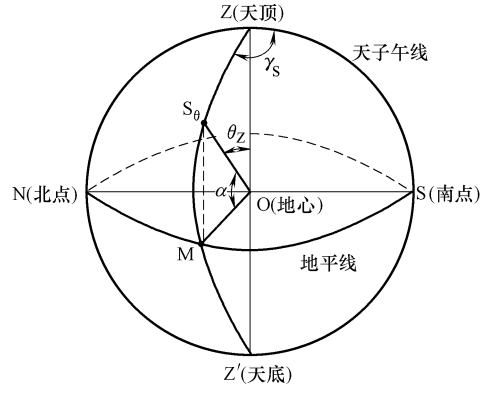


图 2-14　地平坐标

3. 日地关系计算

对于任意观察点，求太阳高度角和太阳方位角时把两种坐标结合起来比较方便。下面是天球坐标中特定的物理量：

1）时角 ω：太阳中心点到地心的连线与天子午线之间的夹角。太阳正午时刻时角为 0。

2）赤纬角 δ：地心和太阳中心的连线与其天赤道平面投影之间的夹角，是反映地球绕太阳公转规律的角度变量。

$$\delta = 23.45° \sin\left(360° \times \frac{284 + n}{365}\right) \tag{2-1}$$

式中　δ——赤纬角；

n——距离 1 月 1 日的天数。

3）太阳天顶角 θ_Z：地心到太阳中心连线与地心到天顶连线之间的夹角。

4）太阳高度角 α：地心到太阳中心连线与其在地平面上的投影线之间的夹角。

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \tag{2-2}$$

式中　α——太阳高度角；

φ——当地地理纬度；

ω——时角，正午为 0，上午为正，下午为负，每小时 15°，每分钟 15′，每秒钟 15″。

5）太阳方位角 A_s：通过地心的南北连线与地心到太阳中心连线在地平面上的投影线的夹角。

$$\sin A_s = \frac{\sin\omega\cos\delta}{\cos\alpha} \tag{2-3}$$

4. 昼长 T_d

昼长（h）计算公式为 $$T_d = \frac{2}{15}\arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \tag{2-4}$$

例 2-1 计算 36.33°N、95.22°E（格尔木）处，5 月 20 日上午 10 时的太阳高度角、方位角、日出日落时间及其方位角。

解：（1）已知条件

1）天数 n

从 1 月 1 日算起，1 月 31 天，2 月 28 天，3 月 31 天，4 月 30 天，5 月 20 天，相加得 $n = 140$ 天。

2）时角 ω

$12\text{h} - 10\text{h} = 2\text{h}$，$2 \times 15° = 30°$，$\omega = 30°$（上午为正，下午为负，每小时 15°）。

3）赤纬角 δ

由式（2-1）得

$$\delta = 23.45°\sin\left(360° \times \frac{284 + n}{365}\right)$$
$$= 19.93°$$

4）纬度 $\varphi = 36.33°$。

（2）太阳高度角 α

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega$$
$$\sin\alpha = \sin36.33°\sin19.93° + \cos36.33°\cos19.93°\cos30°$$
$$= 0.592 \times 0.341 + 0.806 \times 0.94 \times 0.866$$
$$= 0.858$$
$$\alpha = \arcsin0.858 = 59.1°$$

（3）方位角 A_s

$$\sin A_s = \frac{\sin\omega\cos\delta}{\cos\alpha}$$
$$= \frac{\sin30°\cos19.93°}{\cos59.1°}$$
$$= 0.915$$
$$A_s = \arcsin0.915 = 66.25°$$

（4）日出日落时间及其方位角

$$\omega = \arccos(-\tan\varphi\tan\delta) = \arccos(-\tan36.33°\tan19.93°)$$
$$\pm 105.46°$$

$\omega_r = 105.46°$，$\omega_s = -105.46°$，则有

$$12 - \frac{105.46°}{15°} = 4.97, 0.97 \times 60\text{min} = 58.2\text{min}$$

$$12 - \frac{-105.46°}{15°} = 19.03, 0.03 \times 60\text{min} = 1.8\text{min}$$

日出时间为 4 时 58.2 分，日落时间为 19 时 1.8 分。

日出方位角为

$$A_{sr}=\arcsin\left(\frac{\sin\omega_r\cos\delta}{\cos\alpha}\right)=\arcsin\left(\frac{\sin105.46°\cos19.93°}{\cos59.1°}\right)$$
$$=149.1°\text{（补角 }30.9°\text{）}$$

日出方位角为 149.1°。

日落方位角为

$$A_{ss}=\arcsin\left(\frac{\sin\omega_s\cos\delta}{\cos\alpha}\right)=\arcsin\left[\frac{\sin(-105.46°)\cos19.93°}{\cos59.1°}\right]$$
$$=-149.1°\text{（补角 }-30.9°\text{）}$$

日落方位角为 -149.1°。

日出日落方位角有双解，取值按以下规则：当太阳赤纬角为正时，太阳直射北半球，日出日落在靠北方的象限；当太阳赤纬角为 0 时，日出在正东，日落在正西；当太阳赤纬角为负时，太阳直射南半球，日出日落在靠南方的象限。本题赤纬角为 19.93°，为正，日出日落角度以北半球为起始点。

以上计算都为真太阳时。

真太阳时与标准时（北京时间）的换算公式为

$$\text{真太阳时}=\text{标准时}+E\pm4(L_{loc}-L_{st}) \tag{2-5}$$

式中　E——时差（min），$E=9.87\sin2B-7.53\cos B-1.5\sin B$，其中 $B=\dfrac{360°(n-81)}{365}$；

$\pm$——东加西减，已知标准时（北京时间），求另一地地方时，所求时区位于标准时（北京时间）的东侧用“+”，若位于西侧用“-”；

L_{loc}——当地的经度；

L_{st}——当地时区标准子午线。

经度每相差 1°，时间上就相差 4min，故公式中乘 4。

例 2-2　计算 36.33°N、95.22°E（格尔木）处，5 月 20 日日出的标准时。

解：由前例计算已知，该处日出时间（真太阳时）为 4 时 58.2 分，$n=140$ 天，则

$$B=\frac{360°(n-81)}{365}$$
$$=58.19°$$
$$E=9.87\sin2B-7.53\cos B-1.5\sin B$$
$$=3.6\text{ 分}=3\text{ 分 }36\text{ 秒}$$
$$L_{loc}=95.22°$$
$$L_{st}=105°$$

由式（2-5）得

标准时 = 真太阳时 $-E-4$（$L_{loc}-L_{st}$）

=4 时 58.2 分 -3 分 36 秒 -4 ×（95.22 -105）分

=4 时 58 分 12 秒 -3 分 36 秒 +39 分 7 秒

=5 时 33 分 43 秒

答：36.33°N、95.22°E（格尔木）处，5 月 20 日的日出标准时为 5 时 33 分 43 秒。

第二节 太阳辐射

一、名词解释

1）直接辐射：直接接收到的、不改变方向的太阳辐射。

2）散射辐射：接收到的被大气层反射、方向改变的太阳辐射。

3）大气质量：太阳光线穿过地球大气的路径与太阳光线在天顶角方向时穿过大气的路径之比，是一无量纲量。在标准大气压（101325Pa）和气温 0℃时，海平面上太阳光线垂直入射的路径为 1。

4）大气透明度：太阳辐射能在通过大气层时会产生一定衰减，大气透明度是表征大气对辐射衰减程度的一个重要参数。各地区四季的大气透明度可通过查阅资料确定。

5）辐照强度（辐射强度）：单位时间内，垂直投射在地球某一单位面积上的太阳辐射能量，其单位用两种形式表示。若为电能，则用 W/m^2、kW/m^2、$J/(cm^2 \cdot min)$ 表示；若为热能，则用 $cal/(cm^2 \cdot min)$、$kcal/(cm^2 \cdot h)$ 表示。表 2-3 为辐照强度单位换算。

表 2-3 辐照强度单位换算

单位	kW/m^2	$cal/(cm^2 \cdot min)$	$kcal/(cm^2 \cdot h)$
kW/m^2	1	1.43	860
$cal/(cm^2 \cdot min)$	0.698	1	600
$kcal/(cm^2 \cdot h)$	0.00116	0.00167	1

6）辐照度（辐射功率）：在规定的时间内，投射在地球某一单位面积上太阳辐射能的量值，其单位通常用 W 或 $kW \cdot h/m^2$ 表示。表 2-4 为辐照度单位换算。

表 2-4 辐照度单位换算

单位	$kW \cdot h/m^2$	cal/cm^2	MJ/m^2
kW/m^2	1	86	3.6
cal/cm^2	0.0116	1	0.0418
MJ/m^2	0.278	23.9	1

7）峰值功率。太阳电池的输出功率取决于太阳辐照度、太阳光谱分布、太阳电池工作温度。太阳电池的测量需在标准条件下进行，标准条件是辐照度 $1000W/m^2$，标准太阳光谱 AM1.5，电池温度 25℃。在该条件下，太阳电池所输出的最大功率称为峰值功率，以 W 为计算单位，称为峰瓦，符号为 Wp。

8）峰值日照小时数。将太阳电池组件所在平面上某段时间中能接收到的太阳辐射量，转换成为标准条件下辐照度为 $1000W/m^2$ 时的等效小时数，称为峰值日照小时数。

9）最大发电量。峰值日照小时数乘以光伏电站的装机容量即为光伏电站的最大发电量（理论发电量）。

10）电磁波（又称电磁辐射）是指同相振荡且互相垂直的电场与磁场在空间中以波的形式移动，有效地传递能量和动量，其传播方向垂直于电场与磁场构成的平面。图 2-15 为

电磁波的移动。电磁辐射可以按照频率分类，从低频率到高频率包括有无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X-射线和伽马射线等。人眼可接收到的电磁辐射，波长大约在 380～780ns 之间，称为可见光。只要是本身温度大于绝对零度的物体，都可以发射电磁辐射，而世界上并不存在温度等于或低于绝对零度的物体。

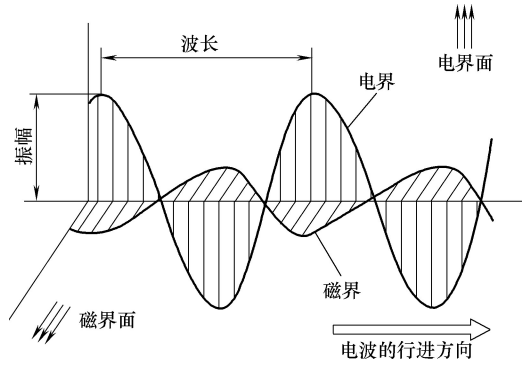


图 2-15　电磁波的移动

从科学的角度来说，电磁波是能量的一种，凡是能够释出能量的物体，都会释出电磁波。正像人们一直生活在空气中而眼睛却看不见空气一样，人们也看不见无处不在的电磁波。

电磁波是电磁场的一种运动形态。电与磁可说是一体两面，变动的电会产生磁，变动的磁则会产生电。变化的电场和变化的磁场构成了一个不可分离的统一的场，这就是电磁场，而变化的电磁场在空间的传播形成了电磁波，电磁的变动就如同微风轻拂水面产生水波一般，因此被称为电磁波，也常称为电波。

电磁波频率低时，主要借由有形的导电体才能传递。原因是，在低频的电振荡中，磁电之间的相互变化比较缓慢，其能量几乎全部返回原电路而没有能量辐射出去；电磁波频率高时即可以在自由空间内传递，也可以束缚在有形的导电体内传递。在自由空间内传递的原因是在高频率的电振荡中，磁电互变甚快，能量不可能全部返回原振荡电路，于是电能、磁能随着电场与磁场的周期变化以电磁波的形式向空间传播出去，不需要介质也能向外传递能量，这就是一种辐射。举例来说，太阳与地球之间的距离非常遥远，但在户外时，我们仍然能感受到和煦阳光的光与热，这就好比是“电磁辐射借由辐射现象传递能量”的原理一样。

电磁波为横波。电磁波的磁场、电场及其行进方向三者互相垂直。振幅沿传播方向的垂直方向作周期性交变，其强度与距离的二次方成反比，波本身带动能量，任何位置的能量功率与振幅的二次方成正比。其速度等于光速 c（3×10^8m/s）。在空间传播的电磁波，距离最近的电场（磁场）强度方向相同，其量值最大两点之间的距离，就是电磁波的波长 λ，电磁每秒变动的次数便是频率 f。三者之间的关系为 $c=\lambda f$。其中，c 为波速（这是一个常量，c 约等于 3×10^8m/s），单位为 m/s；λ 为波长，单位为 m；f 为频率，单位为 Hz。

电磁波通过不同介质时，会发生折射、反射、绕射、散射及吸收等。电磁波的传播有沿地面传播的地面波，还有从空中传播的空中波以及天波。波长越长其衰减也越少，电磁波的波长越长也就越容易绕过障碍物继续传播。

1864 年，英国科学家麦克斯韦在总结前人研究电磁现象的基础上，建立了完整的电磁波理论。他断定电磁波的存在，推导出电磁波与光具有同样的传播速度。1887 年德国物理学家赫兹用实验证实了电磁波的存在。之后，人们又进行了许多实验，不仅证明光是一种电磁波，而且发现了更多形式的电磁波，它们的本质完全相同，只是波长和频率有很大的差别。

按照波长或频率的顺序把这些电磁波排列起来，就是电磁波谱。如果把每个波段的频率由低至高依次排列的话，它们是工频电磁波、无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线

及 γ 射线。以无线电的波长最长，宇宙射线的波长最短。

无线电波：3000m ~ 0. 3mm。

红外线：0. 3mm ~ 0. 75μm。

可见光：0. 7 ~ 0. 4μm。

紫外线：0. 4μm ~ 10nm。

X 射线：10 ~ 0. 1nm。

γ 射线：0. 1 ~ 0. 001nm。

高能射线：小于 0. 001nm。

传真（电视）用的波长是 3 ~ 6m；雷达用的波长更短，3m 到几毫米。

二、电磁辐射

1. 电磁辐射的特性

广义的电磁辐射通常是指电磁波频谱而言。狭义的电磁辐射是指电器设备所产生的辐射波，通常是指红外线以下部分。电磁辐射是传递能量的一种方式，辐射种类可分为三种：游离辐射、有热效应的非游离辐射和无热效应的非游离辐射。图 2-16 为电磁波。

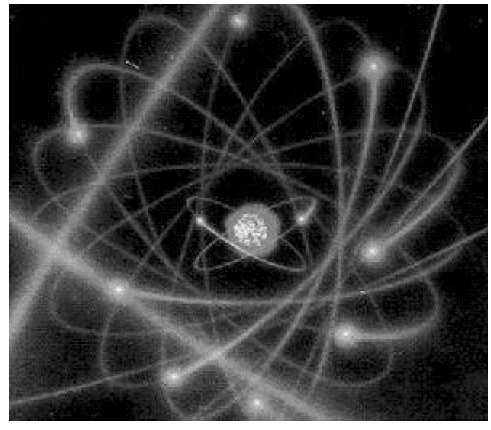


图 2-16　电磁波

电磁辐射危害人体的机理主要是热效应、非热效应和积累效应等。

1）热效应：人体内 70% 以上是水，水分子受到电磁波辐射后相互摩擦，引起机体升温，从而影响到身体其他器官的正常工作。

2）非热效应：人体的器官和组织都存在微弱的电磁场，它们是稳定和有序的，一旦受到外界电磁波的干扰，处于平衡状态的微弱电磁场即遭到破坏，人体正常循环机能会遭受破坏。

3）累积效应：热效应和非热效应作用于人体后，对人体的伤害尚未来得及自我修复之前再次受到电磁波辐射的话，其伤害程度就会发生累积，久之会成为永久性病态或危及生命。对于长期接触电磁波辐射的群体，即使功率很小、频率很低，也会诱发想不到的病变，应引起警惕。

2. 电磁辐射的防治

各国科学家经过长期研究证明：长期接受电磁辐射会造成人体免疫力下降、新陈代谢紊乱、记忆力减退、提前衰老、心率失常、视力下降、听力下降、血压异常、皮肤产生斑痘及粗糙，甚至导致各类癌症等；还会引发男女生殖能力下降，妇女易患月经紊乱、流产、畸胎等症。随着人们生活水平的日益提高，电视机、计算机、微波炉、电热毯、电冰箱等家用电器越来越普及，电磁辐射对人体的伤害越来越严重。但由于电磁波看不见，摸不着，感觉不到，且其伤害是缓慢、隐性的，所以尚未引起人们的广泛注意。家用电器尽量勿摆放于卧室，也不宜集中摆放或同时使用。

看电视勿持续超过 3h，并与屏幕保持 3m 以上的距离；关机后立即远离电视机，并开窗通风换气，以洗面奶或香皂等洗脸。用手机通话时间不宜超过 3min，通话次数不宜多。尽

量在手机接通 1～2s 后再移至面部通话，这样可减少电磁波对人体的辐射危害。具有防电磁辐射危害的食物有绿茶、海带、海藻、裙菜、Va、Vc、Vb1 以及卵磷脂、猪血、牛奶、甲鱼、蟹等动物性优质蛋白等。

3. 电磁波的应用

电磁波为横波，可用于探测、定位、通信等。电磁波谱是无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线（X 射线）、γ 射线等的集合，其应用如下：

无线电波用于通信等。

微波用于微波炉。

红外线用于遥控、热成像仪、红外制导导弹等。

可见光是所有生物用来观察事物的基础。

紫外线用于医用消毒、验证假钞、测量距离、工程上的探伤等。

X 射线用于 CT 照相。

γ 射线用于治疗以及使原子发生跃迁从而产生新的射线等。

无线电广播与电视都是利用电磁波来进行的。在无线电广播中，人们先将声音信号转变为电信号，然后将这些信号由高频振荡的电磁波带着向周围空间传播。而在另一地点，人们利用接收机接收到这些电磁波后，又将其中的电信号还原成声音信号，这就是无线电广播的大致过程。而在电视中，除了要像无线电广播中那样处理声音信号外，还要将图像的光信号转变为电信号，然后也将这两种信号一起由高频振荡的电磁波带着向周围空间传播，而电视接收机接收到这些电磁波后又将其中的电信号还原成声音信号和光信号，从而形成电视节目的画面和扬声器里的声音。

电磁波的电场（或磁场）随时间变化，具有周期性。在一个振荡周期中传播的距离叫做波长。振荡周期的倒数，即每秒振动（变化）的次数称为频率。

很显然，波长与频率的乘积就是波每秒传播的距离，即波速。令波长为 λ，频率为 f，速度为 v，得 $\lambda = v/f$。波长 λ 的单位是 m，速度的单位是 m/s，频率的单位为 Hz。整个电磁频谱，包含从电波到宇宙射线的各种波、光和射线的集合，不同频率段落分别命名为无线电波（3kHz～3000GHz）、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线和宇宙射线。在 19 世纪末，意大利人马可尼和俄国人波波夫同在 1895 年进行了无线电通信试验。在此后的 100 年间，从 3kHz～3000GHz 频谱被认识、开发和逐步利用。根据不同的传播特性、不同的使用业务，对整个无线电频谱进行划分，共分 9 段，分别是甚低频（VLF）、低频（LF）、中频（MF）、高频（HF）、甚高频（VHF）、特高频（UHF）、超高频（SHF）、极高频（EHF）和至高频，对应的波段为甚（超）长波、长波、中波、短波、米波、分米波、厘米波、毫米波和丝米波（后 4 种统称为微波）。表 2-5 为无线电频谱和波段划分。

表 2-5　无线电频谱和波段划分

段号频段名称	频段范围(含上限不含下限)	波段名称	波长范围(含上限不含下限)
甚低频(VLF)	3～30kHz	(超)长波	100～10km
低频(LF)	30～300kHz	长波	10～1km
中频(MF)	300～3000kHz	中波	1000～100m
高频(HF)	3～30MHz	短波	100～10m

（续）

段号频段名称	频段范围（含上限不含下限）	波段名称	波长范围（含上限不含下限）
甚高频（VHF）	30 ~ 300MHz	米波	10 ~ 1m
特高频（UHF）	300 ~ 3000MHz	分米波	100 ~ 10cm
超高频（SHF）	3 ~ 30GHz	厘米波	10 ~ 1cm
极高频（EHF）	30 ~ 300GHz	毫米波	10 ~ 1mm
至高频	300 ~ 3000GHz	丝米波	1 ~ 0.1mm

三、太阳辐射能

太阳向宇宙空间发射电磁波和粒子流传递能量。太阳辐射是地球表层能量的主要来源。但地球所接收到的太阳辐射能量仅为太阳向宇宙空间放射的总辐射能量的二十二亿分之一。在国际单位制单位中，辐射能的单位是 J 或 MJ。太阳辐射能表征到达地球大气层顶部的太阳辐射量的数值，定义为地球位于日地平均距离处，地球大气层上界垂直于太阳辐射束平面的单位面积（$1m^2$）上单位时间（1s，1W = 1J/s）内所接收到的太阳辐射的全谱总能量。1981 年 10 月世界气象组织（WMO）通过的最新数值为 $1367W/m^2$。

1. 太阳辐射光谱

太阳发射的电磁辐射在大气上界随波长的分布称为太阳光谱，太阳光谱的范围几乎涵盖了整个电磁波谱。电磁波用波长、频率来表征。地球大气上界的太阳辐射光谱的 99% 以上在波长 0.15 ~ 4.0μm 之间。其大致分布如下：

50% 的太阳辐射能量在可见光谱区（波长 0.4 ~ 0.76μm）。

43% 在红外光谱区（ > 0.76μm）。

7% 在紫外光谱区（波长 0.76μm）。

最大能量在波长 0.475μm 处。

由于太阳辐射波长较地面和大气辐射波长（约 3 ~ 120μm）小得多，即集中于短波波段（0.22 ~ 1μm），所以通常又称太阳辐射为短波辐射，称地面和大气辐射为长波辐射。

2. 辐射类别

太阳活动和日地距离的变化等会引起地球大气上界太阳辐射能量的变化。太阳辐射通过大气，一部分到达地面，称为直接太阳辐射；另一部分被大气的分子、大气中的微尘和水汽等吸收、散射和反射。被散射的太阳辐射一部分返回宇宙空间，另一部分到达地面，到达地面的这部分称为散射太阳辐射。到达地面的散射太阳辐射和直接太阳辐射之和称为总辐射。

3. 辐射量

太阳辐射通过大气后，其强度和光谱能量分布都发生变化。到达地面的太阳辐射能量比大气上界小得多，在太阳光谱上的能量分布在紫外光谱区几乎绝迹，在可见光谱区减少至 40%，而在红外光谱区增至 60%。在地球大气上界，北半球夏至时，日辐射总量最大，从极地到赤道分布比较均匀；冬至时，北半球日辐射总量最小，极圈内为零，南北差异最大。南半球情况相反。春分和秋分时，日辐射总量的分布与纬度的余弦成正比。南、北回归线之间的地区，一年内日辐射总量有两次最大，年变化小。纬度愈高，日辐射总量变化愈大。到达地表的全球年辐射总量的分布基本上成带状，只有在低纬度地区受到破坏。在赤道地区，由于多云，年辐射总量并不最高。在南北半球的副热带高压带，特别是在大陆荒漠地区，年

辐射总量较大，最大值在非洲东北部。

辐射量的变化原因如下：

1）太阳辐射在大气上界的分布是由地球的天文位置决定的，称之为天文辐射。由天文辐射决定的气候称为天文气候。天文气候反映了全球气候的空间分布和时间变化的基本轮廓。太阳辐射随季节变化呈现有规律的变化，形成了四季。除太阳本身的变化外，天文辐射能量主要决定于日地距离、太阳高度角和昼长。

地球绕太阳公转的轨道为椭圆形，太阳位于两个焦点中的一个焦点上。因此，日地距离时刻在变化。每年1月2日—5日经过近日点，7月3日—4日经过远日点。地球上接受到的太阳辐射的强弱与日地距离的二次方成反比。太阳光线与地平面的夹角称为太阳高度角，它有日变化和年变化。太阳高度角大，则太阳辐射强。白昼长度指从日出到日落之间的时间长度。赤道上四季白昼长度均为12h，赤道以外昼长四季有变化，纬度23.5°的春、秋分日昼长12h，夏至和冬至日昼长分别为14h 51min和9h 9min，到纬度66°33′出现极昼和极夜现象。南北半球的冬夏季节时间正好相反。

2）天文辐射的时空变化特点是：①全年以赤道获得的辐射最多，极地最少。这种热量不均匀分布，必然导致地表各纬度的气温产生差异，在地球表面出现热带、温带和寒带气候。②天文辐射夏大冬小，它导致夏季温高冬季温低。

对太阳辐射的削弱作用还包括大气对太阳辐射的吸收、散射和反射。散射是太阳电磁波与大气中物质（气、液、固）内的电子发生相互作用，电磁波的电场使大气中物质中的电子受到加速，这些加速的电子沿不同方向也辐射出电磁波，使原太阳电磁波有所减弱，其减少的能量分布到其他方向上去了。散射与吸收不同，它不会把辐射能转变为粒子热运动的动能，而仅仅改变辐射的方向，使直射光变为漫射光。地球外面包裹着的空气是由很多的微粒组成的，其中99%是氮气和氧气，其余则是别的气体（如二氧化碳、惰性气体等）、小水滴和来源于工厂的粉尘、风中的扬沙、火山爆发的岩灰等漂浮微粒。但是空气的成分并不是固定的，这依赖于所在的位置、天气和其他的不固定因素（如森林、海洋以及火山爆发和污染的严重与否）。光是能量以电磁波传播的一种方式，在真空中的传播速度为30万km/s。光和其他波（比如声波）不同的是具有波粒二象性。这是因为光是由一种无质量的粒子——光子组成的，所以光不但具有波的特性，还有粒子的特性。光传递能量的大小与光的频率成正比，而光的频率正好决定其颜色。但我们的眼睛只能看到其中特定频率范围内的光，称之为可见光，频率过高（紫外线）和过低（红外线），我们都看不见。对于太阳光，牛顿首先用三棱镜发现其中包含着红、橙、黄、绿、蓝、靛和紫7种颜色。在7种不同的光中，红光波长最长（频率最低），紫光波长最短（频率最高）。我们肉眼所看到的是它们的混合结果。

若没有外界干扰，光都是以直线传播的。当光在空气中传播时，不可避免要遇到空气中的气体分子和其他微粒。这些微粒对光有吸收、反射和散射等物理作用，正是这些物理作用使得晴日里天空成为蔚蓝色。正确解释天空为什么是蓝色始于1859年。科学家泰多尔首先发现蓝光要比红光散射强得多，这就是泰多尔效应。几年之后，科学家瑞利更详细地研究了这种现象，他发现散射强度与波长的4次方成反比。后来，更多科学家称这种现象为瑞利散射。瑞利散射很容易通过下面一个小实验来验证：用一个盛满水的水杯，然后往水杯中滴入几滴牛奶，用手电筒做光源，从水杯的一侧照射，从水杯的另一侧看到的是红光，而从垂直

于光线的方向看到的却是蓝色（在黑暗处效果更明显）。

3）我们所看到的蓝天是因为空气分子和其他微粒对入射的太阳光进行选择性散射的结果。散射强度与微粒的大小有关。当微粒的直径小于可见光波长时，散射强度和波长的4次方成反比，不同波长的光被散射的比例不同，此亦成为选择性散射。当太阳光进入大气后，空气分子和微粒（尘埃、水滴、冰晶等）会将太阳光向四周散射。组成太阳光的红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫7种光中，红光波长最长，紫光波长最短。波长比较长的红光透射性最大，大部分能够直接透过大气中的微粒射向地面。而波长较短的蓝、靛、紫等色光，很容易被大气中的微粒散射。以入射的太阳光中的蓝光（波长为0.425μm）和红光（波长为0.650μm）为例，当光穿过大气层时，被空气微粒散射的蓝光约比红光多5.5倍。因此晴天天空是蔚蓝的。但是，当空中有雾或薄云存在时，因为水滴的直径比可见光波长大得多，选择性散射的效应不再存在，不同波长的光将一视同仁地被散射，所以天空呈现白茫茫的颜色。

如果说波长短的光散射得更强，为什么天空不是紫色的？其中一个原因就是在太阳光透过大气层时，空气分子对紫色光的吸收比较强，所以我们所观测到的太阳光中的紫色光较少，但并不是绝对没有，在雨后彩虹中我们很容易观察到紫色的光。另外一个原因和我们的眼睛本身有关。在我们的眼睛中，有3种类型的接收器，分别称之为红、绿和蓝锥体，它们只对相应的颜色敏感。当它们受到外界的光刺激时，视觉系统会根据不同接收器受到刺激的强弱重建这些光的颜色，也就是我们所看到物体的颜色。事实上，红色锥体和绿色锥体对蓝色和紫色的刺激也有反映，红锥体和绿锥体同时接受到阳光的刺激，此时蓝锥体接收到蓝光的刺激较强，最后它们联合的结果是蓝色的，而不是紫色的。

太阳辐射经过整层大气时，0.29μm以下的紫外线几乎全部被吸收，而可见光则大气吸收得很少，而红外区也有很强的吸收带，大气中吸收太阳辐射的物质主要有氧、臭氧、水汽和液态水，其次有二氧化碳、甲烷、一氧化二氮和尘埃等。大气中含有21%的氧，氧吸收波长小于0.2μm的紫外线，在0.155μm处吸收最强，所以在地面上几乎观察不到0.2μm以下的太阳辐射。臭氧主要存在于10～40km的高层大气中，在20～25km处密度较大，低层大气中几乎没有。臭氧主要有两个吸收带，一个是0.2～0.32μm间的强吸收带，另一个在可见光0.6μm处，虽然吸收因数不大，但恰好在辐射最强区，所以臭氧的吸收量占总辐射量的2.1%左右。水汽是太阳辐射的主要吸收介质，吸收带在红外及可见光区，太阳高度角很小时，水汽吸收量占总辐射量的20%左右。尘埃的吸收作用通常很小。

云层能强烈吸收和散射太阳辐射，同时还强烈吸收地面反射的太阳辐射。云的平均反射率为0.50～0.55。经过大气削弱之后到达地面的太阳直接辐射和散射辐射之和称为太阳总辐射。就全球平均而言，太阳总辐射只占到达大气上界太阳辐射的45%。总辐射量随纬度升高而减小，随高度升高而增大；一天内中午前后最大，夜间为0，一年内夏大冬小。

当太阳辐射能以平行光的形式穿过大气层射向地球的过程中，遇到空气分子、尘埃、去雾滴等的阻挡而改变方向，构成散射，其中一部分被反送出大气无法到达地球表面。散射随天气条件的变化而变化，不同的高度角、海拔，不同的云量、云状和大气透明度都会产生不同程度的散射，云状的影响最大，乌云密布时的散射要比万里无云时的散射大2倍左右。大气散射的波长范围集中在太阳辐射强度最大的可见光区内，因此散射是太阳辐射能减弱的重要原因。

大气的反射主要是云层的反射，它随着云量、云状与去厚的变化而变化。不同的云量、云状、云高对太阳辐射的影响相差很大，很难用一种方法来计算。

地球表面的不同物质由于吸收太阳的辐射，不断积累热能，逐渐增温，同时也以辐射的形式向外散发热能。积雪对太阳辐射的反射率较高，很少吸收，而对来自大气层的长波辐射几乎全部吸收，同时也向外辐射长波。

大气层对于来自地球表面的长波辐射，几乎全部吸收并转变为大气层本身的热能，以长波辐射的形式向外辐射，其中一部分又投回地球表面。投回地球表面的大气长波辐射称为大气逆辐射。大气具有使大部分太阳短波辐射通过，使其到达地球表面，同时又使地球表面的长波辐射不致逸出大气层，而以逆辐射的形式射向地面的能力，起到给地球保温的作用。

四、影响地球表面接收太阳辐射能的因素

影响地球表面接收到太阳辐射能的因素有以下三方面：

1）天文因素：日地距离变化、太阳赤纬变化、地球自转使接收面的倾斜度和方位不同，产生早、中、晚及昼夜交替。

2）地理因素：接收地点的经纬度、海拔、地势地貌不同。

3）物理因素：大气吸收、散射、反射、接收面的表面粗糙度。

太阳辐射能通过大气层的路程越长，大气层对其吸收、反射和散射的程度就越大，到达地球表面的太阳辐射能也就越小，这样就引出大气质量这一概念，定义为太阳光线通过大气的路径与太阳在天顶时光线通过大气的路径之比，用 AM 表示。在标准大气压（p = 760mmHg）和0℃时，海平面上的太阳光线垂直入射路径 R 为 1，即 AM = 1，称大气质量为 1，记为 AM1。大气层处大气质量为零，记为 AM0。我国规定 AM1.5 为测试太阳电池标称输出功率的标准条件之一。图 2-17 显示出大气层外 AM0 和 AM1.5 时的太阳辐射光谱曲线的比较，AM0 时的太阳辐射能要高于 AM1.5 时的太阳辐射能。

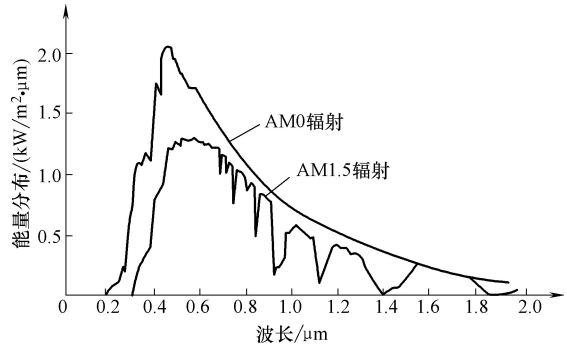


图 2-17　大气质量太阳辐射能的曲线比较

太阳处于任何位置时，大气质量可由下式计算：

$$\alpha = 90° - \theta_z$$

$$\mathrm{AM} = \sec\theta_z = \frac{1}{\sin\alpha},\ 0° < \alpha < 90°$$

式中　θ_z——天顶角，即太阳光线与海平面法线的夹角；

α——太阳高度角，即太阳光线与海平面的夹角。

图 2-18 给出了太阳在任意位置时 AM 的计算。

五、太阳辐射能的接收

为了更多地接收太阳能，许多厂家的太阳光采集面的安装形式都不是水平的，而是与地面成一定的倾角，这个倾角的大小、方位如何，都要根据不同的地点而定。在设计太阳电池应用系统时，必须掌握到达该地区的太阳辐射能，即掌握该地区太阳辐射的年、月总量。由

于太阳辐射观察站很稀疏，靠观察站提供的资料远不能满足需要，因此理论计算是十分必要的，即理论计算太阳的辐照量。现在虽然已有总辐射表可直接测出太阳的辐照量，但是总辐射表有局限性，只能测直射量，测量波长范围为 0.3 ~ 3μm，而太阳的波长集中在 0.2 ~ 0.4μm，因此计算是不可少的。

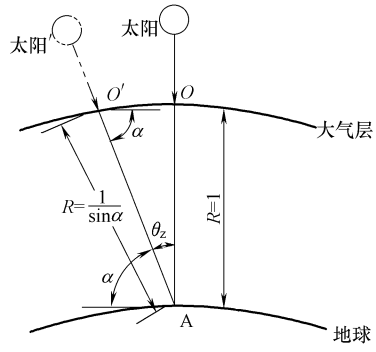


图 2-18　太阳在任意位置时 AM 的计算

1. 采集面上一天的日照昼长 T_{sd}

$$T_{sd}=\frac{2}{15}\arccos[-\tan\delta\tan(\varphi-s)]$$

式中　δ——赤纬角；

φ——纬度；

s——采集面的倾斜角，即受光面与地平面间的夹角。

2. 平均太阳辐射量 H_a 的估算

$$H_a=H_0\left(a+b\frac{\bar{n}}{N}\right)$$

$$H_0=\frac{24}{\pi}E_{sc}\left(1+0.033\cos\frac{360°n}{365}\right)\left(\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s+\frac{\pi\omega_s}{180}\sin\varphi\sin\delta\right)$$

式中　H_0——相应大气层上界水平面上所考虑时期内的平均日照量；

$\bar{n}$——同期内平均每天的日照时数；

N——同期内一天中最大日照时数；

a，b——与地点相关的气候常数，取决于该地区气候、植物生长类型和地理位置；

E_{sc}——太阳常数；

ω_s——日落时角。

3. 小时总辐照量与全日总辐照量的比值 r_t

$$r_t=\frac{I}{H}=\frac{\pi}{24}(a+b\cos\omega)\frac{\cos\omega-\cos\omega_r}{\sin\omega_r-\frac{\pi\omega_r}{180}\cos\omega_r}$$

$$a=0.409+0.5016\sin(\omega_r-60°)$$

$$b=0.6609-0.4767\sin(\omega_r-60°)$$

式中　I——小时总辐照量；

ω_r——日出时角。

4. 小时散射辐照量与全日散射辐照量的比值 r_d

$$r_d=\frac{I_d}{H_d}=\frac{\pi}{24}\frac{\cos\omega-\cos\omega_r}{\sin\omega_r-\frac{\pi\omega_r}{180}\cos\omega_r}$$

式中　I_d——小时散射辐照量。

例 2-3　已知格尔木 5 月 28 日水平面上总辐照量是 25.39MJ/m² （7.05kW · h/m²），求下午 5 时 ~6 时间水平面上的辐照量。

解：由题意知 $n=148$，$\varphi=36°21'=36.35°$（格尔木纬度）。

赤纬角为
$$\delta = 23.45°\sin\left(360° \times \frac{284+148}{365}\right)$$
$$= 21.71°$$

昼长为
$$T_d = \frac{2}{15}\arccos(-\tan\varphi\tan\delta)$$
$$= \frac{2}{15}\arccos(-\tan 36.35°\tan 21.71°)$$
$$= 14.27$$

日出时角为
$$\omega_r = \arccos(-\tan\varphi\tan\delta)$$
$$= \arccos(-\tan 36.35°\tan 21.71°)$$
$$= 107.04。$$

真太阳时 = 标准时 $+E \pm 4$（$L_{loc} - L_{st}$）

标准时 $= 60\text{min} \times 5 = 300\text{min}$

$$E = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B$$
$$B = \frac{360°(n-81)}{365}$$
$$= \frac{360° \times (148-81)}{365}$$
$$= 66.08°$$
$$E = 9.87\sin(2 \times 66.08°) - 7.53\cos 66.08° - 1.5\sin 66.08°$$
$$= 2.89$$
$$L_{loc} - L_{st} = 95.22° - 105° = -9.78°$$

真太阳时$_5$ $= [300 + 2.89 + 4 \times (-9.78)]\text{min}$
$$= 263.77\text{min}$$

真太阳时$_6$ $=$ 真太阳时$_5$ $+ 60$
$$= 263.77\text{min} + 60$$
$$= 323.77\text{min}$$

中间点的时角为
$$\omega = -\frac{263.77° + 323.77°}{2 \times 4}$$
$$= -73.44°$$

求小时总辐照量与全日总辐照量的比值 r_t：
$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24}(a + b\cos\omega)\frac{\cos\omega - \cos\omega_r}{\sin\omega_r - \frac{\pi\omega_r}{180}\cos\omega_r}$$
$$a = 0.409 + 0.5016\sin(\omega_r - 60°)$$
$$b = 0.6609 - 0.4767\sin(\omega_r - 60°)$$

将 $\omega_r = 107.04°$，$\omega = -73.44°$代入上三式，得出

$a = 0.776$，$b = 0.312$，$r_t = 0.044$

$H = 25.39\text{MJ/m}^2$
$$I = r_t H = 0.044 \times 25.39\text{MJ/m}^2 = 1.12\text{MJ/m}^2$$

答：下午 5 时 ~6 时间水平面上的辐照量是 1.12MJ/m^2。

5. 倾斜面上的辐照量

倾斜面上的辐照量分为三部分，即直射部分、散射部分和反射部分。对于确定地点，纬度 φ 和倾斜角 s 为一常数，一年中的任意一天，赤纬角 δ 也可认为是一定值，而在一天的不同时刻，时角 ω 将取不同的值。一天的总辐照量可分别对水平面和倾斜面上时角 ω 求积分，这两个平面的日出和日落的时角是不同的，结合地面的反射，倾斜面上接收到的太阳日总辐照量 H_{ts} 为

$$H_{ts}=HR=H_b\frac{\cos(\varphi-s)\cos\delta\sin\omega_{ss}+\frac{\pi}{180}\omega_{ss}\sin(\varphi-s)\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s+\frac{\pi}{180}\omega_s\sin\varphi\sin\delta}+(H-H_b)\frac{1+\cos s}{2}+H\left(\frac{1-\cos s}{2}\right)\rho$$

式中　H——水平面太阳日总辐照量，可由气象站查得，单位为 MJ/m^2；

R——水平面太阳日总辐照量与倾斜面太阳日总辐照量的比值；

H_b——水平面太阳直射日总辐照量，单位为 MJ/m^2，且

$$H_b=\frac{24}{\pi}E_{sc}(\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s+\omega_s\sin\varphi\sin\delta)$$

其中　E_{sc}——太阳常数，其值为 1367W/m^2；

ω_s——水面平上日落时角，单位为度；

ω_{ss}——倾斜角为 s 的日落时角，单位为度；

ρ——反射率，用% 表示。

表 2-6 为不同状态地面的反射率。

表 2-6　不同状态地面的反射率

地面状态	反射率(%)	地面状态	反射率(%)	地面状态	反射率(%)
普通地面	20	干草地	15 ~ 25	冰面	69
干燥黑土	14	湿草地	14 ~ 26	新雪	81
潮湿黑土	8	森林	4 ~ 10	残雪	46 ~ 70
干灰地面	25 ~ 30	干砂地	18		
湿灰地面	10 ~ 12	湿砂地	9		

6. 倾斜角和方位的影响

有一些学者对接收面倾斜角对接收太阳直射辐照量的影响作了深入的研究，对不同倾斜角表面的辐照量作了比较，认为倾斜角在 0.9φ 时，表面接收的辐照量最大。冬季倾斜角 s 应为 $\varphi+10°$，夏季倾斜角 s 应为 $\varphi-10°$，倾斜角在最大值附近变化对总辐照量并无太大影响。学者们还研究了平面方位角对接收太阳辐照量的影响。这里指的是北半球。一般接收面都是面向正南，如果稍偏向东，接收的日照上午较多，下午较少，反之亦然。当倾斜角不变时，方位角的影响随纬度增大而增大。

六、太阳辐射量的测量

现在市面上已有各种辐射计出售，可以方便地测出水平面上的总辐射量，例如天空辐射计、散射辐射计、直接辐射计等。

1）天空辐射计：俗称太阳表，可记录投射到水平面上的全波长辐射。采用一圆形盘，

交叉地涂布铂黑和镁白，在白区和黑区的不同温度被多重热电偶探测，输出电压作为测量信号。盘由一至二层圆拱形的玻璃罩保护。

2）散射辐射计：在天空辐射计上用特制的圆盘或遮日环挡去太阳直接辐射，可直接测量散射辐射。

3）直接辐射计：视场很小，约为6°，连续跟踪太阳，可测量直接辐射。

太阳辐射量数据可从国家气象局或县、市气象台、站取得，取得的一般是水平面的辐射数据，包括水平面总辐射、水平面直接辐射及水平面散射辐射数据。

上篇　薄膜太阳电池

第三章　薄膜太阳电池的基础知识

第一节　术语及基本概念

一、物质

1. 量子数

原子中电子的运动状态由 n、l、m、m_s 四个量子数来确定。

（1）主量子数 n　$n=1$，2，3，4，5，6，7，表示各个电子壳层，这些壳层分别命名为K、L、M、N、O、P、Q 壳层。它大体上决定原子中电子的能量。

（2）副（角）量子数 l　$l=0$，1，2，…，$n-1$，分别称为 s、p、d、f、g 支壳层。它决定轨道动量矩（电子绕核运动的角动量的大小）。一般而言，处于同一主量子数 n 而不同副量子数 l 状态中的电子，其能量稍有不同。

（3）磁量子数 m　$m=0$，±1，±2，…，$\pm l$，它决定轨道动量矩在外磁场方向上的分量，即决定电子的取向。

（4）自旋磁量子数 m_s　$m_s=\pm\frac{1}{2}$，只有两个值。它决定电子自旋动量矩在外磁场方向上的分量，即决定电子的自旋方向。

2. 量子

在微观领域中，某些物理量的变化是以最小的单位间隔、跳跃式进行的，而不是连续的，这个最小的单位叫做量子。一个物理量如果有最小的单元且不可连续地分割，我们就说这个物理量是量子化的，并把最小的单元称为量子。如辐射能量就是一份一份的，每一份都有一个物质承担者——光量子。

3. 泡里不相容原理

在原子系统内，不可能有两个或两个以上的电子具有相同的状态，亦即不可能具有相同的 4 个量子数。当主量子数 n 给定时，副量子数 l 的可能值为 0，1，2，…，$n-1$，共 n 个。当副量子数 l 给定时，磁量子数 m 的可能值为 $-l$，$-l+1$，…，0，…，l 共 $2l+1$ 个。当主量子数 n、副量子数 l、磁量子数 m 都给定时，自旋磁量子数 m_s 取 1/2 和 −1/2 两个可能值。所以，具有同一 n 值的电子个数最多为 $2n^2$ 个。

4. 能量最小原理

原子中每个电子都有优先占据能量最低的空能级的趋势。能级的能量主要取决于主量子数 n，n 越小，该能级的能量也越低。所以离原子核最近的壳层，一般首先被电子

占据。

5. 电离能

气态电中性基态原子失去一个电子转化为气态基态正离子所需要的最低能量叫做第一电离能（I_1），气态一价正离子再去掉一个电子成为二价正离子所需的能量，称为第二电离能（I_2），第三、第四等电离能可以类推。电离能中第一电离能 I_1 最小，也最重要。电离能是原子或离子在气态时活泼性的量度，电离能越小越活泼，元素金属性越强。“气态”、“电中性”、“失去一个电子”等都是保证“最低能量”的条件。

6. 能级

能级也就是能量等级，一个壳层一个能级。原子构造是以壳层形式按一定规律分布的。原子中心是一个带正电荷的核，核外存在着一系列不连续的、由电子运动轨道构成的壳层，电子只能在壳层里绕核转动。在稳定状态，每个壳层里运动的电子具有一定的能量状态，所以每个壳层相当于一个能级。

7. 价电子

未填满电子的最外壳层中的电子数，决定这一元素的化学性质，这些电子称为价电子。一个原子外壳层电子有几个，就称它为几价。原子和原子的结合主要靠外壳层的互相交合及价电子运动的变化。

8. 价级

价电子所处的基态能级叫做价级。

9. 激发能级

价电子经激发后，可以跃迁到价级以上的空能级中去，这些空能级称为激发能级。激发能级示意图如图 3-1 所示。

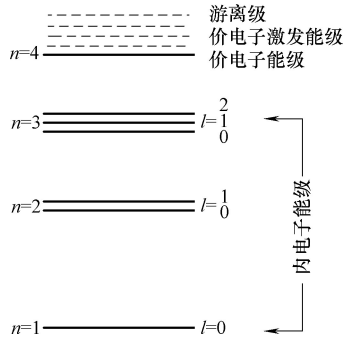


图 3-1　激发能级

激发能级也同样分裂成为能带，激发能带中没有电子称为空带。但价电子经激发后，有可能跃迁到空带中而参与导电，所以空带也称为导带或自由带。

10. 共有化运动

由于原子之间的距离很小，不同原子的内外各电子壳层之间就有一定程度的交叠，相邻原子最外壳层的交叠最多，内壳层交叠较少。电子壳层的这种交叠，使得电子不再完全局限于某一个原子上，而可以由一个原子转移到相邻的原子上去。所以，电子将可以在整个晶体中运动，这种运动称为电子的共有化运动。

11. 能带

能带是能级分裂的结果。由于电子的共有化运动，当 N 个原子相接近形成晶体时，原来单个原子中每个能级分裂成 N 个与原来能级很接近的新能级，这 N 个新能级具有一定的能量范围，称之为能带。

12. 导带 E_C

能带中没有电子，是空的，称之为导带。

13. 价带 E_V

价电子共有化运动形成一个能带，使其处于价级分裂后的这些能级上，这样的能带叫做价带。价带的宽度约有几个电子伏特（eV）。如果价带中所有的能级都按泡里不相容原理填

满了电子，则称为满带。

14. 禁带（带隙）E_g

在两个相邻的能带（价带和导带）之间，可能有一个不被允许的能量间隔（此间不存在能级），这个间隔称为禁带 E_g。

二、晶体学

1. 晶体

有确定熔点的固体称为晶体，如硅、砷化镓、冰、金属。

2. 晶格

所有的晶体都是由原子、离子或分子在三维空间有规则排列而成的，这种对称的、有规则的排列叫做晶体的点阵或晶体格子，简称晶格。

3. 单晶

原子或离子沿着三个不同的方向按一定的周期有规则地排列，并沿一致的晶体学取向所堆垛起来的长程有序的晶体，称为单晶。

4. 多晶

多个单晶晶粒组成的晶体，在其晶界处的颗粒间的晶体学取向彼此不同，其周期性与规则性也在此处受到破坏，变成由许多微小单晶颗粒杂乱无章地排列在一起的固体，称为多晶。

5. 非晶体

没有确定熔点、加热时在某一温度范围内逐渐软化的固体，称为非晶体。

6. 微晶硅

微晶硅是由 50nm 以下的结晶粒群构成的结晶，是薄膜多晶硅体，一般结晶尺寸为 10 ~ 50nm，结晶相对率为 40% ~60%。可以认为它是由结晶硅和非结晶硅组成的，甚至可作为非晶不均质材料来看，也是生产太阳电池的材料。

7. 常用半导体晶体的结构种类

常用半导体晶体的结构种类主要有金刚石型、闪锌矿型和纤锌矿型，如图 3-2 所示。

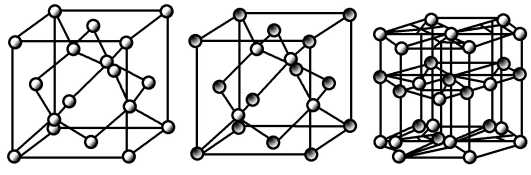


图 3-2　半导体晶体的结构

8. 常用半导体材料的晶体生长方向

不论晶体属于何种结构，都不是完全对称的，因此单晶表现出各向异性。单晶材料都是按一定的方向生长的，单晶生长的这种方向直接来自晶格结构。常用半导体材料的晶体生长方向是 <111> 和 <100>。规定用 <111> 和 <100> 表示晶向，用（111）和（100）表示晶面。

9. 晶体缺陷

晶体内的原子是按一定的规律周期性地排列的，如果在晶体中的一些区域，这种排列遭到破坏，称这种破坏为晶体缺陷。晶体缺陷对半导体材料的使用性影响很大，使器件性能劣化直至失效，因此在材料的制备过程中都要尽量排除缺陷或降低其密度。晶体缺陷的控制是材料制备的重要技术之一。

晶体缺陷的分类：

1）点缺陷：如空位、间隙原子、反位缺陷、替位缺陷和由它们构成的复合体。

2）线缺陷：呈线状排列，如位错就是这种缺陷。

3）面缺陷：呈面状，如晶界、堆垛层错、相界等。

4）体缺陷：如空洞、夹杂物、杂质沉淀物等。

5）微缺陷：几何尺寸在微米级或更小，如点缺陷聚集物、微沉淀物等。

10. 位错

当一种固体材料受到外力时就会发生形变，如果外力消失后，形变也随着消失，这种形变称为弹性形变；如果外力消失后，形变不消失，则称为范性形变。位错就是由范性形变造成的。范性形变可以使晶体内的一原子或离子脱离规则的周期排列而位移一段距离，位移区与非位移区交界处必有原子的错位，这样产生的线缺陷称为位错。

11. 层错

层错是在密排晶面上缺少或多余一层原子而形成的一种面缺陷。层错对器件制备工艺以及成品性能都可以产生较大的影响。在硅外延生长时，如果不采取特殊的措施，生长的外延层中将含有大量的层错，严重破坏晶体的完整性。外延片的层错主要起源于生长外延层的衬底晶体的表面。

三、半导体学

1. 导体、绝缘体、半导体

能够导电的物质叫导体，不能导电的物质叫绝缘体，介于导体与绝缘体两者之间的物体叫半导体。导体有金属、石墨、大地、人体以及各种酸、碱、盐的水溶液等；绝缘体有橡胶、塑料、玻璃、云母、陶瓷、纯水、油、空气等；半导体有硅、锗、砷化镓、磷化铟、氮化镓等。

2. 半导体

半导体是指导电能力介于导体与绝缘体两者之间的物质。半导体大体上可分为两类，即本征半导体和杂质半导体。本征半导体是指纯净的半导体。纯净一是指半导体材料中只含一种元素的原子，二是指原子与原子之间的排列是有一定规律的。本征半导体的特点是导电能力极弱，且随温度变化导电能力有显著变化。杂质半导体是指人为地在本征半导体中掺入微量其他元素（称杂质）所形成的半导体，杂质半导体有两类，即 N 型半导体和 P 型半导体。

3. 半导体材料常用的表征参数

半导体材料常用的表征参数有电学参数、化学纯度、晶体学参数和几何尺寸。

1）电学参数有电阻率、导电类型、载流子浓度、迁移率、少数载流子寿命、电阻率均匀性。

2）化学纯度有材料的本底纯度。

3）晶体学参数有晶向、位错密度。

4）几何尺寸有直径、晶片厚度、弯曲度、翘曲度、平行度、抛光面的平坦度等。

4. 元素半导体材料

已知有 12 个元素具有半导体性质，即硼（B）、碳（C）、硅（Si）、磷（P）、硫（S）、锗（Ge）、砷（As）、硒（Se）、锡（Sn）、锑（Sb）、碲（Te）、碘（I）。硅具有优良的半导体性质，是最主要的半导体材料。锗具有良好的半导体性质，是重要的半导体材料之一。

5. 化合物半导体材料

化合物半导体材料按其构成元素的数量可分为二元、三元、四元等，按其构成元素在元素周期表的位置可分为Ⅲ～Ⅳ族、Ⅱ～Ⅵ族、Ⅱ～Ⅳ～Ⅵ族等，种类繁多，性能各异，用途多种多样。20 世纪 80 年代，以砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）为代表的化合物半导体材料及其器件得到迅速发展。

6. 半导体中的载流子

载流子就是电荷的载体（电荷的输送者），也就是能够移动的荷电粒子，载流子数量大，电导率就高。具有无数载流子的物质是导体，没有载流子的物质是绝缘体，可以改变载流子数量的物质是半导体。电子、正离子、负离子、半导体导带中的电子、空穴等都是载流子。

7. 半导体的分类

根据其性能可分为高温半导体、磁性半导体、热半导体；根据其结晶结构可分为金刚石型、闪锌矿型、纤锌矿型半导体；根据其结晶程度可分为晶体半导体、非晶体半导体、微晶体半导体；根据其化学组成分可分为元素半导体、化合物半导体、固溶半导体三大类，化合物半导体可分为无机化合物半导体和有机化合物半导体。

8. N 型半导体

“N”表示负电的意思，常温下半导体的导电性能主要由杂质来决定，当半导体中掺有施主杂质时，主要靠施主提供带负电的电子导电，这种依靠电子导电的半导体叫做 N 型半导体。例如，下列的掺杂都称为 N 型半导体：

1）硅（Si）中掺有 V 族元素杂质磷（P）、砷（As）、锑（Sb）、铋（Bi）。

2）砷化镓（GaAs）掺有Ⅳ族和Ⅵ族元素杂质硅（Si）、碲（Te）、硒（Se）。

3）磷化铟（InP）中掺有元素杂质硫（S）、锡（Sn）。

4）氮化镓（GaN）中掺有Ⅳ族和Ⅵ族元素杂质硅（Si）、碲（Te）、硒（Se）。

5）碳化硅（SiC）中掺有元素杂质氮（N）、磷（P）、砷（As）。

9. P 型半导体

“P”表示正电的意思，当半导体中掺有受主杂质时，主要靠受主提供带正电的空穴导电，这种依靠空穴导电的半导体叫做 P 型半导体。例如，下列的掺杂都称为 P 型半导体：

1）硅（Si）中掺有 V 族元素杂质硼（B）、铝（A）、镓（G）、铟（I）；砷化镓（GaAs）中掺有元素杂质锌（Zn）、镉（Cd）、镁（Mg）、铍（Be）、碳（C）。

2）磷化铟（InP）中掺有元素杂质锌（Zn）、镉（Cd）。

3）氮化镓（GaN）中掺有元素杂质锌（Zn）、镉（Cd）、镁（Mg）、铍（Be）、碳（C）。

4）碳化硅（SiC）中掺有元素杂质铝（Al）、镓（G）、铍（Be）。

10. PN 结的形成

开始时，有人想用机械方法把 P 型材料与 N 型材料结合在一起，结果都不成功。这说明 PN 结并不是将 P 型半导体和 N 型半导体简单地连接在一起就可以了，而是要用扩散法、离子注入法、合金法和薄膜生长法工艺，使半导体的一部分呈 P 型，一部分呈 N 型，N 型半导体中的多数载流子电子就向 P 型半导体一边扩散。结果使 N 型区域中邻近 P 型区一边的薄层 A 中有一部分电子扩散到 P 型区域中去了，如图 3-3 所示。电子扩散至 P 型区域，

薄层 A 中因失去了这一部分电子而带正电。同样，P 型区域中邻近 N 型区域一边的薄层 B 中有一部分空穴扩散到 N 型区域一边去了，如图 3-4 所示。空穴扩散至 N 型区域，结果使薄层 B 带有负电。这样就在 N 型和 P 型两种不同类型半导体的交界面两侧形成了带电薄层 A 和 B（其中 A 带正电，B 带负电），A、B 间便产生了一个电场，这个带电的薄层 A 和 B 叫做 PN 结，也叫做阻挡层。

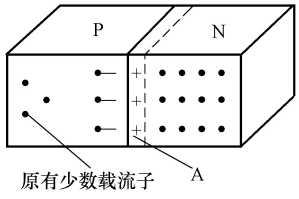


图 3-3　电子扩散至 P 型区域

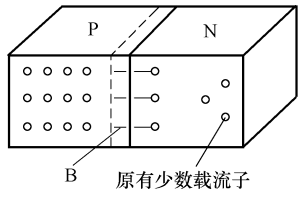


图 3-4　空穴扩散至 N 型区域

11. PN 结的特性

当 P 型区域接到电池的正极、N 型区域接到电池的负极时（这种接法称为正向连接），漂移和扩散的动态平衡被破坏，在 PN 结中流过的电流很大。这时，电池在 PN 结中所产生的电场方向恰好与 PN 结原来存在的电场方向相反，而且外加电场比 PN 结电场强，这两个电场叠加后，电场是由 P 型区域指向 N 型区域的。因此，PN 结中原先存在的电场被削弱了，阻挡层的厚度减小了，所以正向电流将随着外加正向电压的增加而迅速上升。

当 P 型区域接到电池的负极、N 型区域接到电池的正极时（这种接法称为反向连接），在 PN 结中流过的电流很小。这是由于外加电压在 PN 结中所产生的电场方向是由 N 型区指向 P 型区，也即与 PN 结原来存在的电场方向一致，这两个电场叠加后，加强了电场阻碍多数载流子的扩散运动。此时，阻挡层的厚度比原来增大，原来漂移和扩散的动态平衡也被破坏了，漂移电流大于扩散电流，正是这个电流造成了反向漏电流。

PN 结的这个性质叫做单向导电性。

12. 载流子

能自由运动在导带中的电子和自由运动在价带中的空穴称为载流子。

13. 本征导电

对于纯净的而又没有缺陷的半导体，在电子导电的同时，必然也有空穴导电。具有电子在导带中和空穴在满带中相互并存的导电机构，称为本征导电。

14. 掺杂

根据需要可以在纯净半导体晶体点阵里，用扩散等方法掺入微量的其他元素，所掺入的元素对半导体基体而言，称为杂质（间隙杂质、替位杂质）。掺有杂质的半导体称为掺杂半导体。

15. 施主

提供电子的杂质称为施主。杂质价电子在局部能级中，并不参与导电，但是在受到激发时，很容易跃迁到导带上去。这些局部能级称为施主能级，用 E_D 表示。这种杂质半导体的导电机构，是由杂质中多余电子经激发而跃迁至导带中形成的，称为电子型（N 型）半导体。

16. 受主

在半导体中，从半导体接受电子的杂质称为受主。与之相应的能级称为受主能级，用 E_A 表示。这种杂质半导体的导电机构基本上取决于价带中空穴的运动，所以称为空穴型（P 型）半导体。

17. 耗尽层

一个电子碰到了空穴，电子进入空穴，填补了空穴所缺的电子，这样空穴就消失。因为填补空穴的电子并非来自邻近原子的价电子，而是来自导带的电子，所以并未产生新的空穴，没有发生空穴位移。这样，在 PN 结两侧的一定尺寸的范围内可移动的载流子基本上消失，也就是耗尽，这个层称为耗尽层。

18. 势垒

耗尽层中可观察到势垒的变化。PN 结电位倾斜表明它能阻止载流子流动，从这个意义上讲，耗尽层中的电位倾斜被称为势垒。为了使载流子流动，可以设法加一个电压使该势垒的高度降低。

19. 内电场

P 型区一侧呈负电荷，N 型区一侧呈正电荷，因此空间电荷区出现了方向由 N 型区指向 P 型区的电场，由于这个电场是载流子扩散运动形成的，而不是外加电压形成的，故称为内电场，如图 3-5 所示。内电场是由多子的扩散运动引起的，伴随着它的建立，将带来两种影响：一是内电场将阻碍多子的扩散；二是 P 型区和 N 型区的少子一旦靠近 PN 结，便在内电场的作用下漂移到对方区域，使空间的电荷区变窄。因此，扩散运动使空间电荷区加宽，内电场增强，有利于少子的漂移，而不利于多子的扩散；漂移运动使空间电荷区变窄，内电场减弱，有利于多子的扩散，而不利于少子的漂移。当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时，交界面形成稳定的空间电荷区，即 PN 结处于动态平衡。

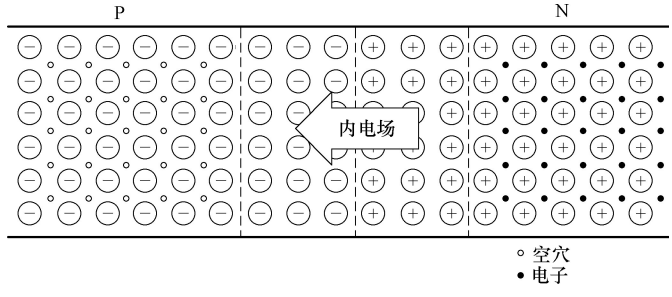


图 3-5　内电场

20. 漂移电流

由于外加电压所产生的电场，使电子和空穴因电性相吸引而流动产生电流，称为漂移电流，如图 3-6 所示。

21. 扩散电流

将 P 型半导体与 N 型半导体结合，加正向电压，电子从 N 型半导体流入 P 型半导体，而空穴从 P 型半导体流入 N 型半导体，即电子和空穴因热运动从密度高的地方流入到密度低的

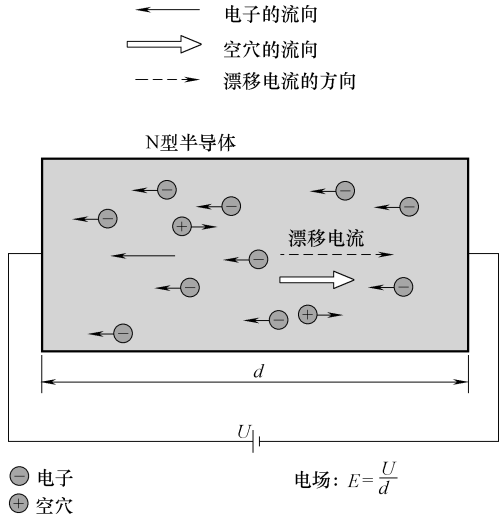


图 3-6　漂移电流

地方，在这样的结构中流动的电流称为扩散电流，如图 3-7 所示。在双极性晶体管或 PN 结二极管中，扩散电流为主体。

22. 半导体导电

如果外电场未能改变满带中电子的量子状态，即不能增加电子的能量和动量，因而不能产生电子的定向运动，不会产生电流。如果加强电场，或者利用热和光的激发，使价带（满带）中的电子获得足够的能量（大于其禁带宽度 E_g），而跃迁到导带中去，如图 3-8 所示。这样，半导体则可能导电。

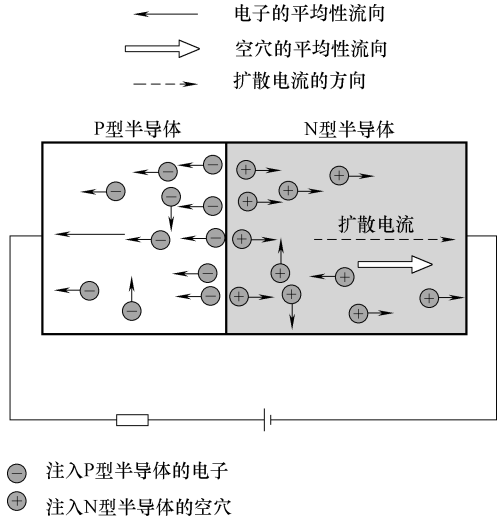


图 3-7　扩散电流

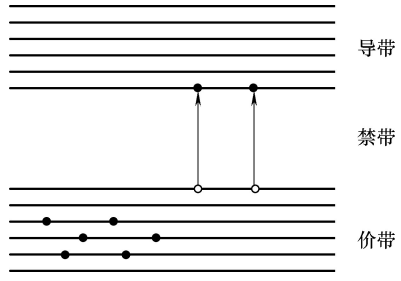


图 3-8　半导体导电

23. PN 结加正向电压

当 PN 结外加正向电压时，外加的正向电压有一部分降落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相反，削弱了内电场，于是内电场对多子扩散运动的阻碍减弱，扩散电流增大，扩散电流远大于漂移电流，可忽略漂移电流的影响，PN 结呈现低阻性，如图 3-9 所示。

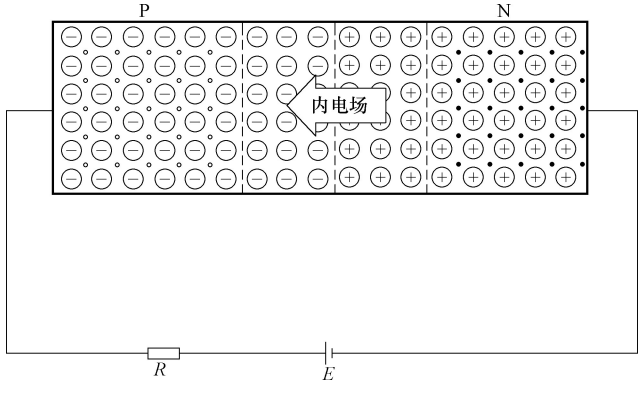


图 3-9　PN 结加正向电压

24. PN 结加反向电压

当 PN 结外加反向电压时，外加的反向电压有一部分降落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场，有利于少子的漂移，而不利于多子的扩散，漂移运动起主要作用，漂移运动产生的漂移电流的方向与正向电流相反，称为反向电流。因少子浓度很低，反向电流远小于正向电流。图 3-10 为 PN 结加反向电压。

25. 漂移速度

半导体在外电场作用时，在载流子的热运动上将叠加一个附加的速度（由电场所引起

的载流子的平均速度的增量），称为漂移速度。

26. 迁移率

迁移率是用来说明载流子导电运动的一个物理量，就是当电场强度为1V/cm时载流子的漂移速度，单位是$cm^2/(V \cdot s)$。例如，硅的电子迁移率为$1350cm^2/(V \cdot s)$，就是说，当电场强度为1V/cm时，电子在硅晶体中以1350cm/s的速度向正电极漂移。迁移率是反映半导体中载流子导电能力的重要参数。载流子在没有电场时，做无规则运动，由于运动方向不断改变，平均位移等于零，不产生电流效应。载流子不断改变运动方向是因为在晶格里和原子碰撞的结果，载流子平均每走几十或几百个原子距离（$10^{-7} \sim 10^{-6}cm$），就和原子发生一次碰撞。当在外电场作用下，载流子就顺着或逆着电场作定向运动，产生电流。

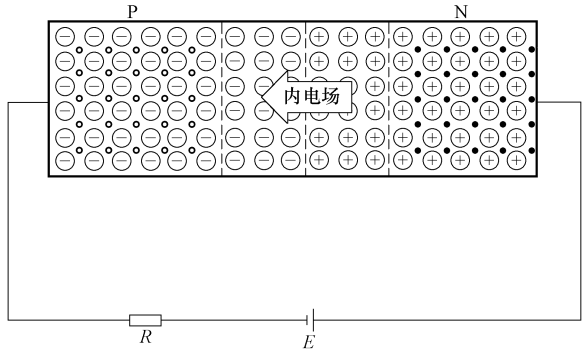


图3-10　PN结加反向电压

掺杂半导体的电导率一方面取决于掺杂的浓度，另一方面取决于迁移率的大小。同样的掺杂浓度，载流子的迁移率越大，材料的电导率越高。迁移率大小不仅关系着导电能力的强弱，而且直接决定载流子运动的快慢，它对半导体器件工作速度有直接的影响。不同的材料，电子和空穴的迁移率是不相同的，迁移率受晶体散射和电离杂质散射的影响，与晶体质量有关，晶体完整性好，迁移率就高。另外，迁移率随温度变化。

27. 多数载流子及少数载流子

在本征半导体中，电子和空穴的浓度是相等的，而在含有杂质和晶格缺陷的半导体中，电子和空穴的浓度不相等，把数目多的载流子称为多数载流子，数目少的载流子称为少数载流子。N型半导体中，电子是多数载流子，空穴就是少数载流子；在P型半导体中正好相反，电子是少数载流子，空穴是多数载流子。

28. 载流子复合

不存在外电场时，电子和空穴在晶格中的运动是无规则的，电子和空穴经常碰到一起，电子跳到空穴的位置上，把空穴填补掉，这时电子和空穴就随之消失，就种现象就称为载流子复合。

29. 晶体管

绝大多数半导体是晶体，因而往往把半导体材料称为晶体，半导体适宜做晶体管，晶体管的名称就是这样得来的。半导体适宜做晶体管是因为半导体具有独特的性质：

1）在本征半导体中适当地掺入极微量的外来杂质，则半导体的导电能力就会有上百万倍的增加，这是半导体最突出、最宝贵的特性。利用这个特性，可以制造出不同性质、不同用途的晶体管。

2）半导体的导电能力随外界条件的变化会有显著不同。例如，当照射在半导体上的光线改变时，或者半导体所处的环境温度变化时，半导体的导电能力均将随着发生显著的变化。利用半导体的这种特性，可制成各种光敏元件（如光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等）和热敏元件（如热敏电阻）。

四、半导体制造工艺

1. 电池车间的洁净技术

生产中的污染，除有害气体泄露、跑冒滴漏外，还有环境中的尘埃、杂质、人体、设备、工具、日用杂品等引入的尘埃、毛发、皮屑、油脂、手汗、烟雾等，都是重要的污染来源，这些污染会引起器件性能下降，甚至失效。例如，PN 结表面污染上尘埃、皮屑、油脂等将引起反向漏电或表面沟道；大颗粒尘埃附着在光刻表面，会使间距不一致，光刻图形模糊；高温扩散中，附着在薄膜上的尘埃将引起局部掺杂和快速扩散，使结特性变坏。所以，洁净是电池制造车间的重要技术。

2. 电子工业洁净度要求

薄膜太阳电池厂房洁净度要求参照图 3-11 所示的美国工业洁净度标准。

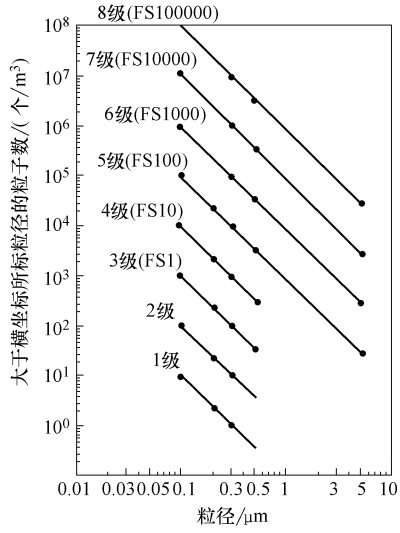


图 3-11　美国工业洁净度标准

国内有的厂家采用 GB 50472—2008《电子工业洁净厂房设计规范》。表 3-1 为电子工业洁净等级规定。表 3-2 为按器件产品种类和要求所采用的洁净标准。

表 3-1　电子工业洁净等级规定

洁净室等级	洁净度		温度/℃		相对湿度（%）		正压值/Pa	噪声（A 声级）/dB	适用范围
	粒径/μm	浓度/(粒/L)	最高	最低	最高	最低			
1 级	≥0.5	≤1	27	18	60	40	逐级相差≥66.661	≤70	大规模集成电路光刻制版
10 级	≥0.5	≤10	27	18	60	40	同上	≤70	光刻制版
100 级	≥0.5	≤100	27	18	60	40	同上	≤70	扩散氧化
1000 级	≥0.5	≤1000	27	18	60	40	同上	≤70	封装压焊
10000 级	≥0.5	<10000	27	18	60	40	同上	≤70	腐蚀筛选

表 3-2　按器件产品种类和要求所采用的洁净标准

洁净室级别	适用的工序	洁净室级别	适用的工序
100 级	光刻	10000～100000 级	中测、划片
100～1000 级	制版中精缩、显影	100000 级	组装、压焊
10000 级	芯片工艺中的氧化、扩散、金属化、清洗	100000 级以下	封装以后的各工序

3. 几种常用的清洗剂的配方

（1）用于去除衬底表面的蜡、油等有机物的清洗剂

$$H_2O_2 : H_2O : NH_4OH = 2 : 5 : 1$$

（2）用于去除衬底表面金属杂质的清洗剂

$$H_2O_2 : H_2O : HCl = 2 : 7 : 1$$

$$H_2SO_4 : H_2O_2 = 5 : 1$$

（3）用于去除衬底表面碳和有机物的清洗剂

$$HCl : H_2O = 1 : 3$$

4. 对气体的要求

气体中的微粒杂质和水汽对薄膜的质量有极大的影响，因此对这些气体纯度要求较高。表 3-3 为气体纯度要求。

表 3-3　气体纯度要求

名称 / 指标	氮气（N_2）	氧气（O_2）	氢气（H_2）	氩气（Ar）
纯度（%）	99.999	99.999	99.999	99.999
O_2（$\times 10^{-4}$%）	<1		<1	<1
N_2（$\times 10^{-4}$%）		<1		<1
H_2（$\times 10^{-4}$%）	<1	<1		<1
CO 及 CO_2（$\times 10^{-4}$%）	<2	<2	<2	<2
H_2S（$\times 10^{-4}$%）	<5	<5	<5	
卤化物（$\times 10^{-4}$%）	<1	<1	<1	<1
H_2O（露点℃）	< -70	< -70	< -70	< -70
含尘量≥0.5μm（个/L）	<3.5	<3.5	<3.5	<3.5

5. 衬底清洗原则

1）去除有机物及无机物的污染。

2）去除金属性杂质的污染。

3）去除粒子性污染。

4）去除表面氧化层。

5）处理后的表面应光亮、平滑、无水渍、无划痕。

6）干燥，防止再污染。

6. 离子

原子（原子团）、分子（分子团）失去或获得电子后所形成的带电粒子称为离子。失去电子带正电荷的粒子称为正离子，获得电子带负电荷的粒子称为负离子。若无特殊说明，均指正离子，简称离子。根据带电荷（失去电子）的多少，可分为单电荷离子（如硼离子 B^+、氢离子 H^+，氢离子又叫质子）、双电荷离子（如磷 P^{+2}、As^{+2}）、三电荷离子（如 Sb^{+3}、Se^{+3}）等。根据离子的组成，又可分为原子型离子（以上所举都是）、分子型离子（如氢分子离子 H_2^+、氧分子离子 O_2^+）、原子团离子、分子团离子等。

7. 离子注入

用具有一定能量的离子（即荷能离子）轰击固体靶并进入到固体靶中的物理现象称为

离子注入，是掺杂的重要工艺之一。它的全过程是在具有高真空系统的离子注入机中完成的。把掺杂剂离子加速到所需要的能量，直接注入半导体晶片中，经适当的温度退火后，改变注入层内半导体材料的组分和性能，达到掺杂（或改性）的目的。

8. 等离子体

等离子体是由部分电子被剥离后的原子及原子被电离后产生的正负电子所组成的离子化气体状物质，它广泛存在于宇宙中，常被视为是除固体、液体、气体外物质存在的第四态。等离子体是一种很好的导电体，利用经过巧妙设计的磁场可以捕捉、移动和加速等离子体。等离子体可分为两种，即高温等离子体和低温等离子体。低温等离子体广泛应用于工业领域。

9. 化学气相沉积

化学气相沉积（Chemical Vapor Deposition，CVD）是用气态的先驱反应物，在一定温度下，通过原子、分子间的化学反应，生成固态薄膜的技术。其过程为：反应气体到达衬底表面，其分子被加热的衬底表面吸附，产生形核的化学反应，生成物从衬底表面扩散，形成结晶中心，使薄膜生长；没有反应的气体被输送到沉积反应室外。CVD 发生的化学反应有许多种，但无论哪一种都必须提供激发反应所需的能量，激发能量主要以热、等离子体或光（紫外线、激光等）的形式提供。

10. 物理气相沉积

物理气相沉积（Physical Vapor Deposition，PVD）使用的原料为固体，采用物理方法，使膜物质微粒经蒸发或溅射逸出固体后，堆积在衬底表面上，就像火山爆发时，喷出的火山灰堆积在地面上一样。

11. 真空蒸发工艺

真空蒸发工艺是将固体原料加热熔化、使膜物质成微粒堆积在衬底表面而形成膜层的方法。蒸发设备也称为蒸发台，其主体是高真空工艺腔，内部主要部件有加热器（坩埚）、持片装置、挡板、淀积监控器等。在蒸发的过程中，待淀积的金属或固体化合物在坩埚中被加热熔化并变成蒸气，在真空工艺腔中直线到达衬底，凝结成薄膜。蒸发设备按蒸发源加热方式分为电阻蒸发、电子束蒸发、离子束蒸发、高频感应加热、激光束加热等。电阻蒸发主要是借助大电流或射频感应涡流电流通过加热器来加热淀积材料；电子束蒸发是借助电子枪的装置，发射高能电子束直接轰击坩埚中的淀积材料来加热。电子束蒸发允许配备多个源，进行不同金属的淀积，可获得高质量薄膜，包括高熔点金属。

真空蒸发工艺最大的缺点是金属薄膜的台阶覆盖能力差，精确控制组分也存在技术难题。

12. 溅射工艺

溅射是与气体辉光放电现象相联系的一种薄膜沉积技术，若在真空室内充入放电所需的惰性气体（如氩气），在高压电场作用下，使气体分子电离，产生大量正离子，带电离子被电场加速，形成高能量的离子流，去轰击靶材料表面，由于离子的动能超过靶材料的分子结合能，在离子轰击下，靶材料的原子或分子将离开固体表面，以高速溅射到衬底上沉积成薄膜。溅射工艺包括直流溅射、射频溅射、磁控溅射、反应溅射、偏压溅射、等离子溅射、离子束溅射等。

13. 直流溅射

直流溅射就是向高真空中充入少量惰性气体（如氩气），气体在低真空强电场下电离，产生高速运动的正离子，这些正离子以一定能量轰击靶材，使靶材料原子飞溅出来，沉积在衬底上形成薄膜。

14. 射频溅射

射频溅射也叫高频溅射，不仅能溅射金属，也能溅射绝缘材料。在绝缘体背面加上金属电极，并在此电极上加上射频电压，产生通过绝缘体的位移电流。溅射电压和等离子层的交替作用，在绝缘体和等离子体之间建立直流电场，直流电场在绝缘体表面产生负偏压，由于这负偏压而产生溅射，这就是射频溅射。

15. 磁控溅射

在靶电极背面安装一个由永久磁铁构成的特定形状的磁铁，使电离的电子在磁场作用下按一定轨迹运动，有效地增加电子与气体分子碰撞的概率，从而增加了气体分子的电离效果，显著提高正离子流密度，并可在较高工作真空、较低工作电压时产生溅射，能获得较高的溅射速率。其特点是溅射电压低、溅射速率快、容易获得大面积均匀的优质薄膜，是应用最广的溅射方法。

16. 反应溅射

反应溅射就是在溅射时，向真空系统中引入一定的反应气体（如氧、氮等），使之与被溅射材料发生反应，可获得化合物薄膜。

17. 砷化镓的基本物理性质及制备方法

（1）性质　砷化镓（GaAs）属于Ⅲ-Ⅳ族化合物半导体材料，是直接跃迁型的化合物半导体，具有闪锌矿型晶体结构，其晶格可以看作是两个互穿的面心立方晶格，分别由镓原子和砷原子构成。表 3-4 为砷化镓的基本物理性质。

表 3-4　砷化镓的基本物理性质

晶体结构	闪锌矿型	晶体结构	闪锌矿型
晶格常数/Å	5.869	晶系	立方
密度/(g/cm^3)	5.32	比介电常数	13.1
熔点/℃	1238	本征载流子浓度/cm^3	2×10^6
线性膨胀系数/(10^6/K)	5.92	电子迁移率/[cm^2/(V·s)]	8500
热导率/[W/(cm·℃)]	0.46	空穴迁移率/[cm^2/(V·s)]	400
室温下的禁带宽度/eV	1.424	本征电阻率/Ω·cm	3×10^8
光学跃迁类型	直接		

（2）制备方法　砷化镓单晶材料的制备方法主要有三种，即布里奇曼法（HB）、高压液封直拉法（LEC）和梯度凝固法（VGF）。

18. 砷化镓化学气相外延的基本原理

在 Ga/$AsCl_3$/H_2 系统，以 $AsCl_3$ 为砷源，以 Ga 或 GaAs 为镓源，载气通常为 H_2，也可用 N_2 或 Ar。镓源置于高温区（850℃），GaAs 衬底置于生长区（650～750℃）。化学反应式如下：

$AsCl_3$ 还原：$4AsCl_3$(气) $+6H_2$(气)$\longrightarrow 4As$(固) $+12HCl$

Ga 输运：$4GaAs + 4HCl \longrightarrow 4GaCl + As_4 + 2H_2$

歧化反应：$10GaCl \longrightarrow 5GaCl_2 + 5Ga$

沉积反应：$5Ga + As_4 \longrightarrow 4GaAs + Ga$

19. 砷化镓化学气相外延生长的掺杂剂

常用的 N 型掺杂剂为 S、Se、Te 和 Sn，P 型掺杂剂为 Zn。液态的 $SnCl_4$ 可以直接掺入 $AsCl_3$ 中，被载气携入反应室。气态的 H_2S、H_2Se 等可以直接被载气携入反应室，其掺杂的重复性较好。掺杂的浓度与气体流量、衬底温度、衬底晶向等因素有关。

20. 砷化镓外延设备的组成

砷化镓外延设备可分为四个主要部分，即反应室、加热系统、气体分配系统和计算机控制系统。

1）反应室有水平式、圆筒式、圆盘式。

2）加热系统有电阻加热、高频感应加热、灯辐射加热等。

3）气体分配系统由质量流量计、气动阀门、不锈钢管道等组成。

4）计算机控制系统控制流量、温度、时间等。

21. 砷化镓气相外延的基本过程

1）源通过载气从主气流区输送到沉积区。

2）源在高温沉积区内发生气相反应，产生反应物和副产物。

3）反应物输送到衬底表面，吸附到生长表面。

4）表面反应生成的固相并入到生长膜中，进行外延生长。

5）副产物随主气流流出反应室。

6）尾气经处理后排出。

22. 液相外延

液相外延（LPE）是由饱和或过饱和溶液在单晶衬底上进行晶体生长的一种外延方法。作为形成饱和溶液的溶剂，它应该能溶解溶质（半导体或半导体组元），而且它溶解溶质的温度应当远低于半导体熔点；此外；它应当是高纯的。

以砷化镓外相为例，砷化镓液相外延方法很多，有突然降温法、平衡降温法、稳态温度梯度法等，常用的方法是稳态温度梯度法。

砷化镓液相外延生长是基于 Ga-As 体系的相图，在一定温度下饱和溶液随着温度的降低产生过饱和结晶。在饱和溶液中放入 GaAs 单晶片作为衬底，当达到饱和结晶时，以单晶的方式沉积在 GaAs 衬底上。这里的溶液是 Ga，溶质是 As，为了控制导电类型和载流子浓度也可掺入一定的杂质。液相外延生长的温度低，可获得纯度较高、缺陷较少的外延薄膜。

23. 金属有机化学气相外延

金属有机化学气相外延（MOCVD）在低压或常压反应室内，用载气带入金属有机化合物（TMGa、TMAl、TMIn 等）和氢化物（AsH_3、PH_3 等）原材料及掺杂剂的混合气体到反应室，在一定条件下发生化学反应，沉积在加热的衬底表面，生长所需的单晶外延层。MOCVD 生长温度低、碳沾污少、纯度高、浓度分布陡峭，便于超薄生长。

24. MOCVD 设备的基本结构

MOCVD 设备可分为五个主要部分，即反应室、气体分配系统、计算机控制系统、尾气处理系统和报警系统。

1）反应室有水平式、圆盘式等，反应室的设计对外延层厚度和组分均匀性、异质界面梯度、本底掺杂浓度以及产量均有极大的影响。加热系统有高频感应加热、灯辐射加热等。

2）气体分配系统由质量流量计、气动阀门、不锈钢管道等组成。气体分配系统的功能是向反应室输送反应剂，并精确控制其浓度、生长时间和顺序以及流经反应室的总气体流量，生长出所需的成分与结构的外延层。

3）计算机控制系统控制气体流量、衬底温度、反应室压力、生长时间和气路中的各种阀门等。利用计算机控制系统可以使 MOCVD 装置按事先设计的程序运行，在生长超晶格、量子阱或组分梯度层时，计算机控制尤其重要。

4）尾气处理系统的功能是在尾气排放前去除有毒、自燃的未反应源和反应副产品。去除的方法包括活性炭过滤器和利用化学反应吸收毒气的干式或湿式过滤器。上述方法往往组合起来使用。为了保证 MOCVD 设备的安全运行，设备中应装有危险气体探测器等监测仪器，并与报警系统相连，构成安全联锁装置。

5）报警系统包括气体流量、衬底温度、反应室压力和气路中的各种阀门出现异常时报警。控制系统中的安全联锁装置可以防止人工控制时的误操作，并在事故发生时自动使整个装置进入保护状态。

25. MOCVD 生长外延层的质量控制

（1）衬底晶向　常用Ⅲ-Ⅴ族半导体衬底表面晶向是（100）面，（100）面易于化学抛光，易于获得镜面外延层形貌，适于选择外延生长，也适于器件工艺要求。偏离（100）面向（110）面倾斜 1°～5°的小角度的衬底的表面，更容易获得镜面光洁的外延层。不同的衬底的晶向，对外延层的载流子浓度和迁移率都有影响。

（2）生长温度　生长温度影响外延层的生长速度、杂质浓度、表面形貌和晶体完整性。

（3）输入的Ⅴ/Ⅲ比　为了避免 GaAs 外延表面出现 Ga 滴，输入反应室的Ⅴ/Ⅲ比必须大于 1。输入的Ⅴ/Ⅲ比对外延层中的剩余杂质浓度有较大影响。

（4）反应室的压力　反应室的压力对生长速度的影响较弱，降低反应室的压力，有利于改善外延层的厚度与组分均匀性以及异质界面组分变化的陡峭程度。

（5）载气的纯度　H_2 纯度大于 7N。H_2 纯度对外延层的载流子浓度、迁移率和表面形貌都有影响。

26. MOCVD 的优点和缺点

（1）MOCVD 的优点

1）可生长各种Ⅲ-Ⅴ族、Ⅱ-Ⅳ族化合物及其固溶体。

2）外延温度比一般化学气相要低，可减少来自衬底的污染，生长界面较陡。

3）生长速度可控，可以生长超晶格、量子阱等微结构。

4）易于生长含 Al 化合物。

5）适用于批量生长。

（2）MOCVD 的缺点

1）所有的反应气体都有很大的毒性，易燃、易爆。

2）反应气体制造复杂，成本高。

27. MOCVD 的原材料的要求

金属有机化合物源的要求：

1）室温下为液体，并有适当而且稳定的蒸气压，可保证能精确控制源的剂量，得到适当的反应速度。

2）适宜的热分解温度，在外延生长温度下基本完全分解，可提高源的利用率，而且在贮存温度下应是稳定的。

3）反应活性较低，不与其他源发生预沉积反应。

4）易于合成与提纯，纯度大于5N。

5）低毒性与价格便宜

表3-5为MOCVD常用源的蒸气压。

表3-5　MOCVD常用源的蒸气压

化合物及缩写名称	状态	蒸气压(298K、hPa)	蒸气压常数	
			A	*B*
$Ga(CH_3)_3$,TMGa	液态	317.3	1703	10.19
$Ga(C_2H_5)_3$,TEGa	液态	6.4	2222	10.34
$Al_2(CH_3)_6$,TMAl	液态	18.9	2134	10.35
$In(CH_3)_3$,TMIn	固态	2.3	3014	12.64
$In(C_2H_5)_3$,TEIn	液态	0.4	2815	11.05
$Zn(CH_3)_2$,DMZn	液态	490	1560	9.926
$Zn(C_2H_5)_2$,DEZn	液态	11.4	2190	10.40
$Cd(CH_3)_2$,DMCd	液态	47.5	1850	9.888
$Hg(CH_3)_2$,DMHg	液态	68	1750	9.699
PH_3	气态	4.45×10^4	—	—
$H_2PC(CH_3)_3$,TBP	液态	354.6	1539	9.709
AsH_3	气态	2.52×10^4	—	—
$H_2AsC(CH_3)_3$,TBAs	液态	200	1562	9.624

注：蒸气压常数*A*、*B*是与物质相关的特性常数，无单位。使用式（3-1）时，要注意温度适用范围。

蒸气压（Pa）的计算公式：

$$\lg P = B - A/T \tag{3-1}$$

式中　*T*——绝对温度（K）。

28. 分子束外延

分子束（Molecular Beam Epitaxy，MBE）外延是精细的真空蒸发，是在清洁的超真空（$P<5\times10^{11}$Torr，1Torr=133.322Pa）设备装有源材料（Ga、Al、As）及掺杂剂（Si、Be）的束源炉，当加热束源炉时，这些材料和掺杂剂被蒸发，以原子或分子束流的形式入射到加热的衬底表面，并发生物理和化学的相互作用，从而获得外延生长。

29. 分子束外延设备的组成

分子束外延设备由三部分组成，即装片室、制备室和生长室。

1）装片室的作用是装取样品，装片室与制备室之间用真空阀门隔离。

2）制备室的主要部件是样品传递装置、样品贮存台和样品预处理装置。

3）生长室的基本组成是束源炉、快门、样品架、高能电子衍射仪和质谱仪。

30. 外延片表面质量

1）外延片表面不应有沾污。

2）外延片表面不应有雾、麻点、划道及擦伤。

3）外延片表面应平整、光亮。

31. 电子束蒸发工艺原理

电子束蒸发比普通电阻加热蒸发增加了一个偏转电子枪，它由发射高速电子的电子枪和使电子作圆周运动的均匀磁场组成。在电子枪中，电子通过螺旋状电丝，使其发热后发射电子，电子在电场、磁场的作用下，穿过加速阳极孔，形成电子束。电子进入均匀磁场后，受洛仑兹力作用而作圆周运动，调节磁场强度可改变电子束的偏转半径，使电子束准确地射到蒸发材料的表面，大量的高速电子因碰撞而失去能量，动能转变为热能，使受电子轰击的蒸发源熔化蒸发并淀积到硅片表面。少量在蒸发源表面反射出来的电子和二次电子也受磁场作用而偏转，最后被接地的吸收器吸收，从而避免了这些高能电子对硅片的损伤。

32. 影响气相外延生长速度的因素

1）衬底表面晶向。

2）气体流量。

3）$AsCl_3$ 的液化压力。

4）反应室的压力。

5）载气的种类。

33. 影响气相外延层质量的因素

1）衬底晶向和抛光质量。

2）源材料和载气的纯度。

3）外延设备的气密性和温度场分布。

4）外延生长的温度和工艺。

34. GaAs 气相外延工艺条件

1）生长温度为 680 ~ 720℃，源温为 -15 ~ 0℃。

2）外延层的厚度主要由生长温度、气体流量、生长时间来控制。通过已确定的外延生长速率，来决定所需的外延层的生长温度、气体流量、生长时间等。生长速率约为 5 ~ 8μm/h。

3）外延层的载流子浓度主要由掺杂剂的浓度、源温和流量来控制。

35. 液相外延的特点

1）外延层的纯度高。

2）生长速度较慢，生长温度低。

3）与其他外延方法相比，设备简单。

4）外延层的厚度及其均匀性较难控制。

5）外延层表面形貌不如气相外延层好。

36. 分子束外延层的质量控制

1）外延工艺参数有异质结界面的控制、外延厚度和浓度的控制、外延的均匀性、外延的重复性等。

2）源材料要求为金属镓、固态砷、金属铝、金属铟纯度≥7N。

3）衬底材料要求为平整、光亮、无损、少沾污。

4）衬底温度为500～520℃，束源炉温度为800～1200℃。

37. 分子束外延工艺条件

1）生长温度为500～550℃，束源炉温度为800～1200℃。

2）外延层的厚度主要由生长温度、束源炉温度、生长时间来控制，通过已确定的外延生长速率，来决定所需外延厚度的生长温度、束源炉温度、生长时间等。生长速率约为1μm/h。

3）外延层的载流子浓度（电阻率）主要由掺杂束源炉温度来控制。

38. 衬底表面处理状态对外延材料的影响（见表3-6）

表3-6　衬底表面处理状态对外延材料的影响

表面状态	影　响
表面划痕	损伤材料表面,杂质易于在损伤处堆积,引起材料掺杂不均匀
表面水渍	半导体表面氧化,造成材料外延不均匀
氧化膜	使外延材料生长的浓度、厚度不均匀
残留金属杂质	使外延材料掺杂不均匀
残留有机物	外延片表面不光亮,引入碳的污染
残留尘粒	使外延材料生长不均匀
腐蚀速度太快	使外延材料表面出现雾状的缺陷

39. 外延片表面不光亮的因素

1）衬底表面抛光质量不高。

2）衬底表面残留有机物。

3）衬底表面有水渍。

4）衬底腐蚀速度太快。

5）载气纯度不够。

6）系统漏气。

7）生长工艺条件不适宜。

40. 自由表面能

在薄膜微观结构中，表面能是一个重要概念。在产生表面时必须克服化学键而做功，化学键的断开（形成）将伴有自由能的增加（降低），自由表面能代表了系统净能量的增加。但是，邻近表面的晶格原子位置的弛豫，会使自由表面能降低；并且为协调表面上可利用的键而发生的表面重构，自由表面能也会进一步降低。在数学上，表面能是用材料表面上位置的标量函数表示的一个宏观量。一个给定晶体学取向的单位面积的自由表面能值由这个表面的精细尺度结构来决定。

41. 界面表面能

材料相接处的界面表面，可用单位面积上的界面表面能表征。界面的能量密度可能小于界面处相连接的两种材料的自由表面能之和，而大于任一种材料远离界面的内部点的能量密度。

42. 薄膜生长原理

在理想生长条件下，给定情况下占主导地位的生长方式主要取决于相关的材料、衬底温度和蒸气的过饱和度，一般来讲，薄膜结构的演变依赖于仍然没有被完全理解的动力学过程。对于一个给定的材料体系来说，可能影响气相沉积薄膜最终晶粒结构的最重要的两个参数就是衬底温度和生长流或沉积速度。生长流是代表朝向生长表面的质量或体积流速的一个量，它与蒸气的过饱和度密切相关。薄膜材料流向生长表面的流量可求助统计力学估计。增加沉积速度趋向于促进形成细小微观结构，而增加衬底温度趋向于促进粗大微观结构或单晶体生长。

43. 薄膜残余应力

薄膜残余应力是指当系统所有外部边界无外力作用时，材料系统中存在的内应力分布。任何黏结在衬底上的薄膜都在其厚度范围内承受某种残余应力。残余应力的存在意味着，如果薄膜不受基体或相邻层的约束，薄膜的平面内尺寸将会改变或变为弯曲的。薄膜应力分为两类。一类是生长应力，是指薄膜在衬底上或相邻层上生长后在薄膜中出现的应力分布。生长应力受所涉及的材料以及沉积过程中的衬底温度、生长流和生长室条件等的强烈影响。第二类为外禀应力，表示生长之后薄膜材料的物理环境变化引起的应力状态，只有当薄膜黏结在衬底上才会产生这种应力。

薄膜残余应力可以导致薄膜过度的变形、断裂、分层、翘曲、鼓包、剥离和材料的微观结构变化等。

五、半导体的电学特性

1. eV

1eV（电子伏特）是1个单位电荷通过1V的电位差所获得的能量。1个单位电荷通过100V电位差所获得的能量为100eV，两个单位电荷通过100V电位差所获得的能量为200eV。

2. 欧姆接触

金属与半导体间没有整流（把交流电变为直流电）作用的接触称为欧姆接触。实际上的欧姆接触几乎都是采用金属-N^+N半导体或金属-P^+P半导体的形式制成的。在这种接触中，金属与重掺杂的半导体区接触，接触界面附近存在大量的复合中心，而且电流通过接触界面时的压降也往往小到不计。制造欧姆接触有两种方法：

1）如果金属本身是半导体的施主或受主元件，而且在半导体中有高的固溶度，就用合金法直接在半导体中形成金属-N^+区或金属-P^+区。如果金属本身不是施主或受主元素，可在金属中掺入施主或受主元素，用合金法形成欧姆接触。

2）在半导体中先扩散形成重掺杂区，然后使金属与半导体接触，形成欧姆接触。

3. 纯度表达

纯度一般按多少个9来表达。5N，即5个9，表示纯度为99.999%，N为英文nine的第一个字母。有时用电阻率来表达，材料的电阻率越高，其纯度越高。

4. 电阻率

1）电阻率是表示物质电阻特性的物理量。长为1m、横截面积为$1mm^2$的导线20℃时的电阻，称为该材料的电阻率。其计算公式为

$$\rho = \frac{RS}{L}$$

式中　ρ——电阻率（Ω·m）；

S——横截面积（mm^2）；

R——电阻（Ω）；

L——导线的长度（m）。

2）电阻率不仅与导体的材料有关，还和导体的温度有关，在温度变化不大时，几乎所有金属的电阻率随温度作线性变化。其公式为

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \tag{3-2}$$

式中　ρ_0——0℃时的电阻率；

α——电阻率温度系数；

t——摄氏温度。

3）电阻率和电阻是两个不同的概念，电阻率是反应物质对电流阻碍的属性，电阻是反应物体对电流的阻碍作用。

4）电阻率除以金属膜的厚度即是方块电阻，电阻大小为方块电阻乘以金属块的长与宽之比。

5. 电导率

电导率用来表示物质中电流流动的难易程度，是物质固有的物理量。电导率 σ 与电阻率 ρ 之间是互为倒数的关系，即

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

电导率的单位是 S/m 或 $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$，S 读作西（门子），电导（S）与电阻（Ω）互为倒数关系，S 可以用电压和电流单位表示，即 1S = 1A/V。

对于半导体材料，由于电子和空穴同时导电，存在两种载流子，其电导率表示为

$$\sigma = ne\mu_1 + \alpha e\mu_2$$

式中　n、α——电子、空穴的浓度（原子/cm^3）；

μ_1、μ_2——电子、空穴的迁移率［$cm^2/(V \cdot s)$］；

e——载流子电量。

室温下的电导率：导体约在 10^5S/m 以上，半导体在 $10^{-10} \sim 10^5$S/m，绝缘体小于 10^{-10} S/m。

6. 势阱

阱是指捕野兽用的陷坑。粒子在某力场中运动，从势能函数曲线可知在空间的某一有限范围内势能最小，形如陷阱，称为势阱（Potential Well），就是电子的势能图像类似一个波的形状，那么当电子处于波谷时，就好像处在一口井里，比较稳定，很难跑出来。

7. 量子阱（QW）

量子阱（QW）是指由两种不同的半导体材料相间排列形成的、具有明显量子限制效应的电子或空穴的势阱。量子阱的最基本特征是：量子阱中因为有源层的厚度仅在电子平均自由程内，阱壁具有很强的限制作用，使得载流子只在与阱壁平行的平面内具有二维自由度，在垂直方向使得导带和价带分裂成子带。

在由两种不同半导体材料薄层交替生长形成的多层结构中，如果势垒层足够厚，以致相邻势阱之间载流子波函数之间耦合很小，则多层结构将形成许多分离的量子阱，称为多量子阱（MQW）。量子阱中的电子态、声子态和其他元激发过程以及它们之间的相互作用，与三维体状材料中的情况有很大差别。在具有二维自由度的量子阱中，电子和空穴的态密度与能量的关系为台阶形状，而不是像三维体材料那样的抛物线形状。

量子阱的制备通常是通过将一种材料夹在两种材料（通常是宽禁带材料）之间而形成的，比如两层砷化铝之间夹着砷化镓，一般这种材料可以通过 MBE（分子束）外延或者 MOCVD（金属有机化学气相沉积）的方法来制备。

8. 隧道结

在势垒一边平动的粒子，当动能小于势垒高度时，按经典力学，粒子是不可能穿过势垒的。对于微观粒子，量子力学却证明它仍有一定的概率穿过势垒，实际也正是如此，这种现象称为隧道效应。对于谐振子，按经典力学，由核间距所决定的位能绝不可能超过总能量。量子力学却证明这种核间距仍有一定的概率存在，此现象也是一种隧道效应。在两层金属导体之间夹一薄绝缘层，就构成一个电子的隧道结。

9. 方块电阻

一个均匀导体的电阻 R 正比于导体的长度 L，反比于导体的截面积 S。如果这个导体是一个宽为 W、厚度为 d 的薄层，则

$$R = \frac{\rho L}{dW} = \frac{\rho}{d}\frac{L}{W}$$

薄层电阻与 $\frac{L}{W}$ 成正比，比例系数为 $\frac{\rho}{d}$，这个比例系数就叫方块电阻，用 R_s 表示，则有

$$R_s = \frac{\rho}{d}$$

$$R = R_s \frac{L}{W}$$

R_s 的单位为欧姆，通常用符号 Ω/□ 表示，以区别于其他电阻，“□”是方块符号。从上式可以看出，当 $L = W$ 时有 $R = R_s$，这时 R_s 表示一个正方形薄层电阻，它与正方形边长无关，这就是取名方块电阻的原因。

10. 测量方块电阻（薄膜电阻）

一般用四探针法测量方块电阻。四探针是四根彼此等距离为 S 的钨丝探针，其针尖保持在一条直线上，且以等量压力压在硅片（薄膜）的表面。一对外探针为电流探针，由稳压电源供电，在薄层中通过一定量的电流（I），相应有一定的电场分布。一对内探针为电位探针，测定距离为 S 的两点间的电位差（U）。如果薄膜的长度、宽度比探针间距大得多，则方块电阻的表达式为

$$R_s = C\frac{U}{I}$$

式中 C——修正系数，由被测样品的长度、宽度、厚度及探针间距 S 来确定，C 可以查表得到；

R_s——方块电阻。

11. 活化

活化又称为激发（Excitation），是指粒子（如原子或离子）从外界获得足够能量后，其电子由较低的基态能级跃迁到较高能级的过程。一个分子是否为活化分子，根据不同的速率理论及反应，其标准不同。如碰撞理论中，分子能量 $\varepsilon > \varepsilon_0$（阈能）的分子为活化分子，活化分子也不一定是过渡态，如单分子理论中的赋能分子。另外，活化也常指某一物质从其无活性状态转变为具有活性状态的过程，其中也包括生物细胞或孢子在休眠后进入重新生长状态。例如金属催化剂的活化，即为从其氧化物状态转变为金属状态的过程；生物孢子在适宜的生长环境中再次繁殖。活化方式有碰撞传能活化及光活化等多种方式。

12. 活化的能量

非活化分子转变为活化分子需要吸收能量。温度对反应速率有显著影响。在多数情况下，其定量规律可由阿伦尼乌斯公式来描述：

$$\kappa = A\exp(-E/RT) \tag{3-3}$$

式中　κ——反应的速率系（常）数；

E、A——分别称为活化能和指前因子，是化学动力学中极重要的两个参数；

R——摩尔气体常数；

T——活化后热力学温度。

对于更为复杂的描述 κ 与 T 的关系式，活化能 E 定义为

$$E = RT_2(\mathrm{d}\ln\kappa/\mathrm{d}T) \tag{3-4}$$

在反应中，并不是反应物分子的每一次碰撞都能发生反应。S. A. 阿伦尼乌斯认为，只有活化分子之间的碰撞才能发生反应，而活化分子的平均能量与反应物分子平均能量的差值即为活化能。近代反应速率理论进一步指出，两个分子发生反应时必须经过一个过渡态——活化络合物，过渡态具有比反应物分子和产物分子都要高的势能，互撞的反应物分子必须具有较高的能量（足以克服反应势能垒），才能形成过渡态而发生反应，此即活化能的本质。式（3-3）可写成对数形式

$$\ln\kappa = \ln A - E/RT \tag{3-5}$$

根据式（3-5），由实验测出不同温度下的 κ 值，并将 $\ln\kappa$ 对 $1/T$ 作图，即可由所得直线的斜率求出 E 值。也可将由实验归纳出的 κ 与 T 的经验关系式直接代入式（3-4）求得 E 值。

对于复合反应，由上述实验方法求出的 E 值只是表观值，没有实际的物理意义。

13. 功函数

功函数（Work Function）又称为功函、逸出功，在固体物理中被定义为，把一个电子从固体内部刚刚移到此物体表面所需的最少的能量。功函数的大小大概是金属自由原子电离能的二分之一。表 3-7 为金属的功函数。

（1）光电功函数　功函数是从某种金属释放电子所必须给予的最小能量。在光电效应中，如果一个拥有的能量比功函数大的光子被照射到金属上，则光电发射将会发生，且任何超出的能量将以动能形式给予电子。

光电功函数为　　$\varphi = hf_0$

式中　h——普朗克常数；

f_0——能产生光电发射光子的最小（阈值）频率。

当电子获得能量时，它从一个能级以“量子跃迁”的方式跳到另一个能级。这一过程称为电子的激发，其中较高能级称为激发态，而较低能级称为基态。

表 3-7 金属的功函数 （单位：eV）

金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数
Ag	4.26	Al	4.28	As	3.75	Au	5.1	B	4.45	Ba	2.7
Be	4.98	Bi	4.22	C	5	Ca	2.87	Cd	4.22	Ce	2.9
Co	5	Cr	4.5	Cs	2.14	Cu	4.65	Eu	2.5	Fe	4.5
Ga	4.2	Gd	3.1	Hf	3.9	Hg	4.49	In	4.12	Ir	5.27
K	2.3	La	3.5	Li	2.9	Lu	3.3	Mg	3.66	Mn	4.1
Mo	4.6	Na	2.75	Nb	4.3	Nd	3.2	Ni	5.15	Os	4.83
Pb	4.25	Pt	5.65	Rb	2.16	Re	4.96	Rh	4.98	Ru	4.71
Sb	4.55	Sc	3.5	Se	5.9	Si	4.85	Sm	2.7	Sn	4.42
Sr	2.59	Ta	4.25	Tb	3	Te	4.95	Th	3.4	Ti	4.33
Tl	3.84	U	3.63	V	4.3	W	4.55	Y	3.1	Zn	4.33

（2）热功函数　功函数在热发射理论中也同等重要。这里电子从热而非光子中获得能量。在这种情况下，电子从加热的充满负电的真空管灯丝逃逸，功函数可被称为热功函数。钨是真空管中常见的金属元素，它的热功函数大约是4.5eV。

热发射要求有灯丝加热电流（I_f），来保持2000～2700K的温度。一旦达到灯丝电流的饱和态，则灯丝电流的小改变不再影响电子束电流。电子枪被提供一个非常靠近克服功函数（W）所需的灯丝电流（Goldstein，2003）。热功函数取决于晶体取向，而且趋向于对于开放晶格的金属更小，对于原子紧密堆积的金属更大，范围大概是1.5～6eV；某种程度上稠密晶面比开放晶格金属更高。

在电子学里，功函数对设计肖特基二极管或发光二极管中金属-半导体结以及真空管非常重要。

（3）测量　很多基于不同物理效应的技术被发展出来来测量样品的电学功函数。

第一类方法利用样品由光吸收（光发射）所引发的电子发射，通过高温（热发射）或者电场（场发射），以及使用电子隧穿效应来测量。

第二类方法是相对测量方法，利用样品与参照电极的接触势差。实验上，是使用二极管的阴极电流或者样品与参照物之间，由人工改变的两者间电容导致的位移电流等方法（开尔文探测、开尔文探测力显微镜）来测量的。

六、太阳电池

1. 光伏

光生伏特简称光伏，是指当某种结构的半导体器件受到光照射时将产生直流电压（或电流），当光照停止后，电压（电流）则立即消失的现象。

2. 杂质散射

一个电子（或空穴）经过一个离化杂质原子附近时，将受到库仑力的作用而改变运动方向，即受到这个离化杂质原子的散射。杂质散射正比于离化杂质总浓度。

3. 晶格散射

位于晶格上的原子热振动，破坏了晶格的周期性，使格点上的原子产生瞬时极化电场，

这种极化电场也可以改变电子（或空穴）的运动方向而产生晶格散射。晶格散射随温度的增加而增加。

4. 扩散

在半导体中，如果电子（或空穴）的浓度不均匀，则电子（或空穴）将在浓度梯度的影响下扩散，发生净位移，产生扩散电流。浓度梯度越大，扩散越快。

5. 费密能级 E_F

费密能级是指固体中电子的化学势，是一个很重要的物理量，它和温度、半导体材料的导电类型、杂质的含量以及能量零点的选取有关。只要知道了 E_F 的数值，在一定温度下，电子在各量子态的统计分布就完全确定。

6. 太阳常数 E_{sc}

太阳常数表征到达地球大气层顶部的太阳辐照量的数值，最新数值是 1367W/m^2。

7. 提高太阳电池效率

要提高太阳电池效率，应提高开路电压、短路电流、填充因子，但三个量是互助牵制的，如果单方面提高一个，可能会降低另一个，以致总效率反而下降。因此在选择材料、设计工艺时必须全盘考虑，力求使三个参量的乘积最大。

8. 电池损失

电池损失包括反射损失、长波损失、被电池吸收的光未能产生光生载流子、短波损失、光生空穴-电子对在各区复合、结电流及少子复合损失、串并联电阻损失。

9. 光电流

光生载流子的定向运动形成的电流称为光电流。

10. 短路电流密度

受照射的太阳电池被短路时，PN 结处于零偏压，这时，短路电流密度 J_{sc} 等于光生电流密度 J_L，正比于入射光强度。

11. 开路电压

由于光照射而在太阳电池两端出现的电压称为光电压，类似外加于 PN 结的正偏压，与内建电场方向相反。太阳电池在开路状态的光电压称为开路电压。

12. 填充因子 *FF*

填充因子是衡量太阳电池输出特性优劣的重要指标之一，是最大输出功率 P_m 与开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 乘积之比。

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc}U_{oc}} = \frac{I_m U_m}{I_{sc}U_{oc}} \tag{3-6}$$

图 3-12 为太阳电池的负载特性曲线。在一定光强下，*FF* 越大，曲线越方，输出功率越大。

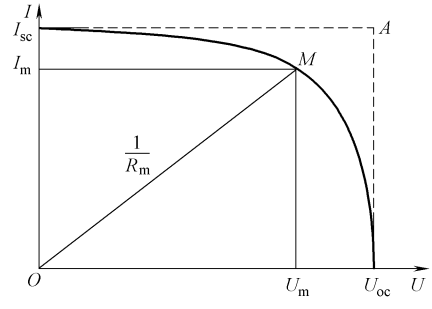


图 3-12　太阳电池的负载特性曲线

13. 太阳电池的标称功率

太阳电池的标称功率也就是最大输出功率，用 P_m 表示。

14. 太阳电池的效率

太阳电池受到光的照射时，其输出的电功率与入射的光功率之比称为太阳电池的效率，也称为光电转换效率。

15. 暗电流

当 PN 结处于正偏状态时，忽略串联电阻的影响，在负载上得到的电流密度 $J = J_L - J_d$，J_d 为没有光照时的电流，称为光电池的暗电流。它消耗光电流，降低了开路电压，因此，减小暗电流是提高太阳电池效率的重要方面。

16. 能带边失调值

当两种不同的半导体形成异质结时，在界面处导带及价带都会产生连续或不连续的突变，这种突变来源于两种材料不同的电子亲和能。常把这种能带边的不连续称为能带边失调值。

17. 多层、叠层、多结电池

多层、叠层、多结电池都是指的同一种类型的电池组件，但三种说法的含意不一样。多层指该电池组件是由几层单独电池组成的；叠层指几层单独电池是上下摞在一起的，即叠在一起；多结是指电池组件的物理结构，该电池是有几个结的，结是指两种不同型结构的界面附近的区域，如 PN 结、PIN 结。

18. 电池、电池组件

电池是指把化学能或光能转变为电能的装置，单个电池可一次完成这个转变过程。电池组件是指由多个单电池串联或并联起来的电池。

第二节 薄 膜

我们周边的物体，大多是在温度变化比较慢或是在热平稳状态下制造出来的，可以做到内部缺陷很少，而在真空中制备的设备是将材料加热到几百度，使之蒸发而成的，如用溅射，其能量要比蒸发大几十倍，汽化后的原子、分子在极短的时间内在衬底上冷却成固体，内部存在大量缺陷，这是薄膜制造与其他物体制造的不同之处。气体与固体的结合分化学吸附与物理吸附。化学吸附的力产生于离子键、原子键、金属键等电子对的相互作用；物理吸附的力是由于范德瓦耳斯力（分子力）、电偶极子、电四极子等的静电相互作用。

膜与衬底之间的附着强度，要针对目标谋求最佳的工艺条件。薄膜的生长有两个过程：一是成核过程；二是单层生长过程。成核过程中从蒸发源出来的原子以几倍于音速的速度向衬底飞去，并与衬底碰撞，某些原子会被反射出去，但多数原子会停留在就近的衬底表面，此时还不能认为它们已被吸附。一般情况下，它们在将热量传给衬底的同时，会在表面迁移，其中一部分与其他的原子结成原子对或原子团，同时在比一般表面处更容易被捕获的位置，如表面凹坑、台阶等，被捕获而形成核。这样的核与持续到来的原子或相邻的核合并而不断长大，到达某个临界值以上后，就变得稳定下来。衬底上可以形成许多核（10 个原子以上），它们互相接触、合并，形成岛状结构（8nm）。岛与岛连成一片，片与片之间留下具有海峡状沟道（11 ~ 15nm），然后海峡状沟道收缩成一些孔眼（19nm），最后孔眼消失形成连续的膜（22nm）。图 3-13 为薄膜生长。

蒸发沉积与溅射沉积有很大的不同。溅射沉积时，岛小而多，核密度大，其结晶方向（衬底上）由最初结晶方向决定；而蒸发沉积时岛大而疏，核密度小，岛在合并时方向往往变化。

单层生长过程中，蒸发时膜料以单原子或单分子层一层层地堆积成膜。图 3-14 为薄膜单层生长。

这种情况，成膜物质原子与原子之间的凝聚力与衬底原子的结合力相近。沿着衬底晶体的某个确定的方向生长的现象称为外延或外延生长。要让膜外延生长，必须让衬底达到某个温度，还要达到合适的真空条件。

外延生长影响的因素有：真空度的影响、残留气体的影响、蒸发速率的影响、衬底表面缺陷的影响。电场的影响、离子的影响、膜厚的影响、晶格失配的影响等。

但是，电子束照射在衬底表面形成许多缺陷，对蒸发核形成起重要的促进作用。

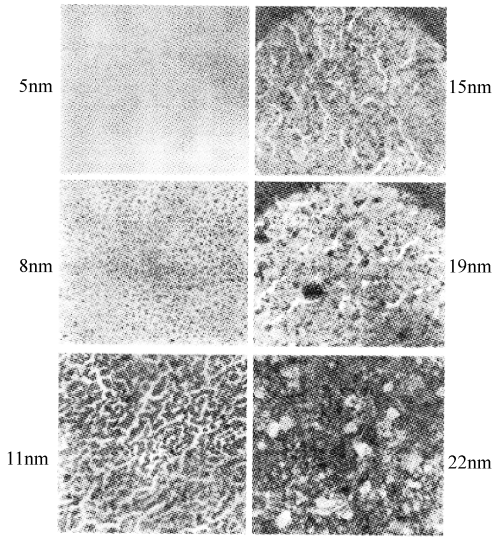


图 3-13　薄膜生长

1. 非晶薄膜的特点

（1）由于无需原子作规则排列，所以在玻璃、金属上大面积（几米×几米）制备薄膜非常容易。

（2）非晶半导体的电特性可以由制备薄膜所使用的材料原子种类或组合、组合比例自由确定。

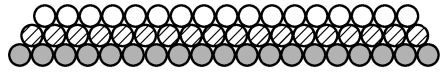


图 3-14　薄膜单层生长

2. 薄膜附着强度

影响附着强度的因素有：

（1）衬底和膜的搭配　最好是创造条件使两者以离子键或原子键或金属键结合。

（2）衬底的前处理　要彻底去掉油脂及各种微小颗粒，衬底和薄膜之间绝对不能有任何异物。

（3）衬底除气　各种材料在一定条件下都会放气，从而影响薄膜成形质量，因此选择材料时要掌握该材料的放气特性，以便在镀膜之前安排妥善的除气工艺。

（4）成膜温度　衬底温度高，附着力大。

（5）膜的结构　如果衬底与膜结合不理想，可以考虑在两者之间加过渡层。

3. 前处理

未经处理的衬底表面都有灰尘和油脂，会引起针孔、线路断线和短路等问题，必须要加以彻底清除。表 3-8 为主要清洗和干燥的方法。

表 3-8　主要清洗和干燥的方法

物理清洗	干燥方法
毛刷擦洗	气刀 热风 真空 红外
超声波	
高速粒子劲吹	
流体喷射	
等离子体	
化学清洗	置换干燥
清洗剂	异丙醇蒸气置换水干燥 马兰古尼干燥
酸、碱	
功能水（氢水、双氧水、电解离子水）	

（1）超声波　当在液体中施加超声振动时，以微小的气泡为核而形成无数近似于真空的“空化气窝”，它们随着超声波振动持续进行着绝热的膨胀、压缩变化。这些空化气

窝被超声波的高压部压碎的瞬间产生了强大的冲击力，这个冲击力就会把异物冲下来，产生洗净效果。除这样的空化效应外，液体分子也随着超声波而振动，产生的最大加速度在频率为 28kHz 时可达到 $10^3 g$（g 为重力加速度），这种高速振动也产生强大的清洗能力。“兆赫声波”可作为最后阶段的清洗，当频率为 1MHz 时，水分子加速度可达到 $10^5 g$，可平均每秒 10^6 次对清洗表面来回擦洗；使水的一部分以 H^+、OH^- 的离子形式存在，提高了水的清洗能力。对于以玻璃作衬底的，可先用频率为 28kHz 的超声波清洗，后用 1MHz 超声波清洗。

（2）等离子体清洗　等离子体清洗效果非常好，大都在成膜之前进行。

（3）气刀干燥　采用不含微粒的干净空气，使其成刀状吹出，赶走液体。

（4）马兰古尼干燥　将衬底从纯水中提拉到氮气和乙醇的混合蒸气中，在气体和水的交界处，混合蒸气从提拉相反的方向流动，使衬底上不留水滴，得到干燥。

4. 等离子体的应用

等离子体是离子和电子混合共存并整体保持电中性的一种物质。等离子体的应用是第二代薄膜技术的主角，在膜的生长方面利用等离子体，起着关键的作用。等离子体可以用放电的方式产生。辉光是等离子体的副产品。

受激的原子、分子经过一个非常短的时间后，会回到原先的稳定态，这时就会发出原子、分子的特征性的美丽光束，称为辉光。

5. 衬底传送机构

衬底是在真空室中工作的，将衬底送入真空室有多种方法：

1）将真空室充入空气，打于真空室门，将衬底送入。

2）设主、副真空室。主真空室一直保持真空，先将衬底送入副真空室，然后把副真空室抽真空，再将衬底从副真空室移至主真空室。这样主真空室不暴露在空气中，能进一步保证镀膜质量。

6. 净化房

为了防止薄膜成形过程中产生针孔，采用 5 ~ 6 级净化房，在净化房内，设置 3 级以上的净化工作室。

7. 分子束外延

分子束外延是一种超高真空蒸镀法，即分子束（方向大体一致的汇集的蒸气分子）流射到衬底上，然后在衬底上生长为单晶薄膜的方法。由于是在 10^{-8} Pa 的超高真空中生长单晶膜，一般只有新鲜的蒸气分子能到达衬底表面，到达的分子数仅由蒸发源的温度决定，单晶的生长速度、杂质的浓度、多元化合物的组分比都能准确地控制。

分子束外延的特征如下：

1）有超高真空的保障，能以极低的生长速度（如 1 原子层/s）制备高质量的具有复杂构造的薄膜。而且在薄膜生长的过程中，能使用各种表面分析仪表来观察薄膜的生长过程。

2）组分比和杂质的控制仅仅用挡板的启闭就可实现，控制性能优越。

3）能获得原子尺寸的平整薄膜，能够以不同种类薄膜交替沉积来制备单晶薄膜。

4）由于是在热的非平衡条件下生长，能够实现不受固溶度限制的高浓度杂质。

5）薄膜可以在低温下生长，因此能抑止杂质从衬底向生长膜扩散。

分子束外延主要用于生长以 GaAs 和 GaAs 为主体的单晶薄膜。As 的附着系数在有 Ga 时

为 1，没有 Ga 时为 0。所以在比 Ga 过量的 As 分子束射到 GaAs 单晶上时，没有形成 GaAs 的 As 全部被再蒸发掉，这样制备出严格化学计量比的 GaAs 薄膜，Ga 和 As 由两个温度可精确控制的加热炉中向衬底射出。GaAs 表面具有原子水平的平坦的优质的单晶。分子束的发生源用液氮冷却罐包裹，从分子束发生源仅仅只产生分子束，而没有其他物质，这样就不会污染单晶生长室内部。另外，从衬底返回的 As 也被冷阱捕获或者被真空泵抽走，这样一来只有新的分子能到达衬底。这对维持清洁的高真空系统有帮助。以上这些因素综合起来避免了杂质混入衬底，从而有助于获得优良的单晶。

8. 溅射率

1 个离子射入而溅射出来的原子数称为溅射率，溅射率越大，膜生成的速率就越大。溅射率是随着离子的能量 E_i 而变化的，降低能量 E_i，溅射率就会急速下降，最终变得忽略不计，这时的 E_i 值就是溅射的最低能量（能量阈值）。被溅射出的原子的出射方向，大体上符合余弦定律。被溅射的原子经过激烈的碰撞后，能量增大了，比蒸发大 100 倍左右。

溅射装置有很多种，磁控溅射是主要的使用方式。平板磁控电极如图 3-15 所示。在靶的表面附近有一个环形的磁场闭环。由于磁力线 B 与电场 E 正交，电子在磁力线约束下作回转运动，在靶的表面附近产生高密度的等离子体。这样靶的电功率密度可以增大到大约数百 W/cm^2 的程度，溅射速率可以飞跃式地增大到数 μm/min 以上，这意味着磁控放电的利用率很高。

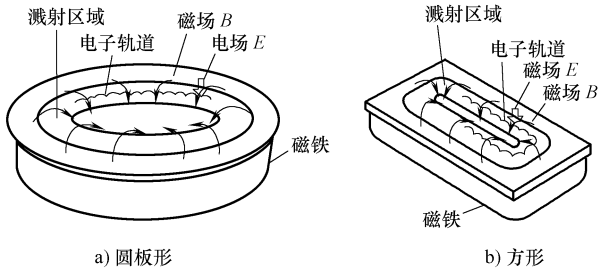


图 3-15　平板磁控电极

平板型磁控溅射特别适合于衬底也是平板的情况。

9. 化学气相沉积（CVD）

（1）装置　图 3-16 为 CVD 装置的系统图，图中“基板”即是衬底。

左侧部分为气体供应系统，即 CVD 的原料部分，在原料为气体的情况下，用净化装置净化后，使用流量控制装置控制所定流量的气体并导入反应室。置换气体是在反应室内混入空气时，先要用它将空气置换出去，然后才可将原料气导入，开始反应成膜。

（2）反应炉　反应炉是 CVD 装置的关键组成设备。对反应炉的要求是：

1）气体能均匀地流到各个衬底表面，并发生均等的反应。

2）未能反应的多余气体能迅速地排出。

3）衬底温度能得到均匀一致的加热。

4）在尽量低的温度下发生反应。

5）衬底进出量处理。

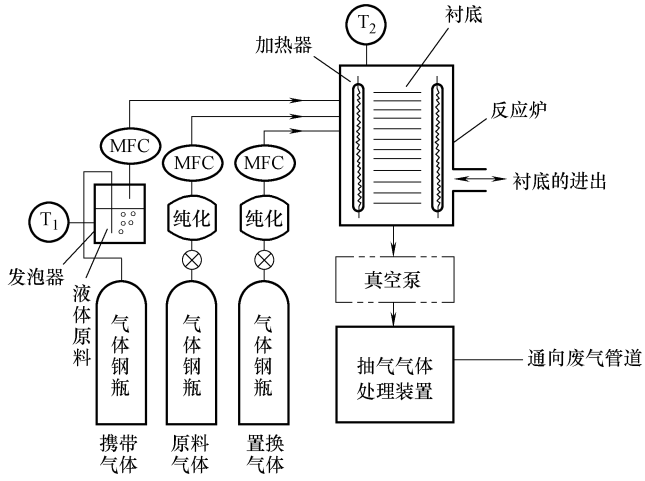


图 3-16　CVD 装置的系统图

第三节　薄膜生产工艺

一个方向的长度比其他两个方向的长度小时，这种结构称为薄膜。“小”指最大尺寸至少比小尺寸大 20 倍～几百倍，当材料结构尺寸与特征微观尺寸相当时，薄膜被认为是微观结构薄膜。虽然薄膜厚度远大于原子或分子尺寸，但其厚度只包括几个结构单元。薄膜的平面尺寸远大于特征微观尺寸，薄膜的力学性能受到诸如平均晶粒尺寸、晶粒形状、晶粒尺寸分布和晶体学织构等因素的影响。晶粒与晶粒之间晶体取向的变化和热、电、磁、力学性能的晶体各向异性也对微观结构薄膜的整个力学响应有更加明显的影响。表面上吸收的单层气体或杂质原子构成的厚度与一个或几个原子层相当，即为原子级薄膜。

原子级薄膜是用物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）的方法制造的，是将材料原子从气相逐个地从一个或多个源转移到衬底固体表面上，在衬底上使其质量沉积、长大成薄膜。沉积过积通常在真空室中进行，以便能够控制气相成分。

如果被沉积的产物没有化学变化，这个过程称为 PVD；如果被沉积的产物有化学变化，这个过程称为 CVD。

一、PVD

PVD 是凭借物理过程（例如蒸发、升华或离子撞击靶材）促使原子从固体或熔融的源转移到基体上的技术，蒸发和溅射是两种应用最广泛的沉积薄膜的 PVD 方法。图 3-17 为蒸发沉积原理。

热能使蒸发源由液态变为气态，沉积在衬底上。蒸发炉有隔热装置，避免热传导。热能的来源有多种方法，如用加热电阻缠绕在被蒸发材料上、石墨坩埚、高频感应、电子束等方法。蒸发炉为真空态，被蒸发材料产生原子运动，在衬底表面沉积，凝聚成薄膜。薄膜的沉积速率有三种表达方式：单位时间到达衬底单位面积的原子数；沉积薄膜材料一个完整的原子层所需时间；薄膜生长表面的平均法向速度。沉积速率或流量是从源到基体的运动距离、衬底表面的撞击角、衬底温度和基本压力的函数。如果源材料升华，在其熔点之下就可获得

足够高的蒸气压力，因此可采用固态源进行蒸发沉积；如不能在熔点之下或在熔点获得足够高的蒸气压力（约 10^{-3}Torr 或 0.13Pa），源材料必须加热到液态，以获得适当的沉积条件。

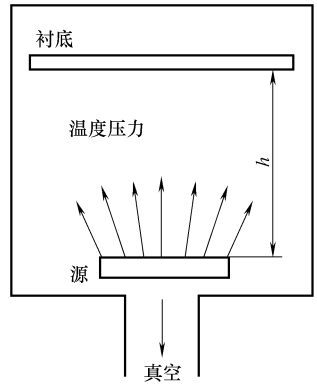


图 3-17　蒸发沉积原理

有些合金（化合物）通常能够由单一的加热源直接被蒸发；有的合金（化合物）两种组分以不同速率蒸发会造成熔体中成分变化，可以采用保持不同温度的两个不同的源，以保证沉积均匀。无机化合物蒸发时，气相成分往往与源成分不同，所形成的薄膜分子结构也不同于源。

蒸发法-分子束外延（MBE）技术是蒸发法的一种，可以为研究提供理想的质量特别好的薄膜材料。不过，与其他方法比较，这种方法生长速率非常低，限制了它的运用。其具体操作是：将衬底置于超高真空中（10^{-10}Torr 或 1.33×10^{-8}Pa），用低能离子束简单溅射去除表面污染，然后高温退火，以去除表面的损伤，随后将衬底冷却至生长温度（400～700℃），把材料的离子束引向衬底的生长表面，生长就开始。材料被加热到远高于衬底温度时，原子束从装有生长材料的坩埚中激发出来，从而诱发蒸发和凝聚。薄膜冷却后可通过透射电子显微镜或 X 射线衍射检测。

溅射技术是指气体离子在电场中被加速至高速轰击制备薄膜的靶材（阴极）。气体离子一般为氩气（Ar），其离子轰击靶材和撞击中性气体原子时释放二次电子，随着系统中直流电压的增加，电荷载体的初始浓度急剧增加，当这种雪崩效应产生临界数目的电子和离子时，气体开始发光，放电变成自持续。轰击制备薄膜的靶材或源材料的气体离子，把表面原子轰出，在真空室中形成蒸气。图 3-18 为直流溅射原理。

溅射炉内，压力为 10^{-1}Torr 或 13.3Pa，氩气离子轰击靶材，将靶材的中性原子轰出，这些原子通过放电运输，在衬底上凝聚，形成薄膜。溅射法分为直流溅射、射频溅射、磁控溅射、偏压溅射。直流溅射通常也称为阴极溅射或两极溅射；射频溅射频率一般在 5～30MHz 范围内；磁控溅射是在衬底与靶材之间施加一个磁场，与平行或垂直取向的电场叠加；偏压溅射是将负的直流偏压或射频偏压加于衬底上，以改变入射电荷种类的能量和流量。

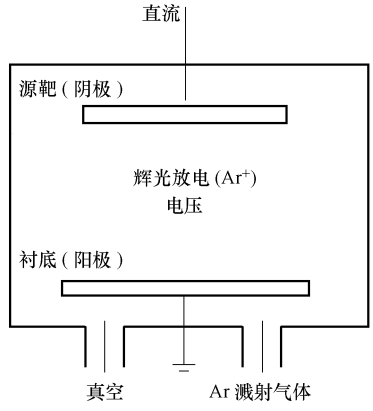


图 3-18　直流溅射原理

蒸发与溅射之间有许多明显的差异。蒸发是一个热过程，沉积材料的原子以很低的动能到达生长表面，而溅射氩气 Ar^+ 对靶材的轰击使被驱出的靶材原子获得高动能。虽然溅射沉积促进了到达原子的高表面扩散率，但由于原子的高能量导致沉积表面产生较多的缺陷形核和损伤，因此比蒸发沉积的薄膜含有较高的杂质原子浓度；而且溅射沉积的薄膜易被溅射气体污染。所以，溅射不适合于薄膜的外延生长。

二、CVD

CVD 原理是使制备薄膜材料的易挥发化合物与其他适当气体之间发生化学反应，造成

不易挥发的固体薄膜的原子易于沉积在衬底上。CVD 的化学反应包括热解或还原。例如，在 650℃的热解使硅烷气体按下面的反应分解：

$$SiH_4(g) \rightarrow Si(s) + 2H_2(g)$$

氢气被用作高温还原反应中的还原剂。

过饱和蒸气影响薄膜的核成形速率，低的衬底温度影响薄膜的生长速率，这两个因素影响外延生长的程度、晶粒尺寸、晶粒形状和织构，导致较少共格。CVD 有低压 CVD（LPCVD）、等离子增强 CVD（PECVD）、激光增强 CVD（LECVD）等。

三、薄膜生长

薄膜生长是从气相到吸附原子，再从吸附原子到形成薄膜。原子从气相沉积到基体表面将会形成许多不同的微观结构的薄膜，最终的结构可从单晶体薄膜到柱状或等轴晶粒的多晶体薄膜，直至大部分的非晶薄膜。最终的微观结构取决于所涉及的材料所用的沉积方法和所施加的环境约束。

1. 从气相到吸附原子

沉积过程开始于具有清洁表面的衬底（温度为 T_S），将该衬底暴露于薄膜材料的蒸气中（温度为 T_V）。为了形成薄膜，蒸气中薄膜材料原子必须到达衬底表面，黏在上面，并在结构缺陷留在生长前端之前占据可能的平衡位置，蒸气中的薄膜材料原子与衬底表面接触，从而与衬底的原子形成化学键，衬底的温度 T_S 必须足够低，使气相从某种意义上相对衬底是饱和的。接触过程中，形成化学键将使能量下降，如果热起伏能量足以克服附着能，一部分已附着的原子将可能通过蒸发返回到蒸气中。

蒸气过饱和，即蒸气压力 p 超过衬底温度下的平衡蒸气压力 p_e。系统的平衡蒸气压力 p_e 被定义为凝聚到固体表面的蒸气原子和从固体表面蒸发出来的原子速率相同时的压力，平衡时，蒸气中每个原子的熵自由能等于晶体内部每个原子的自由能。蒸气过饱和，在蒸气与晶体内部之间存在一个自由能差，这为驱使界面向气相运动提供了一个化学势。蒸气压力低于平衡蒸气压力 p_e 时，薄膜材料在生长表面上的沉积将不会发生。一旦原子附着于衬底上，其熵自由能要低于其蒸气态自由能，吸附原子在衬底表面形成具有二维蒸气特征的分布，被沉积材料很快被加热并达到温度 T_S。

2. 从吸附原子到形成薄膜

任何情况下，为了在衬底表面上形成薄膜，一是均匀形成的核能够生长，二是有足够多的表面缺陷作为非均匀形核来生长。具备了这两种条件后，薄膜形成的方式由生长过程涉及的各种能量的相对值来决定，薄膜形成的方式决定了薄膜的最终结构。

核能够生长是基于原子的跃迁，任何给定原子的跃迁速率随衬底温度升高而增加，这种跃迁导致表面扩散，如果表面是均匀的，扩散随时出现，不会有净质量传输；如果表面是不均匀的，结构有梯度，表面扩散会导致沿表面净质量传输。如果温度非常低或扩散障碍非常高，吸附原子将黏在它们到达的生长表面上，薄膜会生成非晶或晶粒非常细小的多晶体结构。表面缺陷总是会有的，而且分布在生长表面，这些表面缺陷有晶体学台阶、晶界痕迹及位错线终端，它们给吸附原子提供了吸附位置。如果缺陷距离较大，吸附原子易于吸附上去，并释放一些自由能，这种情况称为薄膜生长的非均匀形核。晶体学台阶缺陷分几种情况：①吸附原子沿上行或下行方向越过台阶而不出现吸附；②吸附原子每遇到台阶都出现吸附；③吸附原子只沿上行方向绕过。如果扩散离缺陷距离较大，迁移的吸附原子将通过互相

碰撞聚集在一起形成一个稳定团簇，降低系统能量，这种情况称为薄膜生长的均匀形核。

能量的相对值有两种相对比较：一种是扩散障碍的高度与背景热能的比较；另一种是两个倾向的比较，即吸附原子与衬底的结合倾向、吸附原子与其他弱束缚原子之间的结合倾向。如吸附原子与衬底的结合倾向大，则薄膜生长倾向于以逐层的方式进行，吸附原子与衬底表面结合而不是与其他薄膜材料表面结合，一旦在表面上形成小的稳定吸附原子团簇时，其他吸附原子就倾向于吸附在这些团簇周围，并能够与衬底和薄膜两者结合，从而继续平面生长。如吸附原子与其他弱束缚原子之间的结合倾向大，吸附原子在衬底上易形成三维团簇和小岛，薄膜生长是通过岛的长大和合并进行的。两种生长方式结合，吸附原子与衬底的结合倾向大，但是当薄膜形成几个单层后，即平面生长表面变成确定的薄膜材料时，后续的吸附原子更倾向聚集于团簇，而不是继续平面生长。

第四节　真　　空

制备薄膜的基本条件是衬底和汽化源必须处于真空环境中。在薄膜制备过程中，被汽化的源材料以原子状或分子状飞向衬底，在衬底上黏附，再排列成薄膜，那些原子或分子在飞行途中，很容易与周围的氧发生氧化反应或与氮发生氮化反应，所以沉积薄膜必须在真空中进行。本节介绍气体、真空系统及计算所用的数字规则。

一、气体

1. 有关设定

薄膜太阳电池都是气相沉积而成的，了解气体的性质、运动特性是非常重要的。大气压强为1atm（1大气压，即1.013×10^5Pa）时，22.4L体积内有6×10^{23}个气体分子，有关设定如下：

1）分子：光滑的具有完全弹性的刚性球体（球体指分子在各方向具有相同的性质）。

2）器壁：光滑的完全弹性体。

气体分子的运动是符合动量守恒和能量守恒法则的，分子向任意方向以不同的速度飞行，它们如同弹性良好的皮球一样，一面互相碰撞，一面到处飞溅，它们的速率从0～∞，平均在音速以上。

这种设定已能满足理论计算的需求，并为实际证实是可以的。

2. 气体的性质

表3-9为气体的性质。

表3-9　气体的性质

名称	化学符号	分子量	质量/$\times10^{-26}$kg	平均速率V_a/($\times10^2$m/s)（0℃时）	分子直径$\delta/\times10^{-10}$m（0℃时）	平均自由程$L\times10^{-5}$m（25℃,100Pa时）
空气		28.98	4.811	4.468	3.74	6.78
水蒸气	H_2O	18.02	2.992	5.665	4.68	4.49
氢	H_2	2.016	0.3347	16.93	2.75	12.41
氮	N_2	28.02	4.652	4.542	3.78	6.68
氩	Ar	39.94	6.631	3.805	3.67	7.08
氧	O_2	32.00	5.313	4.252	3.64	7.20
二氧化碳	CO_2	44.01	7.308	3.624	4.65	4.45

3. 气体参数的计算方法

（1）平均速率 V_a

$$V_a = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 145.5\sqrt{\frac{T}{M}} \tag{3-7}$$

式中 R——气体常数；

T——气体温度（K）；

M——分子量。

（2）分子直径 δ 从气体黏性系数的测量可以得出气体的分子直径。

（3）平均自由程 L 按麦克斯韦速率分布理论有

$$L = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n\delta^2} \tag{3-8}$$

式中 n——气体分子密度，以分子数计算，在 0℃，一个大气压的 22.4L 的空间中，气体的分子数为 6×10^{23} 个，即 $1cm^3$ 中大约有 8000 个。

（4）碰撞频率 Z（个/（$s\cdot m^2$））

$$Z = \frac{1}{4}nV_a = 2.4\times10^{24}\frac{p}{\sqrt{MT}} \tag{3-9}$$

式中 p——压强（Pa）；

T——温度（K）。

表 3-10 为 1.3×10^{-4}Pa 时与薄膜相关联的气体参数。

表 3-10 气体参数

名称	碰撞频率 /[$\times10^{14}$个/($cm^2\cdot s$)]	形成单分子层所需分子数 /($\times10^{14}$个/cm^2)	形成单分子层所需时间/s	厚度换算值 /(nm/min)	电流密度换算值 /(μA/ cm^2)
空气	3.97	7.1	1.80	12.5	64
水蒸气	5.04	4.6	0.91	30.9	81
氢	15.06	13.2	0.88	18.8	241
氮	4.04	7.0	1.73	13.1	65
氧	3.78	7.5	2.00	10.9	61
二氧化碳	3.22	4.6	1.44	19.3	52

4. 气体运动特性

气体在真空系统中是流动的，其特性可由如下参数表征：

1）黏滞流：与气体分子碰撞为主的流动，如图 3-19a 所示。

2）分子流：与容器碰撞为主的流动，如图 3-19b 所示。

3）流量 Q：气体流动的量，单位为 Pa·L/s。

4）流导 C：气体的流动能力，与电工学中的欧姆定律相似。黏滞流因是与气体分子碰撞为主的流动，气体的压力能有效地发挥作用，使气体比较容易流动，流导比较大；在分子流范畴，气体间的碰撞已经忽略不计，因此流导比较小。在真空里，压力非常低，基本上只有分子流，流导小。流导（m^3/s）的计算公式为

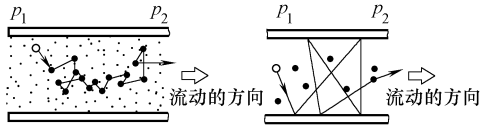
$$C = Q/p$$

由各种流导组成系统时，合成流导的计算与电工学中相同：

串联时为
$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\cdots \tag{3-10}$$

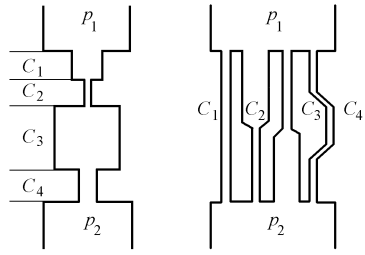
并联时为
$$C=C_1+C_2+C_3+\cdots \tag{3-11}$$

图 3-20 为流导合成。



a) 黏滞流　　b) 分子流

图 3-19　气体的流动



a) 串联　　b) 并联

图 3-20　流导合成

表 3-11 为分子流的流导。

表 3-11　分子流的流导

	圆　孔	长　管	短　管
一般空气	$C_0=\frac{1}{4}V_aA_0$ $=3.64A_0\sqrt{T/M}$	$C_t=30.5\frac{a^3}{L}\sqrt{T/M}$	$C_s=\frac{C_0}{1+\frac{3}{8}\frac{L}{a}}$
空气(25℃时)	$11.7A_0$	$97.7\frac{a^3}{L}$	$\frac{36.8a^2}{1+\frac{3}{8}\frac{L}{a}}$

注：V_a 为气体的平均速率；A_0 为孔的面积（cm^2）；T 为气体的热力学温度（K）；M 为分子量；A 为管的截面积（cm^2）；a 为管的半径（cm）；L 为管的长度（cm）。

5）蒸发速率 m_0：

$$m_0=\frac{1}{4}nV_a\frac{M}{A}=4.38\times10^{-4}p\sqrt{\frac{M}{T}} \tag{3-12}$$

式中　A——阿伏伽德罗常数，$A=6.023\times10^{23}\,mol^{-1}$；

p——蒸气压（Pa）；

m_0——入射原子质量。

式（3-13）是假定在平衡状态下，蒸发的量与凝固的量相等，蒸发速率计算公式为碰撞频率和入射原子的质量相乘。

二、真空系统

1. 真空系统的基本知识

（1）真空的定义　真空是压力低于一个大气压的任何气态空间。在 JIS 中真空被定义为“气体压强低于标准大气压的气体的特定空间”，理论上真空可用分子密度、平均自由程和碰撞频率来阐述。

1）分子密度：1L 空间中大约有 800 万个气体分子。

2）平均自由程：气体分子从一次碰撞到下一次碰撞时所飞行的距离的平均值。对于空

气分子，25℃时，平均自由程是飞226000km，相当于绕地球6周。

3）碰撞频率：单位面积上单位时间上的碰撞分子数。气体的直径只有0.4nm，运动的速度为447m/s（超音速），所以非常小的孔隙也能穿过，这就是真空容器很容易发生泄漏的原因。

一般采用真空度来表示真空程度的高低。

（2）真空范围　表3-12为真空范围的划分

表3-12　真空范围的划分

真空范围的名称	大气压强范围/Pa	真空范围的名称	大气压强范围/Pa
低真空	大气压～100	超高真空	$1\times10^{-5}\sim1\times10^{-8}$
中真空	100～0.1	极高真空	$1\times10^{-8}\sim1\times10^{-11}$
高真空	$1\times10^{-1}\sim1\times10^{-5}$		

实现真空的条件：真空泵及真空室。

（3）真空的单位　真空的单位采用SI，为Pa（帕［斯卡］，N/m^2），是以法国著名物理学家Pascal的名字命名的。过去是以Torr作为真空量度，托里切利真空是将充满水银的玻璃管倒立而形成的真空。还曾使用大气压、毫巴（mbar）为单位。表3-13为压强单位换算表。

表3-13　压强单位换算表

	Pa	Torr	mbar
1Pa	1	7.5×10^{-3}	10^{-2}
1Torr	133	1	1.33
1mbar	100	0.75	1
atm(1大气压)	1.013×10^5	760	1013
hPa(百帕)	100	0.75	1

（4）压力单位及公英制换算

1）压力单位：

psi　　磅每平方英寸　　lb/in^2

Pa　　帕，牛顿每平方米　N/m^2

atm　　大气压

bar　　巴

1atm = 14.696　lb/in^2（psi）

= 29.921　inHg

= 76　cmHg

= 760　mmHg（广泛使用的定义）

= 760　Torr

= 33.899　ftH_2O

$=10.33$　mH_2O

$=1.01325\times10^5$　Pa

$=101.325$　kPa（广泛使用的定义）

$=1.01325\times10^6$　dyn/cm^2

$1bar=1\times10^5$　$Pa=0.1MPa$

2）英制转换公式：

$Gal\times3.785=liters$

$lb\times0.454=kg$

$psi\times6.7=kPa$

$(℉-32)/1.8=℃$

（5）真空在薄膜制备中的作用

1）减少蒸气分子与残余气体分子的碰撞。只有平均自由程远远大于蒸发源到衬底之间的距离时，才能有效地减少分子碰撞。对于大的真空室，真空度的要求更高。

2）抑制残余气体和蒸发分子之间的反应。

（6）体积流速（抽速）S　在一定压强 p 下，单位时间流过某截面的气体体积称为体积流速，单位为 L/s。

$$S=dV/dt$$

（7）流量 Q　流量是指单位时间内通过某截面的气体量，单位为 Pa·L/s。

$$Q=d(PV)/dt$$

在压强不变的情况下，$Q=PdV/dt=PS$。

（8）气体的流阻 R

$$R=(p_2-p_1)/Q \tag{3-13}$$

流导 $U=1/R=Q/(p_2-p_1)$，这是真空泵设计依据的基本规律。

对于复杂的真空系统，可以按照电路的串、并联公式计算总流阻或流导。

（9）材料放气　真空室测 Q 值主要考虑真空室材料放气，如每平方厘米不锈钢表面放气上有 1×10^{-6}Pa·L/s 的放气量，1L 的真空室有 600cm^2 的内表面，总放气量为 6×10^{-4} Pa·L/s。减少放气量的措施有：

1）采用放气量少的材料。

2）材料进入真空室时进行适当处理。

3）在真空室内烘烤。

（10）冷阱（水冷挡板）　冷阱是指置于真空容器和泵之间，用于吸附气体或捕集油蒸气的装置。

（11）气镇阀　在油封机械真空泵的压缩室上开一小孔，并装上调节阀，当打开阀并调节入气量，转子转到某一位置，空气就通过此孔掺入压缩室以降低压缩比，从而使大部分蒸气不致凝结而和掺入的气体一起被排出泵外。起此作用的阀门称为气镇阀。

（12）真空蒸镀　在真空环境中，将材料加热并镀到衬底上称为真空蒸镀，或叫真空镀膜。

（13）真空冷冻干燥　真空冷冻干燥也称为升华干燥，其原理是将材料冷冻，使其含有的水分变成冰块，然后在真空下使冰升华而达到干燥目的。

（14）真空干燥　真空干燥是利用真空环境下沸点低的特点来干燥物品的方法，真空系统常用。

（15）前级泵　凡是由两个以上真空泵串联组成的真空系统，通常把抽低真空的泵叫做它上一级高真空泵的前级泵。

（16）主泵　最后一级的真空泵叫做该真空系统的主泵，被抽容器中的极限真空度和工作真空度就由主泵确定。

（17）主阀　被抽容器出口到主泵入口之间的管路称为高真空管路，主泵入口处的阀门称为主阀。

（18）粗抽泵　粗抽泵是指从大气压下开始抽气，并将系统压力抽到另一真空泵开始工作的真空泵。如真空镀膜机中的滑阀泵，就是粗抽泵。

（19）维持泵　在真空系统中，气量很小时，不能有效地利用前级泵。为此配置一种容量较小的辅助泵来维持主泵工作，此泵叫维持泵。如扩散泵出口处配一台小型旋片泵，就是维持泵。

（20）玻义尔定律　一定质量的气体，当温度不变时，气体的压强与气体的体积成反比，即 $p_1/p_2 = V_2/V_1$。

（21）盖·吕萨克定律　当压强 p 不变时，一定质量的气体，其体积 V 与热力学温度 T 成正比，即 $V_1/V_2 = T_1/T_2 =$ 常数。

当压强不变时，一定质量的气体，温度每升高（或降低）1℃，则它的体积比原来增加（或缩小）1/273。

（22）查理定律　当气体的体积 V 保持不变，一定质量的气体，压强 p 与其热力学温度 T 成正比，即 $p_1/p_2 = T_1/T_2$。

在一定的体积下，一定质量的气体，温度每升高（或降低）1℃，它的压强比原来增加（或减少）1/273。

（23）抽速 S

$$S = \mathrm{d}V/\mathrm{d}t \text{ 或 } S = Q/p$$

式中　Q——流量（Pa·L/s）；

p——压强（Pa）；

V——体积（L）；

t——时间（s）。

（24）真空抽气时间　对于从 1 大气压到 1Torr 的抽气时间计算式（经验公式）为

$$t = 8V/S$$

式中　V——体积；

S——抽速；

t——通常在 5 ~ 10min 内选择。

（25）维持泵选择

$$S_{维} = S_{前}/10$$

（26）扩散泵抽速估算

$$S = 3D^2$$

式中　D——直径（cm）。

（27）漏率

$$Q_{漏}=V(p_2-p_1)/(t_2-t_1) \tag{3-14}$$

式中　$Q_{漏}$——系统漏率（mmHg·L/s）；

V——系统容积（L）；

p_1——真空泵停止时系统中压强（mmHg）；

p_2——真空室经过时间 t 后达到的压强（mmHg）；

t_2-t_1——压强从 p_1 升到 p_2 经过的时间（s）。

（28）粗抽泵的抽速选择

$$S=Q_1/p_{预}$$

$$S=2.3V\lg(p_a/p_{预})/t$$

式中　Q_1——真空系统漏气率（Torr·L/s）；

$p_{预}$——需要达到的预真空度（Torr）；

V——真空系统容积（L）；

t——达到 $p_{预}$ 时所需要的时间（s）；

p_a——大气压值（Torr）。

（29）扩散泵抽速计算公式

$$S=Q/P=Kn/(pt)$$

式中　S——被试泵的抽气速率（L/s）；

n——滴管内油柱上升格数（格）；

t——油柱上升 n 格所需要的时间（s）；

p——在泵口附近测得的压强（Torr）；

K——滴管系数（Torr·L/s）。

（30）旋片真空泵的抽速计算公式

$$S=\pi ZnLK_V(D^2-d^2)/(24\times 104)$$

式中　Z——旋片数；

n——转速（r/min）；

L——泵腔长度（cm）；

D——泵腔直径（cm）；

d——转子直径（cm）；

K_V——容积利用系数（一般取95%）。

真空系统设计的基本内容是：根据被抽容器对真空度的要求，选择适当的真空系统方案，计算、选配所需的真空泵，确定管道、阀门、捕集器、真空测量元件，进行合理的配置，最后画出真空系统装配图和零部件。

2. 真空系统的定义和组成

（1）真空系统的定义　真空系统是指用来获得在密闭空间有特殊要求的真空度的抽气系统。

（2）真空系统的组成　真空泵、真空阀门、连接管道、真空测量元件、PLC 程序控制系统、气罐、其他元件，如捕集器、除尘器、境外过滤总成等。

图 3-21 为真空系统。



图 3-21　真空系统

真空系统包括进气过滤、真空测量计、抽速控制、主要运行数据显示、运行保护及远程控制接口等，被抽真空容器用管道和阀门与真空泵连接起来。控制系统由 PLC 组成，以触摸屏为人机界面，实现对真空系统的全自动化控制。真空泵可选用螺杆真空泵、罗茨真空泵、旋片真空泵及水环真空泵等，视真空度高低的要求而定。真空泵由两级以上组成，第一级真空泵起动后达不到设定所需真空值时，第二级真空泵起动至达到设定的真空值。当达到所需设定值后第一级真空泵停止，接着第二级真空泵停止循环工作；真空度下降了，第一级再行起动，依此循环往复，可得到稳定的真空源。中央真空系统内的真空由管路上的真空止回阀自动截止而得到维持。当需要获得高真空范围内的真空度时，在系统中再串联一个高真空泵，在高真空泵的入口和出口分别加上阀门，以便高真空泵能单独地保持真空。如果所串联的高真空泵是一个油扩散泵，为了防止大量的油蒸气反流进入被抽容器中，通常在油扩散泵的入口加一个捕集器——水冷却板。

3. 真空泵的种类及工作原理

真空泵是利用机械、物理、化学或物理化学的方法在某一封闭空间中将气体排出，以产生、改善和维持真空的器件或设备。真空泵的种类有很多种，由于真空应用部门所涉及的工作压力的范围很宽，因此任何一种类型的真空泵都不可能完全适用于所有的工作压力范围，只能根据不同的工作压力范围和不同的工作要求，使用不同类型的真空泵。大多需要由几种真空泵组成真空抽气系统共同抽气后才能满足生产和科学研究过程的要求。常用真空泵有水环真空泵、油封式旋片机械泵、油扩散真空泵、罗茨真空泵、涡轮分子真空泵、低温真空泵（吸附泵）、溅射离子泵、升华泵等。

（1）水环真空泵　水环真空泵（简称水环泵）是一种粗真空泵，它所能获得的极限真空为 2000 ~ 4000Pa，串联大气喷射器可达 270 ~ 670Pa，用于工业生产的许多工艺过程中，如真空过滤、真空引水、真空送料、真空蒸发、真空浓缩、真空回潮和真空脱气等。由于真空应用技术的飞跃发展，水环泵在粗真空获得方面一直被人们所重视。由于水环泵中气体压缩是等温的，故可抽除易燃、易爆的气体；此外，还可抽除含尘、含水的气体。

水环泵的工作原理：在泵体中装有适量的水作为工作液，当叶轮按顺时针方向旋转时，水被叶轮抛向四周，由于离心力的作用，水形成了一个由泵腔形状决定的近似于等厚度的封闭圆环。水环的下部分内表面恰好与叶轮轮毂相切，水环的上部内表面刚好与叶片顶端接触（实际上叶片在水环内有一定的插入深度）。此时，叶轮轮毂与水环之间形成一个月牙形空间，而这一空间又被叶轮分成和叶片数目相等的若干个小腔。如果以叶轮的下部 0°为起点，那么叶轮在旋转前 180°时小腔的容积由小变大，且与端面上的吸气口相通，此时气体被吸入，当吸气终了时小腔则与吸气口隔绝；当叶轮继续旋转时，小腔由大变小，使气体被压缩；当小腔与排气口相通时，气体便被排出泵外。水环泵是靠泵腔容积的变化来实现吸气、压缩和排气的，因此它属于变容式真空泵。

（2）油封式旋片机械泵　油封式旋片机械泵有旋片泵、偏心转子式真空泵、滑阀式真

空泵三种形式。

图 3-22 为油封式旋片机械泵的构造和抽气原理。

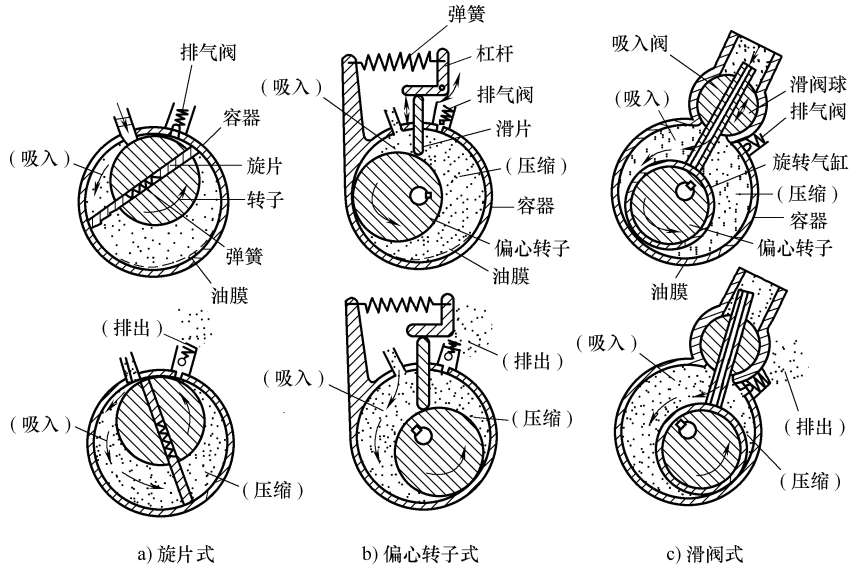


图 3-22　油封式旋片机械泵的构造和抽气原理

1）旋片式真空泵简称旋片泵，其工作压强范围为 $10^4 \sim 1.33 \times 10^{-2}$Pa，属于低真空泵。它可以单独使用，也可以作为其他高真空泵或超高真空泵的前级泵。旋片泵是真空技术中最基本的真空获得设备之一。旋片泵多为中小型泵，有单级和双级两种。所谓双级，就是在结构上将两个单级泵串联起来，以获得较高的真空度。旋片泵主要由泵体、转子、旋片、端盖、弹簧等组成。在旋片泵的腔内偏心地安装一个转子，转子外圆与泵腔内表面相切（二者有很小的间隙），转子槽内装有带弹簧的两个旋片。旋转时，靠离心力和弹簧的张力使旋片顶端与泵腔的内壁保持接触，转子旋转带动旋片沿泵腔内壁滑动。旋片通过弹簧与容器内形成的油膜（真空泵全体浸于油中，油会渐渐进入容器内）保持润滑和密封，随着转子的旋转，实现抽气循环。其真空度可达到 10^{-3}Pa。图 3-22a 为旋片泵。

2）偏心转子式真空泵主要由容器、偏心转子、滑片、弹簧等构成，滑片随着转子的旋转通过弹簧和杠杆上下运动，实现抽气循环。其抽速为 1000L/ min，更换弹簧容易，但振动大、噪声大。图 3-22b 为偏心转子式真空泵。

3）滑阀式真空泵主要由容器、偏心转子和外部设置的旋转气缸吸气阀等构成，吸气阀与滑阀球组合形成上下和左右摇动，随着转子的旋转实现抽气循环。图 3-22c 为滑阀式真空泵。

为防止灰尘进入和保证工作可靠性，转子一般与电动机直连，转速为 500 ~ 2000r/min。真空泵的设计抽气率是按（转子旋转一周的抽气容积）×（转速）计算的。但由于转子部分密封不严密、排气阀关闭不严密及油的气体释放的原因，实际的抽气速率随着压强的降低而减少。在真空泵使用时要注意，当旋片泵停止后，真空室内的压强要实现和大气压强相同，否则泵内的油会因压差回流到真空容器中。

机械泵所用的油起到密封、润滑、提高压缩率的作用，对油品质的要求是低的饱和蒸气压、一定的黏度和较高的稳定性。

机械泵对水汽等可凝性气体抽气有困难，当蒸气在腔内压缩，压强逐渐增大到饱和蒸气压时，水汽开始凝结为水，与机械泵油混合形成一种悬浊液，不仅破坏了密封和润滑，而且会使腔体生锈。若附有气镇装置，可以抽除一定量的可凝性气体，但它不适于抽除含氧过高的、对金属有腐蚀性的、对泵油会起化学反应以及含有颗粒尘埃的气体。

（3）油扩散真空泵　油扩散真空泵（简称扩散泵）是依靠从喷嘴喷出的高速（如200m/s）、高密度（如几十托）的蒸气流而输送气体的泵，依靠被抽气体向蒸气扩散进行工作的。扩散泵一般为三级喷嘴，铝制的各级伞形喷嘴和蒸气导管是扩散泵的核心部分。在锅炉中经加热器加热而蒸发的油蒸气由各个喷嘴喷出，将喷流内扩散的气体向下部推进，进而经排气口排出，通常再由旋片泵向大气中排出。从喷嘴喷出的油被带有水冷的泵容器内壁凝结，经壁面流回锅炉内。由于扩散泵是对扩散到蒸气喷流的气体实行排气的，所以抽气速度与抽气口的面积（抽气口的流导）成正比。

扩散泵使用油的品质是很重要的，它与喷嘴的构造同为决定到达极限真空度的重要因素之一。要实现极限真空压强，油的相对密度、蒸气压、蒸发热要达到相应的标准。

扩散泵的一个重大缺点是油会向被抽气的真空室逆流。真空泵有将油蒸发产生数托的油蒸气的锅炉，有极少量的油逆扩散是不可避免的，但如果不加注意，导致真空室内都被油粘满将无法生成很好的薄膜。如想不产生油逆扩散可采用以下办法：

1）在顶部喷嘴的上部通过配制常温以下的冷却帽，可使油的返流减少到原来的1/10～1/100。

2）为补偿由于冷却帽而产生的抽气率下降，在顶部喷嘴的附近加大开口口径。

3）在真空泵与被抽气的真空室之间加入叶片和冷阱，使真空泵中返流的油蒸气至少与水冷温度叶片有一次碰撞，降低油的返流。

（4）罗茨真空泵　图3-23为罗茨真空泵的结构。

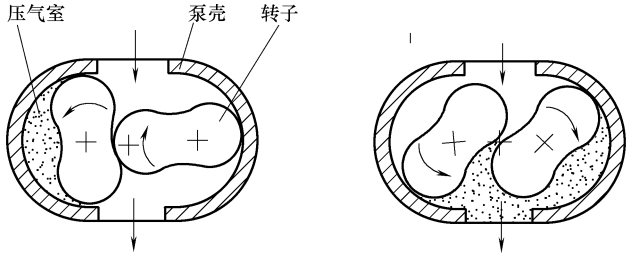


图3-23　罗茨真空泵的结构

罗茨真空泵在椭圆形泵腔内，有两个铸铁或铸钢的转子，装在两个相互平行的轴上，由传动比为1的一对齿轮带动，作彼此反向的同步旋转运动，在转子之间、转子与泵壳内壁之间，保持有一定的间隙（0.1mm），使转子能自由地运转，而又不引起气体过多地泄漏。如图3-23所示，左边的转子作逆时针旋转，则右边的转子作顺时针旋转，气体由上边吸入，从下部排出，每转一周，排气量是泵腔容积的四倍。

罗茨真空泵通常压缩比很低，不可以单独抽气，前级需配油封、水环等可直排大气的真空泵。罗茨真空泵的极限真空除取决于泵本身结构和制造精度外，还取决于前级泵的极限真空。如要提高泵的极限真空度，也可将罗茨真空泵串联使用。

（5）蜗轮分子真空泵　蜗轮分子真空泵（简称分子泵）有一高速旋转的叶轮，当气体

分子与高速旋转的蜗轮叶片相碰撞时就被驱向出气口，再由前级泵抽除。气体分子碰撞到沿着一定方向的固体表面时，所有飞到这表面的分子，经过碰撞后具有一定的分速度，其大小与方向等于固体的速度。分子泵通过高速旋转的蜗轮叶片，不断施以定向的动量和压缩作用，从而达到抽气的效果，短时间内可达到10Pa高真空。

（6）低温真空泵（吸附泵）　利用活性炭、硅胶等多孔质材料每克拥有600m^{2}左右巨大的表面积，用液氮冷却至20K以下的低温，就会有大量气体被物理吸附。它适用于超高真空设备。

（7）溅射离子泵　它是完全不用油的洁净真空泵，利用磁控管放电，使气体分子电离，离子因被电场加速而撞击具有化学活性材料的钛阴极，形成溅射，被溅射的金属钛将气体吸附。它可对惰性气体实现抽气。

（8）升华泵　对钛丝或钛球通电加热使钛升华，可得到巨大的抽速。

4. 真空泵的主要技术指标

1）气体粒子平均距离：作无规则热运动的气体粒子，相继两次碰撞所飞越的平均距离，用符号λ表示。

2）真空泵流量：单位时间流过任意截面的气体量，符号用Q表示，单位为帕·升/秒（Pa·L/s）或托·升/秒（Torr·L/s）。

3）真空泵流导：表示真空管道通过气体的能力，单位为升/秒（L/s）。在稳定状态下，管道流导等于管道流量除以管道两端压强差。符号记作U，$U=Q/(p_2-p_1)$。

4）压力或压强：气体分子作用于容器壁的单位面积上的力，用p表示。

5）标准大气压：压强为每平方厘米101325dyn（即10132.5Pa）的气压，符号为atm。

6）真空泵极限真空。真空容器经充分抽气后，稳定在某一真空度，此真空度称为极限真空。通常真空容器须经12h炼气，再经12h抽真空，最后一个小时每隔10min测量一次，取其10次的平均值为极限真空值。

7）抽气速率。在一定的压强和温度下，单位时间内由泵进气口处抽走的气体称为抽气速率，简称抽速，单位为升/秒（L/s）。

$$S=Q/(p-p_0)$$

式中　Q——流量（Pa·L/s）；

p——压强（Pa）。

真空泵性能的重要指标是极限真空压强和抽速。极限真空压强是真空泵所能实现的最低压强，以压强的单位表示；抽速是表示真空泵抽气快慢，以容积/时间为单位。抽速由真空泵大小决定，根据实际情况选择，随着工作压强的变化，抽速也发生变化。

5. 真空计量仪器

1）热偶真空计。热电偶的电动势与加热元件的温度有关，元件的温度又与气体的热传导有关，热传导变化使压强发生相应变化。热偶真空计就是根据这一原理来测量真空度的真空计。

2）电离真空计（热阴极电离计）。由筒状收集极、栅网和位于栅网中心的灯丝构成，筒状收集极在栅网外面。热阴极发射电子电离气体分子，离子被收集极收集，根据收集的离子流大小来测量气体压强。其可靠性是真空计中最高的。

3）复合真空计。由热偶真空计与热阴极电离真空计组成，测量范围从大气压~

10^{-5}Pa。

4）冷阴极电离计。它的阳极筒的两端有一对阴极板，在外加磁场作用下，阳极筒内形成放电产生离子，根据阴极板收集的离子流的大小来测定气体压强。

5）电阻真空计。利用加热元件的电阻与温度有关，元件的温度又与气体传导有关的原理，通过电桥电路来测量真空度。

6）麦克劳真空计（压缩式真空计）。将待测的气体用汞（或油）压缩到一极小体积，然后比较开管和闭管的液柱差，利用玻义尔定律直接算出气体压强。它是一种绝对真空计。

7）B-A 电离规。一种阴极与收集极倒置的热阴极电离规。收集极是一根细丝，放在栅网中心，灯丝放在栅网外面，因而减少软 X 射线（波长 > 1A）影响，延伸测量下限，可测超高真空。

6. 选择真空泵时应注意的问题

1）被排出物对真空泵的污染、真空泵尺寸大小、可靠性、价格、振动、噪声。

2）真空泵本身对外部磁场、电场、热等有无影响。

3）真空泵所用的电力、冷却水、空冷风量、液氮的消耗量等。

4）太阳电池的制造真空度在 10^{-1} ~ 10^{-3} Pa，采用机械式真空泵就可达到。

没有一种泵能从大气压抽到 10^{-8}Pa（10^{-10}Torr）。抽气系统通常由 2 ~ 3 种真空泵组合而成。典型的例子是机械泵（2 级）+ 扩散泵 + 液氮捕集器（防止油逆扩散用），该系统可达到 10^{-6} ~ 10^{-8} Pa 的真空度；又如分子筛吸附泵（干式）+ 溅射离子泵 + 钛升华泵，该系统可达到 10^{-6} ~ 10^{-9} Pa 的真空度。后级使用干式的组合也很多，特别是在对离子刻蚀和 CVD 等化学活性气体抽气时。干式机械泵单体也较常用。

7. 油封式旋片机械泵的使用问题

油封式旋片机械泵抽除水蒸气时，因不能有效地把蒸汽排出泵腔，蒸汽将凝结在泵腔内，导致一些问题的产生：真空泵润滑油发生乳化变质，达不到所需的工作压力；真空泵泵体转子锈蚀严重，润滑性能下降，磨损加剧，不能正常工作。要解决这个问题，有效地提高抽除蒸汽的能力，可采用这几个办法：安装气镇阀增大气镇量，提高工作温度，降低排气压力，采用新油一次润滑真空泵，在真空管路上安装冷凝器等。

（1）气镇装置　真空泵抽除蒸汽的能力可用最大蒸汽允许压力表示。一定温度下的液体若压力低于其饱和蒸汽压力的话，它就会蒸发，成为蒸汽，即可凝性气体；然而当压力大于饱和蒸汽压力的话，蒸汽就会凝结成液体。油封泵连续工作时其工作温度一般在 70 ~ 800℃，此时的蒸汽饱和压力约为 400hPa（百帕）。当被抽气体完全是蒸汽时，蒸汽压缩到 400hPa 时远没有达到 1333hPa 的排气压力，蒸汽就开始凝结成液体。蒸汽不能被真空泵排出，全部凝结在真空泵中。普通真空泵是不能将纯的蒸汽排出泵腔的。但只要在压缩过程中蒸汽的分压力小于其饱和压力就能将蒸汽排出泵腔。

若吸入压力为　$p_i = 25\text{mbar}$

排气压力为　$p_e = 1333\text{mbar}$

700℃时的饱和蒸汽压力为　$p_{vo}(700℃) = 311.6\text{hPa}$

则可抽出的蒸汽分压力为　$p_{wo} = 25 \times 311.6/1333\text{hPa} = 6.49\text{hPa}$

由此可知，没有任何装置的旋片真空泵只能抽除含有小部分蒸汽及大量永久气体的混合气体。为了能够抽出纯净的蒸汽，必须在蒸汽压缩过程中渗入一定量的干燥空气，使得在排

气压缩终了时蒸汽的分压力小于其蒸汽饱和压力，这样的渗气装置称为气镇阀。真空泵抽除蒸汽的能力一般用最大蒸汽允许压力表示。它是指真空泵在标准状态下（200℃，1013hPa）连续排出纯蒸汽时的真空泵的最大入口压力值，用 hPa（百帕）表示。安装气镇阀的真空泵，其最大蒸汽允许压力 p_{wo} 为

$$p_{wo}=\frac{B}{S}p_e(p_s-p_a)/(p_e-p_s) \tag{3-15}$$

蒸汽量 C_{wo} 为

$$C_{wo}=0.217p_{wo}S/T \tag{3-16}$$

式中　B——气镇量（m^3/h）；

S——吸入压力下的体积流率（m^3/h）；

p_a——大气中的蒸汽分压力，环境温度为 200℃、相对湿度 RH = 58% 时，则 p_a = 13mbar；

p_s——真空泵工作温度下的饱和蒸汽压力；

p_e——真空泵排气压力，一般为 1333hPa；

B/S——一般为 0.1；

T——环境温度（K）。

可根据 DIN28426 标准测量并计算出最大蒸汽允许压力。知道蒸汽允许压力后可按式（3-17）计算出蒸汽量 C_{wo}，用 kg/h 表示。

由式（3-15）和式（3-16）可知，增大气镇量，降低排气压力，提高工作温度，均可有效地增大真空泵的蒸汽允许压力。其中工作温度的变化对蒸汽允许压力的影响最大。真空泵工作温度的提高对抽除蒸气是极其有效的。Busch R5 旋片真空泵只有在 800℃ 工作温度下才能达到较高的蒸汽允许压力。标准型单气镇阀配置真空泵，其最大蒸汽允许压力一般在 40hPa。如被抽蒸汽量超过上述压力值有以下方案可选择：

双气镇阀（蒸汽允许压力为 60 ~ 80hPa）。

HVT 型高温泵（蒸汽允许压力为 200 ~ 300hPa）。

采用水环泵作为前级泵降低排气压力（蒸汽允许压力为 200 ~ 400hPa）。

（2）新油一次润滑　在化工、制药领域中真空泵所抽的气体中不仅存在大量的蒸汽，还存在较多的腐蚀性气体，如果不能有效地抽除蒸汽，腐蚀性的蒸汽在泵内循环使用将对真空泵造成损坏。为此，将真空泵的油润滑系统设计成非循环式，即新鲜的润滑油通过油泵喷射注入泵腔表面，压缩后的冷凝物与润滑油混合在一起与润滑油一起排出泵腔，油进入分离器中不再循环使用。由于喷入压缩腔的润滑油仅起润滑作用，故需少量即可，所以真空泵工作时消耗的润滑油也相当少。如德国某公司 250m^3/h 的真空泵一般每工作 1h 消耗 100mL 润滑油。由于润滑油使用量少，故真空泵一般设计成双级、多旋片、水冷方式，以获得较高的真空度。

（3）冷凝作用　在真空干燥、蒸馏工艺中，将有大量的蒸汽产生，而且某些溶剂或蒸汽需要回收，在此情况下，在真空管路上安装冷凝器是极其必要的。此外，冷凝器的抽吸效果很大，它将减少干燥及蒸馏的时间，在一般工业用途中采用水冷式冷凝器。冷凝物的再蒸发及排放应予以考虑。

（4）正确的维护保养

1）每天观察润滑油，观察其是否乳化、变质。
2）在关闭进气阀的状态下运转约 30min，使真空泵达到其工作温度。
3）工作完毕后，建议让泵继续工作 30min，以便充分排除润滑油中的蒸汽。
4）循环工作时，泵应常开，使真空泵的工作温度稳定。
5）如安装排气管，则应向下倾斜，这样凝结在排气管中的冷凝物就不会流入泵中。
6）两周以上时间不使用真空泵时，应该放掉旧油，加入新油保存。
7）应定期清洗气镇阀上的过滤器。

第四章　非晶硅薄膜太阳电池

非晶硅（amorphous Si，简写成 a-Si）是一种无序材料，它没有完整的晶胞和由晶胞组成的晶体，存在着大量的结构上和键结上的缺陷，是一种“长程无序”而“短程有序”的连续无规网络结构，其中包含有大量的悬挂键、空位等缺陷。由于 a-Si 结构中含有大量的悬挂键等缺陷，使得迁移率隙中有很高的状态密度，因而掺杂比较困难。其费密能级好像被“钉死”在固定的位置上而不容易移动。因此很纯的 a-Si 在技术上利用是十分困难的，而在技术上有实用价值的是 a-Si：H 合金。在这种合金膜中，因为掺杂的氢补偿了 a-Si 中的悬挂键，从而使得定域态密度大大降低，掺杂才成为可能。

第一节　非晶硅薄膜太阳电池的性能

一、a-Si 太阳电池的优、缺点

（1）优点

1）具有较高的光学吸收系数，在 0.315 ~ 0.75μm 的可见光波长范围内，此系数比单晶硅高一个数量级。因此，很薄的 a-Si 太阳电池，就能吸收大部分的可见光。

2）a-Si 的禁带宽度（1.5 ~ 2.0eV）比硅（1.12eV）大，所以与太阳光谱有较好的匹配。

3）制备 a-Si 的工艺和设备简单，沉积温度低（300℃左右），耗能少。

（2）缺点

1）a-Si 中可能有孪生复合。

2）空穴扩散长度小，且空穴迁移率低。

3）最佳结构和工艺尚未确定，电池的填充因子较低。

4）在使用中性能发生衰减。

二、a-Si 太阳电池的结构及工作原理

（1）结构　a-Si 太阳电池采用 P-I-N 结构，P 层是掺杂了硼的材料，I 层是本征材料，N 层是掺杂了磷的材料。对于 P-I-N 结构，在没有光照的热平衡状态下，P、I、N 三层中具有相同的费密能级，这时本征层中导带和价带从 P 层向 N 层倾斜形成内建势。图 4-1 为 a-Si 太阳电池的 P-I-N 能带。

（2）工作原理　在理想的情况下，P 层和 N 层费密能级的差值决定电池的内建势，相应的电场叫内建场。由于掺杂层内缺陷浓度很高，因而光生载

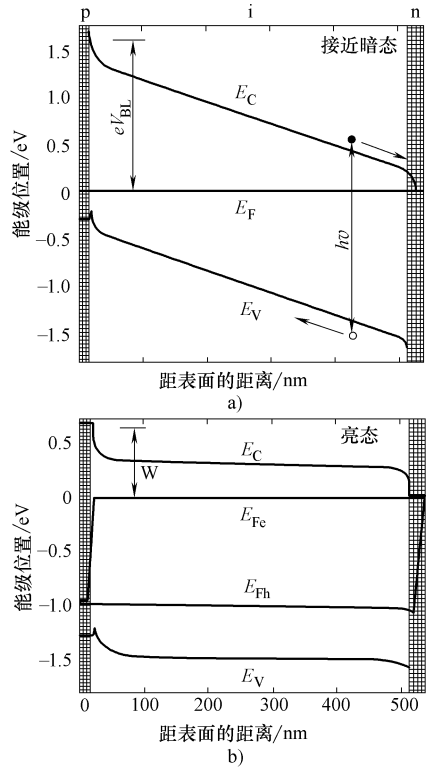


图 4-1　a-Si 太阳电池的 P-I-N 能带

流子主要产生在本征层中，在内建势的作用下，光生电子流向 N 层，而光生空穴流向 P 层。在开路条件下，光生电子积累在 N 层中，而光生空穴积累在 P 层中，这时在 P 层和 N 层中的光生电荷在本征层中所产生的电场抵消部分内建场，这时 N 层中积累的光生电子和 P 层中的光生空穴具有向相反方向扩散的趋势，以抵消光生载流子的收集电流。当扩散电流与内建场作用下的收集电流这两个方向相反的电流之间达到动态平衡时，本征层中没有净电流。此时，在 P 层和 N 层中累积的电荷产生的电压叫开路电压 U_{oc}，是太阳电池的重要参数之一。开路电压 U_{oc}的大小由下列因素决定：

1）与材料特性有关。它取决于本征层的带隙宽度，宽带隙的本征材料可以产生较大的开路电压，而窄带隙的本征材料可以产生较小的开路电压，比如非晶锗硅电池的开路电压比非晶硅的开路电压小。

2）开路电压的大小还取决于掺杂层的特性，特别是掺杂浓度。P 层和 N 层的费密能级的差值决定开路电压的上限，所以掺杂层需要优化，尤其是 P 层，常采用非晶碳化硅合金（a-SiC：H）或微晶硅（μc-Si：H）作为 P 层材料。虽然非晶碳化硅合金通常有较高的缺陷态，但其较宽的带隙使其费密能级可以较低。

3）宽带隙可以减少 P 层对光的吸收。微晶硅的带尾态宽度较小，掺杂效率高，费密能级可以接近价带顶，所以微晶硅也可以增加开路电压的幅度。

4）取决于本征层的质量，即带尾态的宽度和缺陷态密度所决定的反向漏电流的大小。

在 P 区和 N 区之间插入一本征层，形成 P-I-N 结，I 层电导较低，因此空间电荷区宽度基本上落入 I 层，甚至延展到整个 I 层的厚度，在太阳光照下，光子被足够厚的 I 层有效地吸收，I 层的光生载流子在内建场作用下分离，并漂移到边界。由于 P 层与 N 层很薄，少数载流子容易通过 P 层与 N 层被收集。P-I-N 结构中光生载流子主要进行漂移运动，而不是扩散运动。

第二节　单结、双结、三结非晶硅太阳电池

一、单结 a-Si 太阳电池

单结 a-Si 太阳电池有两种，即 P-I-N 和 N-I-P 型。

1. P-I-N 单结非晶硅薄膜太阳电池

P-I-N 单结结构的电池一般沉积在玻璃衬底上，以 P、I、N 的顺序连续沉积各层。光透过玻璃入射到太阳电池，玻璃叫衬底。制造时，先要在玻璃衬底上沉积一层透明导电（TCO）膜。透明导电膜有两个作用：一是让光通过衬底进入太阳电池；二是提供收集电流的电极（称为顶电极）。然后在透明导电膜上依次沉积 P 层、I 层及 N 层，P 层通常采用非晶碳化硅合金，非晶碳化硅合金的禁带宽度比非晶硅宽，光的透过率比通常的 P 型非晶硅高，所以 P 型非晶碳化硅合金也叫窗口材料（Window Material），P 型非晶碳化硅合金可以有效地提高太阳电池的开路电压和短路电流。但是，P 型非晶碳化硅合金和本征非晶硅在 P-I 界面存在带隙的不连续性，在界面处容易产生界面缺陷态，从而产生界面复合，降低电池的填充因子。为了克服这一不足，采用一个缓变的碳过渡层（Butter Layer），可以有效地降低界面缺陷态密度，提高填充因子。在此过渡层上面可以直接沉积本征非晶硅层，然后沉积 N 层。

背电极可以直接沉积在 N 层上。常用的背电极材料是蒸发银和铝。银的反射率比铝高，

使用银电极可以提高电池的短路电流，但是银的成本比铝高，长期使用的可靠性有问题，所以在实验室中采用银作为背电极，大批量的工业生产中用铝作为背电极。为了提高光在背电极的有效散射，在沉积背电极之前可以在 N 层上沉积一层氧化锌（ZnO）。氧化锌有两个作用：一是它有一定的粗糙度，可以增加光漫射；其次它可以起到阻挡金属离子扩散到半导体中的作用，从而降低由于金属离子扩散所引起的电池短路。

2. N-I-P 单结 a-Si 薄膜太阳电池

N-I-P 单结结构是沉积在不透明的衬底上的，如不锈钢和塑料。首先在衬底上沉积背反射膜。常用的背反射膜有银/氧化锌（Ag/ZnO）和铝/氧化锌（Al/ZnO），银/氧化锌的成本较高，通常在实验室使用，大批量的工业生产用铝/氧化锌。在背反射膜上依次沉积 N 层、I 层和 P 层 a-Si 或微晶硅材料，然后在 P 层上沉积透明导电膜。常用的透明导电膜是氧化铟锡（Indium-tin-oxide，ITO）膜。由于 ITO 膜的表面电导率通常不如在玻璃衬底上的透明导电膜的表面电导率高，加上为达到其减反作用，其厚度一般仅为 70nm，厚度很薄，所以要在 ITO 膜面上添加金属栅线，以增加光电流的收集率。与 P-I-N 结构相比，N-I-P 结构有以下几个特点：

1）制造时首先是在背反射膜上沉积 N 层，其材料是铝/氧化锌。氧化锌相对稳定，不易被等离子体中的氢离子刻蚀，所以 N 层可以是 a-Si 或微晶硅。

2）电子的迁移率比空穴的迁移率高得多，所以 N 层的沉积参数范围比较宽。

3）P 层是沉积在本征层上，所以 P 层可以用微晶硅，可有效地提高电池的开路电压。因为微晶硅对短波的吸收系数比 a-Si 小，使电池的短波响应好；微晶硅 P 层的掺杂效率比非晶硅高，相应的电导率高。

4）由于要在顶电极 ITO 膜上添加金属栅线，以增加光电流的收集率，所以电池的有效受光面积会减小。

5）由于 ITO 膜的厚度很薄，ITO 膜本身很难具有粗糙的绒面结构，电池的光漫射效应主要取决于背反射膜的绒面结构，因此对背反射膜的要求比较高。

二、双结 a-Si 太阳电池

用单一材料成分制备的单结太阳电池效率的提高受到限制，这是因为太阳光谱的能量范围很宽，分布在 0.4 ~ 4eV，而材料的禁带宽度是一个固定值 E_g，太阳光谱中能量小于 E_g 的光子不能被太阳电池吸收；能量远大于 E_g 的光子虽被太阳电池吸收，激发出高能光生载流子，但这些高能光生载流子会很快弛豫到能带边，将能量大于 E_g 的部分传递给晶格，变成热能浪费掉了。解决这一问题的途径是寻找能充分吸收太阳光谱的太阳电池结构，最有效的方法便是采用叠层电池。

叠层电池的原理是用具有不同带隙 E_{gi} 的材料做成多个子太阳电池，然后把它们按 E_g 的大小从宽至窄顺序摞叠起来，组成一个串接式多结太阳电池。其中，第 i 个子电池只吸收和转换太阳光谱中与其带隙宽度 E_{gi} 相匹配的波段的光子，也就是说，每个子电池吸收和转换太阳光谱中不同波段的光，而叠层电池对太阳光谱的吸收和转换等于各个子电池的吸收和转换的总和，从而提高太阳电池的转换效率。下面以三结叠层电池为例，来说明叠层电池的工作原理。

选取三种半导体材料，它们的带隙分别为 E_{g1}、E_{g2}、E_{g3}，其中 $E_{g1} > E_{g2} > E_{g3}$，按顺序以串接的方式将这三种材料连续制备出 3 个电池，构成叠加电池，E_{g1} 子电池在最上面（称为顶电池），E_{g2} 子电池在中间（称为中电池），E_{g3} 子电池在最下面（称为底电池）；顶电池

吸收和转换太阳光谱中 $hv \geqslant E_{g1}$ 部分的光子，中电池吸收和转换太阳光谱中 $E_{g1} \geqslant hv \geqslant E_{g2}$ 部分的光子，而底电池吸收和转换太阳光谱中 $E_{g2} \geqslant hv \geqslant E_{g3}$ 部分的光子。三结叠层电池把太阳光谱分为 3 段，分别分配给 3 个子电池来吸收，顶电池吸收短波部分，中电池吸收中波部分，底电池吸收长波部分。很显然，这种三结叠层电池对太阳光的吸收和转换比任何一个带隙为 E_{g1} 或 E_{g2} 或 E_{g3} 的单结电池有效得多，因而它可大幅度地提高太阳电池的转换效率。

a-Si：H/μc-Si：H 是新一代非晶硅/微晶硅薄膜电池的主要结构，它的转化效率比常规的纯非晶硅电池的转换效率高，电池的稳定性好，生产中不需要锗烷，从而可以降低生产成本。微晶硅 μc-Si：H 的禁带宽度接近于单晶硅的 1.1eV，在长波响应和稳定性方面比非晶锗硅要好，是理想的底电池的本征层，在具有良好的背反射膜的情况下，单结 μc-Si：H 电池的短路电流可以达到 27 ~ 29mA/cm^2，甚至超过 30mA/cm^2。为了与底电池的电流相匹配，要求顶电池的电流达到 13 ~ 14mA/cm^2，为了实现这一目标，在 a-Si：H 顶电池和 μc-Si：H 底电池之间插入一层半反射膜作为中间层，这层半反射膜将部分光子反射回顶电池，从而增加顶电池的电流，但是由此带来的损失是底电池的电流相应降低。半反射膜一般为氧化锌（ZnO）或其他电介质材料，其厚度和折射率是两个重要的参数。顶电池的电流随半反射层厚度的增加而增加，底电池的电流随半反射膜厚度的增加而减少，其原因是部分被反射的长波光子不能被顶电池所吸收。所以，半反射膜对双结电池总电流没有正面贡献，但通过它对双结电池进行优化、调节顶底电流的匹配，使双结电池获得较大的输出电流。图 4-2 为双结 a-Si 太阳电池。图 4-3 为中间层不同折射率的量子响应曲线。

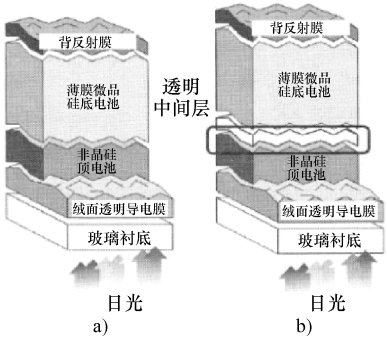


图 4-2　双结 a-Si 太阳电池

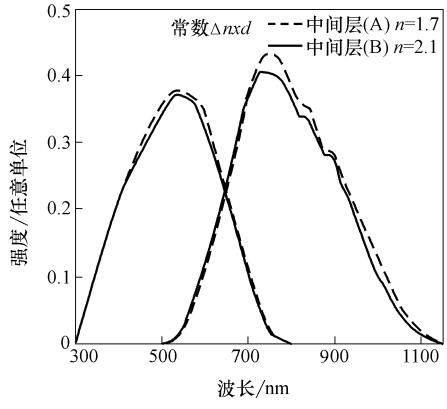


图 4-3　中间层不同折射率的量子响应曲线

从图 4-3 可看出，中间层折射率为 1.7 比折射率为 2.1 的效果好，可获得总效率为 14.7% 的双结叠层电池。

三、三结 a-Si 太阳电池

三结太阳电池的材料主要是非晶硅、非晶锗硅合金和微晶硅。不同的组合，会遇到不同的问题。表 4-1 是对不同的材料的三结太阳电池作一个比较。

结数的增加带来了许多设计及工艺繁琐的问题，各子材料的选择、子结之间的隧道结材料的选择都变得很困难，制造工艺也十分复杂。这势必影响叠层电池结构材料的质量，大大增加成本，从而抵消了由于结数的增加带来的效率提高的好处。但是，最高效率（聚光条件下 40.7%、41.1%）仍然是由三结叠层电池所得到的。

表 4-1　三结太阳电池的特性

电池类别 / 特性	非晶硅/非晶锗硅合金/微晶硅 (a-Si:H/a-SiGe:H/μc-Si:H)	非晶硅/微晶硅/微晶硅 (a-Si:H/μc-Si:H/μc-Si:H)	非晶硅/非晶硅/微晶硅 a-Si:H/a-Si:H/μc-Si:H
特点	长波响应好,短路电流较高,填充因子好,开路电压低(微晶禁带宽度小)	长波响应好,稳定性好,衰变一般在5%左右	中间电池电流难以与顶电池和底电池电流相匹配,在中间电池与底电池之间加了半反射膜
初始效率	15.4%	14.1%	15.1%

第三节　非晶硅薄膜太阳电池的制备

a-Si 太阳电池的制备有辉光放电法、反应溅射法、低压化学气相沉积法、电子束蒸发法及热分解硅烷法等。图 4-4 为辉光放电法制备 a-Si 太阳电池。

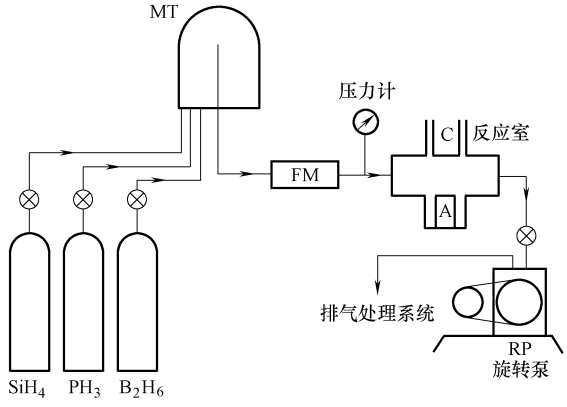


图 4-4　辉光放电法制备 a-Si 太阳电池

在一个抽真空的石英容器中，充入由氢气或氩气稀释的硅烷，射频电源用电容或电感耦合方式加在反应器外侧的电极上，使 SiH_4 电离，形成等离子体。a-Si：H 膜就沉积在被加热了的衬底上，若硅烷中混入适当比例的 PH_3 或 B_2H_6，便可得到 n 型或 p 型 a-Si 膜。衬底材料用玻璃。

辉光放电是一种在低真空条件下的稳态放电，因为在放电过程中会出现特有的辉光，并按一定的规律分布，故称为辉光放电。

在低真空下，残余气体中总有少量的带电粒子，如离子和电子，当外加电场出现时，这些粒子首先加速，获得能量，只要它的能量大于反应气体的电离电位并和气体分子发生第二类非弹性碰撞，发生内能的交换，使得气体分子电离成离子，同时放出电子，这些电子和离子发生新的碰撞，使更多的气体被电离，形成稳定的放电，放电空间分成两个基本区，一个是阴极位降区，一个是等离子区，放电的过程在很短时间内就可完成。表 4-2 为几种气体的电离电位。

表 4-2 几种气体的电离电位

气体种类	电离电位/eV	气体种类	电离电位/eV
硅烷(SiH_4)	11.7	氦气(He)	20.86
氩气(Ar)	15.7	汞(Hg)	10.4
氢气(H_2)	11.1		

1. 工艺条件

a-Si 膜的光伏特性很大程度上取决于工艺条件，主要有反应功率、基体温度、反应压力和气体流量。

（1）反应功率 反应功率是影响 a-Si 膜性能的关键因素，在确定的气体流量和反应压力的情况下，选择合适的射频功率，使放电区内电子的能量将硅烷分解成合适的原子团。射频电源频率高达 13.5MHz，频率越高，放电空间内粒子的能量分布函数越稳定，有利于制备大面积均匀膜。如果放电空间中电子的能量被调整到 10.4eV 左右，硅烷就被分解成 SiH 原子团。SiH 原子团是理想的原子团，它在合适的基本温度下离解成氢化硅，其中的氢原子足以补偿无序网络中的悬挂键，膜的电子性能较高。如电子能量太小，只能将硅烷 SiH_4 分解成 SiH_3 或者 SiH_2 原子团，SiH_3 或者 SiH_2 原子团是有害的，它们的离解温度较高，往往形成聚合链，对性能影响较大。另外，功率太高会使膜内氢含量减少，不足以补偿无序网络中的空位和悬挂键，同时使已沉积好的膜受到有害的轰击。常用的功率为 10～20W，放电电流为几百 A/cm^2。沉积工作时，可以将衬底置于阴极处，沉积速度较高，可达 10Å/s～几十 Å/s；也可将衬底置于放电区外，沉积速率较低，只有 1～3Å/s，但膜的性能好。沉积速率一般和功率的二次方根成正比。

（2）衬底温度 分解 SiH 原子团的温度必须高于 175℃，分解 SiH_3 或者 SiH_2 则需要更高的温度。温度太高，会降低膜内氢的成分，膜的带隙变窄，使电池开路电压变低；温度太低，会使膜成为一种疏松的聚合物。衬底温度一般控制在 220～300℃为宜。

衬底温度升高，a-Si 膜的暗电导和光电导都增加，温度能使本征硅膜内“拟施主”的成分增加。

衬底温度的选择和衬底材料性质有关，要防止膜和衬底材料之间作用，如会扩散形成低共熔合金。铝就是一个例子，铝在 275℃时可以和 a-Si 形成合金，破坏硅膜。铜合金在更低的温度下可以和 a-Si 发生作用。银和 a-Si 膜的结合力差不宜作衬底。铬、钛、铌、钽和铜都是衬底良好的材料。绝缘体（如石英、玻璃）也是良好的衬底材料，但是有些玻璃含有碱金属，在沉积膜时会向膜内扩散。它们是一种施主杂质，会影响整个电池的性能，所以只可采用低碱玻璃。

（3）反应压力和气体流量 反应压力与放电空间内带电粒子的浓度有关。在放电功率一定的情况下，反应压力越高，每个粒子获得能量越小；反之，粒子的能量越大，高能粒子对膜的轰击也越严重，这是不利的。通常将辉光放电工艺分成低压工艺和高压工艺，反应气体的平均自由程大于两极之间距离，是低压工艺；反应气体的平均自由程小于两极之间距离，是高压工艺。用高压工艺制成的膜，具有良好的电子性能，适合于做太阳电池。但如果高压工艺参数选择得不好，会导致膜起皮或者发灰。高的反应压力可提高膜的暗电导和光电导。

气体流量提高可防止起皮和发灰，通常辉光放电在 10^{-1} 到几托范围内进行，气体流量约为 30～100mL/min。大的气体流量也有利暗电导和光电导的提高。

（4）其他条件　采用辉光放电法时用氢气稀释硅烷效果较好，晶粒大，电导高。从稀释气体原子直径对膜的特性的影响考虑，原子直径越小，制成膜的态密度越低，这可能和残留气体对微孔的影响有关。

沉积速率的提高可以采用纯硅烷作反应气体，用乙硅烷作反应气体可进一步提高沉积速率，因为乙硅烷的电离电位较硅烷低，在同样的反应条件下分解速率高，目前沉积速率可超过 30Å/s，采用一些特殊工艺可达 60～90Å/s。

电极材料必须能耐带电粒子的轰击，否则电极材料的溅散物会沾污膜，改变膜的半导体特性。在常用金属材料中，它们的抗溅能力按以下次序逐渐递增：Ag、Au、Cu、Pu、Pt、Ni、Fe、Al。

2. 结构

a-Si 电池的发电原理是光生载流子依靠电池内电场作用下的漂移运动，结构是 pin 形式。图 4-5 为 a-Si 电池的发电原理。

3. 提高效率

1）a-Si 电池内光载流子的生成主要在 i 层，入射光到达 i 层之前，一部分被掺杂层所吸收，它对于发电是无效的，且减小了光的利用率。为了减少掺杂层对光的吸收，可用微晶硅（μc-Si）做掺杂层的结构，或用非晶碳化硅（a-SiC）来做掺杂层的结构，非晶碳化硅做掺杂层对 a-Si 电池的高效化很有效，其转化效率已超过 11%。

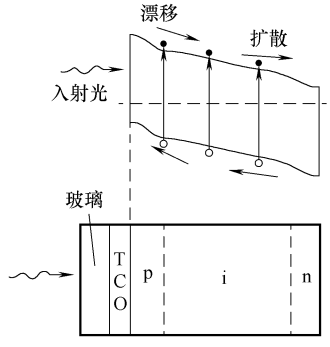


图 4-5　a-Si 电池的发电原理

2）采用多层结构的 a-Si 太阳电池，其效率能超过单晶硅太阳电池。该结构是采用不同的材料在电池的前面对短波产生光响应，在电池的后面对长波产生光响应。对短波产生光响应采用非晶碳化硅（a-SiC）或非晶氮化硅(a-SiN）材料，对长波产生光响应采用非晶硅锗（a-SiGe）或非晶硅锡（a-SiSn）等。这种结构由于有效地利用太阳光谱中更宽波长范围的光，就能大幅度地提高转换率。例如三层结构的太阳电池，其转换效率理论可达 24%。图 4-6 为高效太阳电池。

4. 特性

在 p 层和 n 层之间生产一层本征 a-Si（i 层）作为吸收光的主体，用 pin 结代替 pn 结，这是 a-Si 太阳电池和单晶硅太阳电池的一大区别。在本征层内，空穴扩散长度较大，一般可达到 0.3μm，好的电池可超过 0.5μm。由于本征层两侧存在着高达 10^4V/cm 的 pi 结、in 结电场，所以本征层内产生的光生载流子几乎都可以被电场分离而变成向外输出的光生电流。它的特性可从五个方面描述。

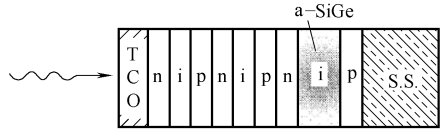


图 4-6　高效太阳电池

（1）光生电流　a-Si 太阳电池在受到阳光照射时，光生电流表达式如下：

$$J_L = \int_0^{\infty} [J_n(\lambda) + J_p(\lambda) + J_i(\lambda)]\mathrm{d}\lambda$$

式中　J_L——光生电流；

$J_n(\lambda)$——n 区提供的光生电流；

$J_p(\lambda)$——p 区提供的光生电流；

$J_i(\lambda)$——i 区提供的光生电流。

$J_n(\lambda)$ 和 $J_p(\lambda)$ 基本上是扩散电流，$J_i(\lambda)$ 主要是漂移电流。a-Si 太阳电池中，载流子的扩散长度都比较小，光生电子-空穴对主要靠强大的漂移电场分离，所以在单结 a-Si 太阳电池中，漂移电流要比扩散电流大 4 个数量级。

a-Si 太阳电池的光生电流比较复杂，在恒定光照下，短路状态与开路状态有所不同。短路时，空间电荷区具有最大的结电场和最大的漂移电流；开路时，空间电荷区变窄，结电场最小，漂移电流减少。所以，a-Si 太阳电池从短路状态变到开路状态的过程中，光生电流会随之减少。

（2）开路电压　通常单结 a-Si 太阳电池的开路电压可达 0.6 ~ 0.8V，理论极限可以超过 1V，反向饱和电流 J_0 与本征载流子浓度的二次方成正比，本征载流子浓度约为 $7 \times 10^7/m^3$。a-Si 太阳电池的弱光响应比较好，例如在 1/1000 的标准太阳辐照度下，开路电压可达 600mV。而单晶硅的开路电压只有 100mV。

（3）填充因子和伏安特性　a-Si 太阳电池的填充因子 FF 表达如下：

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}} \times 100\%$$

式中　U_m——最大功率点处的最佳工作电压；

I_m——最大功率点处的最佳工作电流。

填充因子和电池的结构特性及串、并联电阻有关，a-Si 太阳电池的填充因子可以达到 75% ~77%（单晶硅可达 82% 以上）。

a-Si 太阳电池的伏安特性如图 4-7 所示。图中，开路电压高，短路电流小，曲线“软”，填充因子小，光电流逐渐随端电压增加而减小。

（4）效率　a-Si 太阳电池的效率 η 表达如下：

$$\eta = \frac{U_{oc} J_{sc} FF}{E_{in}} \times 100\%$$

式中　E_{in}——电池接收的辐照度。

目前，工业生产大面积单结 a-Si 太阳电池的效率为 6% ~8%，小面积效率可达 12%。本征层的厚度、质量，透明电极的透光率、电导率等都对效率有重要影响。

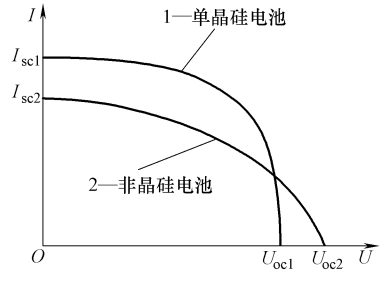


图 4-7　a-Si 太阳电池的伏安特性

（5）温度对电池性能的影响　温度对 a-Si 膜载流子的漂移率影响比较复杂，电流和温度的关系很特殊。图 4-8 为温度与短路电流的关系。

当温度在 160K 以下时，电流变化十分大。原因在于低温下 a-Si 膜中的载流子漂移率很低，电导率也很低，造成收集率下降；同时，在电流流过时，内压降增加，也使得电流下降。在 160 ~350K 的范围内，短路电流随温度逐渐增加。

图 4-9 为温度与开路电压的关系，在 0 ~350K 之间，温度与开路电压具有线性关系。

用辉光放电分解硅烷或乙硅烷制备的 a-Si：H 的光电性质密切依赖于沉积参量。

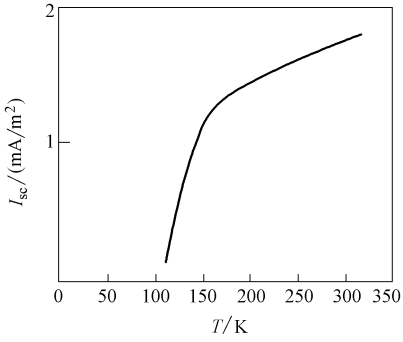


图 4-8　温度与短路电流的关系

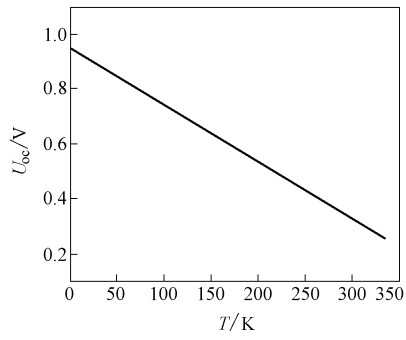


图 4-9　温度与开路电压的关系

第四节　非晶硅薄膜材料的光学特性

1. a-Si 薄膜材料的光吸收

n 型和 p 型 a-Si：H 层具有高的缺陷态密度，因此光生载流子复合速率较高，它们只能用来建立内建电势，而不能用作光吸收层。a-Si 太阳电池依靠本征层（i 层）吸收阳光，因而采用了 P-I-N 结构。本征 a-Si 的光吸收谱分为三个区域吸收：本征吸收区、带尾吸收区和次带吸收区。图 4-10 为本征 a-Si 的光吸收谱。

（1）本征吸收区 A　本征吸收是指由电子吸收了能量大于禁带 E_g 的光子后，从价带跃迁到导带时引起的吸收。E_g 为 1.7 ~ 1.8eV。本征 a-Si：H 的光吸收系数 α 在其吸收边为 $10^3 \sim 10^4 cm^{-1}$，以后随光子能量增大而增加。a-Si 由于结构无序，电子态没有确定的波矢，电子在吸收光子从价带跃迁到导带的过程中，不受准动量守恒的限制。本征 a-Si：H 的光吸收系数 α 随光子能量 hv 的变化在吸收边附近遵循 Tauc 规律：

$$(\alpha hv)^{1/2} = B(E_g - hv)$$

式中　B——与带尾态密度相关的参数。

实验上用光透射谱导出 a-Si：H 的复折射率，由上式计算出 E_g。

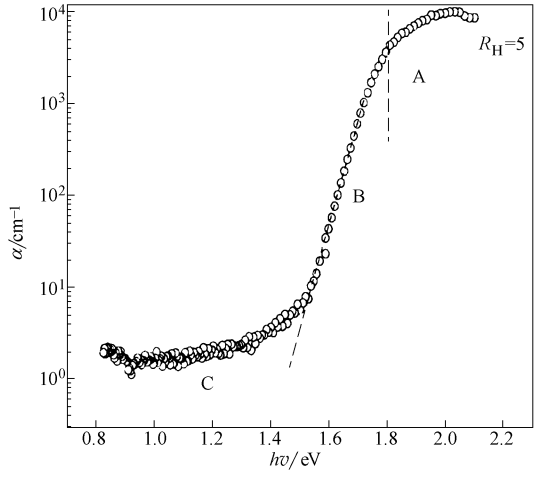


图 4-10　本征 a-Si 的光吸收谱

（2）带尾吸收区 B　带尾吸收区是指电子从价带扩展态到导带尾态的跃迁，或者从价带尾态到导带扩展态的跃迁。在这一区域，$1cm^{-1} < \alpha < 10^3 cm^{-1}$，$\alpha$ 与 hv 呈指数关系，也称此区为指数吸收区。这主要是无序固体中电子从价带尾跃迁到导带尾的光吸收系数随光子能量呈指数变化，它起源于电子带尾态密度的指数分布。这是 F. Urbach 在 1953 年发现的。

（3）次带吸收区 C　次带吸收区的 $\alpha < 10cm^{-1}$，电子从价带到带隙态跃迁，或者从带隙态到导带跃迁。若 $\alpha < 1cm^{-1}$，则该材料具有很高的质量。

2. a-Si 薄膜材料的光电导

在太阳 AM1.5、100mW/cm^2 光照下，a-Si：H 的光电导率大于 $10^{-5}(\Omega \cdot \mathrm{cm})^{-1}$，相应的光电导灵敏度达 $10^5 \sim 10^6$。根据光波长的不同，电子从价带到导带的激发，可产生载流子，从隙态到扩展态的激发也可以产生载流子。a-Si 光电导的大小不仅取决于光吸收和激发的情况，还与材料中复合和陷阱有关，因而可以通过对光电导的测量，确定光吸收和带隙态的情况。

（1）确定光吸收谱　确定光吸收谱的过程如下：

$$\sigma_{\mathrm{ph}} = q\eta\mu\tau F(1-R)[1-\exp(-\alpha d)] \tag{4-1}$$

式中　q——电子电荷；

η——量子产额；

μ——光生载流子的迁移率；

τ——寿命；

F——入射到薄膜表面单位面积上的光子数（或光通量）；

R——薄膜表面的反射系数；

α——吸收系数；

d——样品厚度。

在本征高吸收区，$\alpha d \gg 1$，$1-\exp(-\alpha d) \to 0$，式（4-1）变为

$$\sigma_{\mathrm{ph}}(H) = e\eta\mu\tau F(H)(1-R) \tag{4-2}$$

在低吸收区，$\alpha d \leqslant 0.4$，则有

$$\sigma_{\mathrm{ph}} = e\eta\mu\tau F(1-R)\alpha d \tag{4-3}$$

如果 R 和 $\eta\mu\tau$ 不随入射光子能量 hv 而变化，由式（4-1）比式（4-2）可得

$$\alpha = \frac{\sigma_{\mathrm{ph}}}{\sigma_{\mathrm{ph}}(H)d}\frac{F(H)}{F} \tag{4-4}$$

可以在强吸收区选定一点，比如光子能量为 2.0eV 处，测定 $F(2.0)$ 和 $\sigma_{\mathrm{ph}}(2.0)$，这两个量与样品厚度 d 对光子能量 hv 而言，都是常量，因而

$$\alpha(hv) \propto \frac{\sigma_{\mathrm{ph}}(hv)}{F(hv)} \tag{4-5}$$

只要测出光电导谱 $\sigma_{\mathrm{ph}}(hv)$ 和入射光通量 $F(hv)$，就可以得到光吸收谱 $\alpha(hv)$。

（2）确定带隙态　保持光电导 $\sigma_{\mathrm{ph}}(hv)$ 恒定下，测量入射光通量 $F(hv)$，再按式（4-5）求出吸收系数 $\alpha(hv)$，这样得到的次带吸收区的光吸收谱可以给出费密能级以下带隙的信息，带尾吸收区的光吸收谱则能提供带尾态的信息。

3. a-Si 薄膜材料的光致发光和激发谱

（1）a-Si 薄膜材料的光致发光　在氩离子激光（波长为 488nm 和 514.5nm）或其他能量大于带隙的光子激发下，a-Si：H 膜会发出较强的荧光，这就是 a-Si 薄膜材料的光致发光或光荧光（PL）。这可以观察到。在低温下（77K），在未掺杂的 a-Si：H 膜的光荧光谱中可观察到一个峰值能量在 1.3～1.4eV 的发光峰，其半高宽达 0.3eV；在掺杂的或缺陷密度

高的 a-Si：H 中，还可观察到另一个发光峰，峰值能量在 0.8～0.9eV，其强度较弱，约为前者的 1%。

（2）a-Si 薄膜材料的激发谱　如果改变激光波长，在某一个选定的固定波长下探测光荧光强度随激发小波长的变化，可以得到 a-Si 光荧光的激发谱。光荧光的激发谱主要反映了材料的吸收特性。

4. a-Si 薄膜材料的红外吸收和拉曼散射

（1）a-Si：H 的红外吸收　a-Si：H 的红外吸收谱可用来研究 Si-H 的键。氢在缓和 a-Si 网络结构的内应力饱和或钝化硅悬键方面，起着重要的作用，Si 原子与 H 原子的键态组合和键合氢的总含量，可以用红外吸收谱来测定。

在 a-Si：H 网络结构中，Si 原子是四配位的，它的最近邻原子可以是 Si 原子，也可以是 H 原子，形成 SiH_1、SiH_2、SiH_3 键。红外吸收谱所揭示的固体原子局域振动模式可分为两类：一类是成键原子之间有相对位移的振动模式，包括键长有变化的伸缩模和键角有变化的弯曲模；另一类是成键原子之间没有相对位移的转动模式，如摆动模、滚动模和扭动模，其区别在于转轴的不同。

（2）a-Si：H 的拉曼散射　拉曼散射是指光子（能量在可见光或近红外光谱范围）在 a-Si：H 中由于吸收或发射声子而发生的非弹性散射。通过拉曼散射谱可以得到有关非晶硅网络结构的信息。非晶硅的一级拉曼散射谱主要在 100～600cm^{-1}，属远红外谱区，在研究非晶硅原子振动性质方面，与红外吸收谱互为补充。非晶硅的一级拉曼散射谱有多种振动模式都是激活的，如：横光学 TO 模，峰位在 480cm^{-1}；纵光学 LO 模，峰位在 410cm^{-1}；纵声学 LA 模，峰位在 310cm^{-1}；横声学 TA 模，峰位在 170cm^{-1}。图 4-11 为 a-Si：H 拉曼散射谱。

图 4-11 是用高斯分解得到的 a-Si：H 的 4 个振动模式，是 PECVDa-Si：H 样品典型的拉曼散射谱，制备时的衬底温度为 200℃，氢稀释［H_2］/［SiH_4］= 10。由于非晶硅网络的无序性，使光学跃迁的动量选择定则放宽，原有的禁戒模式获得不同程度的激活，它们的峰位基本上对应于声子态密度谱的峰值，而且这些模式的峰形有明显的展宽，如图 4-11 中 TO 模的半高宽达 51.3cm^{-1}。

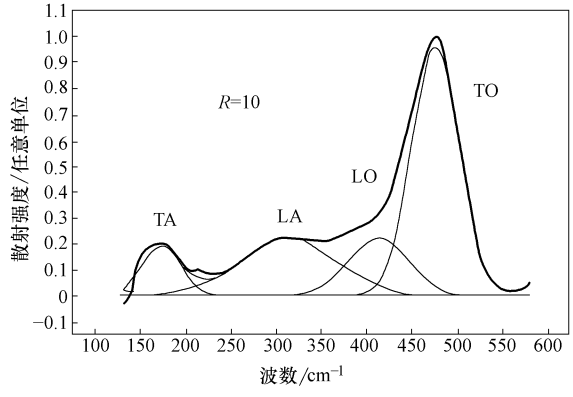


图 4-11　a-Si：H 拉曼散射谱

非晶硅拉曼散射谱的峰位、强度和峰度受到薄膜微结构的影响。例如，拉曼散射谱的 TO 模是非晶硅短程序的灵敏量度，TO 模散射峰的面积对应着 Si-Si 键键角振动的态密度，利用 TO 模的半高宽可以计算出薄膜中硅网络的平均键角畸变，借此推知图 4-10 所示的氢稀释样品的平均键角畸变为 7.0°左右，而随着氢稀释程度的增加，拉曼散射谱的 TO 峰位向高波数方向移动，半高宽减小。再如，拉曼散射谱的 TA 模是薄膜中程有序度的表征，TA 模散射峰的面积与二面角振动的态密度有关，TA 模强度的降低，表明薄膜的中程有序度提高。

5. a-Si 薄膜材料的光致变化

（1）a-Si 薄膜材料光电性质的光致退化　用辉光放电法制备的 a-Si：H 薄膜经光照后（光强为 200mW/cm^2，波长为 0.6 ~ 0.9μm），其暗电导和光电导随时间而逐渐减小，并趋向于饱和，但经 150℃以上温度退火处理 1 ~ 3h 后，光暗电导又可恢复到原来的状态，这种非晶硅光致亚稳变化称为光致变化效应，即 Staebler-Wronski 效应（SWE），是 D. L. Staebler 等 1977 年首先发现的。

SWE 是 a-Si：H 膜的一种本征的体效应，经电子自旋共振和次带吸收谱等技术测定，光照在 a-Si：H 材料中产生了亚稳悬键缺陷态，其饱和缺陷浓度约为 $10^{17}\,cm^{-3}$，这些缺陷态的能量位置靠近带隙中部，主要起复合中心的作用，导致 a-Si：H 薄膜材料光电性质和太阳电池性能的退化，限制了 a-Si：H 电池可达到的最高稳定效率。光照除导致 a-Si：H 的光电导和暗电导下降，亚稳悬挂键密度增加外，还引起 a-Si：H 物理性质的一系列变化：费密能级向带隙中心移动，载流子寿命降低，扩散长度减小，带尾态密度增加，光致发光主峰强度下降，缺陷发光峰强度增加，光致发光的疲劳效应等。

（2）a-Si 薄膜材料光致退化的产生机制　因为没有单一的 a-Si：H 薄膜材料，本征和光致缺陷对沉积条件和微结构也没有单一的依赖关系，因此对 SWE 现象的理解进展较慢，一般认为，氢在 SWE 中起了重要的作用。1998 年 H. Branz 提出一个氢碰撞理论来解释 SWE：光生载流子的非辐射复合释放能量打断 Si-H 弱键，形成一个 Si 悬键和一个可运动的氢。氢在运动的过程中，不断地打断 Si-Si 键，形成 Si-H 键和 Si 悬键，氢跳走时，每个被打断的 Si-Si 键又恢复到打断之前的状态，这会产生两种结果：其一是运动的氢又重新陷落在一个不动的 Si 悬键缺陷中，形成 Si-H 键；其二是两个运动的 H 在运动时相遇或发生碰撞，最后形成一个亚稳的复合体，用 M（Si-H）$_2$ 表示。其二过程发生的概率要远小于其一，但却是产生 SWE 关键的一步。

除了氢碰撞理论，另外还有 Si-Si 弱键断裂理论：在 a-Si：H 中存在 $10^{18} \sim 10^{19}\,cm^{-3}$ 弱 Si-Si 键（带尾态的来源），光照时产生了电子-空穴对，但是电子-空穴对直接无辐射复合提供的能量会使 Si-Si 弱键断裂，断裂的悬键很容易重构而消失，是不稳定的，邻近的 Si-H 弱键有可能同新生的悬键交换位置，而使两个悬键分离，产生亚稳态键，导致 SWE。

SWE 的产生，还来源于 Si-H 键和非晶硅网络结构的光致亚稳变化，经各种仪器的实验和检测，发现其变化有：

1）光照使 Si 原子的整个 2p 峰发生了可逆的 0.1eV 的位移，而不只是产生了一个峰肩。

2）光照使 a-Si：H 的 1/f 噪声谱发生了从非高斯型向高斯型的转变，表明光照使整个（至少大部分）材料结构发生了变化。

3）光照使各向同性和各向异性极化电吸收的比例发生了显著变化，表明发生了与非晶硅键角无序相关的长程网络应变。

4）偶极自旋弛豫时间与较大范围的键合氢原子有关。

5）光照后 Si-H 键拉伸振动膜（$2000\,cm^{-1}$）的强度增加了 1.3%，这可能是 Si-H 键振子强度和数目增加的缘故。

6）光照使 a-Si：H 低频介电常数发生可逆变化。

7）光照甚至使材料的体积发生可逆膨胀。

6. 改进 a-Si 薄膜材料 SWE 的途径

SWE 主要是与非晶硅的无序网络结构和氢的运动有关，因此改进 a-Si 薄膜材料 SWE 的途径，应当从改善无序网络结构和降低 H 含量着手。

20 世纪 80 年代采用了氢稀释技术：在 PECVD 制备 a-Si：H 过程中，用氢稀释硅烷、乙硅烷可以增强原子态氢和生长表面的反应，腐蚀掉一些能量较高的缺陷结构；用氢稀释可以使反应基团在生长表面的迁移率增加，从而可以找到低能量的生长位置；用氢稀释还可使一些原子态氢扩散到薄膜体内，增强钝化效果。总之，氢稀释技术改善了 a-Si：H 的网络结构，降低了缺陷密度和光致退化程度。除了氢稀释技术以外，反应室几何结构、沉积的诸多参数（功率密度、激发频率、沉积温度、气体压力、气体流量）都对 a-Si：H 膜的微结构有直接影响。

20 世纪 90 年代，发展了热丝分解硅烷化学气相沉积（HW-CVD）a-Si：H 薄膜技术，可将薄膜的 H 含量降低到 1% 以下，并且可获得更有序的硅网络结构。

无序网络结构的改善最终将导致结构的微晶化，但是微晶化作为本征吸收层孰优孰劣在国际上还存在争议。非晶到微晶的相变不是突变的，存在着非晶与微晶共存的复相区，一旦能肯定微晶化是有利改善 SWE，并能提高太阳电池的效率，就可以在非晶网络采取一些措施，形成一定的微晶晶粒。生产实际中已发现，在反应气体为纯硅烷的条件下，调节沉积参数，可以在器件上制备出微晶薄膜。

7. 非晶硅锗合金薄膜

a-Si：H 材料的带隙宽度，可以通过与元素 Ge、C、O、N 等形成合金来调节，窄带隙的 a-SiGe：H 合金可用于叠层电池结构作为本征吸收层，两结叠层电池中用作底电池的吸收层，三结叠层电池中用作底电池和中间电池的吸收层。

非晶硅锗合金薄膜的特点：

1）用拉曼散射谱测量发现，当 a-$Si_{1-x}Ge_x$：H 合金薄膜的 Ge 含量较低、x 值小于 0.3 时（$x=0.3$ 相当于 Tauc 光学带隙 $E_g=1.5$eV），合金膜仍呈 Si-Si 网络结构；而当 Ge 含量较高、x 值大于 0.3 时，合金膜不再是 Si-Si 网络结构，而是呈现 Si 原子和 Ge 原子相互作用形成的合金结构，该种结构使材料性能下降，合金薄膜导带尾变宽，电子漂移迁移率降低。

2）合金薄膜的带隙宽度 E_g 随 Ge 含量的增加而降低，从 1.7eV 降到 1.0eV，但器件薄膜的 E_g 一般不会低于 1.4eV。

3）合金薄膜的组分和结构不均匀，也会导致 Ge 含量增加，缺陷态密度也增加。影响组分均匀性的一个因素是 SiH_4 和 GeH_4 在等离子体中分解速率的不同，GeH_4 分解速率较快，大体为 SiH_4 分解速率的 3～5 倍，这使 Ge 含量分布不均匀。Si_2H_6 的分解速率和 GeH_4 相近，所以常用 Si_2H_6 和 GeH_4 混合气体制备 a-SiGe：H 合金薄膜。

4）在 PECVD 制备中，衬底温度对 a-SiGe：H 合金薄膜的性能有显著影响，最佳温度范围在 230～280℃。

5）a-SiGe：H 合金薄膜的主要参数：

$E_g=1.4\sim1.45$eV，

带尾 Urbach 能量小于 60meV

室温暗电导 $\sigma_d<5\times10^{-8}$ $(\Omega\cdot cm)^{-1}$

暗电导激活能 $E_a\approx0.7$eV

光电导率 $>10^{-5}$ （$\Omega \cdot cm$）$^{-1}$ （AM1.5，100mW/cm^2 光照下）

尽管硅基薄膜太阳电池具有如上许多优点，然而在发展进程中也显示出一些明显的缺点。主要的缺点是电池效率的光致衰退效应，这一效应成为硅基薄膜太阳电池进一步发展应用的主要障碍。另外，由于初期产品的效率较低（4% ~5%）再加上 25% 以上的衰退率，使硅基薄膜太阳电池低成本的优势被较低的效率所抵消。所有这些造成硅基薄膜太阳电池的产量从 20 世纪 80 年代末至 90 年代初期间处在停滞不前的徘徊阶段。针对上述问题，自 20 世纪 90 年代起国际上提出要提高硅基薄膜太阳电池稳定效率的口号，并成立了由研究机构和大公司组成的专门研究队伍。

研究表明，硅基薄膜太阳电池效率光致衰退的主要原因是本征非晶硅的 S-W 效应。因此，如何制备高稳定性的本征硅基薄膜材料成为研究的重点。为了克服材料的 S-W 效应，人们从理论上、工艺上和沉积方法上开展了全面的研究。为了揭示 S-W 效应的起因，在理论上人们提出有关 S-W 效应机制的各种微观模型，如 Si-Si 弱键模型、电荷转移模型、再杂化双位模型、Si-H 弱键模型以及桥键模型等。尽管目前国际学术界对 S-W 效应起因的解释还不一致，但在大多数模型中都提到 H 在光诱导变化中可能起重要作用。为了减少材料中的 H 含量，在制备方法方面分别采用了电子回旋共振化学气相沉积（ECR-CVD）、氢根化学气相沉积（HR-CVD）、热丝（HW）法沉积和二极管系统等。在制备工艺方面采用了用 H 等离子体化学退火法、H_2 稀释法、He 稀释法以及掺入氟等惰性气体法等，均取得了一定效果。比如，用常规 Mcvn 技术制备的 a-Si：H 膜中含有约 10% 的 M，而用化学退火法制备的 a-Si：H 膜的合 H 量小于 9%，用热丝法制备的 a-Si：H 膜的含 H 量只有 1% ~2%。

在上述这些技术中，最成熟的技术是在沉积膜的过程中用 H_2 稀释反应气体法。由于这种方法工艺简单易行，并具有明显的效果，因此是当前普遍采用的技术。研究表明，用 H_2 稀释法制备 1 层的电池，效率的衰退率可从 25% 以上降至 20% 以下。

除了通过克服非晶硅基材料的 S-W 效应改善电池的稳定性外，人们还从电池结构上采取措施，并取得了明显的效果。其中最主要的措施就是采用多带隙叠层电池结构。因为采用叠层结构后可减薄每个子电池 1 层的厚度，结果使每个子电池的内电场增强，增加了各子电池的收集效率；另外，多带隙结构可扩展光谱响应范围。综合如上两方面的优势，使电池的稳定效率得到提高。

经过近 10 年来的深入研究，在提高硅基薄膜太阳电池的稳定效率方面取得很大的进步与突破。目前，硅基薄膜太阳电池效率的光致衰退率降至 150A 以下，小面积电池的稳定效率已达到 13%，大面积电池的稳定效率超过 10%，产品组件稳定效率达 71%。技术上的进步与突破带来了硅基薄膜太阳电池更大规模产业化的新高潮，在 20 世纪 90 年代中期，国际上先后建立了数条 5MW、10MW 的高水平电池组件生产线，使硅基薄膜太阳电池的生产能力增加了 25MW。生产流程实现全自动化，组件面积为平方米量级，采用新型封装技术，产品组件寿命达到 10 年以上。薄膜太阳能电池是在廉价的玻璃、不锈钢或塑料衬底上附上厚度只有几微米的感光材料制成的，具有原材料丰富、无毒、无污染、低耗能、质量轻、制程少、低成本等优点，而且用材少、重量轻、外表光滑、安装方便，并具有弱光应用性强的特点。与建筑物屋顶、走廊、玻璃帷幕相结合的建筑一体化，既可发电、美化环境又可以替代建材，应用领域更为广泛。薄膜太阳电池除了耗用硅材料明显减少，同时相对于多晶硅，生产非晶硅薄膜太阳电池的总耗电量仅是它的 15% ~20%，因此更加节能环保。

第五节　单结非晶锗硅合金薄膜太阳电池

调整非晶锗硅材料比，材料的禁带宽度可以得到相应的调整，随着锗含量的增加，材料的禁带宽度相应降低，电池的长波响应随之得到提高，相应的短路电流会增加。与非晶硅材比起来，这是锗硅材料的优越之处。非晶硅的禁带宽度在 1.7～1.8eV，比较宽，相应的长波吸收较少。与非晶硅材比起来，其不足之处是开路电压会降低，填充因子也随之降低。这是因为非晶锗硅合金中锗氢键的强度比硅氢键的强度低，随着锗含量的增加，缺陷态密度也相应地增加。表 4-3 列出了三结非晶锗硅合金薄膜太阳电池的参数。

表 4-3　三结非晶锗硅合金薄膜太阳电池的参数

电池类型	状态	短路电流 J_{sc}/(mA/cm^2)	开路电压 U_{oc}/U	填充因子 FF	最大功率 P_{max}/(mW/cm^2)
a-Si:H 顶电池	初始值	9.03	1.024	0.773	7.15
	稳定值	8.76	0.990	0.771	6.17
a-SiGe:H 中间电池	初始值	10.29	0.754	0.679	5.27
	稳定值	9.72	0.772	0.600	4.21
a-SiGe:H 底电池	初始值	12.2	0.631	0.671	5.17
	稳定值	11.1	0.609	0.622	4.21

表 4-3 虽是三结，但是为了说明问题，制作是独立的，即顶电池和中间电池是沉积在不锈钢衬底上的，底电池是沉积在 Ag/ZnO 背反射膜上的。中间电池本征层中锗的含量在 15%～20%，底电池本征层中锗的含量在 35%～40%。顶电池的参数是直接在 AM1.5 太阳能模拟器下测量的，中间电池和底电池是在 AM1.5 太阳能模拟器下，然后分别通过 530nm 和 630nm 长通滤波片测量的。中间电池和底电池的量子效率光谱如图 4-12 所示。

从图 4-12 中可以看出底电池（沉积在背反射膜上）的光谱响应明显比中间电池（沉积在不锈钢衬底上）的要宽，特别是长波响应得到显著的提高。例如 GaInP/InGaAs/Ge 三叠层电池在 1 个太阳常数下的转换效益已达到 32%（AM1.5），在聚光条件下的转换效率已达到 41.1%（AM1.5D，454 倍太阳常数）。但在结数超过 4 以后，效率增长的趋势变缓。

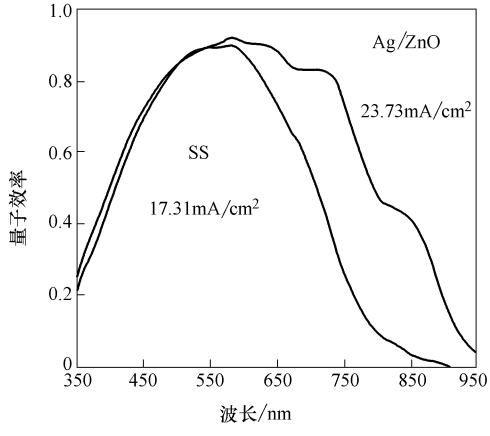


图 4-12　量子效率光谱

太阳辐射光谱的 99% 以上在 0.15～4.0μm。太阳光到达地面的总辐射只有 43% 左右。太阳光在传输至地球的过程中，将受到大气和云层的散射、反射和吸收等多种作用，其中向上的散射约为 40%，大气层吸收 11%，云层吸收约 3%，云层的反射约为 23%，直接辐射到大地的太阳能量粗略计不到 30%，但被散射和反射的太阳辐射将有一部分再返

回到地面，累计达 43% 左右。

太阳电池在向第三代迈进，第一代为晶体硅电池，第二代为薄膜电池，第三代电池正在探索中，根据实验室所研究的领域，可分为三类：

一类是以充分吸收太阳光谱为主的多能带电池，包括多结叠层电池、中间带电池，通过光子能量的上转换和下转换改变入射光子的能量分布，以利于电池对光的充分吸收。

二类是提高每个光子的转换功率，如以提高输出电压为特点的热载流子太阳电池，以及以提高输出电流为目的的碰撞离化电池。

三类是建立在热光电和热光子基础上的光电转换器。本书主要讨论一类的多结叠层电池。

对于单带隙材料，能量低于带隙的光子不能被吸收，不能将电子从价带激发到导带以产生光生载流子，这是造成电池效率不高的主要原因之一。如果在带隙中引入另一个中间带，原来不能被吸收的低能光子就有可能被价带电子吸收而跃迁到这个中间带，然后再吸收另一个低能光子从中间带跃迁到导带，光吸收将会向长波方向扩展，实现多光子吸收，短路电流 J_{sc} 将会显著提高，可获得比多结叠层电池更高的效率，预计可达 50% 以上。当然，用离子注入技术获得高掺杂，使导带分裂出一个子带，形成中间带隙，也会产生大量的晶格缺陷，多为陷阱或复合中心，它们势必会俘获和复合许多光生载流子，因而降低光生电流，这就抵消了由于长波吸收的扩展而带来的短路电流增加的优点。另外，中间带隙的形成将会使开路电压 U_{oc} 降低。这都是不可忽视的重要问题。

第五章　CIGS 薄膜太阳电池

第一节　CIGS 太阳电池的性能

一、CIGS 太阳电池的特点

1）转换效率高，2008 年已达 19.9%，2010 年实验室达到 20.3%。

2）弱光性能好，阴雨天也可发电。

3）化学及电子性能稳定，基本不衰减。

4）抗辐照能力强，适合作太空电源。

5）制造成本远低于晶体硅太阳电池。

CIGS 太阳电池具有柔和、均匀的黑色外观，如图 5-1 所示。CIGS 是 Cu（InGa）Se_2 的简写。

二、CIGS 太阳电池的工作原理

1）CIGS 太阳电池是由多层薄膜组成的，它有 7 层薄膜材料：

① 底电极 Mo 层。

② CIGS 吸收层。

③ CdS 缓冲层（或无镉材料）。

④ i-ZnO 窗口层（本征氧化锌，高电阻）。

⑤ Al-ZnO 窗口层（铝掺杂氧化锌，低电阻）。

⑥ MgF_2 减反射层。

⑦ 顶电极 Ni-Al。

图 5-2 为 CIGS 太阳电池的结构。

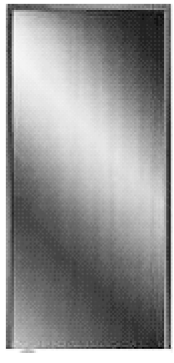


图 5-1　CIGS 太阳电池



图 5-2　CIGS 太阳电池的结构

入射光照射在电池面板玻璃上，进入窗口层和缓冲层，到达吸收层，光生电流主要由吸收层产生。

2）各层的功能如下：

① 底电极 Mo 层具有优良的导电性能，输出太阳电池功率，与玻璃衬底有良好的附着性，同时与 CIGS 吸收层不发生化学变化。

② CIGS 吸收层沉积在钼背电极的上面，厚度约为 2.5μm。

③ CdS 缓冲层厚度为 50nm，在低带隙的 CIGS 吸收层和高带隙的 ZnO 之间形成过渡，减小了两者之间的带隙台阶和晶格失配，调整导带边失调值，改善 pn 结质量；防止射频溅射 ZnO 时对 CIGS 吸收层的损害；Cd、S 元素向 CIGS 吸收层扩散，Cd 元素可以使表面反型，S 元素可以钝化表面缺陷。Cd 会造成环境污染，这是使用 CdS 作缓冲层的缺点。

④ 窗口层在电池的上表层，与上电极一起成为电池功率输出的主要通道。作为异质结 n 型区，ZnO 应有较大的少子寿命和合适的费密能级的位置，而作为表面层则要求 ZnO 具有较高的电导率和光透过率，因此 ZnO 分为高、低阻两层。高阻层要薄，取 50μm，电阻率为 100～400Ω · cm；低阻层要厚，取 300～500μm，电阻率为 $5\times10^{-4}\Omega\cdot cm$。ZnO 是金属氧化物半导体材料，直接带隙，室温时禁带宽度为 3.2eV，波长为 300～700nm 的透过率大于 85%。自然生长的 ZnO 是 n 型，与 CdS 都是六方晶系纤锌矿型结构，两者之间有很好的晶格匹配。

⑤ 太阳电池表面的光反射损失大约在 10%，为减少这部分光损失，ZnO：Al 表面上用蒸发或溅射法沉积一层 MgF_2 减反射膜。MgF_2 具有以下特性：透明；能很好地附着在基体上；有足够的机械强度；不受温度变化影响；不受化学反应影响；折射率为 1.39，ZnO 窗口折射率为 1.9（薄膜折射率应等于基底材料折射率的二次方根，$\sqrt{1.9}=1.378$），合适。

减反射层的基本原理是利用光在减反射膜上、下表面反射所产生的光程差，使得两束反射光干涉相消，从而减弱反射，增加透射。图 5-3 为减反射膜原理。

被第二个界面反射的光在返回第一个界面时，与第一个界面反射的光之间相差 180°，所以前者在一定程度上抵消了后者。

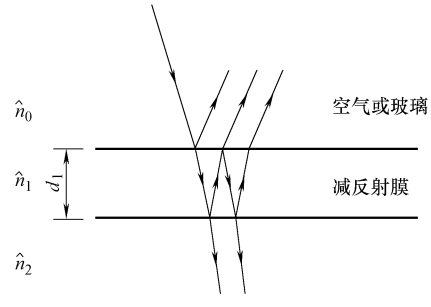


图 5-3　减反射膜原理

在太阳电池材料和入射光谱确定的情况下，减反射的效果取决于减反射膜的折射率和厚度。减反射层折射率应等于基底材料折射率的二次方根，减反射层的最佳厚度是四分之一波长。减反射层的薄膜材料，通常要求有很好的透光性，对光线的吸收越少越好，同时具有良好的耐化学腐蚀性、良好的粘接性及良好的导电性。采用多层减反膜可增加减反射效果，但设计复杂。

⑥顶电极 Ni-Al 的厚度为 1～2μm，Ni 的厚度约为 0.5μm。Ni 可以防止 Al 向 ZnO 扩散，能很好地改善 Al 与 ZnO：Al 的欧姆接触。

3）CIGS 太阳电池之所以效率高、性能好，主要因为有以下几个特点：

① 材料禁带宽度可以在 1.04～1.67eV 范围内连续调整，因此可见光的吸收系数高达 $10^5 cm^{-1}$ 数量级。

② 衬底玻璃为钠钙玻璃，使太阳电池在效率和可靠性上有极大的改进，也导致较大的工艺包容性。20 世纪 80 年代，人们就发现，钠钙玻璃中的钠可以通过 Mo 电极向 CIGS 薄膜扩散，从而使钠钙玻璃为衬底的电池性能优于其他衬底的电池性能，明显使薄膜具有更好的表面和更高的电导。其机理尚不很清楚，一种说法是 Na 量足够大，$CuInSe_2$ 中的 1/8Cu 原子被 Na 取代，从而吸收层带隙增加 0.11eV，即带隙由 1.12eV 变为 1.23eV，带隙增加，太阳电池的开路电压增加。另一种说法是少量 Na 的掺入形成点缺陷，在 CIS 表面催化分解 O_2 成为替代 Se 空位（浅施主），把它们转化为 O_{Se}，O_{Se} 是一种深能级缺陷，这等于增加了 CIGS 层的受主浓度，这对 CIGS 层是很重要的，正是 Na 的这种作用，使 CIGS 薄膜对组分的失配的容忍度大大增加。

③ Ga 元素加入，使吸收层的能隙从 1.04eV 增加到 1.1～1.2eV，同太阳光谱有更好的匹配。

④ CIGS 的 PN 结是由 P 型 CIGS 膜和 N 型 ZnO/CdS 双层膜组成的反型异质结。本征 ZnO 的存在明显提高电池的开路电压。高效 CIGS 薄膜太阳电池的吸收层表面都是贫铜的，因而比其他材料呈现更宽带隙。CdS/ CIGS 结构有合适的能带边失调值（0.2～0.3eV）和很低的晶格失配率。能带边失调值为 0.2～0.3eV，CIGS 太阳电池具有极好的性能，转换效率高。

⑤CIGS 材料属于Ⅰ-Ⅲ-Ⅵ族半导体，其晶体呈四方黄铜矿型结构，具有直接带能，能隙范围宽，E_g 从 $CuInSe_2$ 的 1.04eV 到 $CuGaSe_2$ 的 2.4eV，甚至到 $CuAlS_2$ 的 2.7eV，覆盖了绝大部分可见光谱，这使它们适合于作为薄膜光伏的吸收材料。

第二节　CIGS 太阳电池的制备

首先在玻璃上沉积 Mo 作为底电极，并对 Mo 电极进行激光划线（P_1），将其分割成 5～7mm 宽度的窄条，制作成未来子电池的基础；然后沉积 CIGS、CdS 和 i-ZnO 层后，进行第二次划线（P_2），将 CIGS、CdS 和 i-ZnO 全部划开，保留 Mo 层，此时，多个子电池已经形成；最后沉积 ZnO：Al，作为电池上表面收集层，将各个子电池又连接在一起，再进行第三次划线，将 ZnO：Al、i-ZnO、CdS 划开，将各个子电池分开，形成多个子电池串联而成的薄膜光伏电池。对于玻璃衬底的 CIGS 薄膜光伏组件，划线宽度均为 50μm。图 5-4 为 CIGS 太阳电池的内部连接。

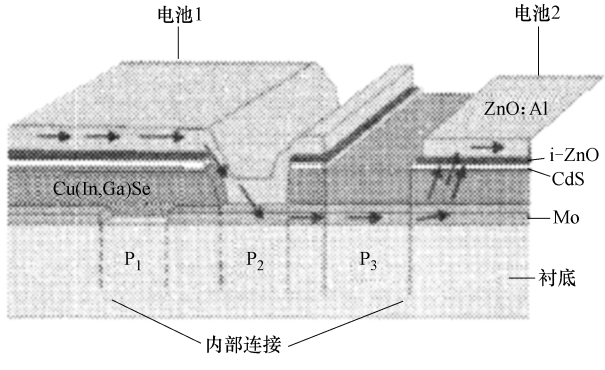


图 5-4　CIGS 太阳电池的内部连接

1. 底电极 Mo 层的制造

底电极 Mo 层采用直流磁控溅射方法制备。为了保证既要与衬底附着力强，又要与 CIGS 吸收层不发生化学变化，采用不同的工艺分两层制备。第一层采用较高的氩气，气压为 10mTorr（1Torr = 133.322Pa），沉积 0.1μm 的 Mo 层，电阻率较高，为 $6 \times 10^{-5}\Omega \cdot cm$，与衬底有较好的附着力；第二层采用较低的氩气，气压为 1mTorr，沉积 0.9μm 的 Mo 层，电阻率较小，为 $1 \times 10^{-5}\Omega \cdot cm$。Mo 层呈柱状结构，利于钠钙玻璃衬底中的 Na 沿晶界向 CIGS 吸收层中扩散，使 CIGS 吸收层质量好。

产能 100MW/年的 CIGS 太阳电池工厂，每年需要 99.95% 的纯钼粉 50 ~ 60t。

2. CIGS 吸收层的制造

采用多元共蒸三步法，即 Cu、In、Ga、Se 四支气体管道同时排列在一台蒸发炉内，工件旋转，保证气体均匀地沉积在工件上。

第一步：在保证玻璃板温度，即衬底温度在 250 ~ 300℃时，放进 In、Ga、Se 气体，控制各元素数量的比例，总量控制在 90%，Se/(In + Ga) 流量比大于 3，形成闪锌矿型结构的预制层，其分子式为 $(In_{0.7}Ga_{0.3})_2Se_3$。

第二步：在保证玻璃板温度，即衬底温度在 550 ~ 580℃时，放进 Cu、Se 气体，直到微富铜时结束。其过程如下：Cu、Se 与预制层反应，逐渐形成贫铜的有序缺陷化合物，这些化合物中存在替位缺陷 In_{Cu} 和 Ga_{Cu} 及空位缺陷 V_{Cu}，继续蒸发 Cu、Se，Cu 向内扩散，薄膜中的 In、Ga 向外扩散，反应后形成新的晶核，增加薄膜的厚度，接近化学计量比后，继续放进 Cu、Se，薄膜变得富铜，当温度高于 523℃时，在薄膜表面和晶界处存在二次相 Cu_xSe 液相。

第三步：蒸发 In、Ga、Se 元素，Cu 向外扩散，与 In、Ga、Se 反应，In、Ga 向内扩散，二次相 Cu_xSe 液相被完全消耗掉，将富铜转化为贫铜，富 In、Ga，实现表面 Ga 的梯度分布。较少载流子的界面复合，可以提高电池的开路电压，满足化学计量比的 CIGS 表面层。该步处理可以在薄膜表面形成有序缺陷层，为缓冲层 Cd 离子的扩散提供空位，方便形成强 n 型的浅埋层，改善异质结界面特性。

值得注意的是，第三步的扩散反应与第二步的扩散反应方向完全相反。图 5-5 为 CIGS 太阳电池的蒸发装置。



图 5-5　CIGS 太阳电池的蒸发装置

美国维易科精密仪器（Veeco Instruments）发布了 CIGS（Cu、In、Ga、Se）型太阳能电池玻璃底板用蒸镀成膜装置，该装置每小时可处理 30 块尺寸为 1.1m × 1.4m 的玻璃底板，使用原子吸收谱、电子碰撞散射谱，监测薄膜成分及蒸发源的蒸发速率。

CIGS 薄膜是多元化合物，其电学性能对原子配比及晶格匹配不当而产生的结构缺陷过

于敏感，制备中需要控制的因素较多，因此工艺重复性低，成品率不高。

3. CdS 缓冲层的制造

用化学水浴法制备（CBD）。配制一定的溶液，将电池半成品放进溶液中，加温到 60～80℃，并加以搅拌，大约 30min 完成。溶液由镉盐、硫脲和氨水按一定比例配制而成，镉盐可以是氯化镉、醋酸镉、碘化镉和硫酸镉，含 Cd^{2+} 的碱性溶液中硫脲分解成 S^{2-} 离子，它们以离子接离子的方式凝结在衬底上。

4. i-ZnO 窗口层（高电阻）的制造

直流磁控溅射法制备，沉积速率高、重复性和均匀性好。i-ZnO 厚度为 0.05μm，电导率为 1～100Ω·cm。磁控溅射参见第八章。

5. Al-ZnO 窗口层（低电阻）的制造

直流磁控溅射法制备，Al-ZnO 厚度为 0.5～1.5μm，电导率为 10^{-4}～10^{-3}Ω·cm。磁控溅射参见第八章。

6. MgF_2 减反射层的制造

① MgF_2 性状：

摩尔质量	62.32g/mol
密度	3.13g/cm^3
堆积密度	0.9～1.2g/cm^3
外观	0.5～1mm 无色透明块状晶体
气味	无味
水中溶解度	不溶于水（20℃）
乙醇中溶解度	不溶于乙醇
熔点	1266℃
沸点	2239℃
折射率	n=1.38（550nm）
衬底温度	250～300℃

② 制造工艺：

氟化镁薄膜的性能取决于沉积方法和沉积工艺。采用热舟蒸发方法，在高真空镀膜系统中沉积，氟化镁纯度标定 99.999%，衬底真空度为 2.7×10^{-3}Pa，工作真空为 4.9×10^{-3}Pa，残余气体为空气。采用的沉积工艺温度试验，依次为 200℃、250℃、300℃、350℃，沉积速度为 0.39nm/s，监控波长为 780nm，薄膜光学厚度为 1/4 波长，采用 Lambda900 光谱测试仪，波长分辨率为 0.08%/nm。为防止空气中的水、氧等对测量结果的影响，测量过程中充入高纯氮气，氮气流量在测量过程中保持在 7～10L/min，光谱曲线测量范围为 190～360nm，延伸到了真空紫外波段。不同沉积温度下薄膜的表面均方根粗糙度由 VeeCo 公司生产的 WYKONT1100 型光学轮廓仪进行测量。

热舟蒸发 MgF_2 薄膜在不同的沉积温度时的紫外光学特性——波长越短，沉积温度对光学损耗的影响越大。因此，要取得优良的 MgF_2 反射性能，尤其要注意沉积温度这一工艺参数的优化。另外，薄膜损伤阈值随沉积温度的升高而降低。

7. 顶电极 Ni-Al 的制造

用真空蒸发法制备。电极厚度为 1～2μm，其中 Ni 厚度为 0.05μm。

8. 覆盖低铁玻璃面板

覆盖低铁玻璃面板时，要使边缘密封，防止湿气的进入，以免影响电池的稳定性。

虽然 CIGS 太阳电池在研究阶段的小面积（0.5cm^2 左右）单元上实现了高达 20.3% 的最大转换效率，但投产后的模块转换效率仅为 11% ~12%。实际上，只要小面积单元能够实现 18% ~19% 以上的转换效率，组件就应该能够实现 15% 以上的转换效率。研究阶段的小面积单元与大面积组件存在差别的主要原因是 CIGS 吸收层的结晶质量不同，因此，制造中尤其要重视大面积高质量 CIGS 吸收层的制造工艺的质量控制。

第三节 CIGS 太阳电池材料的特性

CIGS 材料属于Ⅰ-Ⅲ-Ⅵ族四元化合物半导体，具有黄铜矿型的晶体结构，它有两个特点：

1）多晶固溶体，其禁带宽度可以在 1.04 ~1.67eV 范围内连续调整。

2）是一种直接带隙材料，其可见光的吸收系数高达 $10^5 cm^{-1}$ 数量级。

CIGS 太阳电池的光电性质很大程度上取决于元素成分比、成分的均匀性、晶格结构和晶界的影响。CIGS 材料是多元组成的，元素配比敏感，多元晶体结构复杂，与多层界面匹配困难，使得材料制备的精度、重复性、稳定性要求都较高。但是 CIGS 材料的光电转换理论效率达 25% ~30%，只需 1 ~2μm 厚的薄膜就可以吸收 99% 以上的太阳光。

1. 晶格

1）CIGS 为直接带隙半导体材料，CIGS 材料的结构是以 $CuInSe_2$ 材料结构为基础的。表 5-1 为 $CuInSe_2$ 材料的物理性质（300K）。

表 5-1 $CuInSe_2$ 材料的物理性质（300K）

密度/(g/cm^3)	5.77	熔点/℃	987
晶格常数/Å	$a=5.773, c=11.55$	禁带宽度/eV	1.02
热膨胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	2.9	光学介电常数	15.2
热导率/[W/(cm·K)]	7.1		

注：1Å = 0.1nm。

晶体结构呈黄铜矿型结构，用少量的 Ga 部分替代 $CuInSe_2$ 中的 In 便成了 $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$，通过调整 Ga 的浓度，可以使禁带宽度在 1.02 ~1.68eV 之间变化。当薄膜中 Ga 为零时，禁带宽度为 1.02eV；当薄膜中 Ga 原子含量为 100% 时，即完全取代了 In 原子，材料变为 $CuGaSe_2$，禁带宽度为 1.68eV。禁带宽度随 Ga/(In + Ga) 比值变化，调整到最佳禁带宽度，可以吸收更多的太阳光谱。Ga 的原子半径小于 In，因此 CIGS 晶格常数变小。

2）每个 Cu、In 原子与 Se 有四个键连接，每个 Se 原子与 Cu、In 原子有两个键连接。Cu 和 In 原子的化学性质不同，Ⅰ-Ⅵ（Cu-Se）键长、键强与Ⅲ-Ⅵ（In-Se）键长、键强并不相同，也不严格等于 2，以 Se 原子为中心构成的四面体也不是完全对称的。因此，键强、晶格常数比这两个指标，成为黄铜矿型材料中四方晶格畸变的一个量度。图 5-6 为 CIS 黄铜矿型结构。

2. 相图

相图是多元体系状态随温度、压力及其组分的改变而变化的直观描述。四元化合物 CIGS 热力学反应较为复杂，目前还没发现 CIGS 相图，都是基于与之相关的相图及经过整理后来理解。图 5-7 为 550 ~ 810℃时 Cu_2Se-In_2Se_3-Ga_2Se_3 的相图。

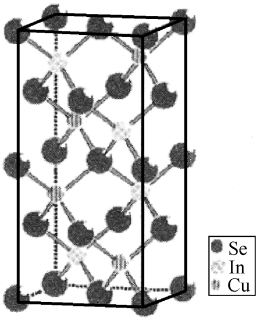


图 5-6　CIS 黄铜矿型结构

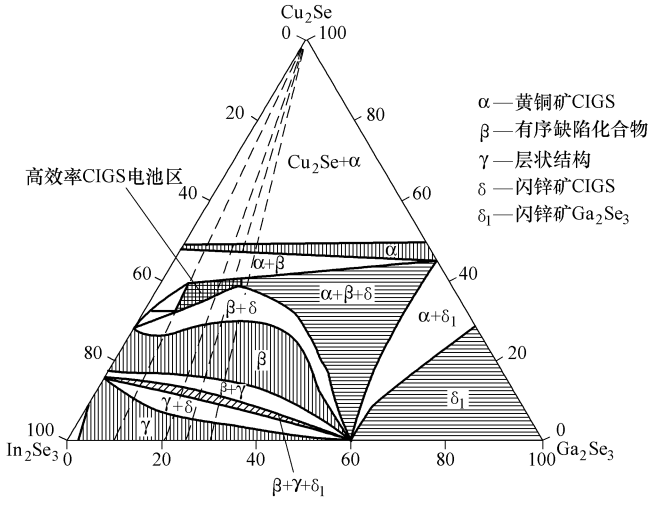


图 5-7　550 ~ 810℃时 Cu_2Se-In_2Se_3-Ga_2Se_3 的相图

温度为 550 ~ 810℃，相图显示四个不同的相，即 α 相（黄铜矿 CIGS）、β 相（有序缺陷化合物）、δ 相（闪锌矿 CIGS）、δ_1 相（闪锌矿 Ga_2Se_3）。闪锌矿 CIGS 相的结构是 Cu 和 In 原子任意排布在阳离子位置，α-CIGS 向 δ-CIGS 的转变称为有序向无序的转变。相图中可看出高效率 CIGS 电池的相域，Cu 质量分数为 22% ~ 24%，Ga 质量分数为 10% ~ 30%，室温下，随着 Ga/In 比例在贫铜薄膜中的增大，单相 α-CIGS 存在的区域宽化，这是因为 Ga 的中性缺陷对（$2V_{cu} + Ga_{Cu}$）比 In 缺陷对（$2V_{cu} + In_{Cu}$）具有更高的形成能。

3. 缺陷

$CuInSe_2$ 为三元化合物半导体材料，要得到精确的化学计量比材料是非常困难的。$CuInSe_2$ 的光学性能、电学性能如何，与材料的组分比、材料组分的均匀性、材料结晶程度、晶格结构等因素密切相关，材料组分偏离化学计量比越小，元素组分越均匀，结晶程度越好，晶体结构越单一，其光学吸收特性就越好，导电特性越明确。材料组分偏离化学计量比较多时，表现出不同的导电特性。$CuInSe_2$ 和 $CuGaSe_2$ 缺陷形成能很低，因此缺陷极易形成。缺陷使其具有以下明显特征：

1）能以自身的缺陷进行自我掺杂。

2）能容忍化学计量比有较大的偏离。

3）缺陷是电中性的。

$CuInSe_2$ 和 $CuGaSe_2$ 缺陷有两种情况，一种是单种金属的富、缺，另一种是复合缺陷，即由两种金属的富、缺带来的缺陷。我们主要专注于高效吸收太阳光谱的贫铜、富铟 CIGS 材料。

第四节　CIGS 太阳电池的物理、光学、电学特性

一、异质结特性

CIGS 太阳电池的 pn 结是由 p 型 CIGS 膜和 n 型 ZnO/CdS 双层膜组成的反型异质结。

1）高效 CIGS 太阳电池的吸收层表面都是贫铜的，它的化学配比与体内不同，类似富 In、Ga 的有序空位化合物（OVC），是 n 型的。

2）它的禁带宽度比 CIS 大 0.26eV，禁带的加宽主要是由于价带下移而导带基本不变。其结构降低了界面复合率。

3）本征 ZnO 的存在能明显提高电池的开路电压。

二、能带图

多元半导体的能带图要用二维或三维能带图才能表达清楚，目前只有一维能带图，因此一些重要细节不能表示出来。图 5-8 为 CIGS 异质结的能带图。能带图关注的是异质结，没有显示 CIGS 与底电极 Mo 层之间的接触。

从图 5-8 中可看出 CIGS 异质结的几个特点，这几个特点均有利于太阳电池性能的提高。

1）CIGS 吸收层的顶部有一个表面缺陷层，厚 10～30nm，它的禁带宽度为 1.3eV。

2）有一 CIGS 同质 pn 结深入到 CIGS 内部，而远离 CdS/CIGS 界面。

3）CIGS 吸收层的价带由 1.3eV 下降到 1.12eV，形成空穴的传输势垒，使界面处空穴浓度减小，降低界面复合。

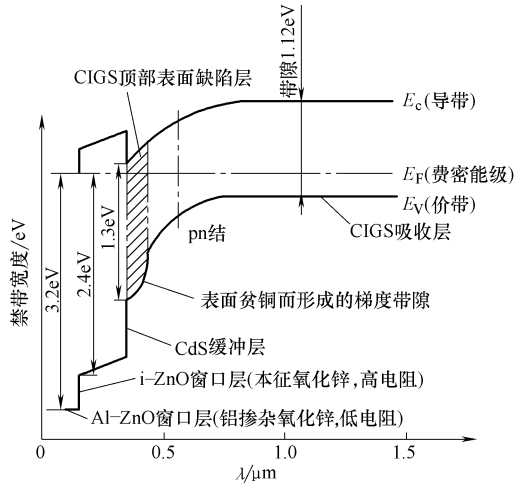


图 5-8　CIGS 异质结的能带图

三、能带边失调值

能带边失调值（Band Offset）是一个很重要的量。当两种不同的半导体形成异质结时，界面处导带和价带都会产生连续或不连续的突变，这种能带边的不连续就称为能带边失调值，用 ΔE_c 表示，用光电子谱来确定。界面处导带和价带这种突变来源于两种材料不同的电子亲和能。CdS/CIGS 的导带边失调值为 0.2～0.3eV，失配率很低。能带边失调值对短路电流密度 J_{sc}、开路电压 U_{oc}、填充因子 FF、转换效率 η 都有影响。建立窗口层/缺陷层/CIGS 结构模型，经过模拟计算得出结果。表 5-2 为能带边失调值 ΔE_c 的影响，此计算结果与实际量产化产品基本相符。

表 5-2　能带边失调值 ΔE_c 的影响

能带边失调值 ΔE_c/eV	-0.7～0.0	0.0～0.4	>0.4
短路电流密度 J_{sc}/(mA/cm^2)	几乎不变。CdS 导带低于 CIGS 导带，形不成势垒，方便光生电子运输	几乎为一常数	骤然下降。CdS 导带高于 CIGS 导带，形成势垒，阻碍光生电子运输

（续）

能带边失调值 ΔE_c/eV	−0.7 ~ 0.0	0.0 ~ 0.4	>0.4
开路电压 U_{oc}/V	随 ΔE_c 绝对值增大而减小	几乎为一常数	几乎为一常数
填充因子 FF	随 ΔE_c 绝对值增大而减小	几乎为一常数	骤然下降
转换效率 η		高	

四、短路电流密度 J_{sc} 损失

短路电流密度 J_{sc} 损失有光学损失、电子损失及其他损失。图 5-9 为 GIGS 太阳电池的短路电流密度损失。

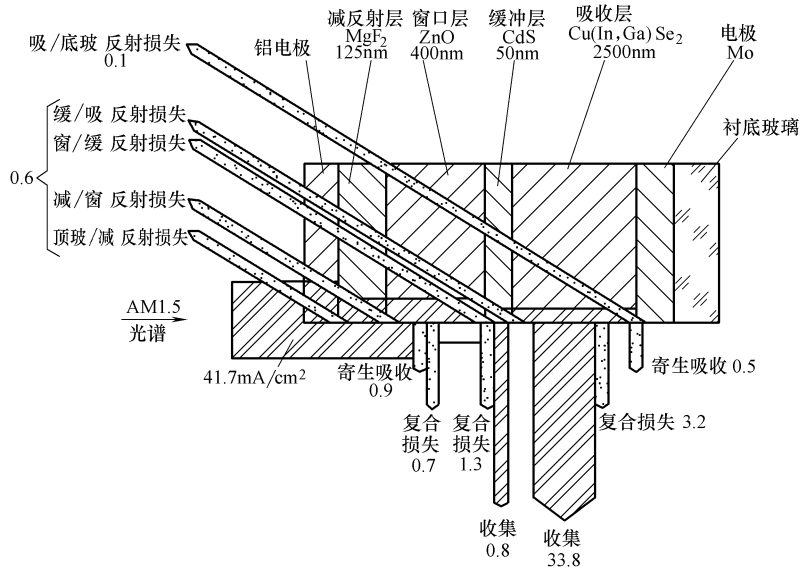


图 5-9　GIGS 太阳电池的短路电流密度损失

（1）光学损失　光学损失包括 5 个反射损失及寄生吸收。5 个反射损失是吸收层/底玻璃反射损失（0.1mA/cm^2）、缓冲层/吸收层反射损失、窗口层/缓冲层反射损失、减反层/窗口层反射损失、顶玻璃和减反射层反射损失，共有 0.7mA/cm^2。寄生吸收发生在高掺杂的窗口层（0.9mA/cm^2）、吸收层与 Mo 电极的交界处（0.5mA/cm^2）。光学损失共计 2.1mA/cm^2。

（2）电子损失　电子损失是发生在窗口层（0.7mA/cm^2）、缓冲层（1.3mA/cm^2）以及吸收层（3.2mA/cm^2）的复合损失，共计 5.2mA/cm^2。

（3）其他损失　其他损失包括栅电极遮挡面积损失、电池间连接宽度损失、窗口层吸收损失、缓冲层吸收损失、吸收层不能完全吸收损失。电池间连接宽度是 300μm 量级，由电池间连接宽度造成 3% ~5% 的电池面积损失；窗口层吸收造成的损失是能量大于禁带宽度的光子被吸收形成电子-空穴对，但是不能收集形成电流，能量小的红外光被电子吸收，产生热能；缓冲层吸收损失是指波长 λ <520nm 的光子产生的电子-空穴对不能收集成电流；吸收层中的光生载流子不能完全收集造成损失。

图 5-9 中测量的损失有偏差，最后测量收集到的电流密度损失为 34.6mA/cm^2。

五、CIGS 太阳电池的电学特性

测量 CIGS 太阳电池光照曲线，很容易得出短路电流密度、开路电压、填充因子和光电转换效率四大输出参数。

1. 弱光特性

举例：室外辐照度在 100mW/cm^2 时，在标准测试条件下，光电转换效率为 14% ~ 15%；辐照度为 5mW/cm^2 时，光电转换效率为 10%；辐照度为 0.1mW/cm^2 时，光电转换效率为 3%。一些研究表明，要提高在低辐照度时的光电转换效率，必须有更大的并联电阻，才会有比较好的电池性能，如铜质量分数为 18%（贫铜）的 CIGS 太阳电池，在辐照度为 0.1mW/cm^2 时，并联电阻高达 142kΩ · cm^2，光电转换效率达 6%。低含铜量、低辐照度时有较大的并联电阻，此时铜的含量偏离了化学计量比，对此 CIGS 太阳电池是宽容的。

2. 温度特性

CIGS 太阳电池的短路电流不随温度变化，开路电压、填充因子、光电转换效率随温度升高而下降。温度的变化影响载流子浓度、迁移率的变化，从而影响各层半导体材料的电阻率、禁带宽度；温度的变化使 CIGS 太阳电池各个界面缺陷态呈现不同的激发态，从而影响器件的性能。210K 以上时，温度下降串联电阻上升，填充因子、光电转换效率增加；210 ~ 100K 时，填充因子、光电转换效率随温度下降而下降。

3. 抗辐照能力

CIGS 太阳电池对高能电子、高能质子的耐受能力，要好于其他地面应用电池，与专门的空间外延 InP 太阳电池相当，因此 CIGS 太阳电池被认为具有非常好的抗高能电子、高能质子辐照的能力。但是，上述情况是指一定条件下的，即在电子能量为 1MeV 时的电子辐照。粒子流密度小于 10^{16}cm^{-2}时，电池参数无任何衰退；粒子流密度在 10^{17}cm^{-2}时，电池效率衰减 10%；粒子流密度在 10^{18}cm^{-2}时，电池效率衰减 21%。这个粒子流密度比硅和砷化镓电池达到同样衰减时的粒子流大一个数量级。

质子流密度对 CIGS 太阳电池影响较大，在相对较低的质子能量和粒子密度辐照下，如质子流密度为 10^{14}cm^{-2}时，电池效率下降得较多。

CIGS 太阳电池的辐照损伤的恢复，和其他电池一样，可以用真空退火的方法得到部分恢复。例如 3MeV 的电子辐照，温度每隔 20K 停留 100s，在稍高于室温下退火，短路电流开始恢复，到 360K 时基本能恢复到辐照前的值；开路电压在 360K 时开始恢复，到 440K 时恢复到最高值 600mV，与初始值 650mV 相比，尚有 50mV 未能恢复。

4. 稳定性

太阳电池性能的衰退是以 pn 结为核心的各层半导体材料的衰减及其界面、外封装引线材料性能的退化。有几家研究单位对 CIGS 太阳电池进行几年户外测试，CIGS 组件的效率没有发现任何衰减，说明 CIGS 太阳电池的性能相当稳定。

第五节　CIGS 太阳电池的类别

一、柔性 CIGS 太阳电池

柔性电池是以金属箔或高分子聚合物做衬底的薄膜太阳电池，可铺设于建筑物曲面或非

平面的表面，可以折叠，方便携带。所有薄膜电池都可以做成柔性的。

1. 柔性电池衬底材料的要求

1）热稳定性好，可以承受制备电池时所需要的温度。

2）要有合适的热膨胀系数，与吸收层材料匹配。

3）化学稳定性好，在 CIGS 沉积时不与 Se 反应，水浴法制备 CdS 时不分解。

4）真空稳定性好，加热时不放气。

5）适合卷对卷工艺。

2. 柔性 CIGS 太阳电池的核心技术

柔性电池的核心技术是均匀而稳定的纳米油墨。制造柔性 CIGS 太阳电池的纳米油墨里含有 CIGS 纳米粒子的聚合物悬浮液，化学成分稳定，4 种半导体原子按比例依次印刷在衬底上。衬底材料采用铝箔，用高速报纸印刷技术的卷对卷工艺，一卷铝箔筒数千米长，在另一台印刷机上沉积 TOC 透明导电膜。柔性 CIGS 太阳电池成本低于其他薄膜电池，其特点是：

1）原材料利用率高。

2）不需要昂贵的气相沉积。

3）电流高于其他薄膜电池。

4）尺寸和形状可以任意裁剪。

5）高的功率质量比。

图 5-10 为柔性 CIGS 太阳电池。

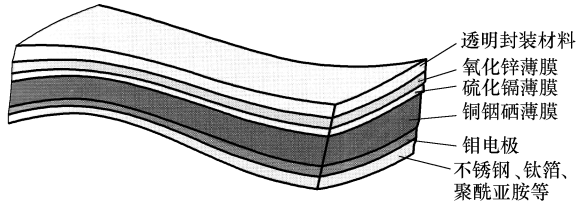


图 5-10　柔性 CIGS 太阳电池

美国、日本、德国的研究机构在 CIGS 太阳电池方面处于领先水平，美国国家可再生能源实验室（NREL）研制的柔性 CIGS 太阳电池的光电转换效率达到 17.5%。

3. 聚酰亚胺衬底

聚酰亚胺（PI）塑料表面平整，具有良好的绝缘性能，在其使用温度下性能稳定，无任何杂质向 CIGS 吸收层扩散，最高承受温度为 450℃；沉积温度低，使 CIGS 薄膜的结晶质量差，晶粒细小，并产生大量晶界，降低了光生载流子的扩散长度，使太阳电池性能变差。瑞士联邦工学院（ETH）以聚酰亚胺为衬底，CIGS 吸收层采用低温三步共蒸发工艺，制造出聚酰亚胺衬底的 CIGS 电池，光电转换效率达 14.1%，功率质量比超过了 1400kW/kg。使用塑料衬底，生产成本低，质轻而且柔软性佳，应用范围较硬性衬底型为广。但是，一旦有湿气自外围侵入，则导致组件质量劣化，使用寿命降低。表 5-3 为几种聚酰亚胺材料的特性。

表 5-3　几种聚酰亚胺材料的特性

材料名称	热膨胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	最高承受温度 T_{max}/℃
Kapton E	17(20～200℃)	<500
Upitex	12～24(20～400℃)	<500
ETH-PI	3	<500

4. 不锈钢衬底

不锈钢衬底的 CIGS 太阳电池的效率比玻璃衬底的 CIGS 太阳电池要低，其原因是不锈

钢表面粗糙度过高，有几百到几千纳米，而玻璃的表面粗糙度低于100nm，可见不锈钢的表面粗糙度是玻璃表面粗糙度的5～20倍，因此对柔性不锈钢衬底要进行抛光处理或覆盖一层绝缘层。另外，不锈钢内部的有害元素Fe在制造温度较高时会扩散到CIGS材料内部，因此要在不锈钢和Mo导电层之间沉积阻挡层，以阻挡Fe原子向CIGS层扩散。采用SiO_x/SiO_x或SiO_x/Al_2O_3双层结构具有很好的阻挡效果，可采用等离子体CVD法、溅射法或溶胶-凝胶法来实现。表5-4为金属材料的特性。

表5-4　金属材料的特性

材料名称	热膨胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	最高承受温度T_{max}/℃	特　　点
不锈钢	10～11	>600	Fe、Cr会扩散，成本低
铝	23～24	600	低成本，低质量，高的热膨胀系数

5. 柔性CIGS太阳电池已量产化的公司

1）美国Nanosolar公司拥有柔性CIGS太阳电池技术，已量产，每瓦发电量所需面积的成本仅0.99美元。Nanosolar公司是一家位于硅谷的风险企业，投资者是美国谷歌的创始人。Nanosolar公司使用金属箔作为底板，使用卷对卷式印刷技术，产品除成本低这一特点外，发电得到的电流值比目前其他的薄膜太阳电池大5倍。

2）美国Ascent Solar Technologies公司具有产能为30MW/年的柔性CIGS太阳电池卷对卷生产线。电池长度为5m，宽度为32cm，质量为2kg，衬底采用聚酰亚胺，开口部能量转换效率达到10.4%，输出功率为123W，产品定位为建材一体化（BIPV）。

3）美国UCLA的研究小组发明的铜铟硒太阳电池溶解技术则不需要经过真空蒸发这个过程，他们将材料溶解在液体中，使其附着到物体表面并进行烘烤，在液态时，太阳电池吸收层可被轻易刷镀到电池片上。溶解技术的优点在于可以不间断地进行卷绕式生产。多数CIGS太阳电池的生产采用共蒸镀技术，需要在真空条件下进行，耗时且成本高。

4）美国IBM以涂布形成CIGS太阳电池，面积为0.45cm^2，转换效率为12.8%，短路电流为28.2mA/cm^2，开路电压为0.63V，填充因子为71.5%。其工艺是将厚度为1400nm左右的CIGS层分10次涂布，每次涂布都经短时间的热处理，第10次涂布时热处理时间稍长，热处理温度为500℃左右。

二、CIGS太阳电池的太空运用

CIGS太阳电池在太空运用时需功率质量比大，抗辐照能力强。CIGS太阳电池对高能电子、高能质子的耐受能力要好于其他地面应用电池。CIGS太阳电池是太空电站的备选电池之一。表5-5为太空用太阳电池参数比较。

表5-5　太空用太阳电池参数比较

电池类别	功率质量比/(W/kg)	功率密度/(W/m^2)
单晶硅	260	230
二结砷化镓	2631(日本Sharp公司，2005年10月，剥离技术)	300
CIGS	1430	210

第六节　CIGS太阳电池的制造成本

2011年CIGS太阳电池国内市场价格为11元/Wp，预期最终国际市场价将低于0.7美元

/Wp。CIGS 太阳电池的投资成本是目前较低的，建一座 5MW/年的 CIGS 太阳电池厂，全部设备投资不足 1 亿元人民币。

第七节　CIGS 太阳电池的发展方向

一、CIGS 太阳电池技术的发展

CdS 缓冲层的 Cd 会造成环境污染，因此要采用其他材料来代替 Cd。缓冲层材料的要求：

1）材料是高阻 n 型或是本征的，以防止 pn 结短路。

2）与吸收层要有良好的晶格匹配，以减少界面缺陷，降低界面复合。

3）需要较高的带隙，使缓冲层能吸收最少的光。

4）缓冲层和工艺层工艺匹配。

ZnS 非常适合作替代材料，其带隙为 3.8eV，可以增强太阳电池短波区的光谱响应，可以用化学水浴法（CBD）来制备。日本青山大学成功地做出了成品，采用锌盐、氨水和硫脲配成的溶液分三次连续沉积，所制备的 CIGS 太阳电池效率达到 18.6%。

二、国内 CIGS 太阳电池的发展前景

目前全球有 30 多家公司置身于 CIGS 产业，如德国的 Wuerth（伍尔特）、Surlfulcell，美国的 Nanosolar 公司、Global Solar Energy、波音（Boeing）公司，日本的 Honda Motor（本田）、Showa Shell 公司等。2006 年、2007 年世界 CIGS 电池组件产能分别为 17.5MW、60.5MW，在世界光伏市场上占据的份额很小，未来几年，CIGS 太阳电池的销售将会加速增长，到 2015 年，CIGS 将占薄膜太阳电池市场的 43.3%。

国内 CIGS 太阳电池厂商主要有：

1）高赛（香港）有限公司及苏州市木渎新区经济技术发展总公司合资设立的苏州高赛太阳能技术有限公司，生产柔性 CIGS 太阳电池，不锈钢衬底，采用的制备工艺为共蒸发/化学浴、溅射硒化/化学浴，平均转化效率为 10.5%。

2）孚日光伏科技有限公司生产出较大面积玻璃衬底 CIGS 组件，采用共蒸发/化学浴工艺，组件结构为钠钙玻璃/Mo/CIGS/CdS/TCO，组件平均转化效率为 9.0%。

3）山东即墨太阳能科技产业园是前期建成投产的国内首条大规模量产 CIGS 太阳电池示范线的升级扩建，建设有年产量达 500MW 的 CIGS 太阳电池生产基地、光伏太阳能装备制造基地及工程研究中心。

4）青岛昌盛日电太阳能科技有限公司在青岛软件园鳌山园区建成投产大尺寸（1.54m^2）CIGS 太阳电池的生产示范线。

5）深圳光伏能源科技有限公司投资 20 亿元，在内蒙古锡林浩特市建设 CIGS 太阳电池生产线（450MW）。

6）上海临港奉贤经济发展有限公司与 nrich Solar 公司在临港奉贤园区投资设立 CIGS 太阳电池研发生产基地。

7）香港耀飞发展（国际）有限公司和广东信宇投资有限公司共同出资设立广州市华茂能源科技有限公司，拥有 CIGS 太阳电池生产专利技术，投资 5 亿美元，落户广州市白云区人和镇。耀飞发展（国际）有限公司有（中国台湾）川飞能源股份有限公司在生产制造技

术、销售渠道和产品研发等全方位的强力支持。

8）扬州经济开发区建有 35MW CIGS 太阳电池生产线，由中国台湾威奈联合科技注资 9000 万美元。中国台湾威奈联合科技是中国台湾第一家 CIGS 太阳电池整厂输出为营运主轴的公司。

三、铟短缺问题的改变

1）我国有 In 1.3 万 t、Ga 10 万 t 的储量，每制备 1MW 的 CIGS 薄膜太阳电池需要 45 ~ 50kg 铟原料，如一半用于制造太阳电池，粗略估算可生产 130GW，按目前的技术水平，开足现有所有工厂产能达到 10GW/年，也要生产 13 年。长期来看，有足够的铟可用。

2）铟主要是锌矿石处理的副产品，目前提炼铟主要受工具设施和工艺经济性的限制，持续上涨的价格已经证明，铟的产能在提高。铟还可以来自其他途径，包括 ITO 碎片的回收和从锌矿以外的其他矿石中提取。随着一些低成本沉积技术的开发，溅射和共蒸的工艺方法将慢慢发生改变，未来将转向铟的盐类物质电镀、铟的纳米粒子、铟硒化合物和铟氧化物墨水的印刷。

3）铟价格不稳定。我国地质铟储量为 1.3 万 t，占世界总储量的 2/3。4N 级精铟（纯度 99.995%）市场价格一度达到 1200 多万元/t，但 2011 年价格为 210 ~ 300 万元/t，市场价格很不稳定。

四、光电转换效率继续提高

1）目前 CIGS 带隙最好效率为 1.12eV，远没到太阳电池的最佳带隙 1.45eV，应在 In/Ga 比例的调整上达到最佳状态。

2）单结 CIGS 太阳电池的光电转换效率为 20.3%，采用叠层电池工艺，顶电池吸收蓝光，底电池吸收红光，效率将由 20.3% 提高到 26% ~ 30%。

第六章　GaAs 薄膜太阳电池

砷化镓（GaAs）属于Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料，其能隙为 1.4eV，处于吸收太阳光较多的最佳值，因此是很理想的电池材料。Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料是继锗和硅材料以后发展起来的半导体材料，种类繁多，其中最主要的是 GaAs 基系Ⅲ-Ⅴ族化合物，其次为磷化铟（InP）和相关化合物组成的 InP 基系Ⅲ-Ⅴ族化合物。这几年，薄膜太阳电池发展很快，采用 3 元和 4 元Ⅲ-Ⅴ族化合物作为各个子电池材料，如 GaInP、AlGaAs、GaInNAs 等材料，从而把 GaAs 和 InP 两个基系结合在一起了。GaAs 太阳电池的大步发展源于德国，1998 年德国费莱堡太阳能系统研究所制得的 GaAs 太阳电池转换效率为 24.2%，该研究所进一步采用堆叠结构制备 GaAs、Gasb 电池，将两个独立的电池堆叠在一起，GaAs 作为上电池，下电池用的是 Gasb，所得到的电池效率达到 31.1%，从此，多结电池占据了薄膜太阳电池的领军位置。2010 年 10 月 6 日，美国 Spire 半导体公司宣布，该公司研发的三结 GaAs 太阳电池峰值效率达到了 42.3%，聚光条件相当于 406 个太阳。制备 GaAs 等Ⅲ-Ⅴ族化合物薄膜电池主要采用 MOCVD（金属有机化学气相外延）技术，在克服了 GaAs 薄膜电池受衬底位错、反应压力、Ⅲ-Ⅴ比率、总流量等诸多参数的影响后，MOCVD 技术得到了长足发展。GaAs 薄膜太阳电池具有抗辐射的特性，热能对它的影响不大，因此轻易地取代了硅太阳电池，在太空运用中成为独秀。2011 年 9 月 27 日我国发射的首个空间实验室“天宫”一号，采用的就是三结 GaAs 太阳电池。

第一节　GaAs 太阳电池的性能

一、GaAs 太阳电池的优缺点

表 6-1 为 GaAs 太阳电池的优缺点

表 6-1　GaAs 太阳电池的优缺点

序号	优　　点	缺　　点
1	具有直接带隙的能带结构,光吸收系数大	材料价格高
2	良好的抗辐照能力	制备技术复杂
3	温差系数较小	材料密度大,GaAs 材料密度为 5.32 g/cm^3,是 Si 材料密度的 2 倍多
4	光电转化效率高	GaAs 材料机械强度较低,易碎

1. 优点

1）GaAs 具有直接带隙的能带结构，其带隙宽度 $E_g = 1.42\text{eV}$（300K），处于太阳电池材料所要求的最佳带隙宽度范围。当光子能量超过其带隙宽度后，光吸收系数剧升到 $10^4/\text{cm}$，仅经过 1μm 左右的厚度，进入的光强便衰减到原值的 1/e 左右，衰减的原因是本征吸收激发光生电子-空穴对而造成的，经过 3μm 左右，进入光的 95% 都被吸收。Si 材料要数十到上百微米厚才能充分吸收进入的太阳光。

2）GaAs 太阳电池具有良好的抗辐照能力。经过 1M eV 电子辐照，光电转换效率仍能保持在原值的 75% 以上，而 Si 太阳电池只能保持在原值的 66%。对于高能质子辐照的情形，两者的差异更为明显。以低轨道商业卫星所用太阳能电池为例，GaAs 太阳电池初期效率为 18%，Si 太阳电池初期效率为 13%，初期效率之比为 1.3。然而，经过低地球轨道的质子辐照，GaAs 太阳电池的终期效率下降为 14.9%，Si 太阳电池的终期效率下降为 10.0%，GaAs 太阳电池的终期效率是 Si 电池的 1.5 倍。

3）温差系数较小。GaAs 太阳电池的温度系数约为 $-0.23\%\,℃^{-1}$，而 Si 太阳电池的温度系数约为 $-0.48\%\,℃^{-1}$。200℃时，GaAs 太阳电池的效率下降约 50%，Si 太阳电池的效率下降约 75%。因为 GaAs 的带隙较宽，要在较高的温度下才会产生明显的载流子本征激发，使暗电流随温度的提高增长较慢，从而使开路电压减小较慢，最终使效率降低较慢。

4）光电转化效率高。GaAs 组成的叠层电池效率是所有太阳电池中效率最高的，超过 30%。

由于 GaAs 基系太阳电池有上述优点，其在空间领域已取代了 Si 太阳电池。随着成本的降低，其地面应用已成现实。

2. 缺点

1）材料价格高。GaAs 材料的价格是 Si 的 10 倍左右，目前采用聚光的措施降低成本，但效果并不很好，因为增加了聚光系统成本。这方面待辟新路。

2）制备技术复杂。目前已将液相外延技术（LPE）、分子束外延技术（MBE）改进为金属有机化学气相外延技术（MOCVD），质量、产量都得到很大的提高。

3）材料密度大。GaAs 材料密度为 5.32g/cm^3，是 Si 材料密度的 2 倍多，但是采用 MOCVD 技术后，电池厚度只有几微米。

4）GaAs 材料的机械强度较低，易碎，目前采用锗（Ge）衬底可加以克服。

二、GaAs 太阳电池的工作原理

1）GaAs 是直接带隙材料，对短波光子的吸收系数高达 $10^4/\text{cm}$ 以上，高能量光子基本上被数百埃厚的表面层吸收，在表面层附近产生了大量的光生载流子。但是，许多光生载流子被表面复合中心复合掉了，不能被收集成为太阳电池的电流。因此，在 GaAs 表面生长一薄层 $Al_xGa_{1-x}As$ 窗口层，当大部分光透过 $Al_{0.8}Ga_{1-0.8}As$ 层进入 GaAs 层中时，由于 $Al_xGa_{1-x}As$/GaAs 界面晶格失配小，故界面态的密度低，对光生载流子的复合较少，而且 $Al_xGa_{1-x}As$ 与 GaAs 的能带带价主要发生在导带边，即 $\Delta E_c >> \Delta E_v$，如果 $Al_xGa_{1-x}As$ 为 p 型层，那么 ΔE_c 可以构成少子（电子）的扩散势垒，从而减小了光生电子的反向扩散，降低了表面复合；同时，ΔE_v 不高，基本上不会妨碍光生空穴向 p 边的输运和收集。ΔE_c 称为导带的带价（Offset），ΔE_v 称为价带的带价。带价是影响异质结性能极为重要的参量。

采用 $Al_xGa_{1-x}As$/GaAs 异质界面结构，使 GaAs 电池的效率超过 20%。

2）用 MOCVD 在锗（Ge）衬底上生长 GaAs 外延层，采用两步生长法，首先在 600 ~ 630℃下用慢速（0.2μm/h）在 Ge 衬底上生长 GaAs 薄层（1000Å），然后在 680℃或 730℃下快速（4μm/h）生长较厚（3.2μm）的 GaAs 基区，把具有不同带隙的材料作成多个子电池，按 E_g 大小从宽到窄的顺序摞叠串联，组成一个串接式多结太阳电池。其中，第 i 个子电池只吸收和转换太阳光谱中与其带隙宽度 E_{gi} 相匹配的光子，叠层电池对太阳光谱的吸收和转换等于各个子电池吸收和转换的总和。

3）三结叠层电池的工作原理：选取三种半导体材料，它们的带隙分别为 E_{g1}、E_{g2} 和 E_{g3}，$E_{g1} > E_{g2} > E_{g3}$，按顺序以串联的方式将这三种材料连续制备出 3 个电池，将其摞叠，带隙 E_{g1} 子电池在最上面（称为顶电池），带隙 E_{g2} 子电池在中间（称为中电池），带隙 E_{g3} 子电池在最下面（称为底电池）。顶电池吸收和转换太阳光谱中光子能量 $hv \geqslant E_{g1}$ 部分的光子，中电池吸收和转换太阳光谱中 $E_{g1} \geqslant hv \geqslant E_{g2}$ 部分的光子，底电池吸收和转换太阳光谱中 $E_{g2} \geqslant hv \geqslant E_{g3}$ 部分的光子，太阳光谱被分为三段，分别被 3 个子电池吸收和转换成电能。

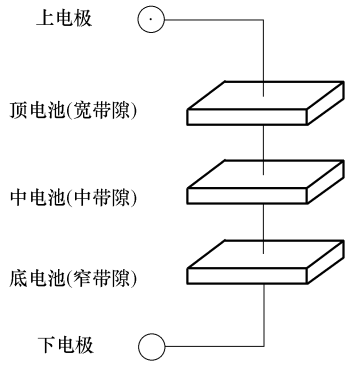


图 6-1　三结叠层电池

叠层电池的输出采用两端输出，即只有上电极和下电极，与单结电池的输出方式相同。图 6-1 为三结叠层电池。

4）电池的连接要求子电池极性相同，即都是 pn 结构或者是 np 结构。要求各个子电池的短路电流要尽可能接近，这样整个叠层电池才能获得最大的短路电流，否则短路电流将受子电池中最小的短路电流限制，影响整个叠层电池的效率。

第二节　单结、双结、三结 GaAs 太阳电池

一、单结 GaAs 太阳电池

在 N 型 GaAs 衬底上，首先生长 0.5μm 左右的 N 型 GaAs 缓冲层，再生长 N 型 AlGaAs 作为背场，在此基础上生长 N 型 GaAs 作为基底层，然后生长 0.5μm 左右的 P 型 GaAs 作为发射层，再利用一层 P 型的 $Al_xGa_{1-x}As$ 薄膜作为窗口层，便组成了单结 GaAs 太阳电池。GaAs 与 AlGaAs 有很好的晶格匹配，$Al_xGa_{1-x}As$ 对阳光几乎是透明的。图 6-2 为单结 GaAs 太阳电池。

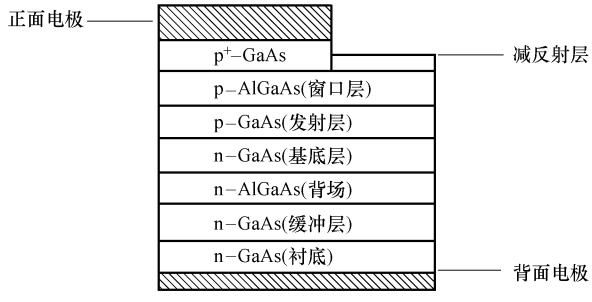


图 6-2　单结 GaAs 太阳电池

实际工艺中，由于锗（Ge）单晶的机械强度比 GaAs 高，而且成本低，因此常用 Ge 单晶来代替 GaAs 单晶作为衬底。图 6-3 为单结 Ge 衬底 GaAs 太阳电池。最初的单结 GaAs 太阳电池是用液相外延（LPE）技术制造的，国内研制效率达 19.34%（4.4cm^2，AM0，28℃）。

在发射极与基区之间插入一层未掺杂的 GaAs 间隔层（过渡层），可以阻止 p^+ 区与在 n 区晶粒间界上形成的 n^+ 子区之间载流子的隧道穿透，减小暗电流，改善电池性能。

二、双结 GaAs 太阳电池

由于单结 GaAs 太阳电池只能吸收特定波长的太阳光谱，而且同质 GaAs 界面的表面复合率也较大，因此将两种以上的不同禁带宽度的薄膜材料叠加在一起，形成双结异质结太阳电池，可吸收更多波长的太阳光谱。双结 GaAs 太阳电池有两种：

（1）AlGaAs/GaAs（Ge）太阳电池　$Al_{0.37}Ga_{0.63}As$ 薄膜的禁带宽度为 1.93eV，与 GaAs

的吸收光谱相匹配，在 AM0 时，AlGaAs/GaAs 薄膜太阳电池的光电转换效率达到 23%。

（2）GaInP/GaAs 太阳电池　$Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 薄膜的禁带宽度为 1.85eV，与 GaAs 的吸收光谱相匹配，复合速率比前一种低。其结构如图 6-4 所示。

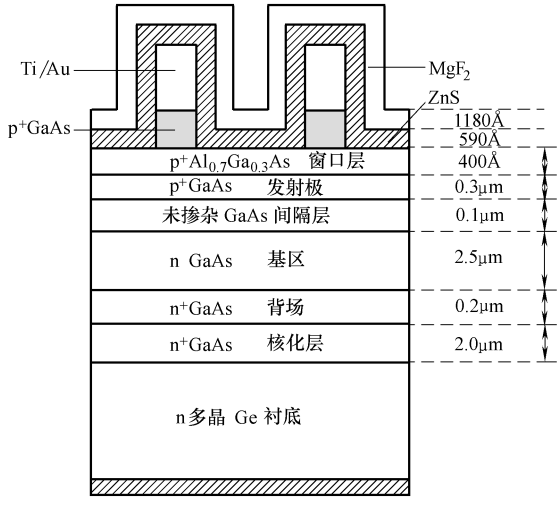


图 6-3　单结 Ge 衬底 GaAs 太阳电池

双结 GaAs 太阳电池采用隧道结将底电池与顶电池连接起来。隧道结的特性与掺杂浓度有关，理论上掺杂浓度越高，隧道结的特性就越好，电导率就越高。但是在高掺杂下，掺杂剂扩散问题就比较突出，因此要根据太阳电池最大输出电流，选择合适的掺杂浓度，能够在满足应用条件的基础上，尽可能选择比较低的掺杂浓度，减小掺杂剂扩散问题。采用 GaAs 作隧道结是可以的，但隧穿电流比较小，双结电池在 1AM0 光照下的输出电流可达 18mA/cm^2 左右，隧道结必须要有 $3\times10^{19}\,cm^{-3}$ 以上的掺杂浓度。如采用 $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ 材料，掺杂 $1\times10^{19}\,cm^{-3}$ 浓度就能满足要求，比采用 GaAs 性能好得多。图 6-5 为隧道结改进双结 GaInP/GaAs 太阳电池。

栅电极	重掺Si层		
0.5μm	GaAs	n–6×10^{18}cm^{-3}[Se]	接触层
0.025μm	AlInP	n–4×10^{17}cm^{-3}[Si]	顶电池
0.1μm	GaInP	n–2×10^{18}cm^{-3}[Se]	
0.6μm(AM1.5) OR 0.5μm(AM0)	GaInP (E_g–1.86eV)	p–1.5×10^{17}cm^{-3}[Zn]	
0.05μm	GaInP (E_g–1.88eV)	p–3×10^{18}cm^{-3}[Zn]	
0.011μm	GaAs	n–8×10^{19}cm^{-3}[C]	隧道结
0.011μm	GaAs	n–1×10^{19}cm^{-3}[Se]	
0.1μm	GaInP	n–1×10^{18}cm^{-3}[Sn]	底电池
0.1μm	GaAs	n–1×10^{18}cm^{-3}[Se]	
3.5μm	GaAs	p–8×10^{16}cm^{-3}[Zn]	
0.07μm	GaInP	p–3×10^{17}cm^{-3}[Zn]	
0.2μm	GaAs	p–3×10^{17}cm^{-3}[Zn]	
衬底	GaAs	Zn–掺杂	

图 6-4　双结 GaInP/GaAs 太阳电池

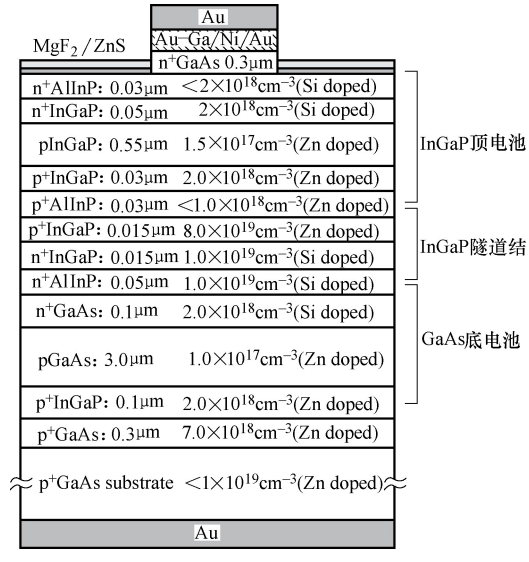


图 6-5　隧道结改进双结 GaInP/GaAs 太阳电池

采用 $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ 材料作隧道结，对下电池起窗口作用，对上电池起背场作用，提高了开路电压和短路电流，在 AM1.5G 下效率达 30.28%。

三、三结 GaAs 太阳电池

三结电池的顶电池、中电池和底电池分别吸收太阳光谱的短波、中波和长波。GaInP/

GaAs/GaInAs 太阳电池的带隙宽度分别为 1.9eV 、1.4eV 和 1.0eV，近似于理想值，但 GaAs 与 GaInAs 有晶格失配问题。为解决这一问题采用了 GaInP 组分渐变缓冲层结构。在 AM1.5、10 个太阳聚光下，光电转换效率达 37.9%。图 6-6 为三结 GaInP/GaAs/GaInAs 太阳电池。图 6-7 为三结 GaInP/GaAs/GaInAs 太阳电池的 *I-U* 曲线。

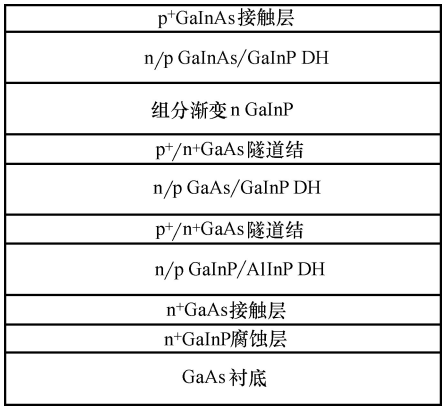


图 6-6　三结 GaInP/GaAs/GaInAs 太阳电池

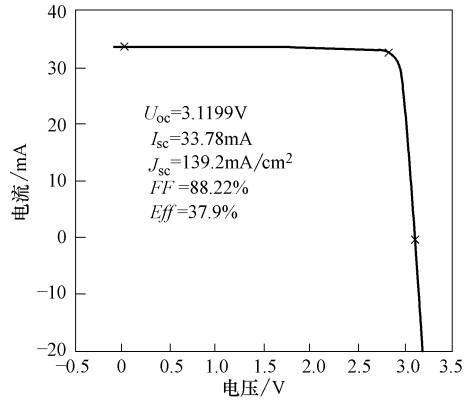


图 6-7　三结 GaInP/GaAs/GaInAs 太阳电池的 *I-U* 曲线

第三节　GaAs 太阳电池的制备

GaAs 太阳电池的制备借助于发光二极管（LED）的制备技术，采用金属有机化学气相外延技术制备。金属有机化学气相外延（Metal-organic Chemical Vapor Deposition，MOCVD）是一种制备化合物半导体薄层单晶材料的方法，MOCVD 设备将Ⅱ族或Ⅲ族金属有机化合物与Ⅵ族或Ⅴ族元素的氢化物相混合后通入反应腔，混合气体流经加热的衬底表面时，在衬底表面发生热分解反应，并外延生长成各种Ⅲ-Ⅴ族、Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体以及它们的多元固溶体的薄膜层单晶材料。

MOCVD 是由美国洛克威尔公司的 H. M. Manasevit 等在 1968 年首先提出的一种制备化合物半导体薄层单晶膜的方法，是在气相外延生长（VPE）的基础上发展起来的一种新型气相外延生长技术。MOCVD 参照了卤化物、氢化物气相外延技术的研究成果，将外延生长控制在质量输运条件下来进行，控制气流为层流，保持稳定的边界层。MOCVD 已有多年的应用历史，其性能已经得到不断改进和完善。MOCVD 运用流体力学的原理实现生长过程中的基片旋转，采用高流速、减压、改进反应室和基座的结构等技术措施，大大提高了生长的均匀性。MOCVD 在 20 世纪 90 年代初得到突飞猛进的发展，有几种典型结构：

（1）高效、高均匀性、低压脉冲 MOCVD 反应器　在常规 MOCVD 设备上配置快速电磁阀门和真空泵。该反应器的特点是将源气体周期性地引入反应室。当气体进入反应室后，反应室的压强会突然增大，出现一个尖峰，这是一种温度平衡现象。每一周期的过程是，首先对气体混合室抽真空，打开开关，通入源气体砷烷（AsH_3）、三甲基镓（TMG）等混合气体，经过反应后排出废气，生长周期结束。在每一周期中，化学组分能任意选取，生长厚度从 1 至 30 原子层（一个原子层厚约 0.2nm）任意调整。由于在生长过程中源气体分子只通过扩散到达衬底表面，并不相对衬底流动，所以克服了传统连续反应器中产生的气体“耗

尽效应”。这种反应器的优点是，提高了外延层组分和厚度的均匀性；高效率地使用源气体；能生长原子级突变界面外延层；整个过程可用计算机控制，实现批量生产。

（2）多功能、大尺寸的 MOCVD 反应器　可制作大面积、大批量、化学组分和厚度极均匀的高纯外延层。该反应器的特点是利用氢气流将主衬底支持器和 7 个子衬底支持器悬浮和转动，使衬底支持器上的 7 片 2in（1in = 25.4mm）基片做旋转运动，避免了衬底和外延系统之间的任何物理接触。该反应器忽略边缘效应，2in GaAs 的外延层厚度和掺杂均匀性 $< \pm 1\%$，实现了高二维电子气迁移率的均匀外延生长，1.5K 下可获得 720000cm^2/（V · s）的大规模迁移率。

MOCVD 与分子束外延（MBE）相比，不仅具有 MBE 所能进行的超薄层、陡界面外延生长的能力，而且还具有设备简单、操作方便、便于大规模生产等特点，因而比 MBE 具有更大的实用价值。

一、MOCVD 的优点

1）适用范围广泛，几乎可以生长所有化合物及合金半导体，所有原材料都以气态输入反应腔。

2）适合于生长各种异质结构材料。

3）可以生长超薄外延层，并能获得很陡的界面过渡。

4）生长易于控制。晶体的生长速率决定于源的供给量，源的供给量可精确控制，因此可以在较大范围内调整外延生长速度。

5）可以生长纯度很高的材料。

6）晶体生长以热分解方式进行。MOCVD 是单温区外延生长，外延层大面积均匀性良好，因此重复性好，便于批量生产及计算机全自动控制。

7）采用低压生长，可以减小外延生长过程的存储效应和过渡效应。

二、MOCVD 的工作原理

1）在低压（0.1bar，1bar = 10^5Pa）或常压反应室内，用携带气体 H_2 带入金属有机化合物原材料及掺杂剂，如三钾基镓（TMGa）、三钾基铝（TMAl）、三钾基铟（TMIn）和氢化物（砷烷 AsH_3、磷烷 PH_3）等，使该混合气体进入到冷壁石英反应器中，在一定温度条件下发生化学反应，反应为一非平衡状态下成长机制，生成 GaAs、GaInP、AinP 等Ⅲ-Ⅴ族化合物，沉积到加热的 GaAs 或 Ge 衬底表面，生长成所需的单晶外延层。N 型掺杂剂多为 Sn、Te、Si 等Ⅳ族或Ⅵ族元素，P 型掺杂剂多为 Zn、Mg 等Ⅱ族元素。

2）MOCVD 生长温度低、碳沾污少、纯度高、浓度分布陡峭，便于超薄生长。外延片表面光亮，各层的厚度均匀，浓度可控，因而产品光电转换效率高，成品率高。用 MOCVD 技术容易实现异质外延生长，可生长出各种复杂的太阳电池结构，因而有潜力获得更高的太阳电池转换效率。在同一次 MOCVD 生长过程中，只需通过气源的变换，便可以生长出不同成分的多层复杂结构，增大了电池设计的灵活性，并可一炉多片。

3）MOCVD 技术的设备和气源材料价格昂贵，技术复杂。使用的各种气源，包括各种金属有机化合物以及氢化物（砷烷 AsH_3、磷烷 PH_3 等）都是剧毒气体，因而 MOCVD 具有一定的危险性。MOCVD 生长系统要求有严格的气密性，以防止这些剧毒气体泄漏，同时避免系统被漏进的氧和水汽等污染。

4）MOCVD 的生长参数包括气体压力、气体流速、Ⅴ/Ⅲ气体比率、生长温度以及 GaAs

或 Ge 衬底的晶体取向等。成长速率和性质成分、晶相会受到温度、压力、反应物种类、反应物浓度、反应时间、衬底种类、表面性质等因素的影响。温度、压力、反应物种类、反应物浓度等重要的制程参数需经由热力学分析计算，再经修正即可得知。反应气体在衬底表面的扩散传输、化学反应、衬底的吸附、固态生成物成核与成长、气态生成物的脱附等微观的动力学过程对制备亦有不可忽视的影响，其中速率最慢者即为反应速率控制要点，也是决定沉积膜组织形态与各种性质的关键所在。

三、MOCVD 设备的组成

MOCVD 设备可分为五个主要部分：反应室、气体分配系统、计算机控制系统、尾气处理系统、报警系统。

（1）反应室　反应室有水平式、圆盘式等形式。反应室是源材料在衬底上进行外延生长的地方，它对外延层厚度、组分的均匀性、异质结果、梯度、基底杂质浓度以及外延膜产量有极大的影响。一般对反应室的要求是：

1）不能形成气体湍流，应是层流状态。

2）基座本身不能有温度梯度。

3）尽可能减少残留效应。

通常反应室由石英玻璃制成，近年也有部分或全部由不锈钢制成。为了生长出优质外延片，各生产厂家和研究工作者在反应室结构的设计上下了很多功夫。水平式反应室和 4.9 ~ 7.4cm 立式反应室通常可容纳 1 ~ 2 片直径为 4.9 ~ 7.4cm 的衬底，适于研究工作用；桶式反应室、高速旋转盘式反应室（转速为 700 ~ 1 500r/min）和扁平式气垫行星旋转式反应室适用于多片批量生产，容量可达每次生长 20 片 7.4cm 直径的衬底或更多；行星式旋转的扁平式反应室和高速旋转盘式反应室一次生长 7 片直径为 4.9cm 的外延片，控制精确度较高，在生长 $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ 时片内和片间厚度、掺杂浓度变化仅为 ±1%，在生长 $Ga_{1-x}In_xAs/InP$ 时片内三元固溶体中 In 含量（x 值）变化仅为 0.05%。

MOCVD 反应系统还需符合下列条件：

1）提供洁净环境。

2）反应物抵达衬底之前已充分混合，确保膜厚、成分均匀。

3）反应物提供系统切换迅速，能长出上下层接口分明的多层结构。

4）加热系统采用高频感应加热、灯辐射加热等。

（2）气体分配系统　气体分配系统的功能是向反应室输送各种反应气源，并精确控制其浓度、生长时间、顺序以及流经反应室的总气体流量，生长出所需成分与结构的外延层。固态或液态原料需使用蒸发器，使进料蒸发或升华，再以 H_2、Ar 等惰性气体作为载体带入反应室中。气体分配系统由金属有机化合物（MO）供应系统、氢化物供应系统和特殊设计的“生长-排空阀门组”等组成。生长-排空阀门组的基本单元是三通阀门，所有需精确控制剂量的反应气源都先进入多路阀门组，从这里再选择是进入生长管线还是排空管线。生长-排空多路阀门在几何结构上可以是直线形或排列成辐射形状，当要避免某些多路反应气源间严重的预反应时，可以采用双重多路阀门结构，将反应气源分成两组送入反应室，控制化学反应的温度与压力。在反应室内，反应气源吸收系统供给的能量，突破反应活化能的障碍开始进行反应。

送入反应室的气态源的摩尔流量，直接由高精度电子质量流量控制器来控制。

依照操作压力不同，MOCVD 制程可分为常压 MOCVD、低压 MOCVD、超低压 MOCVD。依能量来源区分为热墙式和冷墙式。热墙式由反应室外围直接加热，以高温为能量来源；冷墙式有等离子辅助 MOCVD、电子回旋共振等。

（3）计算机控制系统　计算机控制系统控制气体流量、衬底温度、反应室压力、生长时间和气路中的各种阀门等。利用计算机控制系统可以使 MOCVD 装置按事先设计的程序运行。控制系统中还包括安全速锁装置，以防止误操作可能产生的严重后果，并在事故发生时自动使系统进入保护状态，以减轻事故的危害，保护操作人员人身安全。计算机控制系统提高了生长的重现性，增加了软件安全功能及处理和分析事故的能力。先进的系统还可提供数据分析、统计气源的消耗等功能，配以装、卸片机械手，实现 MOCVD 的全自动生长。

（4）尾气处理系统　尾气处理系统的功能是在尾气排放前去除有毒、自燃的未反应源和反应副产品。MOCVD 使用的 MO 源大多数是易自燃及有毒的，许多氢化物有剧毒，很多副产物也有毒性或易自燃，因此在反应室排出的尾气中含有大量有毒和危险物质（气体和粉尘）。不论是常压还是低压 MOCVD 装置，尾气在向大气排放前都要经过处理，用高效过滤器过滤掉粉尘，并使有毒物质浓度达到国家规定排放标准以下。常用的去掉有毒气体的方法有利用物理吸附作用的活性炭过滤器、利用化学反应吸收毒气的干式或湿式过滤器，以及通过热分解或燃烧使毒气转化为粉尘再过滤的方法，以上方法也可组合起来使用。尾气处理系统还有的以淋洗塔作为酸性、碱性、毒性气体收集装置，与集尘装置和排气淡化装置组合起来使用。尾气处理系统通常配备危险气体探测器，用于监测尾气及工作室内的有害气体含量，并把监测器与控制系统相连，成为安全联锁装置的重要组成部分。

（5）报警系统　报警系统在气体流量、衬底温度、反应室压力、气路中的各种阀门出现异常时报警，并控制系统中的安全联锁装置。安全联锁装置可以防止人工控制时的误操作，并在事故发生时自动使整个装置进入保护状态。

四、MOCVD 技术的难点

1）生长速率。MOCVD 的生长过程由三甲基镓（TMG）扩散到衬底来控制，而不是表面动力学反应。在富砷条件下，其生长速率只取决于 TMG 压力，而与砷气压无关；而且在生长温度（500～800℃）范围内，基本与生长温度无关。因此，要实现生长速率的重复性，只需要严格地控制 TMG 的流量，这一点十分重要，也非常关键。

2）生长温度和 As/Ga 比。这两个因素将影响材料的衬底杂质浓度。若生长温度降低，则外延层的载流子浓度也随之下降；提高 As/Ga 比，则有可能引起材料的导电类型从 P 型转向 N 型。

3）N 型、P 型外延层用的掺杂源的控制。N 型掺杂剂为（SiH_4）H_2Se，P 型掺杂剂为二乙基锌（DEZn）或 CCl_4。

4）金属有机物和 AsH_3 的纯度。反应物质的纯度将严重地限制衬底杂质浓度进一步降低（一般达到 $10^{15}cm^{-3}$）。由远红外光电导和光致发光研究表明，主要残留杂质是 Si、Ge、C 和 Zn。

5）目前原料的利用率较低，毒性较大，因此增加了外延层的制造成本。

6）气体特征。InGaAs（P）的生长需要精确控制组分，以达到与衬底 InP 晶格匹配的目的。GaAs/GaAlAs 系是自匹配体系，可以通过精确控制各种源和掺杂剂气体流量来控制外延层的组分、掺杂浓度和厚度等。GaAlAs 系生长所用的砷烷（AsH_3）和 Ga、Al 的有机金

属源具有适合大面积均匀生长的热分解特性，而 In、P 系生长所用的磷烷（PH_3）和三甲基铟（TMI）或三乙基铟（TEI）具有对大面积生长不利的热分解特性。InGaAs(P)/InP 系异质结的生长，不仅要切换Ⅲ族元素，而且还要切换Ⅴ族元素。

多结叠层电池的结构复杂，各子结材料之间要求晶格常数匹配和热膨胀系数匹配，因而对各个子电池材料的选择和连接各个子电池的隧道结材料的选择都十分严格；MOCVD 外延生长工艺也十分复杂，造成Ⅲ-Ⅴ族多结叠层电池的成本较高，限制了它的应用范围。为此，人们已开始第三代太阳电池的研制，包括量子阱、量子点太阳电池、热载流子太阳电池、中间带及多带隙太阳电池、碰撞电离太阳电池等，在非聚光条件下，单结太阳电池（黑体温度为 6000K，电池温度为 300K）的光电转换极限效率理论上为 31%。

第七章　CdTe 薄膜太阳电池

碲化镉薄膜太阳电池（简称 CdTe 太阳电池）是一种以 P 型 CdTe 和 N 型 Cd 的异质结为基础的薄膜太阳电池。CdTe 是Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体，是直接能隙半导体，带隙为 1.45eV，其能隙宽度与太阳光谱有很好的匹配，能隙较宽，可吸收 95% 以上的阳光，理论效率达 28%，性能很稳定，具有很好的抗辐射性能，在较高的环境温度下也能正常工作，强弱光均可发电，温度越高，表现越好。CdTe 是一种良好的 PV 材料。CdTe 太阳电池是技术上发展较快的一种薄膜电池，一直被光伏界看重。CdTe 太阳电池由多晶的薄膜所构成，制备工艺相对简单，容易沉积成大面积的薄膜，沉积速率也高。CdTe 太阳电池通常以 CdS/CdTe 异质结为基础，尽管 CdS 和 CdTe 的晶格常数相差 10%，但它们组成的异质结电学性能优良，制成的太阳电池的填充因子高达 0.75。CdTe 太阳电池的制造采用电子工业通用工艺，能耗低，生产成本低于晶体硅和其他材料的太阳电池，生命周期结束后，可回收。CdTe 太阳电池在全球市场占有率上已经开始向传统晶体硅太阳电池发起了挑战。CdTe 太阳电池的领军企业是美国 First Solar 公司，一度成为全球市值最高的太阳电池企业。

第一个 CdTe 太阳电池是由 RCA 实验室在 CdTe 单晶上镀上 In 的合金制得的，其光电转换效率为 2.1%。1982 年，Kodak 实验室用化学沉积法在 P 型的 CdTe 上制备一层超薄的 CdS，制备了效率超过 10% 的异质结 p-CdTe/n-CdS 薄膜太阳电池，这是现阶段 CdTe 太阳电池的原型。20 世纪 90 年代初，CdTe 太阳电池实现了量产化，但市场发展缓慢，市场份额一直徘徊在 1% 左右。目前 CdTe 薄膜太阳电池在实验室中获得的最高光电转换效率已达到 17.3%，其商用模块的转换效率也达到了 10% 左右。图 7-1 为 CdTe 太阳电池。CdTe 太阳电池应用前景广阔，尤其适合于高原及荒漠电站、外太空及深空间电源，以及用作聚光电池。

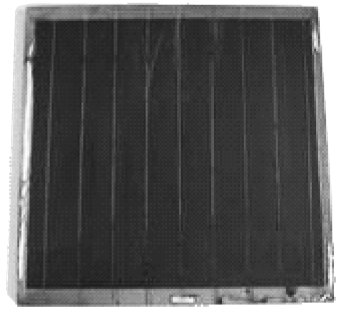


图 7-1　CdTe 太阳电池

第一节　CdTe 太阳电池的性能

一、CdTe 太阳电池的优缺点

1. 优点

1）理想的禁带宽度。CdTe 的禁带宽度一般为 1.45eV，CdTe 的光谱响应和太阳光谱非常匹配。

2）高光子吸收率。CdTe 的吸收系数在可见光范围达 $10^4 cm^{-1}$ 以上，95% 的光子可在 1μm 厚的吸收层内被吸收。

3）转换效率高。CdTe 薄膜太阳电池的理论光电转换效率为 28%。

4）电池性能稳定。由于 CdTe 具有很强的离子性（72%），其 Cd 和 Te 的结合能高达 5.75eV，比太阳所有的光谱都高，其键不会破坏。结合能较大使其具有很好的化学稳定性和热稳定性，降低了性能衰减和 Cd 释放的风险，一般 CdTe 太阳电池的设计使用时间为 20 年。

5）电池结构简单，制造成本低，容易实现规模化生产。

2. 缺点

Cd 是有害元素。

二、CdTe 太阳电池的结构

CdTe 太阳电池是在玻璃或其他柔性衬底上依次沉积多层薄膜而构成的。一般标准的 CdTe 太阳电池由五层结构组成。图 7-2 为 CdTe 薄膜太阳电池的结构。

1）玻璃衬底：主要对电池起支架、防止污染和入射太阳光的作用。

2）TCO 层：即透明导电氧化层，主要起透光和导电的作用。

3）CdS 窗口层：N 型半导体与 P 型 CdTe 组成 PN 结。

4）CdTe 吸收层：电池的主体吸光层，与 N 型 CdS 窗口层形成的 PN 结是整个电池最核心的部分。

5）背接触层和背电极：为了降低 CdTe 和金属电极的接触势垒，引出电流，使金属电极与 CdTe 形成欧姆接触。

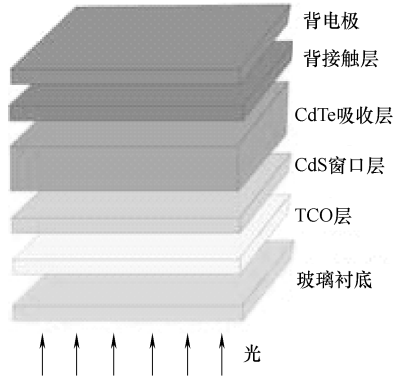


图 7-2　CdTe 薄膜太阳电池的结构

三、CdTe 太阳电池的工作原理

将 TCO 膜沉积在玻璃衬底上，然后沉积 N 型 CdS 膜，再沉积活性 P 型导电 CdTe 膜，最后沉积低电阻背接触层。光通过玻璃衬底进入电池，光子钻入 TCO 层及 N 型 CdS 层，进入 P 型导电 CdTe 层。CdTe 层是电池的主体吸光层，与 N 型 CdS 窗口层形成的 PN 结产生电子-空穴对，电子在内建场的驱动下进入 N 型 CdS 层，空穴仍然在 CdTe 层，空穴的聚集增强材料的 P 型导电，最终不得不经由背接触离开电池，产生电力，由与 TCO 层背接触连接的金属电极引出。

CdTe 对波长低于 800nm 的光有很强的吸收能力，光子数可达 10^4 个/cm，膜厚 3～7μm 就可完全吸收可见光。

第二节　CdTe 太阳电池的制备

CdTe 太阳电池的制备有十道工序：

1）确定衬底玻璃，进行磨边清洗。

2）沉积 TCO 膜。

3）第一次切割，将透明导电膜切断成平行的条带，每一条就是一个单独的电池。

4）沉积 CdS 膜，尽可能薄地沉积 CdTe 膜。

5）第二次切割，露出 TCO 膜。

6）沉积背接触层及背电极。

7）第三次切割，露出 TCO 膜。

8）连接。

9）组装。

10）检验。

下面就主要的工序进行介绍。

一、各层的制备

1. 玻璃衬底

以前用的是钠钙玻璃、普通窗玻璃、硼硅玻璃，现在用超白玻璃。

2. TCO 层

TCO 膜的指标有两个：电阻值和光透过率。人们追求低的电阻率、高的光透过率。经过几十年的探索，可作为 TCO 膜的材料有多种，如 SnO_2、ITO、$CdSnO_4$、ZnO∶Al、ZnO、In_2O_3 等，制备的方法也较多，有常压化学气相沉积法、低压化学气相沉积法、溶胶-凝胶法、磁控溅射法和超声波喷雾热解法。根据不同材料的特性，选择适合的工业制备方法。

（1）SnO_2　纯的 SnO_2 是透明的 N 型半导体材料，禁带宽度为 3.6eV，光透过率在 80% 以上。SnO_2 材料中存在晶格氧空位，在禁带内形成 -0.15eV 的施主能级，向导带提供 10^{15} ~ 10^{18} 个/cm^3 浓度的电子，如果掺入 1% 以上的锑（Sb）等杂质，可以使材料中的载流子浓度达到 10^{15} ~ 10^{18} 个/cm^3，电阻率达到 10^{-4} ~ $10^{-1}\Omega \cdot cm$，从而使 SnO_2 转变为导体，即利用 NH_4F、$SbCl_3$ 等材料，在 SnO_2 中掺入氟（F）或 Sb 杂质，掺 F 的 SnO_2 薄膜简称 FTO，掺 Sb 的 SnO_2 薄膜简称 ATO。为了降低太阳电池的暗饱和电流，提高光电转换效率，还可用低阻的 SnO_2：F 和高阻的 SnO_2 组成复合导电膜。

SnO_2 透明导电膜在工业上有两种制备方法：

1）超声波喷雾热解法：将 SnO_4、$SnCl_4$ 在水中溶解，然后在空气中喷射到热的衬底上，$SnCl_4$ 热分解后形成 SnO_2 薄膜，产生的 HCl 挥发，光透过率达 70% ~ 80%，电阻率为 $10^{-2}\Omega \cdot cm$。$SnCl_4$ 热解反应式为

$$SnCl_4 + 2H_2O \longrightarrow SnO_2 + 4HCl$$

2）磁控溅射法：用 SnO_2、Sb_2O_3 作为靶材，在氧气氛中进行阴极溅射，薄膜质量比喷雾法要好一些，但成本也比喷雾法高一些。

（2）ITO　用 Sn 与 In 作为靶材，采用溅射法制备，电阻率、光透过率由 Sn 与 In 比例来控制，Sn∶In = 1∶9，电阻率一般为 5×10^{-4} ~ $5 \times 10^{-5}\Omega \cdot cm$，接近金属的电阻率。In 会在高温处理过程中扩散进入 CdTe/CdS 层，引入并不需要的 N 型 CdTe，因此通常在 ITO 膜上沉积一层薄的纯 SnO_2 薄膜防止 In 扩散。ITO 膜效果好，不管是电导率还是光透过率都比 SnO_2 要好，但是成本较高。

（3）$CdSnO_4$　用 Cd 的氧化物与 Sn 共溅射制备，薄膜性质比 ITO 膜要好，即同样的电阻率，光透过率要好；或同样的光透过率，电阻率要低。由于退火时温度较高，不适于采用便宜的钠钙玻璃。

（4）ZnO∶Al　用 ZnO 和 Al 靶溅射制备，但在后续沉积 CdTe 时，温度 >550℃，会由于热应力而丧失掺杂性。

3. CdS 窗口层

CdS 是一种重要的直接带隙太阳电池材料，禁带宽度在 2.4eV 左右，吸收系数较高，为 $10^4 \sim 10^5 cm^{-1}$。此处作为 N 型窗口层，其掺杂浓度约为 10^{16} 个/cm^3，厚度在 50 ~ 100nm 之间。

CdS 与 CdTe 有相似的性质，有同样强烈形成符合化学配比薄膜的趋势，有升华和凝结的倾向，制备的工艺方法有电沉积法（ED）、化学水浴沉积法（CBD）、分子束外延法（MBE）、有机金属化学气相沉积法（MOCVD）、喷涂法（SP）和物理气相沉积法（PVD）。其中，化学水浴沉积法（CBD）是一种高效、低成本、适合大面积生产的方法，早在 20 世纪 60 年代就开始用于制备 CdS 薄膜，沿用至今，工艺已作了不少改进。其工艺是把含有 Cd 与 S 的亚稳态溶液加热到 80℃左右，将衬底浸泡在溶液中，衬底表面即形成比较薄的 CdS 薄膜，薄膜均匀，与衬底附着较紧。其反应式为

$$Cd^{2+}_{(aq)} + (NH_2)CS_{(aq)} + 2OH^-_{(aq)} \longrightarrow CdS_{(s)} + H_2O_{(liq)}$$

该工艺在 CdTe 与 CdS 形成 PN 结时，明显有约 5% 的晶格失配，使载流子复合数量很大，对此可采取活化工艺，即在 400℃左右的温度下，在含 Cl（$CdCl_2$）的物质中退火，含 Cl（$CdCl_2$）的物质通常是沉积在薄膜上或以蒸汽形式作为气氛持续几分钟。活化改善了结区晶粒的结晶度和电子学性质，改善了电池的伏安特性，大大提高了电池的光电转换效率，由 2% 提高到 16%。活化产生三个作用：重新结晶及晶粒生长；CdTe 与 CdS 互扩散，相互混合；载流子（少子）寿命增加，少子对电池效率的增加起着重要的作用。需要说明的是，在 500℃或更高温度下不会有这种效应，因为高温沉积的薄膜都是稳定结构，失去了重新结晶和晶体生长的条件。

4. CdTe 吸收层

1）CdTe 有两个性质：

① 把 CdTe 在真空状态下加热到 600℃，将会分解出等量的 Cd 和 Te，剩余的残留物是仍然符合化学配比的 CdTe。

② 把凝结在衬底上的 CdTe 保持在 400℃以上，得到的化学计量比的化合物会是稳定的固相，因为组成 CdTe 的元素 Cd、Te 的蒸汽压比 CdTe 蒸汽压高得多。

以上的性质给制造提供了两点方便：只要有能分解出 Cd、Te 元素的化合物都可以做原始料；不必太在意化学配比，只要在沉积期间或沉积之后，衬底温度被加热到 400 ~ 500℃或更高，就会有符合化学计量比（配比）的 CdTe 凝结。

2）制备 CdTe 薄膜有多种工艺和技术：近空间升华（CSS）、电沉积法（ED）、化学气相沉积法（CVD）、物理气相沉积法（PVD）、溅射法、化学水浴沉积法（CBD）、真空蒸发法、喷涂法（SP）和丝网印刷烧结法。真空蒸发法和溅射法制备质量较好，但是成本相对较高，在大规模生产中一般不用，而是采用近空间升华法和电沉积法。

① 近空间升华法：具有沉积速率高、设备简单、薄膜质量好、生产成本低的优点，适合于真空度要求不高的系统进行流水线生产。将原料粉末或颗粒固体高纯 CdTe 在 700℃真空中升华（也可以用氩气作为保护气），因玻璃衬底与原料之间的距离很近，故凝结在 400 ~ 600℃的衬底上，沉积速率为 10μm/min。近空间升华法的沉积速率主要取决于源温度和反应室气压，最高可达 75μm/min。

美国、德国建有量产化工厂。

② 电沉积法：用 $CdSO_4$ 水溶液与 Te_2O_3 在 90℃左右反应，形成 N 型薄膜。其反应式为

$$Cd^{2+}_{(aq)} + HTeO^{+}_{2(aq)} + 3H^{+}_{(aq)} + 6e^{-} \longrightarrow CdTe_{(s)} + 2H_2O_{(liq)}$$

在 Cl 基化合物条件下退火，晶粒变大，掺杂转变为 P 型，电导率提高。该工艺沉积电流密度小，导致沉积速率较低，因为电压施加在衬底的透明导电膜上，要保证整个沉积表面非常均匀，只能采用较小的电流密度。可用扩大工作面积的方法提高生产率。

美国建有量产化工厂。

③ 丝网印刷烧结法：把含 Cd、Te 的浆料用丝网印刷在衬底上，然后在 600～700℃可控 $CdCl_2$ 气氛下进行热处理 1h 得到大晶粒 CdTe 薄膜。印刷膜具有多孔性缺陷，需要印刷相对较厚的涂层才能使电池效果较好。

④ 化学水浴沉积法：一般的工厂和实验室都采用此法，这是因为其成本低和生成的 CdS 能够与 TCO 形成良好的致密接触。

⑤ 化学喷雾法：把含有 Cd、Te 的可热分解化合物，用喷雾器喷到热衬底上，释放出来的元素形成 CdTe。该法不需要真空设备。美国建有示范工厂。

CdTe 薄膜制备后，要在 $CdCl_2$ 氛围内进行热处理，有两种热处理工艺：一种是用超声波喷雾将 $CdCl_2$ 溶液涂覆在 CdTe 薄膜表面，然后烘干，在含氧气氛围中以 400℃左右的温度热处理 30～60min，最后用离子水清洗掉 $CdCl_2$ 残留物，烘干后，膜面可能会有涡漩状分布，要去除；另一种热处理工艺是采用热升华法形成气相氯化物膜，将 $CdCl_2$ 加热至 380～420℃，在 CdTe 表面形成 $CdCl_2$ 膜面，然后在含氧氛围、380～420℃保温一段时间，这种工艺处理的 CdTe 薄膜晶粒均匀，膜面没有涡漩状分布，也没有 $CdCl_2$ 残留物。

5. 背接触层（过渡层）及背电极

背电极制备影响到电池的稳定性，是重要的制备工序，有多种方法制备背接触层（过渡层）及背电极。

（1）三步法　半导体物理提出，与 P 型半导体形成欧姆接触有两个基本原则：

1）使用功函数比半导体的电子亲和势 + 能隙大的金属，使其费密能级和半导体的价带顶部排成直线。

2）在半导体中形成重（拼音：Zhòng）掺杂的背表面层。

要实现这两个基本原则很难，因为 CdTe 的电子亲和势 + 能隙大于 6eV，没有电子亲和势 + 能隙大于 6eV 的单一金属；高温形成的施主对受主产生了很强的自补偿效应，因此对 CdTe 实施重掺杂没有成功。经过研究人员的努力，采用下面三个步骤制备接触层：

1）制造“Te 帽”，使其覆盖在晶粒上，即用溅射刻去薄膜 30nm，产生富 Te 表面，作积累层。

2）沉积 P 型窄带隙的具有化学惰性的半导体或半金属作过渡层，防止 P 型积累层被活泼的金属电流收集层所腐蚀。

3）沉积金属膜作为低电阻电流收集层，即金属电极。

三层结构组成的接触层很稳定，适合量产化生产。

（2）重掺杂过渡层

1）在 CdTe 膜上制备 100nm 左右的重掺杂过渡层，使过渡层与金属之间的肖特基势垒区足够薄，隧穿电流成为电荷输送的主要形式，从而获得良好的欧姆接触。

2）用强氧化剂刻蚀 CdTe 膜面，获得富 Te 区后涂上含金属盐的电极膏，在一定温度下

烧结，使电极金属和富 Te 膜面形成碲化物，得到重掺杂的过渡层。

对于重掺杂的过渡层材料，一般要求与 P 型的 CdTe 之间有较小的价带不连续值，而且可以重掺杂至 1×10^{18} 个/cm^3 以上的载流子浓度。掺铜的 ZnTe:Cu 常被用于过渡层材料，它与 CdTe 具有相同的闪锌矿型结构，价带的不连续值接近于零。Cu 主要起两个作用：一是 Cu 在富 Te 的 CdTe 膜面上易形成置换缺陷，增加受主浓度，改善电极性能；二是扩散到 CdTe 结区的 Cu 会俘获载流子，降低太阳电池性能。可用电沉积法或共蒸法来制备。

注意，此处的重掺杂与三步法所说的重掺杂是不同的，此处是指过渡层的重掺杂，三步法所指是对 CdTe 实施重掺杂。

（3）其他制备背接触层（过渡层）及背电极的方法

1）在沉积 CdTe 后，分别蒸镀厚为 200～300nm 的 Te 膜（或 Cu_2Te 膜）、Au（金）膜，在氮气氛围中 400℃下热处理约 20min（Cu_2Te 约 250℃）。

2）涂覆掺有 Cu 或 Hg（汞）的石墨电极膏，然后在氮气保护、250℃下热处理。

3）用含 0.1% Br 的 CH_3OH 溶液刻蚀 CdTe 膜面，获得富 Te 膜面，依次蒸镀约 10nm 的 Cu 和 40nm 的 Au，然后在氮气保护下于 150℃热处理约 90min。在过渡层制备完成后，采用蒸镀沉积法制备 Au/Cu 电极，作为背电极。

诸多方法中以三步法较为实用。为了提高转换效率，有的企业在背电极前增加了减反射层。

二、电池的连接

1. 近空间升华法电池的连接

用近空间升华法制备的 CdTe 电池的连接：在衬底上沉积 TCO 膜后，用激光进行第一次切割，将 TCO 膜割成一条条平行、等宽的长条，每条宽 10cm；沉积 CdS/CdTe 膜后，进行第二次切割，与第一次切割的位置错开一点距离，将 CdS/CdTe 膜割开，露出 TCO 膜，每道切割线间隔 10cm；沉积背接触层后进行第三次切割，同样与第二道切割线错开一点距离，切割背接触层 + CdS/CdTe 膜，露出 TCO 膜，电池的串联连接就完成了。图 7-3 为近空间升华法电池的连接。

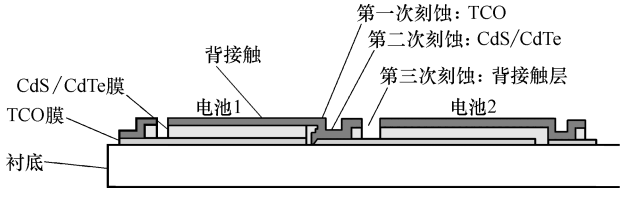


图 7-3　近空间升华法电池的连接

2. 电沉积法电池连接

用电沉积法制备的 CdTe 电池的连接：第一次切割要在 TCO 膜 + CdS/CdTe 膜沉积后进行，一次将 TCO 膜 + CdS/CdTe 膜割透，然后填充绝缘层；然后进行第二次切割，与第一次切割的位置错开一点距离，将 CdS/CdTe 膜割开，露出 TCO 膜，每道切割线间隔 10cm；沉积背接触层后进行第三次切割，同样与第二道切割线错开一点距离，切割背接触层 + CdS/CdTe 膜，露出 TCO 膜，电池的串联连接就完成了。图 7-4 为电沉积法电池的连接。

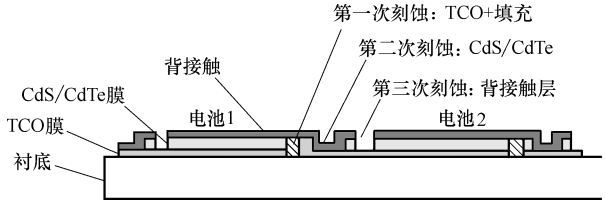


图 7-4　电沉积法电池的连接

3. 电池刻线宽度及单条电池宽度

1）电池刻线：每道电池刻线宽度一般为 0.2 ~ 0.3mm，三道刻线共有 0.6 ~ 0.9mm，占去电池组件不少面积，但这是必要的。

2）单条电池宽度：CdTe 太阳电池每一条电池宽度为 9 ~ 10mm，CIGS 太阳电池每一条电池宽度为 6mm，非晶硅太阳电池每一条电池宽度可达 12 ~ 13mm。不适当地增加电池宽度会导致串联电阻增加，降低填充因子。CIGS 太阳电池因为电流密度高，电压低，所以电池宽度要窄一些。

三、组装

1. 装接线盒

每一块电池组件由 54 ~ 57 单个电池串联组成，电流从第一个电池流到最后一个电池，电池组件电压是 54 ~ 57 个单电池的电压之和，要用金属导线将一头一尾的电流引出才可实用。用导电胶将金属导线分别粘在第一个电池的自由电极区和最后一个电池的自由电极区，引到组件上的一点，即安装接线盒的地方。金属导线到接线盒这一段距离采用绝缘的汇流条，要特别注意不可引起单个电池之间的旁路。连接到接线盒的走线不同厂家有不同的工艺。

2. 层压背玻璃

电池组件内部工作完成后，要用背玻璃盖上，以保护电池不受外部环境的影响和损害，分四道工步：

1）用激光去除衬底四周边缘宽 10mm 的膜层，以便涂胶不让湿气侵入。

2）用 EVA（乙烯醋酸乙烯）胶封。将剪裁成与衬底玻璃同样尺寸的固体 EVA 膜放在衬底玻璃与背玻璃之间，上下玻璃准确定位。背玻璃有一出线孔，将电极线从孔中牵出，然后将叠装好的散件送进层压机加热，在一定温度下 EVA 膜熔化，施加一定压力下，两块玻璃就牢固地粘在了一起。

3）清除四周挤出的 EVA。为防止湿气进入，也可将四周两块玻璃的接缝处补涂上一圈胶。

4）将接线盒粘在背玻璃的电极线出孔处，将电极线牢固焊在接线盒接头处。

四、检验

详见第十章。

五、激光刻划与 CdTe 薄膜的表面腐蚀技术

下面着重介绍制备中的两个工艺环节，即激光刻划与 CdTe 薄膜的表面腐蚀技术

1. 激光刻划

刻划技术有机械刻划、激光刻划两种。机械刻划的刻划速度比激光刻划慢得多，而且对

于 CdTe 厚度到微米量级的、较脆的薄膜，要保证刻槽的平直无渣，工艺难度较大。激光刻划能够获得较窄的刻槽，宽度最低可到 100μm。通常，使用基频（1064nm）YAG：Nd 激光刻划系统刻划透明导电薄膜，使用倍频（532nm）YAG：Nd 激光刻划系统刻划 CdS/CdTe 膜层和金属背电极。激光刻划系统有两种，一种是移动样品实现激光刻划，另一种是样品固定，激光头移动实现激光刻划。前者受微动台的限制，刻划速度只能达到 300～500mm/s，后者的刻划速度可高达 3000mm/s 以上。

刻痕形貌对串联集成的电子学特性有极大影响。激光入射方向、激光模式、刻划速度和开关调制频率是决定刻痕形貌的主要参量。从玻璃面入射比从薄膜面入射更容易得到高质量的刻痕。图 7-5 为 CdTe 薄膜激光刻划刻痕的形貌。该刻痕形貌是分别用 1064nm 激光和 532nm 激光刻划 CdS/CdTe 薄膜后，用探针式表面轮廓分析仪测量的。1064nm 激光刻划的刻槽边缘有高达 4μm 的“脊状峰”，这不利于后续沉积背电极接触层及金属背电极。532nm 激光刻划的刻槽与透明导电薄膜之间可形成连续的、具有良好欧姆特性的连接。

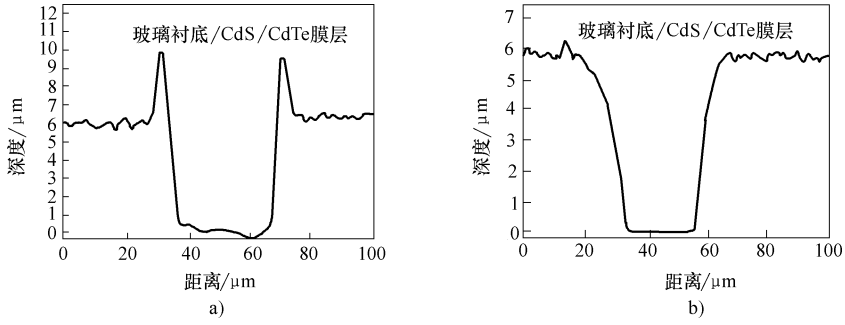


图 7-5　CdTe 薄膜激光刻划刻痕的形貌

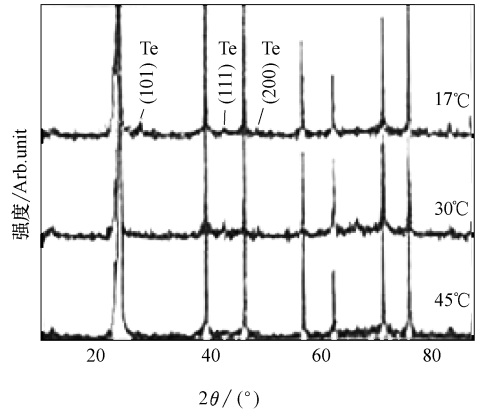
a）基频 1064nm　b）倍频 532nm

2. CdTe 薄膜的表面腐蚀技术

刚沉积的 CdTe 薄膜载流子浓度低，需要在含氧、氯的气氛下进行 380～450℃的热处理，促进 CdS/CdTe 的界面扩散，减少界面的晶格失配程度和钝化薄膜的晶界势垒。但是，该工艺在 CdTe 膜面形成了一高阻氧化层，影响电池的性能，要用化学腐蚀或离子刻蚀去除 CdTe 膜面的这层高阻氧化层。离子刻蚀技术废料少，容易和其他工艺环节集成，但是不易获得高质量富 Te 层。高质量富 Te 层厚度为 10～100nm，该层对形成良好欧姆接触的背电极是非常关键的。所以采用化学腐蚀去除 CdTe 膜面的这层高阻氧化层。化学腐蚀方法中，常用体积浓度为 0.1% 的溴甲醇溶液作为腐蚀液，腐蚀时间为 8～15s。使用该腐蚀工艺制备的小面积电池的转换效率高达 17.3%，但是溴甲醇溶液在空气中容易氧化，不适合工业化生产使用，而要发展更稳定的腐蚀液和速度慢的腐蚀工艺，使用磷酸-硝酸混合溶液可以获得较好的腐蚀效果。典型溶液的体积浓度为（硝酸∶磷酸∶水）0.5∶70∶29.5，室温下腐蚀时间为 1min，降低硝酸浓度和温度可以进一步延长腐蚀时间。但是，磷酸-硝酸混合溶液沿晶界的择优腐蚀较为严重，容易在沉积背电极后形成局部的短路漏电通道，改用硝酸-冰乙酸溶液可以进一步减轻晶体择优腐蚀程度，获得更好的膜面腐蚀效果。图 7-6 为不同温度下使用硝酸-冰乙酸腐蚀后 CdTe 的 XRD（X 射线衍射图）谱图。

CdTe 具有良好的光学、电学性质以及化学性质，因此成为制备高效率、低成本薄膜太

阳电池吸收层的理想材料。但是由于 p-CdTe 高的功函数，很难使其与金属背电极之间形成稳定的欧姆接触。为了解决这个问题，需要对 CdTe 层表面进行处理，同时在 P 型 CdTe 层与背电极之间加入一层背接触层。目前使用最多的表面化学处理有 BM 腐蚀和 NP 腐蚀，背接触层材料采用 ZnTe/ZnTe:Cu 复合背接触层。掺铜的 ZnTe:Cu 与 CdTe 一样，具有相同的闪锌矿型结构，价带的不连续值接近于零，可以用电化学沉积法或共蒸法来制备。用硝酸-冰乙酸混合液对 CdTe 多晶薄膜进行表面处理，使薄膜表面形成一层 Te 层，而且也对 CdTe 表面晶界进行腐蚀，并且在晶界处也存在 Te 层，经过硝酸-冰乙酸混合液腐蚀之后，在 CdTe 多晶薄膜表面沉积背接触层结构。硝酸-冰乙酸混合液对 CdTe 薄膜的腐蚀反应比较平缓，腐蚀过程中 CdTe 薄膜表面颜色发生变化，但是没有或者只有微量的气泡产生。腐蚀液的温度对腐蚀速度有很大影响，腐蚀厚度并不随腐蚀时间的增加而直线下降。



腐蚀时间为 1min，腐蚀温度分别为17℃、30℃、45℃

图 7-6　不同温度下使用硝酸-冰乙酸腐蚀后 CdTe 的 XRD 谱图

国际上 CdTe 太阳电池的研究和制造十分活跃，以美国国家可再生能源实验室（NREL）为首，其技术特点是采用 $CdSnO_4/ZnSnO_4$ 复合膜作为透明前电极，这种复合型透明导电膜在退火后，$CdSnO_4$ 有很高的电导率，$ZnSnO_4$ 有恰当的电阻率，而在这两层之间可形成很薄的过渡层。另外一个典型的技术路线是采用 Te/W_2Te_3 作为背接触层，欧洲的多个研究小组采用该技术，如德国 ANTEC 公司、德国 ISFH 公司、德国 Dieter Bonnet 中心、德国达姆斯塔德技术大学、西班牙 CIEMAT 公司、瑞士 ETH 大学、瑞士 Solaronix 公司、比利时 Gent 大学、意大利 Parma 大学、意大利 SSE 公司、英国 Loughborough 大学、英国巴示大学等，他们制备的小面积电池的最高转换效率在 10% ~13% 之间。大面积 CdTe 太阳电池组件制造的关键技术与小面积单元电池相同，CdS、CdTe、复合背接触层，这三层薄膜的沉积和后处理是获得高效率的技术关键。

工业化大面积组件生产要求工艺条件重复性高，薄膜性质均匀性好，因此一些在制备高效率小面积单元电池时使用的有效技术，并不一定能适用于大面积组件的制造，需要发展新的技术。

第三节　CdTe 太阳电池的成本

一、CdTe 太阳电池的结构

CdTe 太阳电池的各层材料依次为：玻璃 + SnO_2:F + CdS + CdTe + ZnTe + ZnTe:Cu + Ni，CdTe 薄膜的厚度为 7μm，转换效率为 13%，电池板尺寸为 1250mm × 625mm，功率为 100W。

二、材料的成本

1MW CdTe 薄膜太阳电池所消耗材料的成本如表 7-1 所示。

表 7-1　1MW CdTe 薄膜太阳电池所消耗材料的成本

材料	年消耗量	单价/元	总价/元
超白玻璃	15800m^2	150	2370000
透明导电膜	120kg	5000	600000
CdS(6N)	300kg	5500	1650000
CdTe(6N)	470kg	6000	2820000
ZnTe:Cu	20kg	10000	200000
Ni(4N)	100kg	100	10000
其他	50kg	600	30000
合计			7680000

CdTe 和超白玻璃构成材料成本的主体，分别占到消耗材料总成本的 36.7% 和 31%。消耗材料的成本还可以进一步降低，如将 CdTe 薄膜的厚度减薄 1μm，则 CdTe 材料的消耗将降低 14.3%，从而使材料总成本降低 5.2%，即从每峰瓦 7.68 元降为 7.28 元。如使用 99.999% 纯度的 CdTe，效率依然能达到 13%，材料成本还将进一步降低。因此，材料成本达到或低于每峰瓦 6.5 元是可能的。

考虑工资、管理、电力和设备折旧等其他成本，CdTe 薄膜太阳电池的成本大约是 7.5 元/W_P，销售价格为 10～11 元/W_P。

第四节　镉对环境的影响

由于 CdTe 太阳电池含有重金属元素镉（Cd），使很多人担心 CdTe 太阳电池的生产和使用对环境的影响，多年来，一些公司和专家不愿步入 CdTe 太阳电池的开发和生产，美国和其他国家态度不一。

一、美国的态度

CdTe 太阳电池的生产和使用中 Cd 的排放究竟有多严重呢？美国布鲁克文国家实验室的科学家们专门研究了这个问题。他们系统研究了晶体硅太阳电池、CdTe 太阳电池、煤、石油、天然气等常规能源和核能的单位发电量的重金属排放量，在太阳电池的分析中，考虑了将原始矿石加工得到制备太阳电池所需材料、太阳电池制备、太阳电池的使用等全寿命周期过程。图 7-7 为太阳电池组件与其他能源的 Cd 排放量的比较。研究结果表明，石油的 Cd 排放量是最高的，达到 44.3g/(GW·h)，煤次之，为 3.7g/(GW·h)，而太阳电池的排放量均小于 1g/(GW·h)，其中又以 CdTe 太阳电池的 Cd 排放量最低，为 0.3g/(GW·h)。与天然气相同，硅太阳电池的 Cd 排放量大约是 CdTe 太阳电池的两倍。

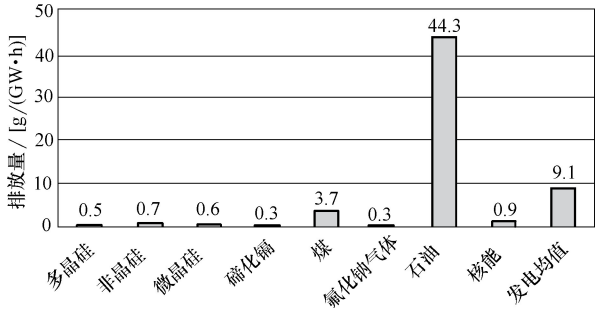


图 7-7　太阳电池组件与其他能源的 Cd 排放量的比较

他们还研究了硅太阳电池和 CdTe 太阳电池生产与使用中其他重金属的排放。图 7-8 为硅太阳电池和 CdTe 太阳电池重金属排放量的比较。研究结果表明，CdTe 太阳电池的砷、铬、铅、汞、镍等其他重金属的排放量也比硅太阳电池低。该研究报告结论基于对美国 First Solar 公司 CdTe 太阳电池生产线、CdTe 太阳电池组件使用现场的系统考察，以及对其他太阳电池、能源的实际生产企业的工艺、相关产品的使用环境研究分析得出，研究结果的科学性、公正性得到国内外的认可。研究者在 2006 年欧洲材料年会硫系半导体光伏材料分会上作的报告，引起了与会人员的强烈关注。

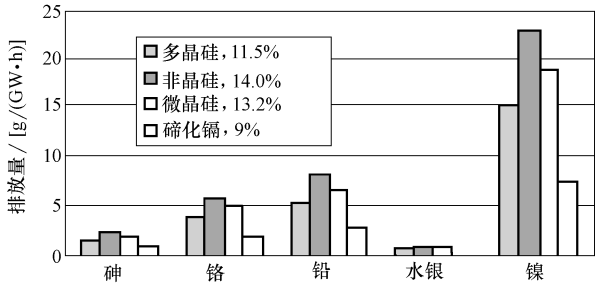


图 7-8 硅太阳电池和 CdTe 太阳电池重金属排放量的比较

美国的研究人员还针对 CdTe 太阳电池组件使用过程中遇到火灾等意外事故造成组件损毁时 Cd 的污染进行了研究，他们将双玻璃封装的 CdTe 太阳电池组件在模拟建筑物发生火灾的情况下进行试验，实验温度高达 1100℃。结果表明，高温下玻璃变软以至于熔化，化合物半导体薄膜被包封在软化了的玻璃中，Cd 流失量不到电池所含 Cd 总量的 0.04%。考虑到发生火灾的概率，得出使用过程中 Cd 的排放量不到 0.06mg/(GW · h)。

虽然实验表明 CdTe 太阳电池组件的使用是安全的，但是建立寿命末期电池组件和损毁组件的回收机制可以增强公众的信心，分离出的 Cd、Te 及其他有用材料，还可用于制造、生产太阳电池组件所需的相关材料，进行循环生产。美国、欧洲的研究表明，回收机制在技术上是可行的，回收材料的效益高于回收成本。事实上，美国 First Solar 公司的 CdTe 太阳电池组件在销售时就与用户签订了由工厂支付回收费用的回收合同。该公司自主开发的蒸汽输运法，使 CdTe 太阳电池生产线产能达到每年 100MW。图 7-9为第一光伏的 CdTe 太阳电池组件。

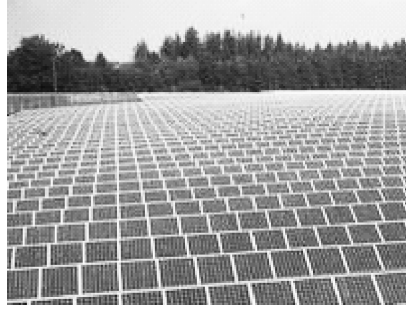


图 7-9 第一光伏的 CdTe 太阳电池组件

二、其他国家的态度

1）欧洲并没有禁止 Cd 的使用。CdTe 太阳电池可以在欧洲用到 2015 年。另外，欧盟也建有太阳电池回收机制，叫 PV circle，只是目前的效果还不太好，因为把问题电池组从设备上拆下来运到回收点的费用，不是每个用户都愿意承担的。

2）在澳大利亚，诺贝尔奖获得者马丁 · 格林加盟了无毒害太阳能联盟。

3）此前日本厂商也曾开发过 CdTe 太阳电池，但考虑到需要使用毒性强的 Cd，因而放弃，未进行量产。

4）我国无锡尚德开展了 CdTe 太阳电池的研发与制造。

除美国专门研究了 CdTe 电池的污染问题，其他众多研究机构对这个问题也进行了研

究，认为在 CdTe 电池的生产过程中，Cd 污染容易控制，不会影响人体健康，即使遇到火灾，熔融的电池中释放的 Cd 对环境的污染也很微小，而且在同样的发电量下，CdTe 电池的重金属排放当量是最低的。

综上所述，CdTe 太阳电池在生产、使用等方面是环境友好的，因此在重视环保的美国和德国等发达国家，CdTe 太阳电池的研究和产业化技术一直得到很好的发展。

第五节　CdTe 太阳电池的前景展望

CdTe 太阳电池正日益受到国内外的关注。

1）全球最大的 CdTe 太阳电池制造商——美国 First Solar 公司正加速扩大产能，该公司正在德国建设年产量 100MW 的工厂，该工厂得到欧盟 4000 万欧元的投资。同时，First Solar 公司还计划在美国本土和亚洲分别建设一个 100MW 的工厂。

2）鉴于 CdTe 太阳电池的发展前景，日本计划再启动 CdTe 太阳电池的工业化生产技术研究。意大利和德国也在进行类似的工作。

3）美国通用电器（GE）公司 2008 年收购 CdTe 太阳电池板生产商 PrimeStar 太阳能公司后，已经渗透到世界各地的太阳能市场。在 2011 年 9 月宣布将把 CdTe 太阳能作为其能源战略发展的重要方向，GE 能源公司计划在未来两年内把他们的 CdTe 薄膜光伏技术放入泰国太阳能市场。GE 公司表示，他们拥有的技术是 CdTe 太阳电池技术中最高效的，将很快产出每瓦成本低于 1 美元的产品。GE 公司近来在美国投资 6 亿美元用于建设一个 400MW 的发电厂，2013 年建成。经由美国国家可再生能源实验室核查，GE 公司的 CdTe 太阳电池板的光电转换效率接近 13%。GE 公司正研发更新的技术来提高转换效率，未来几年里，效率可达到 16%，效率提高一个百分点，将使太阳能电站成本降低 10 个百分点。

4）美国 First Solar 公司和我国签订了自 2011 年起 10 年间建 2GW CdTe 太阳电厂的协议，投资接近 100 亿美元。

5）全球高纯 Te 和 CdTe 材料最大的生产商是加拿大的上市公司 5N Plus，其毛利率达 50% ~60%。

6）鑫瑞环保于 2008 年开始，用专有技术从冶金废料和工业废料中回收和提取 Te，其商用 Te（4N，纯度 >99.99%）的产能可达 40 多吨，年实际产量达 20 余吨。鑫瑞环保拟进一步产业化其高纯 Te（6N）和 CdTe 的生产技术，力争成为 CdTe 太阳电池领先的上游原料供应企业。

7）聚酰亚胺薄膜比光伏玻璃薄数十倍，轻近百倍，可以制造柔性 CdTe 太阳电池。杜邦卡普顿（DuPontKapton）开发了无色聚酰亚胺薄膜（polyimide film）材料，瑞士联邦材料科学与技术实验室使用了这种新的无色薄膜，展示了 13.8% 的转换效率，刷新了他们先前的 12.6% 的记录，并接近使用玻璃的记录。卷到卷沉积技术可采用聚合物薄膜（Polymer Film）作为衬底。

CdTe 太阳电池的生产成本正在逐步接近传统发电系统的成本，各国均在大力研究解决制约 CdTe 太阳电池发展的因素，不久 CdTe 太阳电池将成为社会的主导新能源之一。

第八章　薄膜太阳电池的制造设备

薄膜太阳电池的制造设备主要有薄膜沉积设备、层压设备及激光刻膜机等。

第一节　薄膜沉积设备

一、增强型等离子化学气相沉积炉

增强型等离子化学气相沉积（PECVD）炉的等离子体产生方式多种多样，主要有平板电容式等离子技术、感应射频式等离子技术、直线形微波等离子体技术等。由于在轰击加热状态下，真空系统中的空间温度远低于工件温度，而空间温度过低，等离子体范围有限，因此空间离化率低，密度分布不均匀，使真空内的化学反应不能充分进行，继而影响反应过程和膜层质量。所以，PECVD 设备发展至今还存在以下技术缺陷：薄膜均匀性的控制问题；腐朽污染问题；沉积薄膜中的残留气体问题；沉积速率问题。解决方法：提高等离子场的电离度，如改变电离方式、加大电离功率等，有的也提出在发射源上加上活化源，从而想办法提高电子的能量，提高粒子的电离量，有的提出在电场周围加上磁场，来提高等离子体的均匀性。以上方法都要通过附加装置来保证气流的均匀性。这里提出一种不用增添附加装置，只通过优化本身结构参数来实现气流分布最大均匀性方法。

1. 气流分布

平板式 PECVD 设备气体不均匀可以由两种情况产生，一种是进气不均匀，另一种是抽气不均匀。气流不均匀是影响 PECVD 设备成膜质量的主要因素。一般对于 PECVD 设备来说，要实现均匀布气，应从中间抽气，但玻璃底板正好装在中间，占据了中间位置，只能采用四周抽气的方式，这样就使气体有一定的浓度梯度，无法有效地均匀布气。这里通过调节布气板的小孔直径来实现对进气系统的气流进行补偿。推导压力与气流的关系，改进现有结构，实现气流大面积的均匀分布，提高薄膜沉积的均匀性。

2. 反应室气流分析

反应室的工作原理如图 8-1 所示。混合气体由进气口进入布气罐中，匀流板对气体进行均匀布气，然后气体通过匀流板进入反应室内，利用辉光放电原理将反应气体电离（主要目的是增加反应气体的反应活性，这也是 PECVD 系统可以在低温下进行沉积薄膜的原因），电离后的气体沉积到加热玻璃衬底上。

PECVD 设备沉积薄膜的速率和沉积均匀性由玻璃衬底温度、混合气体种类、气体压强和 RF 电源能力共同决定，反应室的设计应将薄膜均匀性放到首要位置。首先进气管的设计要考虑到为反应室提供充足的气体，出气系统要能及时地排气以及防止有杂质沉淀。

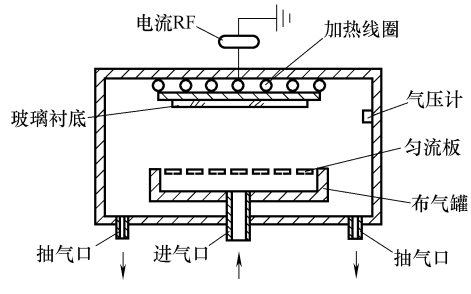


图 8-1　布气原理图

影响到薄膜均匀性的因素很多，但从结构参数上来讲，则只有两主流道截面积比、反应室容积有效利用率和布气板的开孔率、抽气口的形状位置等。

3. 均匀布气分析

为了把按一定比例混合的气体均匀地散布到 PECVD 设备中，须将气体通过布气板进行匀流，让气体通过辉光放电区域自由流动扩散到各处。对于中间进气的布气板，设置中间孔会使中间气流速度很大，对薄膜的冲击很大，所以应避免在布气板中间开小孔。布气板其余孔径 s 的计算可以利用圆管中气流的计算公式：

$$s=\frac{10^{-6}\pi R^4(p_1-p_2)}{8\eta L} \tag{8-1}$$

式中　p_1、p_2——相邻两孔出口处的压力；

R——气体的普适常数；

L——管长；

η——气体的内摩擦系统（粘性系数）。

则质量流速为

$$Q=\frac{p_1+p_2}{2s} \tag{8-2}$$

$$C=\frac{Q}{p_1-p_2} \tag{8-3}$$

式中　C——流导。

在实际应用中，实现均匀布气时，要求所有孔的出气量相同，即所有孔出口处的质量流速相同，则每个孔的流量 q 为

$$q=Q_1=Q_2=\cdots=Q_n=\frac{Q}{n} \tag{8-4}$$

式中　n——整个径向分布的孔的数目。

如果想利用小孔的变直径法实现气体的均匀分布，则可先保证等间距孔的设计，即满足

$$L=L_{1.2}=L_{2.3}=\cdots=L_{n-1.n}$$

为方便计算，令

$$F_2=\frac{\pi}{128\eta[10^6h+(114\times10^3\mu/8\pi\eta RT)Q_2]} \tag{8-5}$$

式中　h——小孔的高度，因为对于平板来说，平板的厚度很小，可以把小孔看成短管；

T——气体的温度；

μ——气体的分子量。

由式（8-1）~式（8-5）可知

$$p_2^{\,2}-p_1^{\,2}=\frac{2Q}{F_2d_2^{\,4}} \tag{8-6}$$

式中　d_2——径向第二圈小孔的直径。

依此类推，即可得到所有直径与压力之间的关系，这样就可以得到不同压力值与开孔直径之间的联系，从而可以在不同压力范围内进行开孔补偿，来实现气流的均匀流动，以实现气体更大面积的匀流效果。此种方法主要解决径向气流的径向分布不均。

4. 数学模型及其仿真建模

由图 8-1 所示布气原理图知，气流由管道流入布气罐中，经匀流板进行匀流，匀流板上面有等距离等直径的小孔，这些小孔使得气体能均匀分布到反应室中。分布均匀的气体在电离、高温下发生化学反应，然后沉积成薄膜。此装置最大的问题是采用等间距、等直径的均匀小孔来实现布气，而气流从小管径通道中流入到匀流板上时，气流是一股射流，射流的扩散角较小，只有 5°～8°。这就造成了中间气流过大的现象，过大气流会对沉积中的薄膜形成冲击。为了避免上述情况发生，气流的入口最好是大面积的活塞流。因此，考虑采用渐变孔的匀流板设计方案。布气系统采用铝或者不锈钢材料，内部压强控制在 0.1～5Torr 之间，电极间距离为 5～10cm，考虑现有的加工条件，取最内圈上孔直径 $d_1 = 0.5\text{mm}$，同时，径向孔数目为 7。由式（8-6）和要求的压强条件，计算得到由内向外径向分布各小孔的直径：$d_2 = 0.6\text{mm}$、$d_3 = 0.62\text{mm}$、$d_4 = 0.64\text{mm}$、$d_5 = 0.65\text{mm}$、$d_6 = 0.67\text{mm}$、$d_7 = 0.7\text{mm}$。

（1）PECVD 布气　数学描述　考虑到装置完全对称，为简化计算，取 1/4 中截面。为了得到有效的计算结果，保证计算精度，网格划分小孔处最小单元边长 0.1mm 作 0.5mm。因为不同的流动采用的数学模型是不同的，所以在对流场建立数学模型时，首先要确定流体的类型和流动的方式。按照流体的粘性可分为无粘流体和有粘流体，但是无粘流体只是一种为了理论研究方便而假定的理性流体，实际的流体都是有粘性的。由于流体的浓度随时间的变化会有所变化，所以为非定常流动。粘性流体质点的运动在不同的初始和边界条件下会出现不同的状态，一种是作无规则不定向的混杂运动，即湍流状态；另一种是所有流体质量作定向有规则的运动，即层流状态。湍流和层流由雷诺数 *Re* 判断。在已知气体流量的情况下 *Re* 的计算公式为

$$Re = \frac{vd}{\gamma} = \frac{vd\pi/4d}{\gamma\pi/4d} = \frac{vs}{\gamma\pi/4d} = \frac{4q}{\pi\gamma d} \tag{8-7}$$

式中　v——流体速度；

γ——运动粘度；

d——管径（对于非圆形断面的管道，以当量直径 d_e 进行计算）。

当 $Re < 2320$ 时，管中是层流；当 $Re > 2320$ 时，管中是湍流。直径最小的地方应该有最大的雷诺数，由前可知，直径最小为 0.5mm，试验的气流为 1000Sccm，运动学粘度取 $20.1 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$，则

$$Re = \frac{4 \times \dfrac{1000}{60} \times 10^{-6}}{\pi \times 20.1 \times 10^{-6} \times 0.5 \times 10^{-2}} = 211.2 < 2320$$

则流体定义为层流。

非晶硅沉积时，气体是 SiH_4 和 H_2 混合物，属于牛顿流体的范围；同时，气体流体属于可压缩气体，根据质量守恒方程，可写出气体连续方程和气体的能量方程（方程较复杂冗长，此处略去。）。

式（8-1）～式（8-7）描述了混合气流在反应室内部流动情况，只要给定足够的初始条件，如入口的流体压力、速度和出口压力等，再加上边界条件，就可以对方程求解。图 8-2 为求解流程图。

如果是瞬态过程，则可将图 8-2 的过程理解为一个时间的计算过程，可循环求下个时间

步的解。

（2）仿真结果及其比较分析　由于模型完全对称，为简化计算经过入口、出口截面的流场，该平面应可反映出模型流场的分布情况。

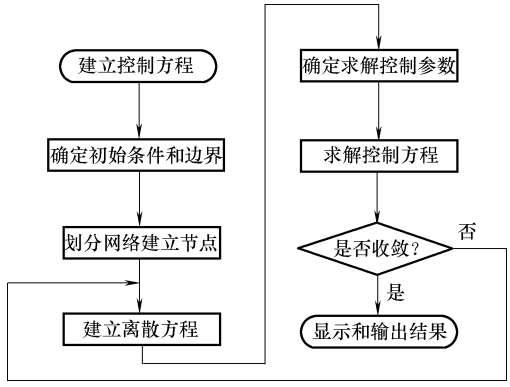


图 8-2　求解流程图

1）作中间开孔的流场云图（图略），可以看出，气流的最大速度达到了 0.5m/s，远远高于周围的气流速度，必然对沉积薄膜造成冲击，大大影响气流的均匀性。不仅如此，中间气流的过大也会造成周围的气流速度降低，这对于均匀沉积薄膜十分不利，而且还会对中间的薄膜形成冲击。

2）作中间不开孔的渐变直径孔流场云图（图略），可以看出，中间渐变孔开口使得气流的入口气流很小，可解决气流对薄膜的冲击问题，而且周围的气流速度明显比中间开口的气流速度大，所以在相同的入口气流的情况下，渐变口的设计很好地弥补了气流分布的均匀性。作中间不开孔等直径孔流场云图（现有装备），这种开孔方式在一定程度上也能达到气体的均匀性，但是在径向上由于没有气流补偿，均匀布气面积受到一定阻碍。

采用渐变孔径来补偿径向气流分布的方法，同时结合流体压力计算，确定弥补气流径向分布不均小孔直径的大小，最后用 CFD 软件对整个装置的流动效果进行仿真。

二、磁控溅射设备

（一）磁控溅射的原理和特点

1. 磁控溅射的原理

要清楚理解磁控溅射（Magnetron Sputtering）原理，得从溅射镀膜说起。溅射镀膜是在真空中利用荷能粒子轰击靶表面，使被轰击出的粒子沉积在衬底上的技术。阴极靶由镀膜材料制成，阳极即为衬底，给真空室通入 0.1～10Pa 的氩气或其他惰性气体，在阴极（靶）输入 1～3kV 直流负高压或 13.56MHz 的射频电压，产生辉光放电，使惰性气体电离，产生入射离子，入射离子与靶材表面原子发生弹性碰撞后，将其中一部分能量给了原子，该原子的动能超过它与其他原子形成的势垒（对金属约为 5～10eV）时，原子就会从晶格点阵碰出，形成离位原子，又与其他附近原子发生反复碰撞-联级碰撞，当原子动能超过结合能（1～6eV）时，原子离开表面进入真空室沉积在设置的衬底上，形成薄膜。由于被溅射原子是与具有数十电子伏特能量的正离子交换动能后飞溅出来的，因而溅射出来的原子能量高，有利于提高沉积时原子的扩散能力，提高沉积组织的致密程度，使制出的薄膜与基片具有强的附着力。但是，这一过程存在着不足之处：

1）在低电压和低气压下，产生的离子数目少，靶材溅射效率低，如改为高电压和高气压，尽管可以产生较多的离子，但飞向基片的电子携带的能量高，容易使基片发热甚至发生二次溅射，影响制膜质量。

2）在低气压下，离子是在远离阴极的地方产生的，因而它们的热壁损失较大；同时，又有很多初始电子可以以较大的能量碰撞阳极，所引起的损失，又不能被碰撞引起的次级发射电子抵消，离化效率很低，以至于不能达到自持的辉光放电所需的离子。

3）靶材原子在飞向衬底的过程中，与气体分子的碰撞概率大为增加，因而被散射到整个腔体，既会造成靶材浪费，又会在制备多层膜时造成各层的污染。

为了解决上述不足之处，人们在 20 世纪 70 年代开发出了直流磁控溅射技术，它有效地克服了阴极溅射速率低和电子使衬底温度升高的弱点。图 8-3 为磁控溅射。

磁控溅射的原理是：在二极溅射的基础上，在靶材后面放置永久磁铁，与靶阴极电场垂直的方向加一个横向磁场（它是平行于阴极表面的磁场），电子在电场 E 的作用下，与 Ar 原子发生碰撞，产生 Ar 离子和二次电子，离子飞向靶材，溅出靶原子，中性的靶原子沉积在衬底上形成薄膜。产生的二次电子会受到电场和磁场作用，产生 E（电场）$\times B$（磁场）所指的方向的漂移（简称 $E \times B$ 漂移），其运动轨迹近似于一条摆线。若为环形磁场，则电子就以近似摆线形式在靶表面做圆周运动，二次电子在加速飞向衬底的过程中受到磁场洛仑兹力的影响，被束缚在靠近靶面的等离子体区域内，二次电子的运动轨迹会发生弯曲甚至产生螺旋运动。因此，它们的运动路径变得很长，增加了与工作气体分子碰撞的次数，从而增加了气体原子的离化效率，使等离子体密度增大，在该区域中电离出大量的 Ar 离子来轰击靶材，从而实现了高的沉积速率。经过多次碰撞而丧失能量的电子到达阳极时，已变成低能电子，逐渐远离靶表面，并在电场 E 的作用下最终沉积在衬底上。因传递给衬底的能量很小，致使衬底温升较低。

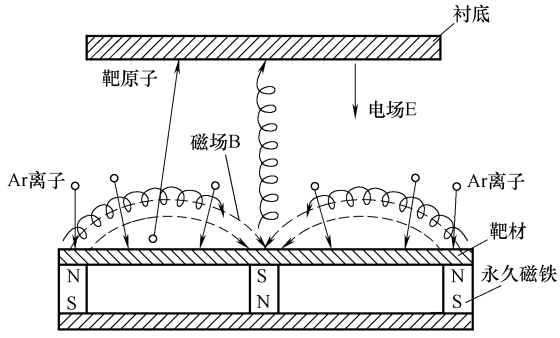


图 8-3　磁控溅射

磁控溅射使溅射速率得到很大的提高，而且可以在较低的溅射电压和气压下工作，降低了薄膜污染的倾向；另一方面，它也提高了入射到衬底表面的原子能量，可以在很大程度上改善薄膜的质量。因此，磁控溅射法具有“高速”、“低温”的优点。电流密度提高到 5 ~ 30mA/cm^2，沉积速率可达到 600nm/min。

磁控溅射原理有三个特征：

1）磁控溅射就是以磁场束缚和延长电子的运动路径，改变电子的运动方向，提高工作气体的电离率，有效利用电子的能量。磁场与电场的交互作用使单个电子轨迹呈三维螺旋状，而不是仅仅在靶面圆周运动。电子的归宿不仅仅是衬底，真空室内壁、靶源阳极也是电子的归宿，但一般衬底与真空室及阳极在同一电势上。

2）磁控溅射是入射离子和靶的碰撞过程，入射离子把部分动量传给靶原子，此靶原子又和其他靶原子碰撞，形成级联过程，在这种级联过程中某些表面附近的靶原子，获得向外运动的足够动量，离开靶被溅射出来。电子由于受电场和磁场的作用，做螺旋运动，大大提高了电子的寿命，增加了电离产额，从而放电区的电离度提高，即离子和电子的密度增加，放电区的有效电阻变小，电压下降。另外，放电区集中在靶表面，放电区中的离子密度高，所以入射到靶表面的离子密度大大提高，因而溅射产额大大增加。产生原子的多少用溅射产额（S）表示。

3）入射正离子轰击靶材表面后产生原子和电子，原子沉积在衬底上形成薄膜，电子用

来维持辉光放电。

2. 磁控溅射的特点

磁控溅射技术成膜速率高，衬底温度低，膜的黏附性好，可实现大面积镀膜，有如下特点：

1）利用外加磁场捕捉电子，延长和束缚电子的运动路径，搞高离化率，增加镀膜速率。

2）溅射粒子（主要是原子，还有少量离子等）的平均能量达几个电子伏，比蒸发粒子的平均动能高得多（3000K 温度蒸发时平均动能仅 0.26eV）。

3）入射离子能量增大（在几千电子伏范围内），溅射率（溅射出来的粒子数与入射离子数之比）增大；入射离子能量再增大，溅射率达到极值；入射离子能量增大到几万电子伏，离子注入效应增强，溅射率下降。

4）入射离子质量增大，溅射率增大。

5）入射离子方向与靶面法线方向的夹角增大，溅射率增大（倾斜入射比垂直入射时溅射率大）。

6）单晶靶由于焦距碰撞（级联过程中传递的动量愈来愈接近原子列方向），在密排方向上发生优先溅射。

7）不同靶材的溅射率不相同。

8）永久磁铁用圆筒结构和平面结构，这两种结构中，磁场方向都基本平行于阴极表面，并将电子运动有效地限制在阴极附近。

9）磁控溅射的制备条件：

加速电压	300～800V
磁场	50～300Gs
气压	1～10mTorr
电流密度	4～60mA/cm
功率密度	1～40W/cm
不同的材料最大沉积速率范围	100～1000nm/min

（二）磁控溅射的分类

磁控溅射分为直流磁控溅射和射频磁控溅射。

1. 直流磁控溅射

直流磁控溅射要求靶材能够将从离子轰击过程中得到的正电荷传递给与其紧密接触的阴极，从而使该方法只能溅射导体材料，不适于绝缘材料。因为轰击绝缘靶材时表面的离子电荷无法中和，这将导致靶面电位升高，外加电压几乎都加在靶上，两极间的离子加速与电离的机会将变小，甚至不能电离，导致不能连续放电甚至放电停止，溅射停止。

2. 射频磁控溅射

射频磁控溅射相对于直流磁控溅射的主要优点是，它不要求作为电极的靶材是导电的，因此理论上利用射频磁控溅射可以溅射沉积任何材料。但是，它对磁性材料有一定要求，由于磁性材料对磁场的屏蔽作用，溅射沉积时它们会减弱或改变靶表面的磁场分布，影响溅射效率，因此磁性材料的靶材需要特别加工成薄片，尽量减少对磁场的影响。射频磁控溅射中，射频电源的频率通常在 50～30MHz。

（三）特殊溅射沉积技术

特殊溅射沉积技术是以直流溅射和射频溅射为基础，为达到某些特殊目的而产生的溅射技术。

1. 反应溅射

用磁控靶源溅射金属和合金很容易，点火和溅射很方便，这是因为靶（阴极）、等离子体和被溅射零件/真空腔体可形成回路，但若溅射绝缘体（如陶瓷），回路就断了。于是人们采用高频电源，回路中加入很强的电容，这样在绝缘回路中靶材成了一个电容。但高频磁控溅射电源昂贵，溅射速率很小，同时接地技术很复杂，因而难以大规模采用。为解决此问题，发明了磁控反应溅射，就是用金属靶，加入氩气和反应气体（如氮气或氧气），当金属靶材原子被溅射撞向零件时，由于能量转化，与反应气体化合生成氮化物或氧化物。

根据膜的导电性的高低，可定性地将反应溅射过程分为两种模式——金属模式和化合物模式，介乎两者之间的是过渡区。一般认为膜的方块电阻在 1000 之下是金属模式，大于 1000 为化合物模式。

反应溅射靶可分为两类，一类是纯金属、合金或混合物，通入的气体是反应气体，或氩气加上一部分反应气体；另一类是化合物，在纯氩气气氛中溅射产生分解，使膜内缺少一种或多种靶成分。在溅射时需要补充反应气体，以补偿损失的成分。常用的反应气体有氧、氮、氧 + 氮（空气）、乙炔、甲烷等。

（1）反应过程　反应发生在衬底或靶的表面上，活性气体形成活性基团，溅射原子与活性基团碰撞形成化合物沉积在衬底上。当通入的反应气体压强很低或靶的溅射产额很高时，一是化合物的合成发生在衬底上，化合物的成分取决于溅射粒子和反应气体到达衬底的相对速度；二是靶面的化学反应消失或者是化合物分解的速度远大于合成的速度。当气体压强升高或溅射产额降低时，化合反应达到某个阈值，靶上的化学合成速度大于逸出速度，化合物的合成发生在靶面上。

（2）反应溅射参数与生成物性能的关系　在纯氩气状态下溅射沉积纯铝膜时，当氮气被引入真空室后，靶面发生变化，随氮气的量不断上升，填充因子下降，膜内 AlN 含量上升，膜的介质性提高，方块电阻增加。当氮气达到某一值时，沉积膜就是纯的 AlN；在电流不变的条件下，电压下降，沉积速率降低。当反应气体量增加时，靶面上会形成一层化合物，薄膜成分变化的同时，沉积速率下降；当反应气体量减少时，放电曲线及沉积速率都出现滞后现象。

（3）反应溅射易出现的问题

1）靶的污染。靶表面形成了非导电的化合物或者导电很差的化合物之后，除了放电电压及沉积速率变化之外，还会因为靶面状况的动态变化引起膜成分及结构的变化。

2）阳极消失。当阳极上化合物沉积到一定厚度时就中断了电荷传导的通路，造成电荷不断积累，最终阳极失去作用，辉光放电不稳定，沉积的膜层性能不一致。因此，经常清理阳极是必要的。

3）极间打火。随着阴、阳极覆盖化合物，其导电性能变差或丧失，使电子累积，若要维持辉光放电，必须提高外加电压，结果造成阴极表面化合物的击穿，形成弧光放电，严重时影响溅射过程的稳定性，并造成膜的缺陷。

磁控反应溅射绝缘体看似容易，而实际操作困难。主要问题是反应发生在阳极、真空腔

体表面以及靶源表面，从而引起灭火、靶源和工件表面起弧等。德国莱宝发明的孪生靶源技术，很好地解决了这个问题，其原理是一对靶源互相为阴、阳极，从而消除阳极表面氧化或氮化。

（4）中频溅射及脉冲溅射　在靶上加一个交变电压，当工作在负电压阶段时，靶被溅射；工作在正电压阶段时，中和靶面积累的正电荷，这就是交流溅射技术。电压波形是非对称的矩形波的溅射方法称为脉冲溅射；电压波形是对称的方波或正弦波的溅射方法称为交流溅射。在一个给定电场强度下，频率越高，溅射产额越低，频率为60kHz、80kHz、500kHz和13.5MHz时，溅射产额分别为直流溅射时的100%、85%、70%和55%，通常取10～80kHz，因此也称交流溅射为中频溅射。中频溅射常用于孪生靶（也叫对靶）。使近乎完全相同的两个靶相对而立，各自与电源的两个极相连，并与真空室处于悬浮状态。在溅射过程中，两个靶周期性地交替作为阴极和阳极，处于低电位的靶吸引正离子产生溅射，处于高电位的另一个靶吸引电子，中和靶面积累的正离子，抑制了溅射时的打火现象，同时消除了“阳极消失”现象。中频孪生靶溅射技术有以下特点：

1）有高的沉积速率。靶功率密度是直流三倍的情况下，可以得到直流溅射十倍的沉积速率。

2）膜内缺陷低。由于消除了打火现象，膜内缺陷比直流溅射时低几个数量级。

3）膜内应力低。由于中频溅射时到达衬底的原子能量高于直流溅射，因此沉积时衬底温升高，形成的膜较致密，与衬底结合力强。

4）连接简单。中频溅射时电源与靶的连接比射频（13.56MHz）溅射容易，后者需要复杂的阻抗匹配。

脉冲磁控溅射是采用脉冲电源或者直流电源与脉冲生成装置配合，输出脉冲电流驱动磁控溅射沉积，一般使用矩形波电压，既容易获得，又有利于研究溅射放电等离子体的变化过程。

（四）磁控阴极（靶源）

磁控阴极按照磁场位形分布不同，大致可分为平衡态和非平衡磁控阴极。

1）平衡态磁控阴极内外磁钢的磁通量大致相等，两极磁力线闭合于靶面，很好地将电子/等离子体约束在靶面附近，增加碰撞概率，提高了离化效率，因而在较低的工作气压和电压下就能起辉，并维持辉光放电，靶材利用率相对较高，但由于电子沿磁力线运动主要闭合于靶面，衬底区域所受离子轰击较小。平衡式靶源镀膜均匀，多用于半导体光学膜。

2）非平衡磁控阴极，即让磁控阴极外磁极磁通大于内磁极，两极磁力线在靶面不完全闭合，部分磁力线可沿靶的边缘延伸到衬底区域，因而部分电子可以沿着磁力线扩展到衬底，增加衬底区域的等离子体密度和气体电离率。非平衡式靶源镀膜膜层和衬底结合力强，多用于磨损装饰膜。

不管平衡非平衡，若磁铁静止，其磁场特性决定一般靶材利用率小于30%，为增大靶材利用率，可采用旋转磁场，但旋转磁场需要旋转机构，同时溅射速率要减小。旋转磁场多用于大型或贵重靶，如半导体膜溅射，对于小型设备和一般工业设备，多用磁场静止靶源。

常见的磁控溅射靶材从几何形状上看有平面和圆形两种。

1）平面磁控溅射。平衡平面溅射是最常用的平面靶磁控溅射，磁力线有闭合回路且与阴极平行，即在阴极表面构成一个正交的电磁场环形区域。等离子体被束缚在靶表面距离靶

面大约 60cm 的区域，通常在基片上加负偏压来改善膜与衬底的结合能力。非平衡平面磁控溅射为了将等离子区域扩展，利用磁体摆放方式的调整，可以方便地获得不同的非平衡磁控源。

2）圆形磁控溅射靶。圆形磁控溅射靶的直径范围为 50 ~ 250mm，靶结构材料选取适合高真空的优质不锈钢和铜合金材料，磁场源采用稳定性最高的稀土钐钴永磁材料，磁场采用模块化排布并进行优化设计，有效地提高靶材利用率和设备稳定性。直径 50 ~ 150mm 的圆形磁控溅射靶主要应用于大专院校与科研院所的研究性磁控溅射镀膜设备；直径 150mm 以上的靶为生产型磁控溅射镀膜设备采用。图 8-4 为圆形磁控溅射靶。



图 8-4　圆形磁控溅射靶

冷却水循环量为 1L/min，能有效地保证设备的冷却效果，根据不同设备可以配置不同角度的安装头，采用 ϕ20mm 不锈钢导管、复合法兰进行安装，适用于高真空、高纯度镀膜。冷却是一切源（磁控，多弧，离子）所必需的，因为能量很大一部分转为热量，若无冷却或冷却不足，这种热量将使靶源温度达一千度以上从而熔化整个靶源。

其他特殊性能可根据客户需要进行设计。

（五）磁控溅射靶材的利用率

磁控溅射靶材的利用率，是磁控溅射源工程设计和生产工艺成本核算的一个参数。对于静态直冷矩形平面靶，即靶材与磁体之间无相对运动，且靶材直接与冷却水接触的靶，靶材利用率（最大值）多在 20% ~ 30%。为了提高靶材利用率，研究出了不同形式的动态靶，其中以旋转磁场圆柱靶最著名，且在工业上被广泛应用，据称这种靶材的利用率最高可超过 70%，但缺少足够数据或理论证明。如何提高利用率是真空磁控溅射镀膜行业的重点研究课题。图 8-5 为磁控溅射。



图 8-5　磁控溅射

（六）溅射产额 S

溅射产额是指单位离子入射到表面后产生的原子数，单位为原子数/离子，也叫溅射率或溅射系数。它决定阴极被剥离的速度，并在很大程度上决定薄膜的沉积速率。溅射产额与入射离子及粒子能量有关。

1. 溅射产额与入射离子

溅射产额与入射离子的种类、能量、入射角度及被溅材料的种类有关。

（1）溅射产额与入射离子的关系

1）与入射离子种类的关系。对于同一种被溅材料，当轰击离子的质量增加时，溅射产额随之增加，而且最大溅射产额出现在元素周期表惰性气体上。

2）与入射离子能量的关系。在入射离子能量很低的一个范围内，没有或者几乎没有溅射发生，随着离子能量的增加，溅射产额也增加，当能量继续增加超过某一个值时，溅射产额不但不增加反而还要下降。$S=0$ 时的最高能量称为溅射的阈值能量，一般为 10 ~ 30eV。

3）与入射离子入射角的关系。当入射角从 0°（离子垂直入射到靶面）逐渐增加时，最

初的溅射产额也随之增加，当达到某一值（Al 为 75°）时，溅射产额达到最大，角度再增加溅射产额反而下降，至 90°时，溅射产额下降到零。

（2）与被溅材料的关系　随着原子序数的增加，溅射产额值是周期性变化的，材料的电子结构中 d 壳层电子越多，该材料的溅射产额值就越大。

2. 溅射产额与粒子能量

粒子能量大，溅射产额就高。影响溅射粒子能量的因素有三点。

1）入射离子的能量对溅射粒子的影响。增大入射离子的能量会使溅射粒子的能量相应增加。在低压强状态下，增加溅射功率是提高入射离子能量的有效途径。但是，如果压强太高，溅射原子在离开靶表面向衬底运动的过程中，就会与室内的气体分子发生碰撞，降低溅射原子的能量。

2）入射离子质量对溅射粒子的影响。质量大的正离子产生的溅射原子具有大的平均能量。

3）正离子入射角对溅射粒子能量的影响。入射角为 60°轰击靶表面，溅射粒子能量会提高。

磁控溅射的缺点是不能制备绝缘体膜，而且磁控电极中采用的不均匀磁场会使靶材产生显著的不均匀刻蚀，导致靶材利用率低，一般仅为 20% ~30% 。

三、设备型号

（一）薄膜沉积设备

薄膜沉积设备主要有化学气相沉积炉、磁控溅射沉积炉、蒸发沉积炉

1. PECVD-800 型高真空等离子体增强化学气相沉积炉

PECVD-800 型高真空等离子体增强化学气相沉积炉主要由沉积室、分子泵高真空系统、电源、生长机体载体及温控系统、独立排气和生长压力调节系统、冷却循环水辅助设备等组成。本装置能用于沉积半导体行业生产所需的 SiNx/SiO_2/ZnO/ZnS 薄膜或聚合物薄膜等。图 8-6 为 PECVD-800 型高真空等离子体增强化学气相沉积炉。表 8-1 为其主要技术指标。



图 8-6　PECVD-800 型高真空等离子体增强化学气相沉积炉

表 8-1　主要技术指标

溅射室尺寸	ϕ800mm × H600mm
抽速	从大气抽到 10^{-3} Pa 小于或等于 20min
极限真空	8.0×10^{-5} Pa
基片台尺寸	≤400mm
基片台运动	转速为 0 ~20r/min，磁流体密封
衬底温度	室温 ~500℃可控可调
电源	射频电源

（续）

真空室结构	立式前开门结构，后置抽气系统，双层水冷
真空系统	分子泵 + 机械泵
控制系统	自动抽真空
报警及保护	对泵、阴极等的缺水、过电流、过电压、断路等异常情况进行报警并执行相应保护措施
选购件	冷却循环水机

2. JCP-1600 高真空磁控溅射镀膜机（柱状靶 + 矩形靶）

图 8-7 为 JCP-1600 高真空磁控溅射镀膜机。其应用特点如下：

1）适合于各种中小尺寸工件的镀膜应用。

2）工艺温度可控可调。

3）可加负偏压、等离子清洗等以增强膜层与基底的结合力。

4）工件转架结构为公、自转结构。

5）程序控制镀膜过程，保证控制精度、可靠性和重复性，极大地提高膜层质量。

6）满足安全方面的技术和要求。



图 8-7 JCP-1600 高真空磁控溅射镀膜机

表 8-2 为 JCP-1600 高真空磁控溅射镀膜机的主要技术指标。

表 8-2 JCP-1600 高真空磁控溅射镀膜机的主要技术指标

真空室内净尺寸（不锈钢，前开门）	ϕ1600mm × H1800mm
有效镀膜空间	ϕ1300mm × H1600mm
观察窗	ϕ120mm
控制系统	PLC + HMI，自/手动控制可选
极限真空度	5.0×10^{-4} Pa
恢复抽真空时间	从大气抽到 5.0×10^{-3} Pa 的时间小于 20min
工件架	24 轴，自转架公/自转，0 ~ 20r/min，可加热烘烤至 250℃，可选配负偏压或等离子清洗
矩形磁控溅射靶尺寸	1200mm × 200mm，2 套
柱状旋转靶	ϕ165mm × 1200mm，1 套
溅射电源	逆变直流、中频溅射电源，DC 60/40kV · A
数显复合真空计	1 套
气体质量流量控制	3 ~ 4 路
强制水冷保护系统	1 套
镀膜周期	根据工艺而定
总电功率	120kV · A（三相五线制，380 ~ 400V，50Hz）
冷却水压和进水温度	水压 > 4.0kg/cm^2，水温 < 25℃

3. JCPF-1600 高真空多靶磁控溅射镀膜机

本系统为单室立式方形结构的高真空双靶位多功能磁控溅射镀膜设备，可用于在较大面积基片上均匀沉积纳米级单层及多层功能膜，如各种金属膜、透明导电膜、介质膜等。图 8-8 为 JCPF-1600 高真空多靶磁控溅射镀膜机。

表 8-3 为 JCPF-1600 高真空多靶磁控溅射镀膜机的主要技术指标。

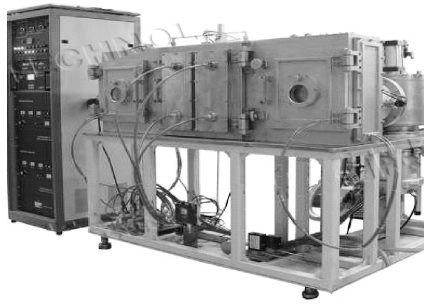


图 8-8　JCPF-1600 高真空多靶磁控溅射镀膜机

表 8-3　JCPF-1600 高真空多靶磁控溅射镀膜机的主要技术指标

镀膜方式	直流/中频/射频磁控溅射镀膜
制膜种类	金属膜(包括铁、钴、镍等磁性膜)、半导体膜、化合物膜、多层膜、反应膜等
制膜大小	200mm×200mm
腔室大小	*L*1600mm×*W*240mm×*H*460mm
溅射靶	矩形平面磁控靶 2 只
溅射电源	双极脉冲中频电源 2 台(可选配直流溅射电源、射频电源)
真空室结构	侧开门结构,后置抽气系统
极限真空	8.0×10^{-5}Pa
膜厚不均匀性	≤ ±5%
工件烘烤温度	室温～300℃可调可控(PID 控温)
工件运动方式	往复运动
工艺气体	2 路气体流量控制及显示系统
报警及保护	对泵、靶等缺水、过电流、过电压、断路等异常情况进行报警并执行相应保护措施
控制方式	自动抽真空,可选配 PLC 手/自动控制或计算机控制
选购件	离子清洗、循环水机、膜厚监控仪

4. TEMD-600/1000 电子束蒸发沉积炉

TEMD-600/1000 电子束蒸发沉积炉具有真空度高、抽速快、基片装卸方便的特点，配备 e 型电子束蒸发源和电阻蒸发源。烘烤采用管状加热器，PID 自动控温，具有成膜均匀、放气量小和温度均匀的优点，可用于制备光学薄膜、导电薄膜、半导体薄膜、铁电薄膜等。图 8-9 为 TEMD-600/1000 电子束蒸发沉积炉。

表 8-4 为 TEMD-600/1000 电子束蒸发沉积炉的主要技术指标。



图 8-9　TEMD-600/1000 电子束蒸发沉积炉

表 8-4 TEMD-600/1000 电子束蒸发沉积炉的主要技术指标

真空腔室尺寸	ϕ1000 mm × 1000mm
真空腔室材料	优质不锈钢
衬底加热	最高 500℃,PID 温度控制及调节
基片架(不锈钢)	球罩形,转速可调
真空机组	复合分子泵机组/扩散泵机组
E-型电子枪	功率为 6kW 或 10kW(分别对应 4″、6″坩埚)
数显复合真空计	一高两低
极限真空	8.0×10^{-4} Pa
反溅清洗	DC/RF(可选)
膜厚监控	晶振膜厚监控仪(选配)
控制系统	自/手动控制可选
自动报警保护系统	对泵、电极等缺水、过电流过电压、断路等异常情况进行报警并执行相应保护措施

5. ZHD-400 高真空电阻蒸发沉积炉

ZHD-400 高真空电阻蒸发沉积炉中，由主阀、分子泵、机械泵组成高真空抽气系统，真空室为优质不锈钢腔室，含 3 对水冷蒸发电极和 1 台 2kW 蒸发电源。基片台旋转速度为 0 ~ 30r/min 可调，加热温度为 500℃以内可调可控。可选用全新的工控机自控控制。它具有真空度高、抽速快、基片装卸方便的特点。图 8-10 为 ZHD-400 高真空电阻蒸发沉积炉。

表 8-5 为 ZHD-400 电阻蒸发沉积炉的主要技术指标。



图 8-10 ZHD-400 高真空电阻蒸发沉积炉

表 8-5 ZHD-400 电阻蒸发沉积炉的主要技术指标

溅射室尺寸	ϕ400mm × H400mm,不锈钢真空腔体
基片台尺寸	ϕ120mm
工件运动方式	磁流体密封,公转无级变速可控可调(0 ~ 30r/min)
蒸发电极	标配 3 对
蒸发电源	3 台
真空系统	分子泵 + 机械泵
极限真空	5.0×10^{-5} Pa
抽速	从大气抽到 10^{-3} Pa 小于或等于 20min
控制方式	自动抽真空
报警及保护	对泵、电极等缺水、过电流过电压、断路等异常情况进行报警并执行相应保护措施
选购件	多对电极,冷却循环水机

6. TSU-600 多功能沉积炉（磁控溅射/多弧离子镀/电阻蒸发）

TSU-600 多功能沉积炉集多靶磁控溅射、多弧离子镀、蒸发镀三功能于一体，主要由镀膜腔室、圆形平面靶、矩形靶、多弧靶、水冷蒸发电极、溅射电源、多弧电源、蒸发电源、偏压电源、离子源、分子泵系统、旋转基片台、管状加热器、气路系统、水路系统、全新 PLC 电气控制系统等组成。该设备具备多靶共溅射功能，实现一机多用，可制备导电膜、半导体膜、绝缘膜等单层或多层膜。整机结构紧凑，功能全，操作方便，抽真空速度快，可用于实验室开发研制各种超硬、耐磨、抗腐蚀、特殊功能膜等。图 8-11 为 TSU-600 多功能沉积炉。



图 8-11　TSU-600 多功能沉积炉

表 8-6 为 TSU-600 多功能沉积炉的主要技术指标。

表 8-6　TSU-600 多功能沉积炉的主要技术指标

溅射室尺寸	ϕ600mm × H600mm
可镀空间尺寸	ϕ300mm × H300mm
基片台运动方式	公/自转,0 ~ 20r/min,磁流体密封
磁控靶	圆形或矩形磁控靶
多弧靶	ϕ65mm
蒸发源	预留蒸发电极
制膜种类	工具镀膜,装饰镀膜
真空室结构	立式前开门结构,后置抽气系统,双层水冷
真空系统	分子泵 + 机械泵
极限真空	8×10^{-5} Pa
报警及保护	对泵、靶等缺水、过电流过电压、断路等异常情况进行报警并执行相应保护措施
选购件	冷却循环水机

7. 超高真空磁控溅射离子镀及电子束蒸发沉积炉

本系统为双室立式圆柱形结构的超高真空磁控溅射离子镀及电子束蒸发镀膜设备，可用于开发纳米级单层及多层功能膜，如各种金属膜、半导体膜、介质膜等。它主要由磁控离子镀膜室、多功能蒸发镀膜室、磁控溅射靶、孪生靶（中频）电源、射频溅射电源、多弧靶、多弧电源、电子枪、蒸发电极、蒸发电源、真空获得系统、真空测量系统、电控系统、气路系统、冷却循环系统等组成。图 8-12 为超高真空磁控蒸发沉积炉。

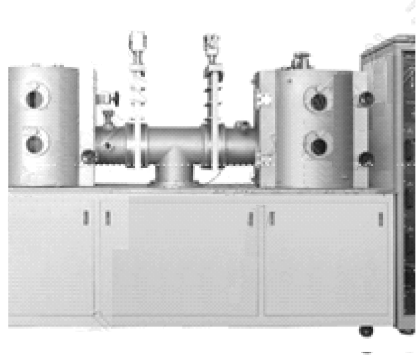


图 8-12　超高真空磁控蒸发沉积炉

表 8-7 为电子束蒸发沉积炉的主要技术指标。

表 8-7 电子束蒸发沉积炉的主要技术指标

型号	TSU-650
内腔大小	ϕ650mm × H700mm
系统构成	磁控离子镀膜室和多功能蒸发镀膜室
矩形平面磁控靶	1 只,2kV · A 射频溅射电源 1 台
系统极限真空	极限真空度在 8.0×10^{-5}Pa 以上,真空室在工作状态可达 8.0×10^{-4}Pa,从大气开始达到工作状态的抽真空时间不大于 50min
样品台	样品台可加热,室温 ~400℃,一次放进 1 ~3 块(L150mm × W100mm)样品
蒸发源	3 对蒸发电极,2kV · A 蒸发电源 3 台,一套 10kW 电子枪系统
控制系统	工业级专用计算机,采用 Windows XP 操作系统
供电	三相五线制,AC 380V,功率≥40kV · A
占地面积	长 × 宽 × 高:5000mm × 2000mm × 2000mm

8. 真空化学气相沉积炉

真空化学气相沉积炉由全真空专用不锈钢腔体、分子泵高真空系统、生长机体、温控系统、独立排气、生长压力调节系统、冷却循环水辅助设备组成。整机结构紧凑,操作方便,抽真空速度快,控制系统采用逻辑按钮手支控制与工控机自控控制可选,可制作 SiO_2、Si_3N_4、a-Si、多晶 Si、SiC、Ti-Si、GaAs、GaSb 等薄膜。图 8-13 为真空化学气相沉积炉。



图 8-13 真空化学气相沉积炉

表 8-8 为真空化学气相沉积炉的主要技术指标。

表 8-8 真空化学气相沉积炉的主要技术指标

沉积类型	TiC、SiC、SiO_2、a-Si
电源	射频电源,带正向功率和反射功率计指示,带匹配器
加热系统	平板式双反应室系统,带加温和匀气系统
工作温度	100 ~1100℃
基片台尺寸(ϕ)	1 ~4in、6in、8in
基片台转速	0 ~20r/min
控温精度	±1℃
极限真空	8.0×10^{-5}Pa
密封系统	磁流体密封
水冷、气路系统	冷却水循环机、无噪声气泵
报警及保护措施	对缺水、过电流、过电压、断路等异常情况进行报警并执行相应保护措施
工作腔体	不锈钢
真空系统	分子泵、机械泵、扩散泵(选配)
气氛系统	浮子流量计
记录装置	无纸记录仪

9. 砷化镓单晶炉系统

表 8-9 为砷化镓单晶炉系统的主要技术指标。

表 8-9　砷化镓单晶炉系统的主要技术指标

结构型式	单管水平式,加热炉体可左右移动 适合 2 ~ 4in 晶体生长工艺(可定制)
炉体有效加热长度	1600mm
最高工作温度	1300℃
恒温区精度(静态闭管)	±0.5℃
升温速率(室温 ~ 1260℃)	斜变升温速率可控制在 0 ~ 15℃/min
降温(1300 ~ 900℃)	0 ~ 5℃/min
供电电源	三相五线制,AC 380(1 ± 10%)V 50Hz

10. 双工位脱氧炉

图 8-14 为双工位脱氧炉。它是生长工艺配套设备。

表 8-10 为双工位脱氧炉的主要技术指标。

表 8-10　双工位脱氧炉的主要技术指标

常用工作温度	300 ~ 1000℃
使用温度	0 ~ 1200℃
控制精度	≤ ±1℃
恒温区长度	600mm
升温功率	≤10kV · A
保温功率	≤5kV · A
开机重复性	≤ ±1℃
冷态真空度	5×10^{-3} Pa
石英真空室内径	根据用户要求设计
环境温度	-10 ~ 45℃
相对湿度	≤85%
供电电源	三相五线制,380(1 ± 10%)V,50Hz

11. 加热炉

加热炉是生长工艺配套设备。图 8-15 为加热炉。

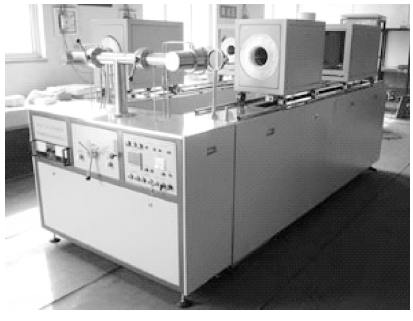


图 8-14　双工位脱氧炉

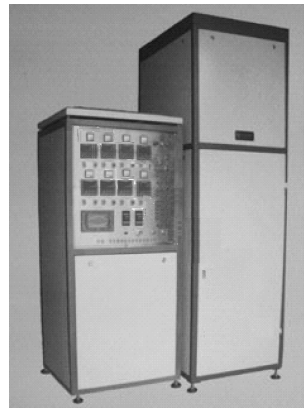


图 8-15　加热炉

表 8-11 为加热炉的主要技术指标。

表 8-11 加热炉的主要技术指标

结构型式	立式,加热炉体不移动 适合 2 ~ 6in 晶体生长工艺(可定制)
炉体有效加热长度	700 ~ 1000mm
最高工作温度	1300℃
恒温区精度(静态闭管)	±0.5℃
升温速率(室温 ~ 1260℃)	斜变升温速率可控制在 0 ~ 15℃/min
降温(1260℃ ~ 900℃)	0 ~ 5℃/min
供电电源	三相五线制,380(1 ± 10%)V,50Hz

12. PECVD 炉

图 8-16 为 PECVD 沉积炉。



图 8-16 PECVD 沉积炉

表 8-12 为 PECVD 炉的主要技术指标。

表 8-12 PECVD 炉的主要技术指标

温度使用范围	150 ~ 400℃
极限真空度	优于 1Pa
压力调节范围	13 ~ 300Pa 连续可调,闭环控制
射频电源	400kHz 连续可调
温区长度(150 ~ 400℃)	1000mm
温区稳定性(400℃)	±2℃
温区稳定性(<400℃)	±3℃
温度梯度	0 ~ 30℃/1000mm 可调
沉积速率	30nm/min
深层折射率	1.9 ~ 2.2
最大可控升温速度	15℃/min
最大降温速度	5℃/min

PECVD 炉的主要特点如下:

1) 用工业微机使工艺时间、温度、气体流量、阀门动作、反应室压力实现全自动

控制。

2）采用进口压力控制系统，闭环系统，稳定性高。

3）采用进口耐腐蚀不锈钢管件、阀门，确保气路的气密性。

4）具有完善的报警功能及安全互锁装置。

5）具有超高温报警及欠温报警、MFC 报警、反应室压力报警、RF 报警、高压空气压力报警、N2 压力报警、水流报警等。

6）工艺过程完全不受外界环境干扰，工艺质量完全可控；有毒害尾气定向收集、集中处理排放，更加安全、环保。

7）装片数量为 250 片每炉管。

8）净化台洁净度为 100 级（10000 级厂房）。

9）自动化程度：自动控制温度及工艺过程。主控温控模块可达到 ±0.25℃ 的控制精度。

10）送取片方式：悬臂式推拉舟。推拉系统采用光杠传动系统，比丝杠传动系统运行更平稳，避免了推拉舟长时间运行后由于丝杠变形引起的推拉舟的震动；可防止突然断电时，丝杠抱死，拖不出炉膛。

13. 大型平板 PECVD 氮化硅覆膜系统

1）图 8-17 为大型平板 PECVD 氮化硅覆膜系统。

2）表 8-13 为大型平板 PECVD 氮化硅覆膜系统的主要技术指标。

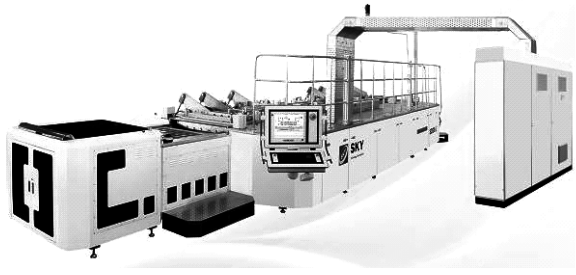


图 8-17　大型平板 PECVD 氮化硅覆膜系统

表 8-13　大型平板 PECVD 氮化硅覆膜系统的主要技术指标

技术指标	片间均匀性	片内均匀性	框内
膜厚	±4%	±2.5%	±4%
折射率	±1.5%	±1.5%	±1.5%

	回填气体	运行功率	微波源	预热时间
SD30 型	氮气	80kW	4 对	75s
SD50 型	压缩空气	90kW	6 对	110s

	人员/人	腔体/个	工位/位	设备长/m	控制方式
SD30 型	4	3	9	12	全自动
SD50 型	6	5	13	18	全自动

3）应用领域。SD 系列大型平板 PECVD 氮化硅覆膜系统是光伏新型可再生能源行业的光学薄膜制备设备，通过微波在一个同轴的石英管系统来激发等离子体。内置同轴的石英管与微波发射器相接后在石英管上进行表面微波放电，将氨气离化，轰击硅烷，产生的氮化硅分子沉积在样品的表面上：$SiH_4 + NH_3 \rightarrow SixNy + H_2$。适用于单晶硅光伏电池生产线和多晶硅光伏电池生产线，数十项专利技术，完全自动化网络式生产，为用户提供便捷、高效、

现代化的服务型产品，使光伏电池产品更加稳定、可靠。

4）设备说明：

最优的性价比：五腔体十三工位设计，产能为 50MW。

更优的运行成本：稳定能耗 90kW，稳定工艺。

低碎片率：＜0.1%。

均匀性：膜厚＜4%，折射率＜1.5%。

低维护率：闭环水、电、气安全监控系统。

人性化操作方式：全自动智能学习型人机界面。

多层次操作：权限式操作管理。

（二）导电玻璃镀膜设备

1. 导电玻璃镀膜生产线

1）电池板镀前电极或背电极。

2）最大基板尺寸：2200mm×2800mm。

3）设备主要组成：

① 真空室：304 不锈钢，立式，外壁通冷却水。

② 真空系统：分子泵抽气系统。

③ 镀膜系统：平面或旋转阴极，配直流、中频磁控溅射电源。

④ 烘烤系统：不锈钢管状加热器、均热板。

⑤ 充气系统：高精长气体质量流量计。

⑥ 电气控制系统：工控机及 PLC 自动控制。

图 8-18 为导电玻璃镀膜生产线。

2. 连续镀膜生产线

1）最大基板尺寸：2540mm×3660mm。

2）真空室数量：7 室。

3）真空系统：分子泵抽气系统。

4）镀膜系统：平面靶/圆柱旋转靶、直流/中频磁控溅射。

5）离子轰击、加热系统、在线检测。

图 8-19 为连续镀膜生产线。

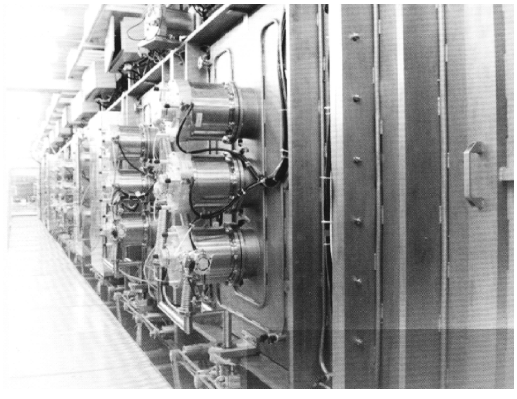


图 8-18　导电玻璃镀膜生产线



图 8-19　连续镀膜生产线

3. 卷绕真空镀膜机

1）结构：方形。

2）卷绕材料：不锈钢、PE、PVC、PC。

3）材料最大宽度：1500mm。

4）最大卷绕速度：15m/min。

5）常用镀膜速度：1～10m/min。

6）镀膜系统：磁控溅射。

7）极限真空：7×10^{-4}Pa。

8）控制：工业计算机＋PLC。

图 8-20 为卷绕真空镀膜机。

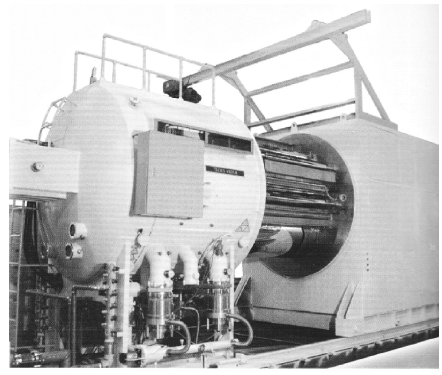


图 8-20　卷绕真空镀膜机

第二节　层 压 设 备

一、SN233J-I 全自动太阳电池组件层压机

1）适用范围：双玻组件层压。

2）功能：分进料段、层压段、出料段，预热、层压；层压、固化；层压、冷却。

3）主要技术参数：

① 有效层压面积：2200mm×3600mm。

② 顶针布局：32 位顶针。

③ 台面工作温度：室温～180℃（可调）。

④ 台面温控精度：≤±1℃。

⑤ 台面温度均匀性：±1℃。

⑥ 极限真空：1mbar（1min 内）。

⑦ 真空泵抽真空速率：70L/s。

⑧ 供气压力：0.6～0.8MPa。

⑨ 工作功率：40～45kW。

⑩ 整机功率：120kW。

⑪ 电源：380V，三相五线制，50Hz。

⑫ 主机尺寸：17400mm×3300mm×1850mm。

图 8-21 为 SN233J-I 全自动太阳电池组件层压机。

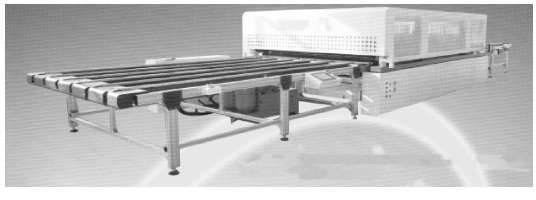


图 8-21　SN233J-I 全自动太阳电池组件层压机

二、BD-A1 全自动油温式层压机

1）适用范围：双玻组件层压。

2）型号参数：

规格型号	层压面积
BD-A1-2400×2200	2400mm×2200mm
BD-A1-3200×1800	3200mm×1800mm
BD-A1-2850×2200	2850mm×2200mm
BD-A1-3600×2200	3600mm×2200mm

3）主要技术参数：

① 工作温度：室温～180℃（可调）。

② 温控精度：≤±1℃。

③ 温度均匀性：±3℃。

④ 极限真空：10Pa。

⑤ 真空泵抽真空速率：70L/s。

⑥ 层压压力：0.01～0.1MPa。

⑦ 最大功率：65kW，工作功率为16～24kW。

⑧ 供气压力：0.7～0.8MPa。

⑨ 压缩空气流量：0.4～0.8m^3/min。

⑩ 进出料速度：0.16 m/s，连续可调。

⑪ 开盖方式：液压直起式。

⑫ 电源：380V，三相四线制。

图8-22为BD-A1全自动油温式层压机。

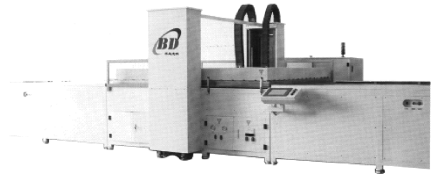


图8-22 BD-A1全自动油温式层压机

三、NST-Y全自动数控一体层压机

1）层压面积：3600mm×2200mm。

2）主要技术参数：

① 结构形式：SD320高温导热油加热、主机一体化设计。

② 传送：入料机、主机、出料机传送带无限循环，运行方向任意，0～300mm/s。

③ 升温速率：常温加温到135℃需50～60min。

④ 温度均匀性：±1℃。

⑤ 真空速率：200L/s。

⑥ 极限真空：10Pa。

⑦ 导热油容量：170L。

⑧ 导热油压力：<0.3MPa。

⑨ 开盖方式：液压开盖。

⑩ 最大开盖高度：200mm。

⑪ 最大功率：48kW。

⑫ 工作功率：20kW。

⑬ 电源：380V，三相四线制。

⑭ 设备重量：15.8t。

⑮ 外形尺寸：14000mm×2800mm×1380mm。

图 8-23 为 NST-Y 全自动数控一体层压机。

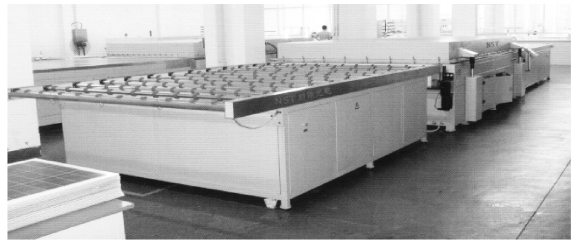


图 8-23　NST-Y 全自动数控一体层压机

第三节　激光刻膜机

一、GSF-P 激光刻膜机

1）应用领域：非晶硅、碲化镉、背电极膜等的激光刻膜。

2）产品特点：

① 光纤耦合激光器，四光路同步输出。

② 高速气浮工作台，膜面朝上运行。

③ 自动进出料，自动上下料。

④ 自动识别跟踪定位，自动温度补偿。

⑤ 直线电动机驱动。

⑥ 静态显示，动态观察。

3）主要技术参数。表 8-14 为激光刻膜机的主要技术参数。

表 8-14　激光刻膜机的主要技术参数

型　　号	GSF-P1	型　　号	GSF-P1
激光波长/nm	1064	重复定位精度/μm	±10
有效加工尺寸	1100mm×1400mm	运动直线度	±10μm/1000mm
最大运行速度/(mm/s)	2000	刻度膜宽度/μm	30～60
平均刻膜速度/(mm/s)	800～1500	三线外沿总宽度/μm	300～400

图 8-24 为 GSF-P 激光刻膜机。

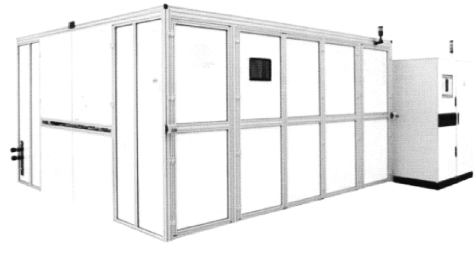


图 8-24　GSF-P 激光刻膜机

二、YMG-5D 激光刻蚀机

1）应用领域：非晶硅、碲化镉、背电极膜等刻膜，电池绝缘清边。

2）产品特点：

① PLC 智能控制，计算机通信接口。

② 双高倍 CCD 视觉系统。

3）主要技术参数。表 8-15 为激光刻蚀机的主要技术参数。

表 8-15 激光刻蚀机的主要技术参数

型号	YMG-5D1064	YMG-5D532
激光物质	Nd^{+3}:YV04	Nd^{+3}:YV04
激光波长/nm	1064	532
调制频率/kHz	1～200	1～100
激光功率/W	20	7
光束发射角/mrad	≤2.0	≤2.0
脉宽/ns	35	35
重复定位精度/μm	±10	±10
刻膜速度/(mm/s)	800～1500	800～1500
刻蚀项目	TCO:SnO_2、ZnO	非晶硅、绝缘清边
最大工件尺寸	1400mm×1100mm	1400mm×1100mm
刻膜宽度/μm	30～60	30～60
三线总宽/μm	300～500	300～500
冷却方式	水冷却	空气冷却
电源	AC 380(1±10%)V,50/60Hz	AC 380(1±10%)V,50/60Hz
外形尺寸	4500mm×2500mm×1700mm	4500mm×2500mm×1700mm
净重/kg	6000	6000

图 8-25 为 YMG-5D 激光刻蚀机。

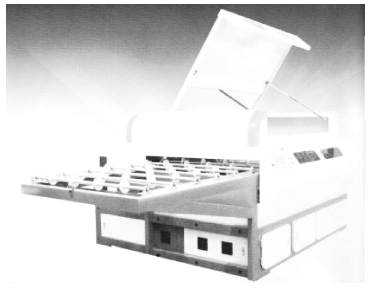


图 8-25 YMG-5D 激光刻蚀机

第九章　薄膜太阳电池材料

薄膜太阳电池所用材料有衬底用材、各种半导体化合物、各种气体、胶、接线盒、电线电缆等。太阳电池长期暴露在阳光下，在各种恶劣气候的侵袭下，要求仍能安全正常工作，因此对整个系统的零部件都有不同于普通器材的要求。

第一节　衬 底 用 材

衬底用材有光伏玻璃、塑料、不锈钢等。

一、光伏玻璃

光伏玻璃主要是指用于太阳能光伏发电和太阳能光热组件的封装或面板玻璃。用于太阳能光伏发电组件的光伏玻璃又分为晶体硅太阳电池组件用和薄膜太阳电池组件用两类，前者主要是使用超白压延玻璃，而后者主要是使用超白浮法玻璃。薄膜太阳电池组件是用两块玻璃将电池夹在一起的，有面板玻璃与底玻璃之分，两者的要求是不一样的。直接接受阳光照射的是面板玻璃，面板玻璃也称为衬底、基体、基板、盖板，薄膜太阳电池是直接做在面板玻璃上的，做好后再压上一块玻璃作底，两块玻璃之间涂上胶，经过热压，使两块玻璃牢固粘接，将电池封住，空气不能进入。面板玻璃直接接受太阳光的照射和进入，太阳电池能接收多少太阳光，第一道关就取决于面板玻璃。

1. 薄膜太阳电池面板玻璃的要求

1）对太阳光的透过率要高，吸收率、反射率要低。

2）有较高的机械强度及硬度，能经受得起风压、积雪、冰雹、热应力、小石子等外力的侵袭。

3）在雨水和弱酸弱碱环境中，对有害气体有一定的耐腐蚀性能。

4）长期暴露在大气和阳光下，性能不会发生严重衰退。

5）膨胀系统与相结合材料匹配。

最早用的太阳玻璃是普通的窗玻璃、钠玻璃、硼硅玻璃（耐温600℃）、钠钙玻璃、钢化玻璃等，随着技术的进步，人们发现这些玻璃做底玻璃是可以的，做面板玻璃就不能适合要求了，因其在透过率、吸收率、反射率方面不能满足电池组件高效率的要求。

2. 太阳玻璃的分类

太阳玻璃分为三种类型：厚度类、镀膜类及低铁超白类。

（1）厚度类　厚度类的厚度范围一般有三种：

1）普通薄板玻璃厚2～7.5mm用于各种太阳电池的衬底。

2）超薄平板玻璃厚0.1～1.5mm，用于太阳能发电反射的玻璃镜、太阳电池的玻璃盖板（罩）以及电子工业的平面显示器基板等。

3）无碱极超薄玻璃厚度≤0.1mm，用于太空太阳电池玻璃罩（玻璃盖玻片），也是电子工业各种平面显示器用基片。

（2）镀膜类　镀膜类主要是指 TCO 玻璃（Transparent Conductive Oxide Glass，透明导电氧化物薄膜玻璃）。TCO 玻璃是在平板玻璃表面通过物理或化学镀膜的方法均匀镀上一层透明的导电氧化物薄膜。物理法就是在玻璃成形中，通过喷涂工艺，直接在玻璃表面在线镀膜，物理法与化学法相比，其生产成本大幅降低，产品质量稳定。TCO 玻璃被用作太阳能薄膜电池的前电极，同时起面板作用。由于薄膜太阳电池的飞速发展，使目前光伏用 TCO 玻璃在市场上变得非常紧俏。随着国内 BIPV 的推广，非晶硅技术和 CIGS 技术的进一步成熟，国内薄膜太阳电池将面临新一轮的高速发展时期，TCO 玻璃的国内市场空间也相当可观。

光伏 TCO 玻璃的特性指标与太阳电池的输出特性密切相关，对透光率、厚度、导电能力等指标都要求苛刻，生产技术门槛较高，前几年 TCO 玻璃工艺主要掌握在国外公司手中，目前，国内企业已突破技术难关。

（3）低铁超白类　应用最广的太阳玻璃是低铁含量、高透光率玻璃，俗称超白玻璃，又称高透明玻璃、无色玻璃、低铁玻璃。薄膜面板光伏玻璃是在超白玻璃上镀 TCO 膜。超白玻璃是玻璃产品中最高档的品种，透光率高达 92% 以上，作为太阳能光热、光电转换系统的面板，可以提高光电转换效率。

超白玻璃产品主要应用于太阳电池、电子产品、高档建筑的内外装修、高档轿车玻璃、高档园艺建筑、高档玻璃家具、各种仿水晶制品等行业。

3. 超白玻璃概况

超白玻璃要求含铁量低。铁是在玻璃制造过程中，由原料本身、耐火材料或金属材质的生产设备等引入的，不可能完全避免。太阳玻璃的硅质原料中含铁量（Fe_2O_3）一般在（140～150）$\times 10^{-4}$%，是作为杂质存在的。铁杂质的存在，一方面使玻璃着色，另一方面增大玻璃的吸热率，也就降低了玻璃的透光率。目前，太阳电池玻璃的铁含量在 0.008% ～0.02% 之间。

超白玻璃的生产工艺主要有浮法和压延法两种，分别称为低铁超白浮法玻璃及低铁超白压延玻璃，生产工艺不同导致两种玻璃的用途不同。低铁超白浮法玻璃反射率较高，要经过一定的处理才能达到面板玻璃的要求。超白压延玻璃是晶硅电池所用的盖板玻璃，其铁含量较普通浮法玻璃低很多，阳光透射率可达 90% ～92%。因此，低铁超白浮法玻璃作面板玻璃成本略高，有条件应当选用低铁超白压延玻璃作为面板玻璃。

超白玻璃处于太阳电池产业链上游，世界上最早采用透明平板玻璃作衬底应用于太阳电池的是德国，当初德国科技人员将这种板状的太阳电池作为窗玻璃安装在建筑物上，它可将摄取的电能直接供住户使用，多余的电能输入电网。这种最初的太阳电池玻璃的开发利用，不久被美国、日本及欧洲一些工业发达国家所重视，他们迅速研发，加快了太阳低铁、超白太阳玻璃的应用步伐。

生产低铁太阳玻璃最早由美国福特公司玻璃厂研制成功。该公司生产低铁太阳玻璃的工艺措施是：

1）在配合料中完全去除（确保玻璃颜色一致的）红粉（即 Fe_2O_3）。

2）选择含铁量低的硅质原料，从源头上降低铁的含量。

3）减少或除去外界掺入的机械铁，因这些外来铁是通过称量和混合过程而进入窑炉熔制的。

4）在配合料中尽量少用还原剂，而利用氧化剂，因此公司为了制取低铁的太阳玻璃，在配合料中去除煤粉（还原剂），稍增加一些芒硝用量，并相应降低纯碱用量。从原料的制备起控制含铁量，一般要求原料中的 Fe_2O_3 不超过 0.015%，为了避免原料成分的波动，从原料品位、粒度、水分、仓储、运输等各个环节制定质量控制目标。

美国福特公司玻璃厂采用上述工艺措施利用浮法玻璃熔窑拉制生产了 90000m² 高透过率的低铁浮法玻璃，用于 Pasto（巴斯脱）的 10MW 太阳能电站，成功获得高的效率。该公司所生产的 90000m² 低铁太阳能浮法玻璃，厚度约为 3mm，光透过率为 89.3%。

如今，美国 PPG 公司已可生产透过率高达 92% 以上的低铁太阳能用浮法玻璃。该公司技术人员采取一系列切实有效的工艺措施，使玻璃原料中的 Fe_2O_3 含量低于英国皮尔金顿公司含量，现今 PPG 生产的低铁浮法玻璃 Fe_2O_3 含量仅为 0.0063%，玻璃白透。法国圣戈班集团是超白玻璃的主要生产商，占有世界浮法玻璃六成以上的市场，以 Saint-Gobain Glass Vision 系统著称；其他如英国的皮尔金顿、日本的旭硝子、比利时的 Glaverbel 也生产质量优异的低铁超白太阳玻璃。

4. 我国太阳玻璃产业概况

（1）产能全球第一　随着近几年太阳电池行业的高速发展，我国已连续多年成为全球最大的光伏组件生产国，2010 年为 8GW 左右，超过全球总产量的 50%。2011 年国内晶硅电池产量达到 10GW，薄膜电池产量达到 2GW，预计 2014 年全球薄膜电池产量将达到 9.5GW。太阳电池行业的发展带动了我国太阳玻璃市场的极大增长。太阳玻璃由于科技含量高，生产难度大，因此价格不菲，是普通玻璃的 5～10 倍，但是成本只不过是普通玻璃 2～3 倍，具有较高的附加值。2006 年以前，我国光伏玻璃的市场主要被国外几大玻璃公司垄断，形成了高额的垄断利润。

近年来，我国太阳玻璃生产企业不断创新，打破了国外技术和产品对我国市场的垄断，从根本上满足了我国太阳能产业对超白玻璃的高品质要求和大规模市场需求，极大地提升了我国太阳能光伏组件产品的国际竞争力。太阳玻璃产量每年以 40%～60% 的速度增长，2010 年我国太阳玻璃实际年产能约 2500 万 m²，产能已经跃居世界第一位，世界太阳玻璃制造工厂也已逐步转移到中国，在核心技术层面，我国已与欧、美等发达国家站在同一水平线上。我国生产的很多光伏玻璃还出口到世界各地。例如，台玻福建光伏玻璃有限公司出口量较多，每月出口光伏玻璃超过 100 个货柜，预计可增至 600 个货柜。其他光伏玻璃企业也以各种形式加强外贸工作，每年约有 35% 的产品销往世界各地。由于薄膜电池的转化效率各不相同，以主流的非晶硅为计算依据，折合每平方米的电池标称功率为 50W，也就是说，每 50W 的电池将使用 1m² 的 TCO 玻璃。2011 年我国光伏玻璃产量 1.3 亿 m² 以上（其中，国内 0.9 亿 m²，出口 4000 万 m²）。

我国技术较成熟的厂家有 10 多家，主要厂商包括浙江福莱特玻璃镜业股份有限公司、信义玻璃控股有限公司、中国南玻集团股份有限公司等，其所占市场份额超过一半。国内重要的平板玻璃生产企业都先后进入太阳玻璃领域，东莞南玻绿色能源产业园建有我国最大规模的太阳超白玻璃生产线。在太阳电池封装玻璃方面，信义玻璃控股有限公司拥有两条光伏玻璃生产线；上海福莱特玻璃有限公司拥有两条超白压花玻璃生产线。据中国建筑材料联合会统计，2010 年我国新增浮法玻璃生产线 34 条，增加浮法玻璃生产能力 1.3 亿重量箱，增加生产线数量和生产能力都是历年之最。截至 2011 年 3 月，我国光伏玻璃生产线达到 41

条，年产能约 13560 万 m^2，单条生产线的生产能力为 250～500t/d。青岛金晶玻璃集团目前已形成年产防眩高透高强光伏玻璃 600 万 m^2 的能力；彩虹集团投资建设的彩虹光伏玻璃项目，年产 3.2mm 规格钢化太阳能光伏玻璃 502.6 万 m^2。方兴科技集团股份有限公司生产的 ITO 导电膜玻璃为国家级高新技术产品。

我国完整的太阳能光伏产业链已经形成。以中国南玻集团股份有限公司为例，其完整的太阳能光伏产业链包括 7.9 万 t/年的超白压延玻璃、1500t/年的多晶硅、25MW 的太阳能光伏电池，目前超白压延玻璃和太阳能光伏电池都已经投产，2009 年多晶硅达产率为 30%～40%，产量为 500～600t。

光电-建筑一体化的玻璃幕墙已成为当今世界建筑业与太阳能利用相结合的发展大趋势，光电玻璃幕墙正展示出其投资价值与魅力。根据规划，“十二五”期间单位 GDP 能耗将下降 17.3%，“十三五”期间单位 GDP 能耗将下降 16.6%，这给今后光伏玻璃的大规模使用奠定了坚实基础。

（2）标准制定　我国首个太阳能行业标准《太阳电池用玻璃》，已在全国建筑用玻璃标准化技术委员会组织召开的太阳电池玻璃行业标准审查会议上获得通过，标准的内容主要涉及太阳玻璃的术语和定义、材料、技术要求、外观质量、试验方法、检验规则以及包装、标志、运输和贮存等方面的质量要求。标准中所说的材料方面，太阳电池用玻璃可以使用钢化或非钢化的压花玻璃和浮法玻璃。该标准还提出，太阳电池玻璃含铁量不得大于 0.015%，可见光透射比大于或等于 91.5%，太阳光直接透射比大于或等于 91.0%。该标准针对太阳能玻璃用硅砂的低铁特征，首先全面分析了铁在硅砂中的状态，并对太阳玻璃用硅砂的除铁提纯工艺做了较详细的阐述，包括洗矿脱泥、擦洗、重选、磁选、浮选、酸浸等。该行业标准将寻求提升到更高的平台，力争成为国家标准。2011 年 4 月，《太阳能光伏用减反射膜玻璃》行业标准已由中华人民共和国工业和信息化部正式批准立项，2012 年 6 月组织召开了审查会。

（3）存在的问题

1）超白玻璃占薄膜电池组件总成本的 20%～30%，太阳能产品价格几年内会降到火电水平，即薄膜电池组件总成本减少 2/3，如考虑到玻璃价格保持稳定，这相当于电池总成本中玻璃的因素将增加 2 倍多，超白玻璃将占薄膜电池总成本的 45%～75%，组件生产厂商是难以接受的。

2）国内企业面临产能增长过快、行业竞争加剧、部分技术难关尚未突破等问题，行业的波动性使超高的利润率无法长期延续。

3）国家淘汰玻璃落后产能的力度将进一步加大，淘汰力度可能远远超过前市场预期的 700 万重量箱，如果浮法玻璃占比提高到 90% 左右的话，将需要淘汰掉 3500 万～4000 万重量箱的格法玻璃和平拉玻璃产能。

二、塑料衬底——聚酰亚胺

聚酰亚胺是分子结构含有酰亚氨基链节的芳香杂环高分子化合物，英文名为 Polyimide（简称 PI）。聚酰亚胺是近半个世纪发展起来的芳香杂环聚合物中最主要的品种，也是使用温度最高的一类高分子材料。由于聚酰亚胺具有十分优异的综合性能，可用多途径合成，还可用多种方法加工，所以以多种多样的材料形式在航空、航天、电气、机械、微电子、化工等方面得到广泛的应用。

1. 性能

1）优异的耐热性。聚酰亚胺的分解温度一般超过 500 ℃，由联苯四甲酸二酐和对苯二胺合成的聚酰亚胺，热分解温度达到600℃，是迄今聚合物中热稳定性最高的品种之一，这主要是因为分子链中含有大量的芳香。

2）耐极低温。在 -269℃的液态氦中不会脆裂。

3）优良的力学性能。聚酰亚胺未增强的基体材料的抗张强度都在 100MPa 以上，均苯型聚酰亚胺的薄膜（Kapton）为 170Mpa 以上，而联苯型聚酰亚胺（Upilex S）达到400MPa。作为工程塑料，弹性模量通常为 3～4GPa，纤维可达到 200GPa，据理论计算，均苯四甲酸二酐和对苯二胺合成的纤维可达 500GPa，仅次于碳纤维。

4）良好的化学稳定性及耐湿热性。聚酰亚胺材料一般不溶于有机溶剂，对稀酸稳定，耐腐蚀、耐水解，有的品种经得起 2 个大气压下、120℃、500h 水煮。但采用合适工艺，也可水解，这个性能是聚酰亚胺有别于其他高性能聚合物的一个很大的特点，即可以利用碱性水解回收原料二酐和二胺，例如对于 Kapton 薄膜，其回收率可达 80%～90%。

5）热膨胀系数低。聚酰亚胺的热膨胀系数为 $2\times10^{-5}\sim3\times10^{-5}℃^{-1}$，广成热塑性聚酰亚胺为 $3\times10^{-5}℃^{-1}$，联苯型可达 $10^{-6}℃^{-1}$，个别品种可达 $10^{-7}℃^{-1}$。

6）良好的耐辐射性能。聚酰亚胺薄膜在 5×10^{9}rad 剂量辐射后，强度仍保持 86%；某些聚酰亚胺纤维经 1×10^{10}rad 剂量辐射后，其强度保持率为 90%。

7）良好的介电性能。聚酰亚胺的介电常数为 3.4 左右，引入氟，或将空气纳米尺寸分散在聚酰亚胺中，介电常数可以降到2.5 左右。介电损耗为 10^{-3}，介电强度为 100～300kV/mm，广成热塑性聚酰亚胺的介电强度为 300kV/mm，体积电阻为 1017Ω/cm。这些性能在宽广的温度范围和频率范围内仍能保持在较高的水平。

8）自熄性聚合物，发烟率低。

9）在极高的真空下放气量很少。

10）无毒。聚酰亚胺可用来制造餐具和医用器具，并经得起数千次消毒。有一些聚酰亚胺还具有很好的生物相容性，例如在血液相容性实验为非溶血性，体外细胞毒性实验为无毒。

图 9-1 为聚酰亚胺。



图 9-1　聚酰亚胺

2. 类别

（1）聚酰亚胺按结构可分成缩聚型和加聚型两种。

缩聚型芳香族聚酰亚胺是由芳香族二元胺和芳香族二酐、芳香族四羧酸或芳香族四羧酸二烷酯反应而制得的。由于缩聚型聚酰亚胺的合成反应是在诸如二甲基甲酰胺、N-甲基吡咯烷酮等高沸点质子惰性的溶剂中进行的，而聚酰亚胺复合材料通常是采用预浸料成形工艺，这些高沸点质子惰性的溶剂在预浸料制备过程中很难挥发干净，同时在聚酰胺酸环化（亚胺化）期间亦有挥发物放出，这就容易在复合材料制品中产生孔隙，难以得到高质量、没有孔隙的复合材料。因此，缩聚型聚酰亚胺已较少用作复合材料的基体树脂，主要用来制造聚酰亚胺薄膜和涂料。

由于缩聚型聚酰亚胺具有如上所述的缺点，为克服这些缺点，相继开发出了加聚型聚酰亚胺。目前获得广泛应用的主要有聚双马来酰亚胺（BMI）和降冰片烯基封端聚酰亚胺。通

常这些树脂都是端部带有不饱和基团的低相对分子质量聚酰亚胺，应用时再通过不饱和端基进行聚合。

1）聚双马来酰亚胺。聚双马来酰亚胺是由顺丁烯二酸酐和芳香族二胺缩聚而成的。它与聚酰亚胺相比，性能不差上下，但合成工艺简单，后加工容易，成本低，可以方便地制成各种复合材料制品，但其固化物较脆。

2）降冰片烯基封端聚酰亚胺树脂。其中最重要的是由 NASA Lewis 研究中心发展的一类 PMR（for insitu polymerization of monomer reactants，单体反应物聚合）型聚酰亚胺树脂。PMR 型聚酰亚胺树脂是将芳香族四羧酸的二烷基酯、芳香族二元胺和 5-降冰片烯-2、3-二羧酸的单烷基酯等单体溶解在一种尝基醇（例如甲醇或乙醇）中，该种溶液可直接用于浸渍纤维。

（2）聚酰亚胺在工程上分为两大类：一类是热塑性聚酰亚胺，如亚胺薄膜、涂层、纤维及现代微电子用聚酰亚胺等；另一类是热固性聚酰亚胺，主要包括聚双马来酰亚胺型和单体反应物聚合（PMR）型聚酰亚胺及其各自改性的产品。聚双马来酰亚胺易加工但脆性较大。聚酰亚胺的制造方式有多种。

1）合成途径。聚酰亚胺品种繁多、形式多样，在合成上具有多种途径，因此可以根据各种应用目的进行选择，这种合成上的易变通性也是其他高分子所难以具备的。

聚酰亚胺主要由二元酐和二元胺合成，这两种单体与众多其他杂环聚合物，如聚苯并咪唑、聚苯并哑唑、聚苯并噻唑、聚喹哑啉和聚喹啉等单体比较，原料来源广，合成也较容易，二酐、二胺品种繁多，不同的组合就可以获得不同性能的聚酰亚胺。

2）聚酰亚胺可以由二酐和二胺在极性溶剂，如 DMF、DMAC、NMP 或 THE/甲醇混合溶剂中先进行低温缩聚，获得可溶的聚酰胺酸，成膜或纺丝后加热至 300℃左右脱水成环转变为聚酰亚胺；也可以向聚酰胺酸中加入乙酐和叔胺类催化剂，进行化学脱水环化，得到聚酰亚胺溶液和粉末。二胺和二酐还可以在高沸点溶剂，如酚类溶剂中加热缩聚，一步获得聚酰亚胺。此外，还可以由四元酸的二元酯和二元胺反应获得聚酰亚胺；也可以由聚酰胺酸先转变为聚异酰亚胺，然后再转化为聚酰亚胺。只要二酐（或四酸）和二胺的纯度合格，不论采用何种缩聚方法，都很容易获得足够高的相对分子质量，加入单元酐或单元胺还可以很容易地对相对分子质量进行调控，给加工和成粉带来方便；很容易在链端或链上引入反应基团形成活性低聚物，从而得到热固性聚酰亚胺。

3）利用聚酰亚胺中的羧基，进行酯化或成盐，引入光敏基团或长链烷基得到双亲聚合物，可以得到光刻胶或用于 LB 膜的制备物。

4）作为单体的二酐和二胺在高真空下容易升华，因此容易利用气相沉积法在工件，特别是表面凹凸不平的器件上形成聚酰亚胺薄膜。

一般的合成聚酰亚胺的过程不产生无机盐，对于绝缘材料的制备特别有利。

3. 应用

聚酰亚胺因其耐高温、抗氧化、抗辐射、耐腐蚀、耐湿热、高强度、高模量等独特的综合性能而得到广泛的关注和应用。在众多的聚合物材料中，只有 6 种在美国化学文摘（CA）中被单独列题，聚酰亚胺即是其中之一。由此可见，聚酰亚胺在技术和商业上有着非常重要的意义。由于聚酰亚胺在性能和合成化学上的特点，在众多的聚合物中，很难找到如聚酰亚胺这样具有如此广泛的应用方面，而且在每一个方面都显示了极为突出的性能。聚酰亚胺的应用领域主要包括：

1）薄膜：是聚酰亚胺最早的商品之一，用于电动机的槽绝缘及电缆绕包材料。透明的聚酰亚胺薄膜可作为柔软的太阳电池衬底。

2）涂料：作为绝缘漆用于电磁线，或作为耐高温涂料使用。

3）先进复合材料的基体树脂：用于航天、航空器及火箭部件，是最耐高温的结构材料之一。例如美国的超音速客机飞行时表面温度达177℃，使用寿命为60000h，50%的结构材料为以热塑型聚酰亚胺为基体树脂的碳纤维增强复合材料，每架飞机的用量约为30t。

4）纤维：弹性模量仅次于碳纤维，可作为高温介质及放射性物质的过滤材料和防弹、防火织物。

5）泡沫塑料：用作耐高温隔热材料。

6）工程塑料：有热固性也有热塑型。热塑型可以模压成型也可以用注射成型或传递模塑，主要用于自润滑、密封、绝缘及结构材料。广成聚酰亚胺材料已开始应用在压缩机旋片、活塞环及特种泵密封等机械部件上。

7）粘结剂：用作高温结构胶。

8）分离膜：用于各种气体对，如氢/氮、氮/氧、二氧化碳/氮或甲烷等的分离，从空气烃类原料气及醇类中脱除水分，也可作为渗透蒸发膜及超滤膜。由于聚酰亚胺有耐热和耐有机溶剂性能，在对有机气体和液体的分离上具有特别重要的意义。

9）光刻胶：有负性胶和正性胶，分辨率可达亚微米级，与颜料或染料配合可用于彩色滤光膜，可大大简化加工工序。

10）在微电子器件中的应用：用作介电层进行层间绝缘，作为缓冲层可以减少应力、提高成品率，作为保护层可以减少环境对器件的影响，还可以对a-粒子起屏蔽作用，减少或消除器件的软误差（Soft Error）。

11）液晶显示用的取向排列剂：聚酰亚胺在TN-LCD、SHN-LCD、TFT-CD及未来的铁电液晶显示器的取向剂材料方面都占有十分重要的地位。

12）电-光材料：用作无源或有源波导光学开关材料等，含氟的聚酰亚胺在通信波长范围内为透明，以聚酰亚胺作为发色团的基体可提高材料的稳定性。

聚酰亚胺作为特种工程材料，已广泛应用在航空、航天、微电子、纳米、液晶、分离膜、激光等领域。近来，各国都在将聚酰亚胺的研究、开发及利用列入21世纪最有希望的工程塑料之一。聚酰亚胺因其在性能和合成方面的突出特点，不论是作为结构材料还是功能性材料，其巨大的应用前景已经得到充分的认识，被称为是“解决问题的能手”（Protion Solver），并认为“没有聚酰亚胺就不会有今天的微电子技术”。

4. 聚酰亚胺薄膜的主要厂商和产品特点

表9-1为聚酰亚胺薄膜的主要厂商和产品特点。

聚酰亚胺作为柔性基材，我国主要厂商有九江福莱克斯有限公司、湖北化学研究所、深圳丹邦科技股份有限公司、中山东溢新材料公司、陕西704厂研究所、广东生益科技股份有限公司等。

5. 展望

聚酰亚胺作为很有发展前途的高分子材料已经得到充分的认识，在绝缘材料和结构材料方面的应用不断扩大，在功能材料方面正崭露头角，其潜力仍在发掘中。今后的发展有两方面。

表 9-1 聚酰亚胺薄膜的主要厂商和产品特点

厂 商	商品名称	特 点
杜邦(美)	H	传统商品
	Kapton E	高尺寸稳定性,低吸湿性
钟渊化学(日)	Apical AH	传统商品
	Apical NPI	高尺寸稳定性,低吸湿性
	Apical HP	高尺寸稳定性,低吸湿性
宇部兴产(日)	UPILEX-S	高尺寸稳定性,低吸湿性
	U 液态树脂	液态聚酰亚胺
三井化学(日)	NEOFLEX	供制造无粘结剂型挠性覆铜板
新日铁化学(日)	ESPANEX	供制造无粘结剂型挠性覆铜板
日东电工(日)	JP 3000P	液态聚酰亚胺 发泡聚酰亚胺

(1) 降低成本 聚酰亚胺在发展了多年之后仍未成为更大的品种，其主要原因是，与其他聚合物比较，成本还是太高。因此，今后聚酰亚胺研究的主要方向之一仍应是在单体合成及聚合方法上寻找降低成本的途径。

1) 单体合成降低成本的途径。聚酰亚胺的单体是二酐（四酸）和二胺。二胺的合成方法比较成熟，许多二胺也有商品供应。二酐则是比较特殊的单体，除了用作环氧树脂的固化剂外主要都是用于聚酰亚胺的合成。均苯四甲酸二酐和偏苯三酸酐可由石油炼制产品重芳烃油中提取的均四甲苯和偏三甲苯用气相和液相氧化一步得到。其他重要的二酐，如二苯酮二酐、联苯二酐、二苯醚二酐、六氟二酐等已由各种方法合成，但成本十分昂贵，例如六氟二酐每千克达到上万元。中国科学院长春应用化学研究所开发的由邻二甲苯氯代、氧化再经异构化分离可以得到高纯度的 4-氯代苯酐和 3-氯代苯酐，以这两种化合物为原料可以合成一系列二酐，其降低成本的潜力很大，是一条有价值的合成路线。

2) 聚合降低成本的途径。目前所使用的二步法、一步法缩聚工艺都使用高沸点的溶剂，非质子极性溶剂价格较高，还难以除尽，最后都需要高温处理。PMR 法使用的是廉价的醇类溶剂。热塑性聚酰亚胺还可以用二酐和二胺直接在挤出机中聚合造粒，不再需要溶剂，可以大大提高效率。用氯代苯酐不经过二酐，直接和二胺、双酚、硫化钠或单质硫聚合得到聚酰亚胺则是最经济的合成路线。

(2) 加工 聚酰亚胺的应用面是如此之广，对于加工也是有多种多样的要求，例如高均匀度的成膜、纺丝、气相沉淀、亚微米级光刻、深度直墙刻蚀、大面积大体积成型、离子注入、激光精度加工、纳米级杂化技术等都为聚酰亚胺的应用开辟了广阔的天地。

三、金属衬底

金属衬底有不锈钢、钼、铜、铝、钛，常规金属材料表面粗糙度较大，在几百到几千纳米之间，而玻璃的低于 100nm。粗糙表面易形成小的颗粒，产生更多的缺陷；尖峰可穿过电池吸收层，导致 pn 结短路；沉积时杂质会从衬底向沉积膜扩散。

因此，太阳电池用金属衬底材料纯度要足够高，表面粗糙度控制在 Ra0.05 ~ 0.2μm，即 50 ~ 200nm。

第二节　各种半导体材料

太阳电池用的半导体材料有硅、锗、铟、镓、硒、砷、碲、镉等。

一、硅

1. 概况

符号	Si
原子属性	类金属
密度（固态）/(g/m^3)	2.33
地壳含量	25.8%
原子量	28.0855
电子在每能级的排布	2，8，4
氧化价（氧化物）	4（两性的）
晶体结构	面心立方
摩尔体积/(m^3/mol)	1.206×10^{-5}
汽化热/(kJ/mol)	384.22
熔化热/(kJ/mol)	50.55
蒸气压/Pa（1683K）	4.77
电负性/(鲍林标度)	1.90
比热容/[J/(kg·K)]	700
电导率/Ω·m	2.52×10^{-4}
第一电离能/(kJ/mol)	786.5
第二电离能/(kJ/mol)	1577.1
第三电离能/(kJ/mol)	3231.6
第四电离能/(kJ/mol)	4355.5
第五电离能/(kJ/mol)	16091
第六电离能/(kJ/mol)	19805
第七电离能/(kJ/mol)	23780
第八电离能/(kJ/mol)	29287
第九电离能/(kJ/mol)	33878
第十电离能/(kJ/mol)	38726
同位素	已发现的硅同位素共有 12 种，包括硅 25 至硅 36，其中只有硅 28、硅 29、硅 30 是稳定的，其他同位素都带有放射性

2. 性状

（1）物理性状　硅是一种半导体元素，元素符号为 Si，位于元素周期表的第三周期第四主族，原子序数为 14，熔点为 1416℃ ±4℃，沸点为 3145℃。它在常温（300K）下是具有灰色金属光泽的固体，属脆性材料。硅晶体的晶体结构是金刚石型，有 9 个反映对称面、6 条二次旋转轴、4 条三次旋转轴和 3 条四次旋转轴，其全部对称要素为 3L44LS6L 9PC。如

果加压到1.5GPa，硅晶体就会发生结构变化，由金刚石型结构转变为面心立方结构，此时的晶体常数为0.6636nm。

（2）化学性状　硅的原子价主要为4价，其次为2价，在常温下它的化学性质稳定，不溶于单一的强酸，易溶于碱，易于形成稳定的热氧化膜，在平面型硅器件制造中可以用氧化膜实现pn结表面钝化和保护，还可以形成金属-氧化物-半导体结构，制造MOS场效应晶体管和集成电路；在高温下化学性质活泼，能与许多元素化合。

硅在自然界中没有单质状态存在，基本上以氧化态存在于硅酸盐或硅石中，其表现形态为各种各样的岩石，如花岗岩、石英岩、长石、云母、黏土、橄榄石、角闪石等，都是硅酸盐类；水晶、玛瑙、碧石、蛋白石、石英、沙子以及燧石等，都是硅石。硅是地壳中赋存最高的固态元素，其含量约占地壳质量的25.8%，仅次于氧元素，居第二位。

（3）电学性状　硅材料是应用最广泛的、最重要的元素半导体材料，具有其他元素不具有的一些特性，即具有优良的半导体电学性质，在室温下它的禁带宽度为1.12eV，本征载流子浓度为1.45×10^{10}个/cm^3，载流子迁移率较高，电子迁移率为1350cm^2/(V·s)，空穴迁移率为480cm^2/(V·s)，本征电阻率在室温（300K）下高达$2.3\times10^5\Omega\cdot cm$，掺杂后电阻率可控制在$10^4\sim10^{-4}\ \Omega\cdot cm$的宽广范围内，能满足制造各种器件的需要。硅单晶的非平衡少数载流子寿命较长，在几十微秒至1ms之间，热导率较大，这些优良的半导体电学性质使pn结具有良好特性，使硅器件具有耐高压、反向漏电流小、效率高、使用寿命长、可靠性好、热传导好，并能在200℃高温下运行等优点。

（4）分类　硅材料有多种形态，按晶体结构可分为单晶硅、多晶硅和非晶硅。单晶硅材料是指硅原子在三维空间有规律周期性的不间断排列，形成一个完整的晶体材料，材料性质体现各向异性，即在不同的晶体方向各种性质都存在差异。多晶硅材料是指由两个以上尺寸不同的单晶硅组成的硅材料，它的材料性质体现的是各向同性。非晶硅材料是指硅原子在短距离内有序排列而在长距离内无序排列的硅材料，其材料的性质显示各向同性。

3. 用途

1）一种重要的半导体材料。单晶硅具有准金属的物理性质，有较弱的导电性，其电导率随温度的升高而增加，有显著的半导电性。超纯的单晶硅是本征半导体。在超纯单晶硅中掺入微量的Ⅲ A族元素（如硼）可提高其导电的程度，而形成p型硅半导体；如掺入微量的ⅤA族元素（如磷或砷）也可提高导电程度，形成n型硅半导体、n型和p型半导体结合在一起组成pn结，就可做成太阳电池，将辐射能转变为电能。单晶硅太阳电池的性能稳定，转换效率高，体积小，重量轻，可作为太空航天器上的电源。美国的大型航天器——太空实验室上就安装有4块太阳电池帆板，它们是由147840块8cm^2大小的单晶硅太阳电池排列组成的，发电功率大约为12kW。

2）金属陶瓷、宇宙航行的重要材料。将陶瓷和金属混合烧结，制成金属陶瓷复合材料，它耐高温，富韧性，可以切割，既继承了金属和陶瓷各自的优点，又弥补了两者的先天缺陷，可用于军事武器的制造。第一架航天飞机“哥伦比亚号”能抵挡住高速穿行稠密大气层时摩擦产生的高温，全靠它那31000块硅瓦拼砌成的外壳。

3）光导纤维通信。用纯SiO_2拉制出高透明度的玻璃纤维，激光在玻璃纤维的通路里无数次地全反射向前传输，代替了笨重的电缆。光纤通信容量高，一根头发丝那么细的玻璃纤维，可以同时传输256路电话，它还不受电、磁干扰，不怕窃听，具有高度的保密性。光纤

通信使21世纪人类的生活发生革命性巨变。

4）性能优异的硅有机化合物。例如有机硅塑料是极好的防水涂布材料。在地下铁道四壁喷涂有机硅，可以一劳永逸地解决渗水问题。在古文物、雕塑的外表涂一层薄薄的有机硅塑料，可以防止青苔滋生，抵挡风吹雨淋和风化。天安门广场上的人民英雄纪念碑，便是经过有机硅塑料处理表面的，因此永远洁白、清新。

5）用于制造玻璃、混凝土、砖、耐火材料、硅氧烷、硅烷。

6）用于制造高硅铸铁、硅钢等合金，四氯化硅等。

7）一个直径75mm的硅片，可集成几万至几十万甚至几百万个元件，形成了微电子学，从而出现了微型计算机、微处理机等。由于当前信息工程的发展，硅主要用于微电子技术。以硅晶闸管为主的电力半导体器件、元件越做越大，与硅晶体管相比集成电路正相反，在直径为75mm的硅片上，只做一个能承受几千安电流和几千伏电压的元件，这种元件渗透到电子、电力、控制3个领域形成了一门新学科——电力电子学。为适应大规模集成电路的发展，单晶硅正向大直径、高纯度、高均匀性、无缺陷方向发展，最大硅片直径已达150mm，实验室的高纯硅接近理论极限纯度。

目前世界硅产品年产量约为3×10^{6}kg。

4. 来源及制备

（1）来源　1823年，瑞典的贝采利乌斯用金属钾还原四氟化硅，得到粉状硅，尽管之前也有不少科学家制得过无定形硅，但直到贝齐利乌斯将制得的硅在氧气中燃烧，生成二氧化硅——硅土，硅才被确定为一种元素，被命名为silicium，元素符号为Si。

（2）制备　在地壳的矿物质中，虽然硅元素的含量最多，二氧化硅矿石在自然界中随处可见，但是真正能够用于制作硅晶体的原始材料，或者说纯度能够满足制作硅晶体要求的却不多。硅晶体的提取先从提取冶金硅（金属硅）开始，冶金硅主要用于钢铁工业和铝合金工业，要求纯度为98%，工业上，通常是用碳在电炉中还原二氧化硅制取。冶金硅除了含有较高的Si外，还含有铁（Fe）、铝（Al）、钙（Ca）、磷（P）、硼（B）等，它们的含量在十亿分之一个原子（1×10^{-9}）以下不等。而半导体硅中的杂质含量应该降到10（摩尔分数）的水平，太阳级硅中的杂质含量应降到10~6（摩尔分数）的水平。如要将它做成半导体用硅，还要将其转化成易于提纯的液体或气体形式，再经蒸馏、分解过程得到多晶硅。电子工业中用的半导体硅则是用氢气还原三氯氢硅或四氯化硅，将这种还原出的硅粉与氯化氢（HCl）气体发生反应，生成甲硅烷（SiH_4）和三氯硅烷（$SiHCl_3$）等中间化合物，经过反复精馏后，使其中的活性金属杂质浓度降低到十亿分之一个原子（1×10^{-9}）以下，再把高纯度三氯硅烷与高纯度的氢气一起通入到化学气相沉积（CVD）设备中，它们之间发生置换反应，析出单质硅。这些析出的单质硅沉积在多晶硅的籽晶棒上（直拉法），使得高纯度的多晶硅棒逐渐长大。这种高纯硅是目前为止所有的人工物质中纯度最高的物质。接下来将这种多晶硅棒粉碎成适当大小的颗粒，清洗干净，再根据需要制作的单晶硅的半导体类型，有控制地掺入适当的微量杂质。例如，如果要制成P型半导体，就掺入微量的元素B；而如果要制成N型半导体，则掺入微量的元素P或者元素Sb。而且，根据需要制作的单晶硅的体电阻率来决定这些杂质的掺杂量。然后，将它们放入单晶硅生长设备中的石英坩埚内，供制作单晶硅锭使用。

1）主要技术参数。

单晶硅的主要技术参数有导电类型、电阻率与均匀度、非平衡载流子寿命、晶向与晶向偏离度、晶体缺陷等。

① 导电类型。导电类型由掺入的施主或受主杂质决定。p 型单晶多掺硼，n 型单晶多掺磷，外延片衬底用 n 型单晶掺锑或砷。

② 电阻率与均匀度。拉制单晶时，掺入一定杂质以控制单晶的电阻率，由于杂质分布不匀，电阻率也不均匀。电阻率的均匀性包括纵向电阻率均匀度、断面电阻率均匀度和微区电阻率均匀度，它直接影响器件参数的一致性和成品率。

③ 非平衡载流子寿命。光照或电注入产生的附加电子和空穴瞬即复合而消失，它们平均存在的时间称为非平衡载流子寿命。非平衡载流子寿命同器件放大倍数、反向电流和开关特性等均有关系。寿命值又间接地反映单晶硅的纯度，存在重金属杂质会使寿命值大大降低。

④ 晶向与晶向偏离度。常用的单晶晶向多为（111）和（100），晶体的轴与晶体方向不吻合时，其偏离的角度称为晶向偏离度。

⑤ 晶体缺陷。生产电子器件用的单晶硅除对位错密度有一定限制外，不允许有小角度晶界、位错排、星形结构等缺陷存在。位错密度低于 200/cm^2 者称为无位错单晶硅，无位错单晶硅占产量的大多数。在无位错单晶硅中还存在杂质原子、空位团、自间隙原子团、氧碳或其他杂质的沉淀物等微缺陷。微缺陷集合成圈状或螺旋状者称为旋涡缺陷。热加工过程中，单晶硅微缺陷间的相互作用及变化直接影响集成电路的成败。

2）按类型和应用晶体硅分为单晶硅和多晶硅。

① 单晶硅的制作。

单晶硅也称为硅单晶，是电子信息材料和光伏行业中最基础的材料，属半导体材料类。单晶硅已渗透到国民经济和国防科技中各个领域。硅片直径越大，技术要求越高，越有市场前景，价值也就越高。单晶硅圆片按其直径分为 6in、8in、12in（300mm）及 18in（450mm）等。直径越大的圆片，芯片的成本也就越低。但大尺寸晶片对材料和技术的要求也越高。单晶硅是具有基本完整的点阵结构的晶体，不同的方向具有不同的性质，是一种良好的半导体材料，纯度要求达到 99.9999%，甚至达到 99.9999999% 以上，用于制造半导体器件、太阳电池等。单晶硅的制法是先制得多晶硅或无定形硅，按晶体生长方法的不同，分为直拉法（CZ）、区熔法（FZ）和外延法。直拉法、区熔法生长单晶硅棒材，外延法生长单晶硅薄膜。

单晶硅要经过如下制造过程：石英砂→冶金级硅→提纯和精炼→沉积多晶硅锭→单晶硅→硅片切割。

硅主要以 SiO_2 形式存在于石英和沙子中。图 9-2 为硅材料。



图 9-2 硅材料

它的制备是在电弧炉中用碳还原石英砂而成，化学反应方程式为

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$$

这样制得的硅纯度为 97% ~98%，叫做冶金级硅（MG-Si），该过程能量消耗很高，约为 14kW · h/kg，大部分冶金级硅用于钢铁工业和铝合金工业。粉碎的冶

金级硅在硫化床反应器中与 HCl 气体混合并反应，生成三氯氢硅和氢气：

$$Si + 3HCl \rightarrow SiHCl_3 + H_2 \uparrow$$

由于 $SiHCl_3$ 在 30℃以下是液体，因此很容易与氢气分离，接着通过精馏使 $SiHCl_3$ 与其他氯化物分离。经过精馏的 $SiHCl_3$，其杂质水平可达到电子级硅要求。提纯后的 $SiHCl_3$ 通过 CVD 原理制备出多晶硅锭。多晶硅锭生产最常用的工艺是铸锭法。在这个过程中，多晶硅放入石英坩埚中，经过加热、融化、长晶、退火和冷却，完成一个多晶硅锭的生长过程。单晶硅按拉制方法不同分为无坩埚区熔（FZ）单晶与有坩埚直拉（CZ）单晶。区熔单晶不受坩埚污染，纯度较高，适于生产电阻率高于 20Ω·cm 的 n 型单晶硅和高阻 p 型单晶硅。由于含氧量低，区熔单晶机械强度较差，大量区熔单晶用于制造高压整流器、晶体闸流管、高压晶体管等器件。直拉法易于获得大直径单晶，但纯度低于区熔单晶，适于生产 20Ω·cm 以下的单晶硅。由于含氧量高，直拉单晶机械强度较好，大量直拉单晶用于制造 MOS 集成电路、大功率晶体管等器件。

直拉法即切克老斯基法（Czochralski：Cz），是用得最多的一种晶体生长技术。直拉法生长的单晶硅主要用于半导体集成电路、二极管、外延片衬底、太阳电池。多晶硅料需要转化成单晶硅棒或多晶硅锭后才能把它进一步加工成硅片、电池和组件。单晶硅棒生产最常用的工艺就是直拉法，即把多晶硅料放入石英坩埚中，经过加温后缓慢融化，浸入一根具有一定晶向的籽晶，经过缩颈、放肩、转肩、等径、收尾生长和冷却过程，完成一根单晶的生长过程。直拉法基本原理和基本过程如下。

A）工艺：

（a）引晶。通过电阻加热，将装在石英坩埚中的多晶硅熔化，并保持略高于硅熔点的温度，将籽晶浸入熔体，然后以一定速度向上提拉籽晶并同时旋转引出晶体。

（b）缩颈。生长一定长度的、缩小的、细长颈的晶体，以防止籽晶中的位错延伸到晶体中。

（c）放肩。将晶体控制到所需直径。

（d）等径生长。根据熔体和单晶炉情况，控制晶体等径生长到所需长度。

（e）收尾。直径逐渐缩小，离开熔体。

（f）降温。降低温度，取出晶体。

B）要注意的问题：

（a）晶体的最大生长速度。晶体的最大生长速度与晶体中的纵向温度梯度、晶体的热导率、晶体密度等有关。提高晶体中的温度梯度，可以提高晶体生长速度，但温度梯度太大，将在晶体中产生较大的热应力，会导致位错等晶体缺陷的形成，甚至会使晶体产生裂纹。为了降低位错密度，晶体的实际生长速度往往低于最大生长速度。

（b）熔体中的对流。相互相反旋转的晶体（顺时针）和坩埚所产生的强制对流是由离心力、向心力及熔体表面张力梯度驱动的。所生长晶体的直径越大（坩埚越大），对流就越强烈，会造成熔体中温度波动和晶体局部回熔，从而导致晶体中的杂质分布不均匀等。实际生产中，晶体的转动速度一般比坩埚快 1～3 倍，晶体和坩埚彼此的相互反向运动导致熔体中心区与外围区发生相对运动，有利于在固液界面下方形成一个相对稳定的区域，有利于晶体稳定生长。

（c）生长界面（固液界面）的形状。固液界面的形状对单晶均匀性、完整性有重要影

响。正常情况下，固液界面的宏观形状应该与热场所确定的熔体等温面相吻合。在引晶、放肩阶段，固液界面凸向熔体，单晶等径生长后，界面先变平后再凹向熔体。通过调整拉晶速度、晶体转动和坩埚转动速度就可以调整固液界面的形状。

（d）生长过程中各阶段生长条件的差异。直拉法的引晶阶段的熔体高度最高，裸露坩埚壁的高度最小，在晶体生长过程直到收尾阶段，裸露坩埚壁的高度不断增大，这样造成生长条件（熔体的对流、热传输、固液界面的形状等）不断变化，即整个晶锭从头到尾经历不同的热过程，头部受热时间最长，尾部最短，这样会造成晶体轴向、径向杂质分布不均匀。

（e）在直拉法中，氧含量及其分布是非常重要而又难以控制的参数，主要是熔体中的热对流加剧了熔融硅与石英坩埚的作用，即坩埚中的 O_2、B、Al 等杂质易于进入熔体和晶体。热对流还会引起熔体中的温度波动，导致晶体中形成杂质条纹和旋涡缺陷。

C）技术改进：

（a）连续生长技术。为了提高生产率，节约石英坩埚（在晶体生产成本中占相当比例），发展了连续直拉生长技术，主要是重新装料和连续加料两种技术。重新加料技术可节约大量时间（生长完毕后的降温、开炉、装炉等），一个坩埚可用多次。连续加料技术除了具有重新装料技术的优点外，还可保持整个生长过程中熔体的体积恒定，提高基本稳定的生长条件，因而可得到电阻率纵向分布均匀的单晶。连续加料技术有两种加料法，即连续固体送料法和连续液体送料法。

（b）液体覆盖直拉技术是对直拉法的一个重大改进，用此法可以制备多种含有挥发性组元的化合物半导体单晶。其主要原理是，在晶体生长室内充入惰性气体，使其压力大于熔体的分解压力，以抑制熔体中挥发性组元的蒸发损失，这样就可按通常的直拉技术进行单晶生长。

对惰性液体（覆盖剂）的要求：对熔体和坩埚在化学上必须是惰性的，密度小于所拉制的材料，既能浮在熔体表面之上，又不能与熔体混合，但要能浸入晶体和坩埚；熔点要低于被拉制的材料且蒸气压很低；有较高的纯度，熔融状态下透明。广泛使用的覆盖剂为 B_2O_3，密度为 1.8g/cm^3，软化温度为 450℃，在 1300℃时蒸气压仅为 13Pa，透明性好，粘滞性也好。

此种技术可用于生长 GaAs、InP、GaP、GaSb 和 InAs 等单晶。

（c）半导体熔体都是良导体，对熔体施加磁场，熔体会受到与其运动方向相反的洛仑兹力作用，可以阻碍熔体中的对流，这相当于增大了熔体中的粘滞性。在生产中通常采用水平磁场、垂直磁场等技术。磁控直拉技术与直拉法相比所具有的优点在于，减少了熔体中的温度波度。一般直拉法中固液界面附近熔体中的温度波动达 10℃以上，而施加 0.2T 的磁场，其温度波动小于 1℃。这样可明显提高晶体中杂质分布的均匀性，晶体的径向电阻分布均匀性也可以得到提高；降低了单晶中的缺陷密度；减少了杂质的进入，提高了晶体的纯度。这是由于在磁场作用下，熔融硅与坩埚的作用减弱，使坩埚中的杂质较少进入熔体和晶体。将磁场强度与晶体转动、坩埚转动等工艺参数结合起来，可有效控制晶体中氧浓度的变化；由于磁粘滞性，使扩散层厚度增大，可提高杂质纵向分布均匀性，有利于提高生产率。采用磁控直拉技术（如用水平磁场），当生长速度为一般直拉法两倍时，仍可得到质量较高的晶体。

磁控直拉技术主要用于制造电荷耦合（CCD）器件和一些功率器件的单晶硅，也可用

于 GaAs、GaSb 等化合物半导体单晶的生长。

单晶硅的制法通常是先制得多晶硅或无定形硅，然后用直拉法或悬浮区熔法从熔体中生长出棒状单晶硅。熔融的单质硅在凝固时硅原子以金刚石晶格排列成许多晶核，如果这些晶核长成晶面取向相同的晶粒，则这些晶粒平行结合起来便结晶成单晶硅。

② 单晶硅的应用。单晶硅所生产的太阳电池可以直接把太阳能转化为光能，高纯的单晶硅是重要的半导体材料。

③ 多晶硅材料。

A）多晶硅产品的分类。多晶硅按纯度分类可以分为冶金级（工业）硅、太阳能级和电子级。

（a）冶金级硅（MG）是硅的氧化物在电弧炉中被碳还原而成，一般含 Si 为 98% ~99%。

（b）太阳能级硅（SG）的纯度介于冶金级硅与电子级硅之间，至今未有明确界定，一般认为含 Si 在 99.99% ~99.9999%（4 ~6 个 9）之间。

（c）电子级硅（EG）一般要求含 Si 在 99.9999 % 以上，超高纯达到 99.9999999% ~99.999999999%（9 ~11 个 9），其导电性介于 10^{-4} ~$10^{10}\Omega \cdot cm$ 之间。

B）多晶硅的应用领域。多晶硅是半导体工业、电子信息产业、太阳能光伏电池产业最主要、最基础的功能性材料，可制作各种晶体管、整流二极管、晶闸管、太阳电池、集成电路、电子计算机芯片以及红外探测器等。

多晶硅是制备单晶硅的唯一原料和生产太阳电池的原料。

C）世界上主要的几种多晶硅生产工艺：

（a）改良西门子法——闭环式三氯氢硅还原法。以 HCl（或 Cl_2、H_2）和冶金级工业硅为原料，将粗硅（工业硅）粉与 HCl 在高温下合成为三氯氢硅（$SiHCl_3$），然后对 $SiHCl_3$ 进行化学精制提纯，接着对 $SiHCl_3$ 进行多级精馏，使其纯度达到 9 个 9 以上（其中金属杂质总含量应降到 0.1ppba 以下），最后在还原炉中在 1050℃的硅芯上用超高纯的氢气对 $SiHCl_3$ 进行还原，长成高纯多晶硅棒。

国内外现有的多晶硅厂绝大部分采用此法生产电子级与太阳能级多晶硅。

（b）硅烷法——硅烷热分解法。硅烷（SiH_4）是以四氯化硅氢化法、硅合金分解法、氢化物还原法、硅的直接氢化法等方法制取的，然后将制得的硅烷气提纯后在热分解炉生产纯度较高的棒状多晶硅。以前只有日本小松公司掌握此技术，由于发生过严重的爆炸事故，故没有继续扩大生产。但美国 Asimi 和 SGS 公司仍采用硅烷气热分解法生产纯度较高的电子级多晶硅产品。

（c）流化床法。以四氯化硅、氢气、氯化氢和工业硅为原料在流化床内（沸腾床）、高温高压下生成三氯氢硅，将三氯氢硅再进一步歧化加氢反应生成二氯二氢硅，继而生成硅烷气。制得的硅烷气通入加有小颗粒硅粉的流化床反应炉内进行连续热分解反应，生成粒状多晶硅产品。因为在流化床反应炉内参与反应的硅表面积大，生产效率高，电耗低，故适用于大规模生产太阳能级多晶硅。其缺点是安全性差，危险性大；其次是产品纯度不高，但基本能满足太阳电池生产的需要。

此法是美国联合碳化合物公司早年研究的工艺技术，目前世界上只有美国 MEMC 公司采用此法生产粒状多晶硅，此法比较适合生产价廉的太阳能级多晶硅。

D）太阳能级多晶硅的新工艺技术。除了上述改良西门子法、硅烷法、流化床法三种方

法生产电子级与太阳能级多晶硅以外，还涌现出几种专门生产太阳能级多晶硅的新工艺技术。

（a）冶金法生产太阳能级多晶硅。日本川崎制铁公司采用冶金法制得的多晶硅已在世界上最大的太阳电池厂（SHARP 公司）应用，现已形成 800t/年的生产能力，全量供给 SHARP 公司。

其主要工艺是，选择纯度较好的工业硅（即冶金硅）进行水平区熔单向凝固成硅锭，去除硅锭中金属杂质聚集的部分和外表部分后，进行粗粉碎与清洗，在等离子体融解炉中去除硼杂质，再进行第二次水平区熔单向凝固成硅锭，去除第二次区熔硅锭中金属杂质聚集的部分和外表部分，经粗粉碎与清洗后，在电子束融解炉中去除磷和碳杂质，直接生成太阳能级多晶硅。

（b）气液沉积法生产粒状太阳能级多晶硅。以日本 Tokuyama 公司为代表，200t 商业化规模生产线在运行。

其主要工艺是，将反应器中的石墨管温度升高到 1500℃，流体三氯氢硅和氢气从石墨管的上部注入，在石墨管内壁 1500℃高温处反应生成液体状硅，然后滴入底部，温度回落变成固体粒状的太阳能级多晶硅。

（c）重掺硅废料提纯法生产太阳能级多晶硅。美国通过对重掺单晶硅生产过程中产生的硅废料提纯后，可以生产太阳电池用的多晶硅，最终成本价可望控制在 20 美元/kg 以下。

E）国外多晶硅生产技术发展的特点：

（a）研发的新工艺技术几乎全是满足太阳能光伏硅电池行业所需要的太阳能级多晶硅。

（b）研发的新工艺技术主要集中体现在多晶硅生成反应器装置上，多晶硅生成反应器是复杂的，是多晶硅生产系统中提高产能、降低能耗的关键装置。

（c）研发的流化床（FBR）反应器生成粒状多晶硅的工艺技术，将是生产太阳能级多晶硅首选的工艺技术。其次是研发的石墨管状炉（Tube-Recator）反应器，也是降低多晶硅生产电耗、实现连续性大规模化生产、提高生产效率、降低生产成本的新工艺技术。

流化床反应器和石墨管状炉反应器中，生成粒状多晶硅的硅原料可以用硅烷、二氯二氢硅或三氯氢硅。

（d）在 2005 年前多晶硅扩产中 100% 都采用改良西门子法。在 2005 年后多晶硅扩产中除 Elkem 外，基本上仍采用改良西门子法。

（e）由于硅材料占太阳电池成本中的绝大部分，降低硅材料的成本是光伏应用的关键。浇注多晶硅技术是降低成本的重要途径之一，该技术省去了昂贵的单晶拉制过程，也能用较低纯度的硅作投炉料，材料及电能消耗方面都较省。

④ 切片。把单晶硅棒或多晶硅锭切割成硅片，目前基本上采用的是多线切割技术，将硅棒或硅锭经表面整形、定向、切割、研磨、腐蚀、抛光、清洗等工艺，加工成符合特定要求的硅片。硅片的厚度已经从 2004 年的主流厚度 270μm 发展到现在的 200μm 为主。目前，国际上部分厂家量产的硅片厚度可以达到 180μm。硅片的利用率已经提高了 32% 以上。由于拉晶炉和铸晶炉比较便宜，且已基本上实现了国产化，再加上技术门槛较低，因此近年我国新上了一大批拉棒切片项目。我国光伏产业增长迅猛，2011 年生产多晶硅 14.9 万 t。

5. 危害及防治

多晶硅生产过程中将有大量的废水、废液排出，如生产 1000t 多晶硅将有三氯氢硅

3500t、四氯化硅4500t废液产生，未经处理回收的三氯氢硅和四氯化硅是一种有毒有害液体。对多晶硅副产物三氯氢硅、四氯化硅通过多级精馏提纯等化学处理，可生成白炭黑、氯化钙以及用于光纤预制棒的高纯（6N）四氯化硅。

二、锗

1. 概况

元素名称	锗
元素符号	Ge
英文名称	Germanium
类型	金属元素
宇宙中含量	$0.2\times10^{-4}\%$
太阳中含量	$0.2\times10^{-4}\%$
海水中含量	太平洋表面，$0.00000035\times10^{-4}\%$
地壳中含量	$1.8\times10^{-4}\%$
相对原子质量	72.61
氧化态	主要 Ge^{+2}，Ge^{+4}
化学键能/(kJ/mol)：	
Ge-H	288
Ge-C	237
Ge-O	363
Ge-F	464
Ge-Cl	340
Ge-Ge	163
原子序数	32
质子数	32
中子数	41
摩尔质量/(g/mol)	73
所属周期	4
所属族数	ⅣA
电子层排布	2-8-18-4
晶体结构	晶胞为面心立方晶胞，每个晶胞含有4个金属原子
晶胞参数：	
$a=565.75$pm	
$b=565.75$pm	
$c=565.75$pm	
$\alpha=90°$	
$\beta=90°$	
$\gamma=90°$	
莫氏硬度	6
声音在其中的传播速率/(m/s)	5400

电离能/(kJ/mol)：	
第一电离能	$M^{-}M^{+}$762.1
第二电离能	M^{+}-M^{2+}1537
第三电离能	M^{2+}-M^{3+}3302
第四电离能	M^{3+}-M^{4+}4410
第五电离能	M^{4+}-M^{5+}9020
原子半径/pm	125（计算值）
共价半径/pm	122
摩尔体积/(m^3/mol)	13.63×10^{-6}
汽化热/(kJ/mol)	330.9
熔化热/(kJ/mol)	36.94
蒸气压（1210K)/Pa	0.0000746
声速（293.15K)/(m/s)	5400
电负性/鲍林标度	2.01
比热容/[J/(kg·K)]	320
电导率/m·Ω	1.45
热导率/[W/(m·K)]	59.9

发现过程：

1886 年，德国的克莱门斯·温克勒在分析硫银锗矿时，发现了锗的存在，后由硫化锗与氢共热，制出了锗，以拉丁语命名为 Germanium，原意是“德国的”。在温克勒发现之前，俄国科学家门捷列夫在 1871 年根据新排出的元素周期表预言了锗的存在和性质。

2. 性状

（1）概况　锗在周期表上的位置，正好夹在金属与非金属之间，锗虽属于金属，但却具有许多类似于非金属的性质，在化学上称为“半金属”，就其导电的本领而言，优于一般非金属，劣于一般金属，在物理学上称为“半导体”，有着良好的半导体性质，如电子迁移率、空穴迁移率等。在高纯锗中掺入三价元素（如铟、镓、硼），得到 P 型锗半导体；掺入五价元素（如锑、砷、磷），得到 N 型锗半导体。锗对固体物理和固体电子学的发展有过重要作用。锗是浅灰色的金属，据 X 射线的研究证明，锗晶体里的原子排列与金刚石差不多，结构决定性能，所以锗与金刚石一样，硬而且脆。

（2）化学性质　锗化学性质稳定，锗的氧化态为 +2 和 +4，常温下不与空气或水蒸气作用，但在 600～700℃时，与氧反应很快生成二氧化锗。锗与盐酸、稀硫酸不起作用，加热时能与卤素或硫反应；易溶于硝酸和氢氟酸的混合液，硝酸和热的浓硫酸能将金属锗氧化为二氧化锗，浓硫酸在加热时，锗会缓慢溶解。在王水中，锗易溶解。常温下，锗在空气中不被氧化，但在加热时，锗能在氧气、氯气和溴蒸气中燃烧。在空气存在下，锗易溶于熔融的氢氧化钠或氢氧化钾，生成锗酸钠或锗酸钾。在过氧化氢、次氯酸钠等氧化剂存在下，锗能溶解在碱性溶液中，生成锗酸盐。锗与碳不起作用，所以在石墨坩埚中熔化不会被碳所污染。

（3）物理性质　锗为银灰色晶体，熔点为 937.4℃，沸点为 2830℃，密度为 5.35g/cm^3，硬度为 6～6.5（Mohs 莫氏硬度），室温下晶体锗质脆，可塑性很小，有明显的非金属性质。

图 9-3 为锗锭。

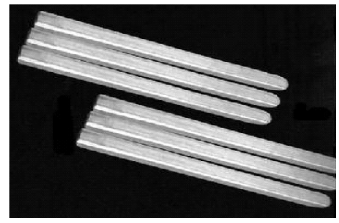


图 9-3　锗锭

3. 用途

1）锗单晶的用途：

① 在 1942 年发现高纯度的锗是半导体工业的重要原料，掺有微量特定杂质的锗单晶，可用于制各种晶体管、整流器及其他器件。

② 高纯锗单晶具有高的折射系数，对红外线透明，不透过可见光和紫外线，可作专透红外线的锗窗、棱镜或透镜。

2）锗化合物的用途：

① 锗和铌的化合物是超导材料。

② 二氧化锗是聚合反应的催化剂，含二氧化锗的玻璃有较高的折射率和色散性能，可作广角照相机和显微镜镜头。三氯化锗是新型光纤材料添加剂。

③ 用于制造荧光板。

3）用于辐射探测器。锗在电子工业中的用途已逐渐被硅代替，但由于锗的电子和空穴迁移率比硅高，在高速开关电路方面，锗比硅的性能好，锗在低功率半导体二极管、三极管、红外器件、γ 辐射探测器方面仍占有优势，金属锗能让 2 ~ 15μm 的红外线通过，锗酸铋用于闪烁体辐射探测器。

4）用于太阳电池。锗系列产品应用于太阳电池领域，主要体现在两个方面：

① 随着航空航天领域及卫星市场的发展，作为航天器主要能源的太阳电池的市场需求将扩大，锗产品的市场需求将随之增长。

② 地面光伏产业的发展带动了对太阳电池的需求，高效三结电池的市场需求，将随着光伏产业的发展而扩大，锗系列产品的市场需求将随之增长。

5）用于红外产品。据美国陆军实验室估计，目前锗在红外光学领域的年需求量，占整个锗消费量的 20% ~30%。锗红外光学器件主要作为红外光学系统中的透镜、棱镜、窗口、滤光片、整流罩等光学材料。红外市场对锗产品的未来需求增长，主要体现在军事装备的日益现代化，带动了对红外产品的需求。军用红外热像仪产品是红外技术最早的应用领域，而主要由锗光学元件组成的红外光学镜头，是热像仪产品里除探测器以外的重要关键部件，直接决定着红外热像仪的光学成像质量。目前，随着各国军队开始在新武器装备中大量应用红外热像技术，以及对旧武器装备进行添加红外热像设备的改造，军用市场将对红外热像设备产生大量的需求，红外用锗的市场需求也将随之扩大。

6）用于新技术。锗用于在微小芯片中替代硅的锗绝缘体衬底材料，以及基于锗的 LED 产品。硅锗化合物能使芯片及晶体管体积变小，同时减少芯片及晶体管本身产生的电子噪声污染，延长电池寿命以及在超高频环境下保证使用的稳定性，因此常应用于芯片和晶体管生产中。IBM 公司已生产出在室温下运行频率接近 350GHz 的硅锗芯片。在无线通信领域，硅锗化合物已经开始取代砷化镓，硅芯片生产厂家已经生产出低成本的、能够产业化的高速硅锗芯片。

7）用于光纤。四氯化锗是光纤纤芯必不可少的添加剂，随着光纤通信的发展、铜质电缆的被替代、我国 3G 建设的推进、村通工程的建设，将扩大光纤光缆行业对光纤级四氯化锗的需求。

8）用于纳米集成电路、量子点自旋电子学及光电集成器件，推动微纳电子和光电子产业发展。

9）用于煤的氢化和石油炼制的催化剂、合金、医疗保健等领域。

4. 来源及制备

（1）来源　锗在地壳中的含量为 $1.8\times10^{-4}\%$，分散在煤、金属硅酸盐及硫化物矿中，锗在各类煤中的含量为 0.001% ~0.1%，低灰分的煤中含锗较多，硫银锗矿（$4Ag_2S\cdot GeS_2$）含锗 5% ~7%，黑硫银锡矿［$4Ag_2S\cdot(Sn,Ge)S_2$］、锗石（$3Cu_2S\cdot FeS\cdot 2GeS_2$）含锗 10%，硫锗铁铜矿［$(Cu,Fe)_3(Fe,Ge,Zn,Sn)(S,As)_4$］含锗 7%，闪锌矿中锗的含量为 0.001% ~0.1%，在普通的泥土、岩石和一些泉水中，也含有微量锗，几乎没有比较集中的锗矿，因此称之为“稀散金属”。现代工业生产的锗，主要来自煤、铜、铅、锌冶炼的副产品，仅仅在极少数条件下，锗才能超常富集，形成独立的矿床进行开采。目前，全世界已探明的锗保有储量约为 8600 金属吨（既不含品位的吨），而世界已查明的黄金储量约为 89000t，锗储量明显少于黄金。世界锗的资源比较贫乏，2010 年，全世界锗的实际消费量将超过 210 金属吨，如果按照目前全世界 8600 金属吨的保有储量来计算，目前全世界的锗只够用 40 年。

1）国外。美国已经探明的锗储量约占世界总储量的 45%，居世界第二。美国是全球锗产品的消费大国，但基本上不开发这一属于自己的资源，主要依赖进口。2007 年，美国锗废料、二氧化锗和区熔锗锭的进口总量近 52 金属吨，美国锗的消费量为 60 金属吨，消耗量的年平均复合增长率达 33.89%，进口量占消费量的比例为 86.67%。美国早在 1984 年就将锗列为国防储备资源进行战略保护。锗下游产品出口国主要有比利时、美国、德国、俄罗斯、日本等。

2）国内。我国稀散稀有金属储量相对较丰富，全国已探明锗储量居世界第一，锗矿产地约 35 处，保有储量约 3500 金属吨，远景储量约 9600 金属吨，主要分布在全国 12 个地区，其中广东、云南、内蒙古、吉林、山西、广西、贵州等地区储量较多，约占全国锗总储量的 96%，规模最大的是云南临沧超大型锗矿床、内蒙古乌兰图嘎超大型锗矿床。虽然我国锗储量居世界第一，但是在锗的制造和应用上，仍处于行业的末端，多以锗锭和粗加工为主，锗的开采、加工、出口机制不完善，锗的生产企业长期处于锗产业链的上游粗加工、低价出口状态。云南锗业是较好的企业，采选、精深加工及研发一体化，是锗产业链较为完整的锗生产龙头企业，主要产品有区熔锗、锗单晶、锗光学元件、红外光学锗镜头、光伏级太阳能锗单晶及晶片等，拥有大寨矿和梅子箐矿两大矿山资源，已经探明的锗金属保有储量合计达 689.55 金属吨，其中，大寨锗矿保有储量 613.19 金属吨，品位为 0.0361%；梅子箐矿保有储量为 76.36 金属吨，品位为 0.0241%。其他公司产量较少，驰宏锌锗年产锗产品 10t，罗平锌电年产锗 3t。

2010 年我国初级锗及二氧化锗的产量是 100t，产量为世界第一，大多数产品都用于出口，占全世界初级锗供给的 60% ~70%。可是我国的资源优势并没有转化为经济优势，我国在国际市场上没有定价话语权，没有在真正意义上形成具有定价话语权的全产业链，外盘压价导致国内锗行业处于微利甚至无利状态。我国锗生产厂家极想谋求锗价格在国际市场的话语权，但是要想真正让这个行业得到根本的改进，应该进行资源整合，在深加工和高附加值产品上下功夫，向产业下游延伸，投入光纤、红外器材、太阳能等下游深加工产品。一个

完整的伴生于褐煤矿的锗产业链是，褐煤—煤烟尘—锗精矿—二氧化锗—锗单晶及二氧化锗光纤下游—单晶锗下游太阳能、红外线导航系统。为加快资源向优势企业集中，云南省将全力整合省内褐煤矿，限制其对外出口，集中向锗生产的龙头企业供应褐煤。

国家知道锗在应用上的广泛和储量上的奇缺，已将包括锗在内的有色金属提高到了战略高度，国务院发布的《有色金属产业调整和振兴规划》提出，“支持在具有资源、能源优势的中西部地区发展深加工”，稀散金属产业结构、增长方式、技术创新能力等都被列为调整和振兴规划的目标，前几年国家进行了包括锗在内的十种稀有金属战略资源收储工作，目前这项收储工作已完成。

（2）锗的制备　锗的提取方法是首先将锗的富集物用浓盐酸氯化，制取四氯化锗，再用盐酸溶剂萃取法除去主要的杂质砷，然后经石英塔两次精馏提纯，再经高纯盐酸洗涤，可得到高纯四氯化锗，用高纯水使四氯化锗水解，得到高纯二氧化锗。一些杂质会进入水解母液，所以水解过程也是提纯过程。纯二氧化锗经烘干煅烧，在还原炉的石英管内，用氢气在650～680℃还原得到金属锗。

在火法炼锌过程中，锗以氯化物或氧化物的形式进入烟尘中，并得到富集。煤燃烧或炼焦工业产生的锗都富集在烟道灰中。用盐酸处理这些烟尘和烟道灰，可得四氯化锗，通过精馏法提纯后，水解得高纯二氧化锗，放在石英管内，加热到680℃，用氢气还原得高纯锗，再用直拉法或区域熔炼法制得锗的单晶。

（3）锗价　2011年7月初，国内锗锭价格为10000～10300元/kg，氧化锗价格维持在8300元/kg左右；国外市场，99.99%的锗锭（CIF欧洲）价格维持在1570美元/kg左右，氧化锗（欧洲）价格维持在1350美元/kg左右，氧化锗MB自由市场价格维持在1237.5美元/kg左右。从长远看，红外光学和太阳电池领域的高端锗产品用量会呈爆发式增长，因此锗价还有上涨空间。

5. 危害及防治

（1）锗在动植物体中的分布　锗在自然界天然分布含量极微，绝大多数自然土壤中含锗量为0.6～1.3mg/kg，大气层的含锗量为3μg/m^3，天然矿泉水中含锗量为0～0.2mg/L，动物组织中的含锗量为0.1～1mg/kg，蔬菜内含锗量为0.1～1mg/kg，实体性甘果含锗量小于0.15mg/kg，在海产品、谷物、大豆、肉类、奶制品中都不同程度地含有锗，植物锗的来源主要是水、土壤和空气。人体的各组织、器官，如肾脏、肝脏、头发、全血、肺、许多酶、大脑、小脑、灰质、白质及脑脊液中都有锗的分布，人类摄入锗的渠道为食物、饮水和空气，成年人平均每天从食物中摄入锗量为0.4～3.5mg。土壤及水内的锗主要决定于矿岩中锗的含量、溶解度及释放性的大小，而空气中的锗来源于燃煤释放的锗量。锗未被列入人体必需的微量元素行列，进入人体后，均匀地分布于各器官组织，3h后有90%被排出体外，24h后完全排出体外，属于不会在体内蓄积的微量元素。

（2）有机锗的作用　锗的化合物有无机锗与有机锗两种。无机锗毒性较大，对人体是严格禁用的。有机锗对人体健康有益，有生物活性、药理作用及保健效能，其应用范围已超越了微量元素及人体必需元素的概念。最重要的是如何严格掌握有机锗的使用剂量，学者对它的评价褒贬不一。

1）有机锗含有多个Ge-O键，具有很强的氧化脱氢能力，与人体血红蛋白结合，通过血球细胞增加供氧，保证细胞的有氧代谢。由于它所载负电荷氧原子能捕捉代谢产物中的

氢，起到部分净化血液作用，因此有益于老年性痴呆症等病人的康复，对肝癌、肺癌、胃癌等血管丰富部位的癌症和呼吸道疾病、哮喘及皮肤病等有特殊的疗效。

2）人体有机代谢过程中，不断有自由基产生，有机锗能有效地提高肝、脑等脏器超氧化物歧化酶的活性，降低血清丙二醛，产生抗氧化的能力，保护机体不受自由基反应的损伤，使过氧化脂质水平降低，从而延缓了细胞的衰老。

3）有机锗能诱导人体细胞产生 γ 干扰素，提高 NK 细胞（天然杀伤细胞）和巨噬细胞（MΦ）的活性，从而提高免疫功能。

4）有机锗有生血刺激作用，表现在增加红细胞和血红蛋白数量、刺激血小板生成及消除血管壁上的脂类附着物，所以对贫血和高胆固醇血脂及糖尿病有一定的疗效。

5）有机锗的抗癌机理可能是由于降低癌细胞膜的生物电位引起的。癌细胞生物电位比正常细胞高，易于裂殖，有机锗外层电子为 4S2、4P2，可产生电荷转移和游离基，自由电子可以从高电位细胞夺取氧，降低癌细胞的电位而制止其繁殖。有人应用 Ge-132 后，癌细胞膜多较平直，较少呈齿状突起，认为可能与用药后癌细胞电位降低所致的形态改变有关。

6）锗被称为能吃的氧。缺氧为万病的根源，锗对缺氧引起的以下病症有特殊的疗效：由于精神压力的加重，引起血液黏稠度升高；现代人由于运动量不足引起的新陈代谢不振；各种心理因素和身体衰弱引起的睡眠不足；呼吸污染的空气而引起的肺功能低下；大量地吸入过量化学物质等。

7）锗有抑制放射线引起的伤害、恢复被伤害细胞的作用。

锗在一些地方被当作医疗辅助用具，但临床证明有效的案例不多，如果服用的话，曾经有过死亡的例子；有的临床研究者认为是有危险的东西，会对肾脏产生不好影响。

三、铟

1. 概况

拼音	Yīn
英文	Indium
元素符号	In
元素类型	金属
原子序数	49
元素相对原子质量	114.8
核内质子数	49
核外电子数	49
核电荷数	49
氧化态	主要 In^{+3}，其他 In^{+1}，In^{+2}
质子质量/kg	8.1977×10^{-26}
质子相对质量	49.343
所属周期	5
所属族数	ⅢA
摩尔质量/(g/mol)	115
摩尔体积/(m^3/mol)	15.76×10^{-6}
外围电子排布	$4d^{10}5s^2\ 5p^1$

核外电子排布	2-8-18-18-3
晶体结构	晶胞为四方晶胞
晶胞参数：	
$a=325.23\text{pm}$	
$b=325.23\text{pm}$	
$c=494.61\text{pm}$	
$\alpha=90°$	
$\beta=90°$	
$\gamma=90°$	
原子半径/pm	155（156）（计算值）
共价半径/pm	144
范德华半径/pm	193
电负性/鲍林标度	1.78
电离能/(kJ/mol)：	
第一电离能	M -M + 558.3
第二电离能	M + -M2 + 1820.6
第三电离能	M2 + -M3 + 2704
第四电离能	M3 + -M4 + 5200
第五电离能	M4 + -M5 + 7400
第六电离能	M5 + -M6 + 9500
第七电离能	M6 + -M7 + 11700
第八电离能	M7 + -M8 + 13900
第九电离能	M8 + -M9 + 17200
第十电离能	M9 + -M10 + 19700
蒸气压（429K）/Pa	1.42×10^{-17}
汽化热/(kJ/mol)	231.5
熔化热/(kJ/mol)	3.263
声速（293.15K）/(m/s)	1215
比热容/[J/(kg·K)]	233
地壳含量	1×10^{-5}

2. 性状

（1）物理性质　铟是一种化学元素，符号为 In，原子序数为 49，是一种柔软的银灰色金属，带有光泽，铟熔点低（156.61℃），沸点高（2080℃），密度为 7.3g/cm^3（20℃），莫氏硬度为 1.2，热导率为 81.6W/(m·K)，电导率为 11.6×10^6S/m，很软，能用指甲刻痕，比铅的硬度还低，传导性好，延展性好，可塑性强，可压成极薄的金属片。铟-115 是最常见的铟同位素，带有微弱的放射性。铟自身有冷熔接性，供应的铟块都涂有润滑脂。铟金属在弯曲时会发出鸣音。

（2）铟的化学性质　铟与铁相似，在常温下不易氧化，红热会燃烧，能溶于无机酸。从常温到熔点之间，铟与空气中的氧作用缓慢，表面形成极薄的氧化膜，温度更高时，与

氧、卤素、硫、硒、碲、磷作用。大块金属铟不与沸水和碱反应，但粉末状的铟可与水作用，生成氢氧化铟。铟与冷的稀酸作用缓慢，易溶于浓热的无机酸和乙酸、草酸。铟能与许多金属形成合金。铟的氧化态为 +1 和 +3，主要化合物有 In_2O_3、$In(OH)_3$，与卤素化合时，能形成一卤化物和三卤化物。



图 9-4　铟锭

图 9-4 为铟锭。

3. 用途

1）制造铜铟镓硒（CIGS）太阳电池的核心材料，制造计算机芯片（In）的关键材料。

2）用于生产液晶显示器所需要的 ITO（铟锡氧化物）。

3）用于 LED（发光二极管）。因为由氮化镓（GaN）制成的 LED 发出的仅是强蓝色，必须在其中加入铟元素，才可制成五颜六色的 LED。

4）用于光电子领域。铟及其化合物半导体具有广泛的用途，在铟基Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体［如锑化铟（InSb）、磷化铟（InP）、砷化铟（InAs）等］中，最受重视并具有潜在应用前景的是磷化铟（InP），可用于毫米波通信，并可作为光纤通信的激光光源材料。

5）作为透明电极涂层的 ITO 靶材。ITO 具有可见光透过率 95% 以上、紫外线吸收率≥70%、对微波衰减率≥85%、导电和加工性能良好、膜层既耐磨又耐化学腐蚀等优点，因此作为透明导电膜广泛应用于半导体、低熔点合金等方面。

6）由于铟具有较强的抗腐蚀性及对光的反射能力，可制成军舰或客轮上的反射镜。

7）铟合金的用途：

① 可作反应堆控制棒，能够敏感地检测中子辐射。

② 可用于登陆舱，着陆时不脆化、不开裂。

③ 含 24% 铟及 76% 镓的合金，在室温下是液体。

④ 利用铟合金熔点低的特点可制成特殊合金，用于消防系统的断路保护装置及自动控制系统的热控装置。

⑤ 由铟制成的合金，导热能力比银和铅还高。添加少量铟制造的轴承合金是一般轴承合金使用寿命的 4 ~ 5 倍，用于制造航空发动机轴承。

⑥ 铟称得上“合金的维生素”。铟合金可用作钎料。铟是无铅钎料新的重要添加元素，世界无铅钎料的发展趋势有利于铟钎料的应用。铟可作为包覆层或与其他金属制成合金，以增强耐腐蚀性。

8）因为其较软的性质，可作为填充金，也可用于压缝，如作为较高温度下真空缝隙的填充材料。

9）医学上用作扫描剂；肝、脾、骨髓扫描用铟胶体；脑、肾扫描用铟-DTPA；肺扫描用铟-Fe（OH）颗粒；胎盘扫描用铟-Fe 抗坏血酸；肝血池扫描用铟-输铁蛋白。

10）其他用途：

① 锑化铟和砷化铟可用于红外探测和光磁器件。

② 铟可在蓄电池中作为添加剂，在无汞碱性电池中作为缓蚀剂，可使电池成为绿色环保产品。

③ 铟可用作防雾化层。

④ 日本索尼公司以铟代替钪，用作电子枪阴极，使每根电子枪的成本降到十分之一左右。

4. 来源、制备、价格及价值

（1）来源　1863 年德国弗赖贝格（Freiberg）矿业学院物理学教授 F. 赖希和 H. T. 里希特为了寻找铊而研究闪锌矿，铊被发现和取得后，赖希由于对铊的一些性质感兴趣，希望得到足够的金属进行实验研究，他在 1863 年开始在夫赖堡希曼尔斯夫斯特（Himmelsfüst）出产的锌矿中寻找这种金属，这种矿石所含主要成分是含砷的黄铁矿、闪锌矿、辉铅矿、硅土、锰、铜和少量的锡、镉等。赖希认为其中还可能含有铊，虽然实验花费了很多时间，他却没有获得期望的元素，但是他得到了一种不知成分的草黄色沉淀物，他认为是一种新元素的硫化物，就用光谱进行分析。可是赖希是色盲，他请求助手 H. T. 李希特进行光谱分析实验，李希特在分光镜中发现一条靛蓝色的明线，位置和铯的两条蓝色明亮线不相吻合，认为是一种新元素，就根据希腊文中“靛蓝”（indikon）一词命名它为 indium（铟，In）。同年，他们首先分离出铟的氯化物和氢氧化物，接着利用吹管在木炭上还原成金属铟。两位科学家共同署名发现铟的报告，于 1867 年在法国科学院展出。

铟是元素周期表中的第三族元素，硼、铝、镓、铟、铊系列的第四位，铟属于分散元素，在地壳中含量非常低，非常稀少，全世界铟的地质含量仅为 1.6 万 t，为黄金地质储量的 1/10，在地壳中的含量与银相似，但产量仅为银的 1%，含量约为 1×10^{-5}，没有独立矿物，广泛分布于闪锌矿中，闪锌矿中铟的含量为 0.0001% ~0.1%。铅锌冶炼厂和锡冶炼厂都能回收铟，当其含量达十万分之几时，就有工业生产价值，目前主要是从闪锌矿中提取。另外，从锌、铅和锡生产的废渣、烟尘中也可回收铟。我国是全球第一大原生铟供应国。铟矿物，如硫铟铜矿（$CuInS_2$）、硫铟铁矿（$FeInS_4$）、水铟矿［$In(OH)_3$］，伴生在其他有色金属硫化矿物中，特别是硫化锌矿，其次是方铅矿、氧化铅矿、锡矿、硫化铜矿和硫化锑矿等，但量极少，虽然在一些有色金属精矿中铟得到初步富集，但由于铟品位低，一般不可直接作为提铟原料，上述有色金属精矿经过冶炼或高炉炼铁后得到的粗锌、粗铅、炉渣、浸出渣、溶液、烟尘、合金、阳极泥等是提铟的主要原料。

我国的铟保有储量为 13014t，分布在 15 个省区，主要集中在云南（占全国铟总储量的 40%）、广西（31.4%）、内蒙古（8.2%）、青海（7.8%）、广东（7%）等省。

铟的供应主要分为原生铟和回收铟。原生铟的生产主要来自中国、韩国、加拿大和日本，再生铟主要在日本、韩国和我国台湾省等。日本是世界上最大的铟消费国，每年铟需求量占世界铟年产量的 70% 以上，绝大部分从我国进口。基于铟的稀缺和不可替代性，美国从 1985 年开始金属铟的储备。2007 年，日本也将铟列入战略储备金属名单。2007 年铟的全球供应量为 1249t，其中原生铟 549t，再生铟 700t，我国供应原生铟 249t。目前全球的铟产量只有 300t 左右，且其产能不会急剧增长。

（2）制备　铟一般与其性质类似的锌、铅、铜和锡等共生，附着在锌矿、铅矿石上，从锌、铅、锡等重金属冶炼的副产物中回收生产，世界上铟产量的 90% 来自铅锌冶炼厂的副产物。根据回收原料的来源及含铟量的差别，应用不同的提取工艺，以达到最佳配置和最大收益。常用的工艺技术有氧化造渣、金属置换、电解富集、酸浸萃取、萃取-电解、离子交换、电解精炼等。

1）萃取-电解法。这也是现今世界上铟生产的主流工艺技术，工艺流程为：含铟原料→富集→化学溶解→净化→萃取→反萃取→锌（铝）置换→海绵铟→电解精炼→精铟。

2）为了简化铟的提取流程，降低生产成本，提高金属回收率，针对原有的萃取-电解法生产工艺，研究开发了“富铟粗铅电解—铅电解液萃铟”提取工艺，确定了新工艺的最佳工艺参数。工艺流程为：粗铅熔化铸成极板，装入电解槽通电进行电解，阳极中的铟溶解进入电解液，当铟富集到一定浓度后，抽出电解液进行萃取、反萃，富铟反萃液经 pH 调节、置换、压团熔铸后得到粗铟。

3）从炼锌副产品中回收铟。日本同和矿业公司以炼锌中产生的净液残渣作为原料，先分离和浸出，脱铜、脱铝，除去原料中与镓铟性质相似的重金属，然后在富集镓铟的溶液中加入盐酸，混合搅拌，调整酸度之后，再用醚萃取铟，使它和镓及其他金属分离，最后用水反萃出铟，再经置换、熔融和电解。在每次电解中需调整电流密度和电解液的酸度，以除去微量的镉、锡和铅等，生产出 4N 以上的金属铟。此外，铟的选择性分离法是把铅、锌冶炼过程中产生的含有微量的铟烟尘、阳极泥等各种残渣以及电解排出液作为原料，采用含萃取剂膦酸二（2-乙基己基）酯的有机溶剂，在 pH 小于 1.0 的条件下，对含铟及其他金属的硫酸溶液萃取，然后用盐酸进行反萃，从而选择性分离铟，其萃取铟的效率可高达 98% 以上。

4）从矿渣中回收金属铟。从锑、锌矿渣中回收金属铟一般采用酸化浸出-萃取法。在其他矿渣，如铁矾渣、铜渣等中也含有稀散金属铟。冰铜冶炼转炉吹炼得到的铜渣中铟含量达 0.6% ~0.95%，具有较大的回收价值。从铁矾渣中富集、回收铟可采用还原挥发处理和萃取提铟新工艺，将铁矾渣在高温下用碳还原，并加入某助剂使铟从渣中挥发出来，形成富铟物料，再进行浸出—萃取—电积，可得到纯度为 99.99% 的高纯铟，铟回收率大于 80%，同时解决了铁矾渣的污染问题。进一步用电解精炼，可得纯度为 99.9999% 的高纯铟。

5）从烟灰中回收金属铟。冶炼烟灰中主要含有锌、铅、铜和铁等金属，同时含有少量铟。铟在冶炼烟灰中主要以 In_2O_3、In_2S_3 和 $In_2(SO_4)_3$ 等物相存在。从冶炼烟灰中回收铟主要采用酸浸-溶剂萃取法。株洲冶炼集团采用硫酸直接浸出-萃取法从铅浮渣反射炉烟尘中提取铟，在硫酸溶液中浸出，铟的浸出率为 90%，用 P204 作萃取剂，适当条件下溶液中铟的萃取率可达 85%，用 HCl 作反萃剂，反萃率在 95% 以上。在酸浸过程中加入 NaCl 有利于进一步提高铟的浸出率。对铅烟灰进行酸化焙烧—水浸，铟浸出率提高到 88% 以上。在萃取过程中采用 P204 水平箱萃取法，铟的萃取率从 90% 提高到 95%。

6）液膜法。从废水中回收金属铟，液膜分离法是一种高效、快速、节能的高新分离技术。以 P291 为流动载体，L113A 为表面活性剂，液体石蜡为膜增强剂，煤油为膜溶剂，硫酸和硫酸肼水溶液为内相试剂，用该乳状液膜体系对铟进行分离富集。

7）从合金中回收金属铟。以铅、锡等为主体的多元合金及金属化合物，含有铟、锗等有价金属，可采用碱熔、酸浸的方法回收铟、锗等有价金属。如电炉底铅是以铅、锡等为主体的多元合金及金属化合物，往电炉底铅中加入 NaOH，进行碱熔和碱煮，将细浸出渣酸浸，两段酸浸的铟总浸出率达 99%，铟直收率达 84.3%。

我国铟的提取工艺在 20 世纪 90 年代初获得突破，在有色金属工业快速发展的大背景下，铟的提取工艺普及非常快，特别是铟价高涨之后，铟的综合回收受到企业的普遍重视，国内科研单位和生产企业针对各种含铟物料的提铟工艺又取得长足进展，因此我国铟产量增长迅速。主要生产厂家的工艺特点，在于针对不同的含铟原料采取不同的初步富集方法和溶

解技术，再根据介质情况选择适合的萃取剂。如华锡集团和柳州铟泰科技有限责任公司，提铟原料为含铟量大约0.2%的炼锌铁钒渣；葫芦岛锌厂、韶关华力公司、韶关冶炼厂则是从含铟2%～3%的硬锌块中提铟；株洲冶炼厂用置换渣（含铟2%～3%）作为提铟原料；柳州锌品公司从生产立德粉的浸出渣（含铟0.2%）中提炼。

（3）价格　我国是全球第一大原生铟供应国，然而这一垄断性资源优势却没有体现出“中国价值”，其原因有以下几方面：

1）铟资源价格长期遭受外国厂家的压制。2010年7月16日，我国19家具有铟出口资质和配额的企业就MB（MetalBul—letin，英国《金属导报》周刊）的精铟报价问题发表联合声明：认为MB报道的精铟价格不能代表当前中国市场的主流价格。2010年6月中旬以来，我国厂商未曾以MB所报道的低价出货，上述企业要求MB公正地发布即时市场价格，否则将联合业内人士拒绝参照MB的报价，并拒绝向其提供任何有关信息。19家企业“激烈”行动背后正是我国在国际铟市场缺少话语权的具体体现。自2010年6月9日以来，MB对铟金属的最低报价就一直维持在520美元/kg，我国企业对此明确提出异议，认为MB报价低于市场主流价格，MB声称其报道的低价确为中国出口的不含税价格。在几次与MB沟通未果的情况下，我国企业通过公开申明的方式表明自己的立场，而中国有色金属工业协会铟业分会（以下简称铟业分会）也表态称，我国是铟最主要的原产地，理应在铟的价格问题上更有话语权，从6月至7月，铟业分会就MB低报中国铟价格与对方进行了一个半月的艰难磋商，最后迫使MB正视中国企业的要求，提高了报价。

2）日本控制铟加工核心技术。日本是铟需求大国，我国70%的铟出口日本。在铟产业链中，我国通过消耗大量的铟资源赚取微薄的利润，而日本等国却将每年从我国大量进口的低价铟加工成高端产品，再以高价卖给我国。以目前的市场价格为例，我国出口的精铟价格仅为每吨300万元左右，但从日本进口的铟靶材（ITO粉）高达每吨两三千万元，价格接近精铟的10倍。铟是ITO靶材生产的主要原料，自1994年以来，国内有不少企业联合高校对相关技术进行研发，但至今无法掌握高品质ITO靶材制作所需的技术，这些技术目前主要被日本的几大公司掌握，日本矿业公司、三井产业等4家企业控制着全世界95%左右的ITO靶材市场份额，我国株洲冶炼集团有限公司等公司曾与日本企业进行过谈判，但一直无法引进相关技术。

3）铟价低，波动大。铟价历史上最高曾达到9000元/kg，2010年初报价还是7000～8000元/kg，到了2010年2季度突然暴跌，仅仅三四个月的工夫一路跌到1000多元/kg。一直以来，铟金属的价格波动都比较频繁，上下起伏很大。这是因为铟出口价格掌控在国际订货商手中，他们有需求，价格就上去，反之就下降。而且国际买家到我国采购采取询价策略，当市场出现暂时性过剩时，国内很多企业都恐慌性抛货、降价，致使铟市场的价格波动大。

4）非主营业务。铟矿多伴生在有色金属硫化矿物中，特别是硫化锌矿，其次是方铅矿、氧化铅矿、锡矿等，需通过相关工艺才能提炼出铟。目前包括株洲冶炼集团有限公司、深圳市中金岭南有色金属股份有限公司、葫芦岛锌业股份有限公司、西藏珠峰工业股份有限公司、云南罗平锌电股份有限公司等企业都有铟业务，但对于株洲冶炼集团有限公司等企业来说，铟并不是主营业务，而是副产品，生产成本低，因此价格也往往不高，这也造成了铟价格一直被市场低估。

5）产业链延伸不够。国内在产业链延伸方面的科技投入不够，致使铟的深加工产品不能生产，国内下游行业直接消费少，精铟必须依赖出口。

6）原料价格上涨，环保跟不上。与铟价的低迷相比，各种提取铟的原材料价格、各种辅助材料价格一直上涨，挤压了粗铟的利润空间；环保等方面的要求日益严格，由于没有成熟的处理铟生产废水的方法，许多小铟厂被迫关闭，制铟企业承受着巨大的环保压力。

7）关税压力。2007 年 6 月 18 日开始，我国对铟出口实行许可证和配额管理，并征收 15% 的关税，而在此前，出口铟可以享受退税 13% 。一进一退之间利润的巨大下滑，也加速了小铟厂的关闭。在个旧，颇有实力的乘风有色金属由于没有利润，虽然拥有铟出口配额，但也不得不停止生产。

8）供大于求。根本上来说，铟市场一直处于供大于求的局面，来自欧洲、美国及日本的厂家需求持续低迷，致使铟价格低位徘徊。

9）管理不到位。出口配额分配不够合理，并没有按照具体的市场情况来决定，如有的区域只拥有 2t 的配额，而当地一年的铟产量可以达到 50t，但国内铟产品的应用根本支撑不起内销市场。目前我国有 4 个铟产品海关税则号，基本适用于冶炼产品，而国内外大量需要的铟靶材则没有单独的税则号，这对行业统计、了解下游行业需求以及引导国内深加工产品发展极为不利，因为没有铟靶材税则号，造成铟业分会至今无法核实国内出口、进口铟靶材的量，也无法知道需求，不利于铟靶材产业化的发展。铟业分会在提交 2011 年海关税则号更新目录中再度提交了铟靶材税则号。

（4）改进措施

1）完善铟产业政策。国家近年来已经意识到了铟资源的重要性，因此实行了出口配额许可证管理制度，并取消了出口退税，同时增加了出口关税，目的就是要保护国内的铟资源，规范铟行业的发展，使铟价格能够符合其价值。

2）中国的铟金属产业规模小，企业多而散，想夺回定价权，必须“抱团”。2009 年 9 月，中国有色金属工业协会成立铟业分会，为铟行业搭建一个交流的平台。

3）开辟国内市场。掌权定价权的要点是能生产下游产品，开拓国内市场，将铟靶材产业化，并应用于太阳电池。用铟最多的是 ITO 靶材，主要应用于平板液晶行业，但铟靶材国内基本没有实现产业化，主要靠进口。铟靶材产业投资大，技术要求高，至少需要投入 2 亿 ~3 亿元，这不是一般的小铟厂可以承受的。另外，薄膜太阳电池和 LED 的快速发展，将是铟最重要的应用领域之一。业内应以专家牵头，组织力量齐心攻破这两道难关。

（5）铟的价值

1）铟作为一种优良的改性剂，有“金属维他命”之称，良好的商品属性支撑了铟的金融属性的开发。

2）铟具有很好的保值性能，一些金融部门已经接受铟作为融资工具进行抵押贷款。

3）铟还可以作为投资工具活跃于资本市场，一般金属行情波动周期为 5 ~7 年。铟具有很好的价格波动性，每年铟价会有两轮涨势。日本是目前最大的铟消费国，每年 4 月份日本的通关优惠政策会导致日本采购大增，铟价暴涨；11 月底前日本、韩国企业则会为第二年生产提前 2 ~3 个月大量采购，价格也会小涨。如此波动的行情有利于投资者利用金融杠杆进行有效操作，获取利益。

4）铟还可能与股票债券等硬性资产相提并论，用作风险规避。铟与银价值非常相近，

而相比之下铟更加稀缺。铟优于黄金投资的理由还在于，金价已经到达一个高位，而铟的储量只有1.6万t，用量却以每年10%～15%的速度上升，未来价格有翻倍可能。尽管短期内市场暂时疲软，但长期来看，如果没有强力的替代材料出现，铟的价格总会有所突破。

5）供不应求态势确立。一方面，随着铟在薄膜太阳电池、LED等新领域的应用日益广泛，铟的需求量有望保持每年10%～15%的增速；另一方面，伴随着以我国为代表的铟资源国对铟实现战略储备和出口配额，原生铟的供应将逐步呈现收紧态势，而再生铟的供给也存在瓶颈，从中长期来看，铟的供不应求态势基本确立，预计2015年铟的需求量将达到3000t/年，铟价有望回归合理价值2000～3000美元/kg。

5. 危害及防治

（1）危害　美国和英国已公布了铟的职业接触限值为0.1mg/m^3，而这两个国家铅的标准为0.15mg/m^3。依据毒理学研究结果，铟及其化合物的急性毒性大多属于低毒或微毒。铟及其化合物经过消化道吸收剂量很小，动物实验表明，水溶性大的盐类吸收量稍多，但通常未超过摄入量的1%。铟及其化合物的粉尘是职业接触的主要形式，其通过呼吸道吸收的剂量也与水溶性有关。给实验动物气管内吸入或注入可溶性铟盐或氧化铟，可以观察到肺部炎症、心肌和肝肾细胞的变性。研究者发现，实验动物吸入不溶性三氧化二铟粉尘，造成肺泡蛋白沉着，但是没有发生纤维化的表现。铟及其化合物通常不会造成皮肤损害。

由于铟的工业应用通常是和其他物质生成混合物质，其对人体的协同损害作用依然有待研究。

（2）防治　在生产企业建设过程中，针对可能存在铟及其化合物污染的工程项目，需要做到卫生防护措施和生产工艺同时设计、同时施工、同时投产使用，做好有害因素的源头治理。在铟及其化合物作业环境中，需要有效的通风设施，生产过程中尽可能封闭粉尘来源，保证工作场所铟及其化合物空气浓度标准符合国家职业卫生标准。工作中接触铟及其化合物的场合，需要强调预防为主的理念，做好必要的职业卫生防护。劳动者在工作场所需要戴防尘口罩，遵守操作规程。从事铟及其化合物作业的人员，应当定期接受职业健康检查，对存在职业禁忌者，应及时调离铟及其化合物作业场所。

吸入铟产生的职业病原本很少见，但随着大量液晶屏幕生产厂家落户我国，这种现象必须引起我们的重视。

四、镓

1. 概况

元素符号	Ga
相对原子质量	69.72
元素类型	金属
原子体积/(cm^3/mol)	11.8
地壳中含量	18×10^{-4}%
太阳中的含量	0.04×10^{-4}%
海水中的含量	0.00001×10^{-4}%
原子序数	31
核外电子数	31
核外电子排布	2-8-18-3

电子构型	$1s^2\ 2s^2p^6\ 3s^2p^6d^{10}\ 4s^2p^1$
原子半径/Å	1.81
共价半径/Å	1.26
离子半径/Å	0.62
质子质量/kg	5.1863×10^{-26}
质子相对质量	31.217
元素周期表所属周期	4
元素周期表所属族数	ⅢA
氢化物	GaH_3
氧化物	Ga_2O_3
最高价氧化物化学式	Ga_2O_3
常见化合价	+3
氧化态	主要 Ga^{+3}
	其他 Ga^{+1}、Ga^{+2}
声音在其中的传播速率/(m/s)	2740
莫氏硬度	1.5
晶体结构	正交晶胞
晶胞参数：	
a = 451.97pm	
b = 766.33pm	
c = 452.6pm	
α = 90°	
β = 90°	
γ = 90°	
电离能/(kJ/mol)：	
M - M + 578.8	
M + - M2 + 1979	
M2 + - M3 + 2963	
M3 + - M4 + 6200	
M4 + - M5 + 8700	
M5 + - M6 + 11400	
M6 + - M7 + 14400	
M7 + - M8 + 17700	
M8 + - M9 + 22300	
M9 + - M10 + 26100	
比热容/[J/(g · K)]	0.37
蒸发热/(kJ/mol)	258.7
熔化热/(kJ/mol)	5.59
电导率/(10^6S/cm)	0.0678

热导率/[W/(cm·K)]	0.406
肝中含量	$0.0025\times10^{-4}\%$
肌肉中含量	$0.0014\times10^{-4}\%$
血中含量/(mg/dm^3)	<0.08

2. 性状

(1) 物理性状　镓是一种稀有的三价金属元素，固体密度为5.904g/cm^3，熔点为29.78℃，沸点为2403℃，第一电离能为5.999eV，质软、性脆，在空气中表现稳定。图9-5为镓，图9-6为大块镓单晶。



图9-5　镓

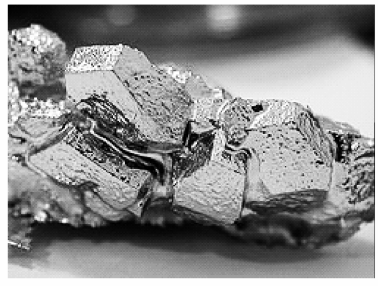


图9-6　大块镓单晶

固体镓为蓝灰色，液体镓为银白色；镓与钒、铌、锆形成的合金具有超导性，电阻率为$2.7\times10^{-7}\Omega\cdot m$；液态镓的蒸气压很低，1350℃时仅为133.3Pa。在所有元素中，镓的液态温度范围最宽（为29.93~2403℃）。固态镓的结构复杂，液态镓易出现过冷现象，在快速冷却时，液体镓可以在-40℃的过冷状态下仍保持液态。液态镓转为固态时，镓体积膨胀，膨胀率达3.2%，已熔融的金属，在温度下降到室温时，可保持液态达数日之久，适宜贮藏于塑料容器中。液态镓几乎能润湿所有物质的表面，具有优良的浇注性能，能迅速扩散到某些金属的晶格内，在高温下能和许多金属生成合金。

(2) 化学性状 有+1~+3三种价态，其中以+3价化合物最稳定。镓的化学活性不如铝活泼，在常温下几乎不受氧和水的侵蚀，只在高温下才被氧化，与沸水反应剧烈，与200℃的高压水蒸气接触，会氧化生成氢氧化镓。镓缓慢溶于硫酸和盐酸中，室温下不溶于硝酸，可溶于热的强酸及强碱中，分别形成镓盐或镓酸盐。镓的氧化和氢氧化物都是两性的，可溶于酸和碱中。随着纯度的提高，镓在酸和碱中溶解速度变慢。镓能和卤素作用生成各种卤化物，反应生成三卤化镓或一卤化镓。镓在高温下能与硫、硒、碲、磷、砷、锑反应，生成的化合物都有半导体性质。金属镓腐蚀很强。

3. 用途

1) 镓在常温下看上去像一块锡，如果你想把它放在手心里，它马上就熔化了，成为银亮的小珠，因为镓的熔点很低，只有29.78℃。镓的熔点虽然很低，可是沸点却非常高，高达2403℃。人们就利用镓的这个特性来制造测量高温的温度计，把这种温度计伸进炉火熊熊的炼钢炉中，玻璃外壳都快熔化了，里边的镓还没有沸腾。如果用耐高温的石英玻璃来制造镓温度计的外壳，它能够一直测到1500℃的高温。所以，人们常用这种温度计来测量反应炉、原子反应堆的温度。

2) 镓具有较好的铸造特性，由于它“热缩冷胀”，被用来制造铅字合金，使字体清晰。

3）镓与许多金属，如铋、铅、锡、镉，铟、铊等，生成熔点低于60℃的易熔合金，如铟质量分数为25%的镓铟合金（熔点16℃）、锡质量分数为8%的镓锡合金（熔点20℃），可以用在电路熔断器和各种保险装置上，温度一高，它们就会自动熔化断开，起到安全保险的作用。加入铝中可制得易热处理的合金。

4）镓同玻璃合作，有增强玻璃折射率的效能，可以用来制造特种光学玻璃。因为镓对光的反射能力特别强，同时又能很好地附着在玻璃上承受较高的温度，所以用它做反光镜最适宜。镓镜能把射来光的70%反射出去。

5）镓的一些化合物，如今与尖端科学技术结下了不解之缘。镓在空气中表现稳定，高温时能与大多数金属作用，是制造半导体砷化镓、磷化镓、锗半导体的重要元素。

① 砷化镓性能优良，可作太阳电池；用它作为电子元件，可以使电子设备的体积大为缩小，实现微型化；人们还用砷化镓做元件制成了砷化镓激光二极管，这是一种效率高、体积小的新型激光器。

② 磷化镓是一种半导体发光元件，能够射出红光或绿光，可制成发光二极管，人们把它做成了各种阿拉伯数字形状，在电子计算机中，利用它来显示计算结果。

6）镓可用作高温温度计和真空装置中的密封液。镓的最重要的应用是在制造半导体器件方面。镓还用来制造阴极蒸气灯等。在原子能工业中，用镓作为热传导介质，把反应堆中的热量传导出来。

7）镓和金的合金应用在装饰和镶牙方面，用作有机合成的催化剂。

8）医学上用于癌的定位。

4. 来源及制备

（1）来源　在化学元素周期表建立的过程中，性质相似的元素成为一族已为当时的化学家们所接受。当时法国化学家布瓦邦德朗在用光谱分析物质时发现，在铝族中，铝和铟之间缺少一个元素。从1865年开始，他用分光镜寻找这个元素，分析了许多矿物，但是都没有成功。直到1875年9月，在闪锌矿中离析出几克性质与门捷列夫预言的“类铝”相同的元素，从光谱分析上，布瓦邦德朗发现是以前从未见过的新谱线，于是断定这种物质是以前不曾发现的元素。经过电解后得到了镓，布瓦邦德朗在法国化学家们面前做了一组实验，证明新元素的存在。当时布瓦邦德朗测定的新元素密度是4.7g/cm^3，而门捷列夫根据元素周期表推算出的密度应该是5.9～6g/cm^3，布瓦邦德朗又重新测定了这种新元素，证实了密度应该是5.96g/cm^3。他将此物质命名为gallium，意思为“法国的”，元素符号定为Ga。镓是化学史上第一个先从理论预言，后在自然界中被发现验证的化学元素。镓的发现不仅仅是一个化学元素的发现，它的发现引起了科学家们对门捷列夫制定的元素周期表的重视，使化学元素周期表得到赞扬和承认。

镓在自然界中常以微量分散于铝土矿、闪锌矿等矿石中，由铝土矿中提取制得。

（2）制备　高纯镓一般杂质总含量在10^{-5}以下，按镓含量分为5N、6N、7N和8N共四种级别，正交晶系，各向异性显著，0℃时电阻率沿a、b、c三个轴分别为$1.75\times10^{-6}\Omega\cdot m$、$8.20\times10^{-6}\Omega\cdot m$和$55.30\times10^{-6}\Omega\cdot m$。高纯镓可采用化学处理、电解精炼、真空蒸馏、区域熔炼、拉单晶等多种工艺方法制备。

欧盟委员会曾发布题为《对欧盟生死攸关的原料》的报告，将14种重要矿产原料列入“紧缺”名单，镓名列其中。尽管镓是紧缺资源，但却是被浪费的紧缺资源，因为镓很少单

独成矿，多为伴生，回收率极低，多在1%以内，而且一旦生产，要建立符合环保标准的生产线，投入巨大。很多大型的矿业集团不愿意投入资金进行提取，而是任其白白浪费。例如内蒙古准格尔煤层中富含镓资源，探明的储量为5万t左右，其含量已经达到镓的工业品位，满足开发利用的标准。虽然这部分煤矿中富含镓，但采矿初期并没有对镓收集提炼，富含镓的煤炭资源仍然是按照普通煤炭的政策进行开采和销售，这部分镓资源被默默消耗掉。我国山西、河南、山东、河北、贵州等地的铝土矿中，都伴生镓元素；内蒙古、云南、重庆等地，镓富集于煤层、锡矿和锗矿中；此外，在部分铅锌矿里面也富集镓。小型镓业公司抓住这机会，大型的矿业集团弃之不用的废料变成了很多小型镓业公司的原材料，在环保监管不严的情况下，小型镓业公司往往投入几十万就可以建一条镓矿提取线，提取工艺也十分简单，年产只有3～4t甚至1t。镓市场越来越大，资金回笼快，吸引了一些大型矿业集团开始投资，进行镓矿提取。2009年，东方希望集团旗下的东方希望渑池镓业有限公司，投资1.5亿建立了一条产能为40t的生产线，依托年产250万t的氧化铝生产企业，实现了矿产的综合利用，已经生产了十几吨的镓，在带来不菲经济效益的同时，还大大提高了氧化铝的纯度。中国铝业公司是产镓大户，年产超过20t，出口到很多国家。北京吉亚半导体材料有限公司、万盛集团（珠海）贸易有限公司等属于规模比较大的企业。

我国本溪满族自治县草河掌境内发现了镓金属矿种，新发现的镓矿分布面积较大，品位较高。我国永川市须家河煤系地层中，贮藏有丰富的镓（锗）稀有金属元素，在现有永和煤矿、中心桥煤矿井田中发现两个中型镓矿床，这两个中型镓矿床是国内稀有的少数矿床之一，投资2000万元人民币，生产规模年产10t金属镓，粉煤灰年处理量为50～80万t。金属镓售价为420～460美元/kg，折合成人民币为350～382万元/t，年生产10t的金属镓提取工厂，销售价按450美元/kg计算，年销售收入可达3700多万元，税前利润在1500万元左右，2～3年即可收回投资成本。

我国已探明的镓资源储量为10万t，但产量不稳定。我国政府对包括稀土、钨、锑、钼、锡、铟、锗、镓、钽和锆等10大稀有金属已建立战略储备库，镓的出口也进行管理，镓的出口配额从每年的5.4t下降到3.6t，而且还有逐年下降的趋势。

日本是世界上最大的镓进口国，其次是欧美等发达国家。美国地理测绘局（U.S. GeologicalSurvey）对镓的生产销售做出的统计显示，中国、德国、哈萨克斯坦和乌克兰是当今世界的四大镓生产国，美国消耗的镓中16%是从中国进口的。2005年，镓价格达到了历史高位，其价格一度在每公斤5200元～5800元之间徘徊。目前，全世界镓的需求量超过100t/年，而实际年生产总量不足80t。

5. 危害及防治

（1）危害　镓具有腐蚀性，暴露会刺激和灼伤眼、鼻和咽喉；反复或高浓度暴露会引起恶心、呕吐、皮疥，造成肾损伤。

（2）防治　如皮肤接触，应迅速脱去污染的衣物，用清水冲洗患处；如眼睛接触，应立刻用大量清水冲洗至少15min；如吸入，需将患者移至新鲜空气处。

保护眼睛时，应戴防化镜和面罩（操作液体时），或戴防尘镜和面罩（操作粉尘时）；保护身体时，应穿戴清洁完好的防护服、足靴、头盔；防护手时，应戴手套；保护呼吸系统时，应选用适当的呼吸器。处理泄漏时，须穿戴防护用具进入现场，使用干沙、泥土或类似物质吸收液体，并放入密闭容器内。

镓平时应贮存在密闭容器内，置于凉爽、通风处，避免接触酸和卤素，运输须贴“腐蚀”标签，航空、铁路限量运输。

五、硒

1. 概况

中文名称	硒
英文名称	Selenium
元素符号	Se
类型	非金属元素
原子体积/(cm^3/mol)	16.45
元素在海水中的含量（太平洋表面）	1.5×10^{-12}%
地壳中的含量	5×10^{-6}%
自然环境中发现的最高含量	3%
相对原子质量	78.89
原子序数	34
氧化态	主要 Se^{+4}，Se^{+6}；其他 Se^{-2}
化学键能/(kJ/mol)：	
Se-H	305
Se-C	245
Se-O	343
Se-F	285
Se-Cl	245
Se-Se	330
晶胞参数：	
a = 905.4pm	
b = 908.3pm	
c = 1160.1pm	
α = 90°	
β = 90.810°	
γ = 90°	
质子数	34
中子数	45
摩尔质量/(g/mol)	79
原子半径	1.22
所属周期	4
所属族数	VIA
电子层排布	2-8-18-6
价层电子排布	[Ar] 4s24p4
晶体结构	晶胞为六方晶胞
电离能/(kJ/mol)：	

M – M + 940.9
M + – M2 + 2044
M2 + – M3 + 2974
M3 + – M4 + 4144
M4 + – M5 + 6590
M5 + – M6 + 7883
M6 + – M7 + 14990
M7 + – M8 + 19500
M8 + – M9 + 23300
M9 + – M10 + 27200

莫氏硬度	2
常见化合价	+4、+6
同位素	Se-74 Se-76 Se-77 Se-78 Se-80 Se-82

图 9-7 为硒。



图 9-7　硒

2. 性状

硒是灰色呈金属光泽的固体，声音在其中的传播速率为 3350m/s，密度为 4.81g/cm^3，熔点为 217℃，沸点为 684.9℃，是稀散元素之一。在已知的 6 种固体同素异形体中，3 种晶体（α 单斜体、β 单斜体和灰色三角晶）是最重要的，还以 3 种非晶态固体形式存在(其中有红色和黑色的两种无定形玻璃状)。硒在空气中燃烧发出蓝色火焰，生成二氧化硒（SeO_2）。硒能直接与各种金属和非金属反应，包括氢和卤素，不能与非氧化性的酸作用，但它溶于浓硫酸、硝酸和强碱。溶于水的硒化氢能使许多重金属离子沉淀成为微粒的硒化物。硒与氧化态为 +1 的金属可生成两种硒化物，即正硒化物（M_2Se）和酸式硒化物（MHSe）。正的碱金属和碱土金属硒化物的水溶液会使元素硒溶解，生成多硒化合物（M_2Se_n），也能与硫形成多硫化物。

3. 用途

硒可以用作光敏材料、电解锰行业的催化剂、动物体必需的营养元素和植物有益的营养元素等。

（1）光敏材料　利用无定形硒的薄膜对于光的敏感性，能使含有铁化合物的玻璃着色或脱色，高质量的信号透镜玻璃中含 2% 硒，含硒的平板玻璃用作太阳能的热传输板和激光器窗口红外线过滤器；用作油漆、搪瓷、玻璃和墨水中的颜色、塑料；用于制作光电池、整流器、光学仪器、光度计等；硒在电子工业中可用作光电管、太阳电池，在电视和无线电传真等方面也使用硒。

（2）电解锰行业的催化剂　冶金方面，电解锰行业的硒用量占到我国全部硒产量的较大比重。此外，含硒的碳素钢、不锈钢和铜合金具有良好的加工性能，可高速切削，加工的零件表面光洁。硒与其他元素组成的合金用以制造低压整流器、光电池、热电材料。硒以化合物形式用作有机合成氧化剂、催化剂，可在石油工业上应用。硒加入橡胶中可增强其耐

磨性。

（3）营养元素

1）由于硒是动物和人体中一些抗氧化酶（谷胱甘肽过氧化物酶）和硒-P 蛋白的重要组成部分，在体内起着平衡氧化还原氛围的作用，具有提高动物免疫力的作用，因此硒可作为动物饲料微量添加剂，也在植物肥料中添加微量元素肥，提高农副产品含硒量。硒已被作为人体必需的微量元素，在 2000 年制定的《中国居民膳食营养素参考摄入量》中 18 岁以上者的推荐摄入量为 50μg/d，适宜摄入量为 50 ~ 250μg/d，可耐受最高摄入量为 400μg/d。我国既存在硒资源丰富地区，又存在大面积硒缺乏地区，2/3 地区硒摄入量低于最低推荐值。

2）防癌之王。硒被科学家称为人体微量元素中的“防癌之王”。硒用于人体，其原理主要有两个，一是组成体内抗氧化酶，保护细胞膜免受氧化损伤，保持其通透性；二是硒-P 蛋白具有螯合重金属等毒物，降低毒物毒性的作用，起抗氧化作用。

硒是谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）的组成成分，每摩尔的 GSH-Px 中含 4g 原子硒，GSH-Px 的作用是催化还原性谷胱甘肽（GSH）与过氧化物的氧化还原反应，所以可发挥抗氧化作用。GSH-Px 是重要的自由基清除剂，在体内，GSH-Px 与维生素 E 抗氧化的机制不同，两者可以互相补充，具有协同作用。正是由于硒的高抗氧化作用，适量补充能起到防止器官老化与病变、延缓衰老、增强免疫、抵御疾病、抵抗有毒重金属、减轻放化疗副作用、防癌抗癌等作用。科学界研究发现，一个地区食物和土壤中硒含量的高低与癌症的发病率有直接关系。例如，此地区的食物和土壤中硒含量高，癌症的发病率和死亡率就低，反之，这个地区的癌症发病率和死亡率就高。事实说明，硒与癌症的发生有着密切关系。硒具有预防癌症的作用，使用硒辅助治疗癌症已十分普遍。

3）硒是迄今为止发现的最重要的抗衰老元素。广西壮族自治区巴马县是世界著名的四大长寿地区之一。中国科学院专家对巴马县的研究表明，巴马县土壤、谷物中的硒含量高于全国平均水平 10 倍以上，百岁老人血液中的硒含量高出正常人 3 ~ 6 倍。在安徽省石台县也发现一个长寿村，80 岁以上老人占全村人口的 12%，50 年来未发现一例癌症、心脑血管、糖尿病和肥胖患者，经对该村土壤中硒含量分析测定表明，硒含量高出一般地方 10 倍。硒元素是抗氧化剂谷胱甘肽过氧化物酶的活性成分，人体补充了充足的硒元素，就能有效清除自由基，抗氧化，延缓衰老。硒如果配合维生素 E、β-胡萝卜素进行适量补充，效果会更好。

4）增强免疫力。有机硒能清除体内自由基，排除体内毒素，抗氧化，有效抑制过氧化脂质的产生，防止血凝块，清除胆固醇，增强人体免疫功能。

5）防止糖尿病。硒是构成谷胱甘肽过氧化物酶的活性成分，它能防止胰岛 β 细胞氧化破坏，使其功能正常。医生通过让糖尿病人定量服硒，可以起到保护和恢复胰岛功能的作用，促进糖分代谢，降低血糖和尿糖，改善糖尿病患者的症状。所以，有人称硒是微量元素中的“胰岛素”。

6）防止白内障。生物学家们经过长期的研究发现，硒对视觉器官的功能是极为重要的，硒能催化并消除对眼睛有害的自由基物质，从而保护眼睛的视网膜。视网膜由于接触电脑辐射等较多，易受损伤，若人眼长期处于缺硒状态，就会影响视网膜的完整，从而导致视力下降和许多眼疾病，如白内障、视网膜病、夜盲症等。一些医院对眼病患者采用硒治疗，临床表明，硒有增强玻璃体的光洁度、提高视力、防止白内障、治疗视网膜病等多种眼疾的

作用。

7）防止心脑血管疾病。硒是维持心脏正常功能的重要元素，对心脏肌体有保护和修复的作用。人体血硒水平的降低，会导致体内清除自由基的功能减退，造成有害物质沉积增多，血压升高、血管壁变厚、血管弹性降低、血流速度变慢，送氧功能下降，从而诱发心脑血管疾病。科学补硒对预防心脑血管疾病、高血压、动脉硬化等都有较好的作用。

8）防止克山病、大骨节病、关节炎。缺硒是克山病、大骨节病两种地方性疾病的主要病因，补硒能防止骨髓端病变，促进修复，对这两种地方性疾病和关节炎患者都有很好的预防和治疗作用。

9）解毒、排毒。硒与金属的结合力很强，能抵抗镉对肾、生殖腺和中枢神经的毒害。硒与体内的汞、铅、锡、铊等重金属结合，形成金属硒蛋白复合，从而解毒、排毒。

10）防治肝病、保护肝脏。我国预防医学科学院的专家于树玉历经 16 年，在肝癌高发区流行病学调查中发现，肝癌高发区居民血液中的硒含量均低于肝癌低发区，肝癌的发病率与血硒水平呈负相关。位于长江三角洲的江苏启东地区是鱼米之乡，经济发达，但是长期以来这里的人们肝癌、肝炎发病率极高，发病原因不清楚。于树玉专家在该地区坚持 16 年，对 13 万居民补硒，结果证实肝癌、肝炎发病率极高的原因是这里的水、土壤、粮食中缺少元素硒，生活在这里的人们从水和粮食中获取的硒很少，体内硒含量特别低，体内缺硒的人易被肝炎病毒传染，长期缺硒的肝炎患者转化为肝癌病人的危险是其他人群的 2 倍。补硒可使肝癌发病率下降 35%，使有肝癌家族史者发病率下降 50%。

综上所述，硒是人体必需的，硒是延长寿命最重要的矿物质营养素，体现在它对人体的全面保护。硒不能由人体自制，因此世界卫生组织建议每天补充 200μg 硒，可有效预防多种疾病的发生。

4. 来源及制备

硒是 1817 年瑞典的贝齐利乌斯（J&ouml；ns Jakob Berzelius）从燃烧黄铁矿制取硫酸产生的粘物质中发现的，是贝齐利乌斯发现铈、钍后发现的又一个化学元素。他命名这种新元素为 selenium。他还发现了硒的同素异形体，他还原硒的氧化物，得到橙色无定形硒；缓慢冷却熔融的硒，得到灰色晶体硒；在空气中让硒化物自然分解，得到黑色晶体硒。

硒与它的同族元素硫相比，在地壳中的含量要少得多。硒成单质存在的矿是极难找到的，工业上可从电解铜的阳极泥和硫酸厂的烟道灰、酸泥等废料中回收而得。目前全球唯一硒独立成矿的地区位于我国湖北恩施，该地区岩石、土壤、动植物硒富集均达到世界之最，并发现超过 1% 的含硒岩石。

很多食物中都有硒，一些食品中含硒较高，如海产品、食用菌、肉类、禽蛋、西兰花、大蒜、巴西坚果、全粒谷物（全麦面包、燕麦粥、大麦）、白米、豆类等。蛋类略高于肉类，内脏和海产品含硒为 0.4～1.5mg/kg，瘦肉含硒为 0.1～0.2mg/kg，蛋类含硒为 0.15～0.31mg/kg，谷物含硒为 0.1～0.8mg/kg，奶制品含硒为 0.1～0.3mg/kg，水果蔬菜含硒为 0.1mg/kg，人参含硒为 0.15mg/kg，花生含硒为 0.14mg/kg。植物性食物的硒含量决定于当地水土中的硒含量。例如，我国高硒地区所产粮食的硒含量高达 4～8mg/kg，而低硒地区的粮食是 0.006mg/kg，二者相差 1000 倍。营养学家也提倡通过硒营养强化食物补充有机硒，如富硒大米、富硒鸡蛋、富硒蘑菇、富硒茶叶、富硒麦芽、硒酸酯多糖、硒酵母等。现在国内开展这方面研究的机构有中国科技大学、中国科学院南京土壤研究所、中国科学院地理资

源研究所、中国农业大学、中国农业科学院、中国环境科学院、上海农业科学院和南京农业大学等，这方面技术实力较强或市场规模较大的中国企业有苏州硒谷科技有限公司（Setek）、安琪酵母股份有限公司（Angel）、上海黄金搭档生物科技有限公司（Gloden Partner）、安徽省华信生物药业股份有限公司、南京远望有限公司（Yuanwang）等，国际企业有新西兰的 SouthStar、英国的 GrowHow、美国的 AllTech。一些硒强化产品不断涌现，美国科学家制成了富硒果汁、富硒牧草、富硒奶，澳大利亚科学家制成了富硒小麦、富硒啤酒、富硒饼干和富硒牛肉干，我国科学家研究的富硒水果、富硒谷物、富硒大闸蟹、富硒烟草也丰富了硒在营养强化领域的应用。

5. 危害及防治

1）无机硒盐毒性较大，在日本 1993 年已禁止在食品和饲料中添加，支持采用安全性更高的含硒蛋白、氨基酸等有机形态硒或富含硒的农副产品。

2）硒过量表现为指甲变厚、毛发脱落、肢端麻木、偏瘫等。

3）硒缺乏症表现为未老先衰，引发心肌病及心肌衰竭，发生克山病、大骨节病，精神萎靡不振，精子活力下降，易患感冒等。

六、砷

1. 概况

注音	shēn
英文	Arsenic
元素符号	As
CAS 号	7440-38-2
原子序数	33
元素相对原子质量	74.92
元素类型	类金属
莫氏硬度	3.5
晶体结构	晶胞为三斜晶胞
地壳中的含量	$1.5\times10^{-4}\%$
原子体积/(cm^3/mol)	13.1
化学键能/(kJ/mol)：	
As-H 245	
As-C 200	
As-O 477	
As-F 464	
As-Cl 293	
As-As 348	

2. 性状

砷是灰色半金属，俗称砒，是一种以有毒著名的类金属，砷有三种同素异形体，呈灰、黄、黑色。工业上用的是在室温下最稳定的灰色晶体，光亮似银，有金属物性，质硬而脆，并善于传热导电，易被捣成粉末。金属砷不溶于水，但溶于硝酸和热硫酸，密度为 5.727g/cm^3，熔点为 817℃（28atm，1atm = 101.325kPa）。砷在空气中加热至约 200℃时，有荧光出现；到

400℃时，会有一种带蓝色的火焰燃烧，并形成白色的氧化砷烟；在空气中加热到613℃时，便可不经液态直接升华，成为蒸气，形成三氧化二砷烟雾，砷蒸气具有一股难闻的大蒜臭味。砷的化合价为+3和+5，第一电离能为9.81eV。游离的砷是相当活泼的，游离元素易与氟和氮化合，在加热情况下也与大多数金属和非金属发生反应。三种有着不同晶格结构的类金属形式砷存在于自然界，严格地说是砷矿和更为稀有的自然砷铋矿和辉砷矿，但更容易发现的形式是砷化物与砷酸盐化合物，总共有数百种的矿物是已被发现的。

自然界中含砷的矿物有雄黄、雌黄、信石等。砷的硫化合物具有强烈毒性，今天砷的拉丁名称arsenium和元素符号As正是由这一词演变而来。

3. 用途

砷与其化合物自古以来被用作颜料和杀虫剂、灭鼠药。砷作合金添加剂生产铅制弹丸、印刷合金、黄铜（冷凝器用）、蓄电池栅板、耐磨合金、高强结构钢及耐蚀钢等。高纯砷是制取化合物半导体砷化镓、砷化铟等的原料，也是半导体材料锗和硅的掺杂元素，这些材料广泛用于制作二极管、发光二极管、红外线发射器、激光器等。砷的化合物还用于制造农药、防腐剂、染料和医药等。

砷用于制造硬质合金；黄铜中含有微量砷时可以防止脱锌；砷的化合物可用于杀虫及医疗；三氧化二砷、砷酸盐可作杀虫剂、木材防腐剂；高纯砷还用于半导体和激光技术中。

4. 来源及制备

西方化学家一般认为，砷是由德国罗马修道会学者和炼金家马格纳斯（Magnus A，1193—1280）在1250年从含砷矿物中首先制得的。因为他确实在那时用两份肥皂与一份雄黄共炼而制得了单质砷。其实，早在公元四世纪前半叶，中国晋朝大炼丹家葛洪（283—363）已在他的名著《抱朴子·仙药篇》中记载了可以制取单质砷的方法。不过由于原文属提要性质，叙述过于简单，长期以来没有人对它作出解释，因而在化学史上被忽略了。但葛洪所记载的方法有可炼单质砷这一点是确凿无疑的。这是世界上关于炼制单质砷最早的可靠记载，比马格纳斯的工作早九百年以上。

三氧化二砷在我国古代文献中称为砒石或砒霜。小剂量砒霜作为药用在我国医药书籍中最早出现在公元973年宋朝人编辑的《开宝本草》中。到18世纪，瑞典化学家、矿物学家布兰特阐明砷和三氧化二砷以及其他砷化合物之间的关系。拉瓦锡证实了布兰特的研究成果，认为砷是一种化学元素，主要以硫化物矿形式存在，有雄黄（As_4S_4）、雌黄（As_2S_3）、砷黄铁矿（FeAsS）等。砷在地壳中的含量约为0.0005%，含量不大，但是它在自然界中到处都有。无论何种金属硫化物矿石中都含有一定量砷的硫化物，因此人们很早就认识到砷和它的化合物。在工厂中，砷是熔炼铅、金、锌、钴、镍的副产品。

砷有三种形式存在，即不带价（As）、三价砷（aesenite）和五价砷（arsenate），其化合物对哺乳动物的毒性由价数的不同，有机或是无机，是气体、液体还是固体，溶解度高低、粒径大小、吸收率、代谢率、纯度等来决定。

（1）来源　砷矿主要以硫化物形式存在，主要用于提炼砷元素、制造砷酸和砷的化合物。世界砷矿的主要产地为智利、墨西哥及菲律宾等国，1993年共生产砷元素约3万t。我国砷矿地质勘查大都是在有色金属和贵金属矿产勘查中顺便检查或综合评价的，未进行过系统调查和研究，勘查程度很低，现探明砷元素储量为356万t。青海砷矿资源线索较多，已知矿产地35处，其中中型矿床4处，矿点7处，矿化点24处。已探明砷元素C+D级储量

为 7.01 万 t（其中 C 级为 0.53 万 t），保有储量为 6.9 万 t，潜在价值为 1.38 亿元，居世界第 9 位。另有，尕科合、都秀等矿点地质储量为 11.8 万 t。

（2）制备　在自然界中，砷主要以二硫化二砷（雄黄）、三硫化二砷（雌黄）、硫砷化铁等形式存在。图 9-8 为砷矿，图 9-9 为自然砷。

1）雄黄（As_4S_4）、雌黄（As_2S_3）是两种天然的含砷矿物，可与氧气发生反应。

$$2As_2S_3 + 9O_2 \xrightarrow{\text{点燃}} 2As_2O_3 + 6SO_2$$

$$As_4S_4 + 7O_2 \xrightarrow{\text{点燃}} 2As_2O_3 + 4SO_2$$

雄黄和雌黄可被 Zn、C 等在加热条件下还原，得到砷单质。

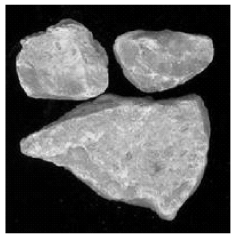


图 9-8　砷矿

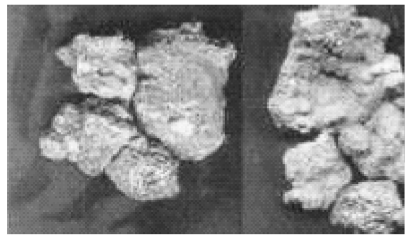


图 9-9　自然砷

2）砷化氢是无色有毒气体，相对分子质量为 77.9454，不稳定，可发生可逆反应。

$$4As + 3O_2 \xrightarrow{\text{点燃}} 2As_2O_3$$

$$2AsH_3 \longrightarrow 2As + 3H_2$$

3）砷化氢是强还原剂，很容易被氧化，与氧气反应（自燃）。

$$2AsH_3 + 3O_2 \longrightarrow As_2O_3 + 3H_2O$$

4）砷化氢与氨气不同，一般不显碱性，可以用于半导体材料砷化镓在 700 ~ 900℃的化学气相沉积。

$$AsH_3 + Ga(CH_3)_3 \longrightarrow GaAs + 3CH_4$$

5）三氧化二砷是毒性很强的物质，砒霜的主要成分，可用于治疗癌症，是两性氧化物，可被一些强氧化剂氧化成五价砷。

被臭氧氧化：

$$3As_2O_3 + 2O_3 \longrightarrow 3As_2O_5$$

被氟气氧化：

$$2As_2O_3 + 10F_2 \longrightarrow 3O_2 + 4AsF_5$$（此反应用于制取高纯度的 AsF_5）

6）三氧化二砷可被过氧化氢氧化成砷酸。

五价砷的卤化物只有五氟化砷能稳定存在，是无色气体，发生水解反应，生成氟化氢（腐蚀玻璃的原理）。五氧化二砷是酸性氧化物，溶于水能生成三种砷酸（偏砷酸、砷酸和焦砷酸）。砷酸（H_3AsO_4）与磷酸性质相似，其钾、钠、铵盐溶于水，其他盐一般不溶于水。

$$2As + 5F_2 \xrightarrow{\text{点燃}} 2AsF_5$$

5. 危害及防治

微量的砷是动物生理所需要的。在雏鸡、仓鼠、山羊、猪和大白鼠实验中，砷缺乏最一

致的表现是生长抑制和生殖异常。生殖异常特征是受精能力损伤和围产期死亡率的增加，所有物种在缺砷时都表现出各种器官内矿物质含量的变化，对砷缺乏的某些应答反应取决于应激因子或其他因素的存在。人的砷需要量为 6.25μg/4.18MJ ~ 12.5μg/4.18MJ，世界各地砷的摄入量一般为 12 ~ 40μg，摄入海产品多的人，砷的摄入量可达到每天 195μg。鱼、海产品、谷类、酒和粮食制品是砷的主要膳食来源。膳食中各种砷很容易被吸收。鱼、海产品、藻类中含有砷胆碱（arsenocholine），这些化合物对人体毒性低而且容易排出体外。

膳食中无机砷酸盐和亚砷酸盐水溶液中的砷有 90% 以上可被吸收，不同形式的有机砷其砷的吸收程度不一样，代表去毒的甲基化多半在肝脏进行，甲基化的能力会因砷暴露量增加而降低。然而，甲基化的能力是可以被训练的，若长时间暴露在低浓度的砷中，之后再暴露在高浓度砷中，则甲基化能力会增强。无机砷在肝脏经甲基化后主要代谢为二甲砷酸，经由肾脏、排汗、皮肤脱皮或指甲头发等排出。在人体内，五价砷和三价砷会互相转换，而海产品中的砷化物无法在人体内转化，通常也以原貌由尿液排出。膳食中的无机砷通常在两天内排出。

（1）危害　含砷矿石的开采和冶炼，以砷化合物为原料的玻璃、颜料、药物、纸张、半导体等的生产以及煤的燃烧，均可能造成砷对环境的污染。砷主要通过呼吸道、消化道和皮肤接触进入体内，砷进入人体内被吸收后，将破坏细胞的氧化还原能力，影响细胞正常代谢，引起组织损害和机体障碍，可直接引起中毒死亡。如果将砷作用于人体局部，最初有刺激症状，久之出现组织坏死。砷对黏膜具有刺激作用，可直接损害毛细血管。自然界的砷多为五价化合物，污染环境的砷多为三价化合物。三价砷在体内的蓄积性和毒性均较五价砷大。砷的毒性与其化合物有关，无机砷氧化物及含氧酸是最常见的砷中毒原因。当砷的摄入量超过排泄量时，经黏膜或皮肤吸收的砷及化合物，就会在毛发、指甲、骨、肝、肾、肺、脾等器官，特别是毛发、指甲中蓄积。

（2）防治

防止工业砷污染的根本措施是改革工艺，对含砷的废水、废气和废渣加以综合利用。与此同时，还须制定标准，控制砷化物在环境中的浓度。我国有的地区地下矿产中有较高的含砷量，在进行地下水资源利用工程施工前应有预防性环境医学监测。对砷中毒患者除采用二巯基丙磺酸钠、二巯基丁二酸钠等解毒药和对症治疗外，还应脱离砷污染环境，以利于疾病的治疗。

七、碲

1. 概况

原子序数	52
相对原子质量	127.60

2. 性状

碲的元素名来源于拉丁文，原意是“地球”。1782 年赖兴施泰因在含金的矿石中发现碲。碲为银白色有金属光泽的固体，有两种同素异形体：一种是结晶形，熔点为 452℃，沸点为 1390℃，莫氏硬度为 2.5，不溶于同它不发生反应的所有溶剂，银白色，有金属光泽，与锑（Sb）相似；另一种是无定形，为黑色粉末，密度为 6.00g/cm^3，熔点为 449.5℃，沸点为 983.3℃。

碲性脆，具有良好的传热和导电本领，电离能为 9.009eV，在空气或氧气中燃烧带有蓝

色火焰，并散发出腐烂的萝卜气味。碲在常温下不与氧起反应，可与卤素反应，但不与硫、硒反应，在高温下不与氢作用，溶于硫酸、硝酸、氢氧化钾和氰化钾溶液，其电阻在高压下急剧增大，并随温度升高而下降。在氧化作用阶段，碲失去电子，表现为 +4 价，如 TeO_2，外层电子形成 Te（Ⅳ）或 Te（Ⅵ），在还原条件及酸性介质条件下，可还原成自然碲或以 Te 形式出现。

图 9-10 为碲。

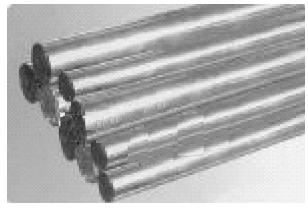


图 9-10 碲

3. 用途

碲主要用于冶金、电子工业、化学工业、玻璃等方面。碲金属化合物是制造太阳电池、辐射探测器和红外探测器的材料。

4. 来源及制备

（1）来源 碲储量为 16 万 t，主要分布在美国、加拿大、中国、智利等国家。碲矿资源分布稀散，大多伴生在其他矿物或以杂质形式存在于其他矿中，我国四川石棉县大水沟碲矿是至今唯一碲独立矿床。碲主要与黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等共生，含量仅 0.001% ~0.1%，主要碲矿物有碲铅矿、碲铋矿、碲金矿（$AuTe_2$）、辉碲铋矿（Bi_2TeS_2）、针碲金银矿和碲铜矿等。辉碲铋矿是一种铋和碲的硫化物矿物，是一种较难独立成矿的碲硫化物，浅灰色，带有金属光泽，并且还会褪色变暗，有叶、粒、块状等。碲金矿中，金为 43.59%，碲为 56.41%。四川石棉县的碲原生矿石含碲一般为 1% ~12%，个别高达 36.6%；含铋一般为 3% ~20%，个别达 40% 以上。针碲金银矿是一种金和银的碲化物矿物，是重要的矿石矿物。1993 年，我国碲的工业储量为 1.345 万 t，当年产量为 3.99t。美国、加拿大、日本、秘鲁和斐济等国 1979 年产金属碲约 290t。

（2）制备 碲的制取主要取决于铜的生产状况，铜阳极泥是碲的主要原料，一般含碲 1.5% ~10%。碲的另一重要来源是铅和镍的阳极泥及有色金属冶炼的烟尘，以及硫酸生产中产出的含碲的酸泥，碲波动在 0.2% ~14%。铜电解精炼所得的阳极泥是碲的主要来源。处理阳极泥的主要方法是硫酸化焙烧法。对于含碲高的阳极泥，干燥后在 250℃下进行硫酸化焙烧，然后在 700℃使二氧化硒挥发，碲则留在焙烧渣中；对含碲低的铜阳极泥和铅阳极泥混合处理时，可进行还原熔炼。高纯碲的制取主要采取电解法。

八、镉

1. 概况

元素符号	Cd
元素类型	金属元素
相对原子质量	112.4
原子序数	48
质子数	48
摩尔质量/(g/mol)	112
原子体积/(cm^3/mol)	13.1×10^{-4}%
太阳中的含量	0.006×10^{-4}%
海水中的含量（太平洋表面）	0.0000011×10^{-4}%
地壳中的含量	0.11×10^{-4}%
氧化态	主要 Cd^{+2}，其他 Cd^{+1}

所属周期	5
所属族数	ⅡB
电子层排布	2-8-18-18-2
晶体结构	晶胞为六方晶胞

晶胞参数：

$a = 297.94\text{pm}$

$b = 297.94\text{pm}$

$c = 297.94\text{pm}$

$\alpha = 90°$

$\beta = 90°$

$\gamma = 120°$

莫氏硬度	2
声音在其中的传播速率/(m/s)	2310

电离能/(kJ/mol)：

M - M + 867.6

M + - M2 + 1631

M2 + - M3 + 3616

M3 + - M4 + 5300

M4 + - M5 + 7000

M5 + - M6 + 9100

M6 + - M7 + 11100

M7 + - M8 + 14100

M8 + - M9 + 16400

M9 + - M10 + 18800

2. 性状

镉的主要物理性见表9-2。

表9-2　镉的主要物理性

密度(20℃)/(g/cm^3)	8.64
熔点/℃	320.9
沸点/℃	767
平均比热容(0～100℃)/[J/(kg·K)]	233.2
熔化热/(kJ/mol)	6.41
汽化热/(kJ/mol)	99.6
热导率(0～100℃)/[W/(m·K)]	103
电阻率(20℃)/μΩ·cm	7.3

镉是一种银白色或铅灰色有光泽的软质金属，性质柔软，有毒，有韧性和延展性，电离能为8.993eV，原子价为2，标准电位为-0.4029V（9），电子组态为$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}\ 4s^2\ 4p^6 4d^{10}\ 5s^2$，常见化合价为+2。镉在潮湿空气中缓慢氧化并失去金属光泽，加热时表面

形成棕色的氧化物层。高温下镉与卤素反应激烈，形成卤化镉。也可与硫直接化合，生成硫化镉。镉不溶于水，可溶于酸，与硫酸、盐酸和硝酸作用生成相应的镉盐；但不溶于碱。氧化镉和氢氧化镉的溶解度都很小，它们溶于酸，但不溶于碱。镉蒸气燃烧产生棕色的烟雾。镉有 8 种天然的稳定同位素，还有 11 种不稳定的人工放射性同位素。镉在空气中迅速失去光泽，并覆上一层氧化物薄膜，可防止进一步氧化。镉在所有的稳定化合物中都呈 +2 价，其离子无色。镉可形成络离子 $Cd(NH_3)_4^{2+}$、$Cd(CN)_4^{2-}$ 和 CdI_4^{2-}。

3. 用途

镉是银白色的金属，是一种有益于人类的重金属，镉不像汞、铅那样为人熟知，自 20 世纪初就广泛应用于电镀工业、化工业、电子业和核工业等领域。

1）镉对盐水和碱液有良好的耐蚀性能，可以用作钢构件的电镀防蚀层，但因镉的毒性较大，此项用途有减缩的趋势。

2）镍-镉和银-镉电池的体积小、电能容量大，因而镉在电池制造中用量日增。镉镍电池（Nickel-cadmium Battery）是采用金属镉作负极活性物质、氢氧化镍作正极活性物质的碱性蓄电池。正、负极材料分别填充在穿孔的附镍钢带（或镍带）中，经拉浆、滚压、烧结、化成或涂膏、烘干、压片等方法制成极板；用聚酰胺非织布等材料作隔离层；用氢氧化钾水溶液作电解质溶液；电极经卷绕或叠合组装在塑料或镀镍钢壳内。镉镍电池的标称电压为 1.2V，有圆柱密封式（KR）、扣式（KB），镍镉电池可重复 500 次以上的充放电，经济耐用。其内部抵制力小、既内阻很小、可快速充电，又可为负载提供大电流，而且放电时电压变化很小，是一种非常理想的直流供电电池。

3）镉是制造钎焊合金和易熔合金的主要成分之一。

4）在铜中加入 0.05% ~1.3% 的镉，可改进铜的力学性能，尤其是冷加工性能，对电导率则影响不大。

5）镉的化合物曾经广泛用于制造颜料、塑料稳定剂、荧光粉。

6）硫化镉（CdS）、硒化镉（CdSe）、碲化镉（CdTe）具有较强的光电效应，用于制造光电池。

7）镉具有较大的热中子俘获截面积，因此含银（80%）、铟（15%）、镉（5%）的合金可作原子反应堆的控制棒。它是一种吸收中子的优良金属，制成棒条可在原子反应炉内减缓核子连锁反应速率。

8）它的鲜明的硫化物所制成的镉黄颜料，广受艺术家的欢迎。

9）镉可以制成特殊的易熔合金、耐磨合金、焊锡合金等，广泛用作钢结构的电镀防腐层。

10）镉氧化电位高，故可用作铁、钢、铜的保护膜，广用于电镀上。镉主要用于钢、铁、铜、黄铜和其他金属的电镀，对碱性物质的防腐蚀能力强。

11）镉作为合金组土元能配成很多合金，如含镉 0.5% ~1.0% 的硬铜合金，有较高的抗拉强度和耐磨性。

12）镉（98.65%）镍（1.35%）合金是飞机发动机的轴承材料。很多低熔点合金中含有镉，著名的伍德易熔合金中含镉达 12.5%。

13）镉化合物可用于杀虫剂、杀菌剂、油漆等的制造业。

4. 来源及制备

（1）来源　先发现镉的是德国哥廷根大学化学和医药学教授斯特罗迈尔，他兼任政府委托的药商视察专员，在视察药商的过程中，观察到含锌药物中出现的问题，促使他在1817 年发现了镉。由于发现的新金属存在于锌中，就以含锌的矿石菱锌矿的名称 Calamine 作参照，命名它为 Cadmium，意为“泥土”的意思，元素符号定为 Cd。由于镉在地壳中的高度分散性和低含量，常呈类质同像形式存在于与其化学性质相近的 Zn、Cu、Sb 和 Sn 等的硫化物中，难以形成独立矿物。镉的化学性质与锌极其相似，几乎所有的闪锌矿中都含有镉，闪锌矿矿石中镉平均含量为 9000×10^{-6}左右，闪锌矿单矿物中镉含量一般大于 1.20×10^{-2}，最高可达 10×10^{-2}，其储量已达大型矿床规模（5299.14t），该矿床中还含有 Ge 和 Ga 等多种分散元素。我国贵州都匀牛角塘铅锌矿床中镉含量异常高，一般为（2284～9850）$\times10^{-6}$，最高为 13400×10^{-6}，比地壳克拉克值（0.2×10^{-6}）高 5～6 个数量级，比要求的工业品位高几十到上百倍。此外，广东蕉岭鸡公山铅锌矿、广西临桂葛家塘铅锌矿、吉林吉安铅锌矿等矿床中镉均异常富集。云南金顶超大型含镉铅锌矿床是我国最大的铅锌矿床，也是我国最大的镉储量矿床，铅锌矿储量为 1500 万 t，镉储量为 17 万 t。

镉与它的同族元素汞和锌相比，被发现得晚得多。它在地壳中的含量比汞还多一些。硫镉矿（CdS）是镉的硫化物，在所有矿物中，它的含镉量最高，硫镉矿赋存于锌矿、铅锌矿和铜铅锌，是提炼镉的重要原料。图 9-11 为硫镉矿。



图 9-11　硫镉矿

硫镉矿的晶体可呈粒状、粉末状甚至土状，它们往往像是一层皮壳覆盖在闪锌矿或其他锌矿物上。其颜色为黄色调，半透明到透明，具有松脂光泽或金刚光泽。把硫镉矿放入盐酸中会产生一股臭鸡蛋的味道，这是释放出来的硫化氢的味道。其结构或分子式为 CdS，密度为 4.9～5.0g/cm^3，呈黄橙色或暗橙黄色。

镉的世界储量估计为 900 万 t，世界上每年生产的镉大约为 2 万 t 左右。美国是镉的主要生产国，1930 年年产量超过 1000t，1940 年接近 3000t，占当时世界产量的 70%。1977 年世界镉产量为 19793t。镉与锌的产量比约为 4∶1000。年产镉超过千吨的国家还有加拿大、日本、澳大利亚、墨西哥、德国等。我国镉的年产量接近 1000t。1976 年—1979 年世界市场金属镉（纯度 99.9%）的价格为 6.6 美元/kg，纯度 99.999% 的金属镉的价格为 22 美元/kg。

（2）制备　金属镉比锌更易挥发，因此在用高温炼锌时，它比锌更早逸出。在炼锌厂的硫酸锌溶液净化过程中产出的铜镉渣（含镉 4%～20%），炼锌厂的粗锌精馏过程中产出的镉灰（含镉 10%～30%）和某些铜、铅冶炼厂的富镉尘均可提取镉。由于镉污染环境，铅锌冶炼厂必须从排放物中回收镉。镍镉和铁镉蓄电池的极板等各种工业废料也是提取镉的二次原料。镉的提取方法分为从铜镉渣中提镉的湿法和从富镉尘中提镉的联合法。

1）湿法提镉。湿法提镉的工艺流程：铜镉渣浸出海绵镉→海绵镉溶解→镉液净化→电解沉积→熔化铸锭等工序。图 9-12 为铜镉渣提镉流程。

铜镉渣主要含有锌、镉、铜等金属及其氧化物，还含有少量的砷、锑、铁、钴、镍、铊等。用 15g/L 的硫酸溶液在 80～90℃下浸出，当酸含量降至 4～5g/L 时加 MnO，使镉、铁氧化，加石灰水［Ca(OH)］中和除铁、砷和锑。此时，浸出液成分为 Cd＞10g/L、Fe＜1g/L、Cu 为 0.05g/L，pH＝5.2～5.4。浸出液调整 pH 值为 3～4 后，加入锌粉（为理论量的1.2～

1.3 倍）置换，得海绵镉。硫酸锌滤液（含 Cd < 50mg/L）返回锌系统。海绵镉经自然氧化后，用含 40 ~ 70g/L H_2SO_4 的溶液浸出。用 KMnO 氧化并加石灰水中和水解，以进一步除铁，过滤后的滤液用新鲜海绵镉置换除铜。电解滤液得电积镉，镉电积的操作与锌电积相似，但由于镉易长成树枝状结晶，所以用低电流密度（65 ~ 100A/m）电解。电解液成分（g/L）：Cd 为 60 ~ 150、Zn 为 30 ~ 40、H_2SO_4 为 100 ~ 160，初始温度为 25 ~ 30℃。为了改善镉在阴极析出的状态，可添加动物胶。电镉在熔融烧碱覆盖下熔化并脱锌，制成镉锭、镉棒和镉粒等形状。含杂质较多的树枝状镉，可用真空蒸馏法单独处理。由于浸出和置换过程中能产生剧毒的砷化氢（AsH），其他过程中也产生含镉的有害气体，所以应有良好的通风排气等安全措施。可用多种方法从含镉的烟尘或镉渣（如煤或炭还原或硫酸浸出法和锌粉置换）中获得金属镉。进一步提纯可用电解精炼和真空蒸馏。

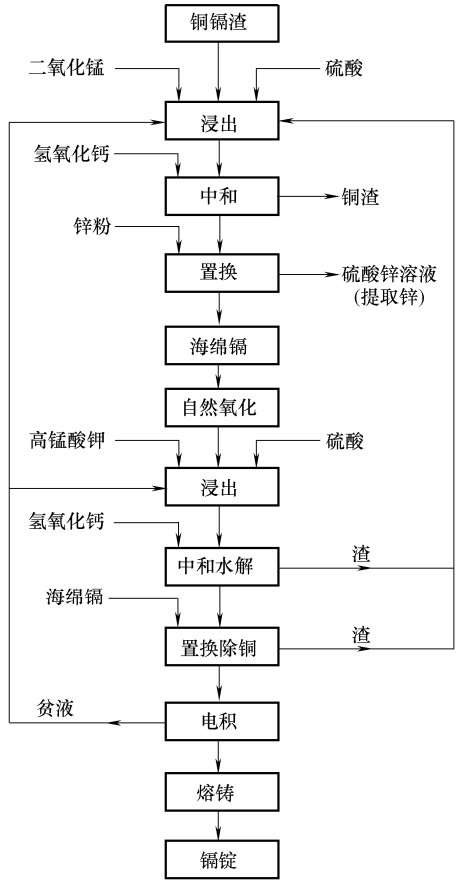


图 9-12　铜镉渣提镉流程

2）联合法提镉。联合法提镉的工艺流程：镉尘焙烧→脱去砷、锑等杂质→得到浸出性能良好的焙砂→稀硫酸浸出→浸出液经氧化水→解脱去铁、砷，有时还加碳酸锶（SrCO）脱铅→净化后的含镉溶液用锌粉置换得到海绵镉→加压成团→在铸铁锅中于熔融烧碱保护下，铸成粗镉锭→将粗镉加入精馏塔内精馏提纯→杂质从塔的下部渣锅中排出，精镉由塔顶镉蒸气冷凝产出，纯度在 99.99% 以上。镉的回收率可达 99.7%。

5. 危害及防治

（1）危害　镉不是人体的必需元素。镉和镉化合物在身体内过多沉积会引起中毒，有急性中毒、慢性中毒之分。

1）急性中毒。急性镉中毒，大多是由于在生产环境中一次吸入或摄入大量镉化物引起的。大剂量的镉是一种强的局部刺激剂，含镉气体通过呼吸道会引起呼吸道刺激症状，潜伏期短，通常经 10 ~ 20min 后，即可发生咽痛、咳嗽、恶心、气短、胸闷、胸痛、头晕、全身酸痛、无力、发热、呼吸困难、咯大量泡沫血色痰等症状，严重者伴有眩晕、大汗、虚脱、上肢感觉迟钝，甚至出现抽搐、休克中毒，导致中毒性肺水肿或化学性肺炎，甚至可因急性呼吸衰竭死亡。镉从消化道进入人体，则会出现呕吐、胃肠痉挛、腹疼、腹泻等症状，甚至因肝肾综合症死亡。

2）慢性中毒。当环境受到镉污染后，镉可在生物体内富集，通过食物链进入人体引起

慢性中毒。慢性中毒损害肾脏，主要表现为尿中含大量低分子量蛋白质，肾小球的滤过功能虽多属正常，但肾小管的回收功能却减退，并且尿镉的排出增加。人体内的镉是出生后从外界环境中吸取的，主要通过食物、水和空气而进入体内蓄积下来。慢性中毒，可能导致“痛痛病”，即身体积聚过量的镉，损坏肾小管功能，造成体内蛋白质从尿中流失，久而久之形成软骨症和自发性骨折。

（2）防治　吸入大量氧化镉烟雾所致的急性中毒，其治疗与一般刺激性气体中毒的处理相同。关键在于防止肺水肿。应及早撤离出事现场，保持安静，卧床休息，吸入氧气，保持呼吸道畅通，可用10%硅酮雾化吸入，以消除泡沫。肾上腺皮质激素能降低毛细血管通透性，宜早期定量使用。急性食入性镉中毒时主要采用对症治疗，给予大量补液，注射阿托品用来止吐和消除腹痛。慢性镉中毒引起肾脏损害者，膳食中应增加钙和磷酸盐的摄入，供给充足的锌和蛋白质。金属络合剂依地酸二钠钙（$CaNa_2EDTA$）可增加镉的排出，但可加重肾脏的损害，目前在急、慢性中毒时均不主张使用。口服氮川三乙酸（NTA）能促使镉排出（主要经粪便），从而降低在体内的蓄积，而且不损害肾脏功能。

为了预防镉中毒，熔炼、使用镉及其化合物的场所应具有良好的通风和密闭装置。焊接和电镀工艺除应有必要的排风设备外，操作时应戴个人防毒面具。不应在生产场所进食和吸烟。我国规定的生产场所氧化镉最高容许浓度为$0.1mg/m^3$。

镀镉器皿不能存放食品，特别是醋类等酸性食品。

镉对土壤的污染主要有气型和水型两种。气型污染主要由含镉工业废气扩散并自然沉降，蓄积于工厂周围的土壤中，可使土壤中的镉浓度达到$4\times10^{-3}\%$，污染范围有的可达数公里。水型污染主要是铅锌矿的选矿废水和有关工业（电镀、碱性电池等）含镉废水灌溉农田、排入地面水或渗入地下水引起的。为了防止镉对环境的污染，必须做好环境保护工作，严格执行镉的环境卫生标准。在饮食方面，可多食、常食海带和紫菜等含大量碘的食物。镉在自然界中广泛存在，且多以化合态存在，含量很低，大气中含镉量一般不超过$0.003\mu g/m^3$，水中不超过$10\mu g/L$，每千克土壤中不超过0.5mg，这样低的浓度不会影响人体健康。但环境受到镉污染后，镉可在生物体内富集，进而通过食物、水、吸烟或其他途径进入人体，当镉的浓度达到一定程度时，就会发生镉中毒。

日本农村工学研究所的研究小组称，在受到重金属镉污染的土壤中栽种植物蔓田芥，能够减少土壤中镉的含量。利用这种方法可以使大范围受到镉轻度污染的土壤得到净化，这一发现使得低成本、大范围净化被镉污染的土壤成为可能。叶芽南芥又称蔓田芥（Arabis gemmifera），属十字花科（Aburana）多年生草本植物。这种植物在日本分布很广，原产于我国吉林省长白山地区，分布在山地等阳光充足的地方。研究小组在室外利用厚度为15cm、每千克含镉47mg的土壤来栽种这种植物。一年后土壤里的含镉量减少到每千克2.6mg。土壤被利用5次以后，土壤中的镉含量只有原来的1/5。而且，收获以后的叶芽南芥在干燥并经400～500℃高温燃烧后，其中所含的镉不会挥发，可以回收起来再利用。

冶金车间工作环境空气中含金属镉和可溶性镉尘的极限值规定为$200mg/m^3$，氧化镉烟雾的极限值为$100mg/m^3$。含镉大于$0.5\times10^{-4}\%$的废水不许排放。绝大多数淡水的含镉量低于$1\mu g/L$，海水中镉的平均溶度为$0.15\mu g/L$，正常环境状态下不会影响人体健康。环境监测中测定镉的方法，有原子吸收分光光度法、双流腙分光光度法、阳极溶出伏安法和示波极谱法等。

第三节　太阳电池组件密封胶

一、太阳电池组件密封胶的性能要求

1. 技术要求

1）粘接性好，对铝材、玻璃、接线盒塑料有良好的粘接性。

2）耐紫外线，抗黄变，耐气候老化。

3）密封性能优异，防雨水，防污垢，耐冰雹冲击。

4）阻燃性能达 UL 94 V-0 级。

5）长期保持稳定性，不会变硬、变脆，失去粘接性。

6）产品无毒。

2. 产品

1）卡夫特 K-5906Z 太阳组件密封胶。

① 太阳组件密封胶的主要技术参数见表 9-3。

表 9-3　太阳组件密封胶的主要技术参数

固化前		外观	白色膏状
		密度/(g/cm^3)	1.35～1.40
		表干时间(25℃)/min	≤12
		拉伸强度/MPa	≥2.0
固化后	力学性能	扯断伸长率(%)	200～300
		剪切强度/MPa	≥2.0
		硬度(shore A)	50～55
		使用温度范围/℃	-50～250
	电性能	介电常数(60Hz)	2.8
		介电强度/(kV/mm)	≥18
		体积电阻/Ω·cm	1×10^{15}
		阻燃级别	UL94 V-0

② 使用方法：清除被粘物表面的油脂和沾染物，确保其清洁干燥。用挤压枪挤出胶液，在被粘物表面均匀涂布。

③ 固化时间。固化表层形成后，固化会从表层继续向内深入，室温及 50% 相对湿度条件下，密封胶的固化厚度约为 3.2mm；更深的部分，尤其是与空气接触有限部分，固化时间会更长；低温或低湿情况下固化时间同样会延长。正常情况下施胶 2h 后产品即可移动，但注意轻拿轻放。

电池组件设计使用寿命为 25 年，因此选用优质密封胶尤其重要。

2）型号 UN-8111、8222、8333。产品为单组分室温固化密封绝缘防潮胶，可以在宽泛的温度和湿度范围内体现良好的密封粘接性能。此产品具有防潮、防雨水、防污垢、防振、固定以及耐紫外线的性能，可以防止外部环境的机械碰撞以及热冲击对其造成的不良影响。它能与高速 XY 表和自动点胶设备组合使用，显著提高光伏组件的成品效率，并兼容于各种常用组件材料，如铝合金、玻璃、玻纤、背板和聚碳酸酯。

它可用于太阳电池组件、光伏组件（FV）外框的密封，太阳电池组件接线盒的粘接，

太阳能灯具的密封，也可用于 TPT、TPE 背膜的粘接密封。

普通光伏组件封装用的胶一般为 EVA，由于 EVA 的抗老化性能不强，使用寿命达不到 50 年，不能与建筑同寿命，EVA 发黄将会影响建筑的美观和系统的发电量，所以设计师在选择 BIPV 组件时应该尽量避免使用 EVA 封装的组件。

3）EVA 粘结剂。它是一种热熔粘结胶膜，常温下并无粘性，只有经过热压时才发生熔融粘接和交接固化。

4）PVB。《民用建筑太阳能光伏系统应用技术规范》明确规定，使用双玻光伏建筑组件，其夹胶层应为 PVB。1997 年批准实行的《玻璃幕墙工程技术规范》中规定，夹层安全玻璃生产应采用 PVB 干法加工。PVB 膜对无机玻璃具有良好的粘接性，具有高透光性、抗紫外线、机械强度高等特性。采用 EVA 封装的普通光伏组件，由于其安全性能方面达不到建筑规范的要求，也不适合应用在对建筑安全性能有要求的部位。

5）UNINWELL 国际太阳电池组件密封绝缘防潮胶、光伏组件密封粘结剂具有优异的防潮性，用于保护组件等的电极免受湿气的伤害。由于涂膜的透湿度低、离子性杂质较少，因此具有优异的耐迁移性，能够提高产品的可靠性。

二、乙烯-醋酸乙烯共聚体（EVA）热熔胶

1. 概况

英文	ethylene-vinyl acetate copolymer（简称 EVA）
技术说明书编码	1314
CAS 号	24937-78-8
分子式	$(C_2H_4)_x.(C_4H_6O_2)_y$
相对分子质量	2000（平均）

2. 特点

1）耐水性：密闭泡孔结构，不吸水，防潮，耐水性能良好。

2）耐腐蚀性：耐海水、油脂、酸、碱等化学品腐蚀，抗菌，无毒，无味，无污染。

3）加工性：无接头，且易于进行热压、剪裁、涂胶、贴合等加工。

4）防振动：回弹性和抗张力高，韧性高，具有良好的防振、缓冲性能。

5）保温性：隔热、保温防寒及低温性能优异，可耐严寒和曝晒。

6）隔音性：密闭泡孔结构，隔音效果好。

3. 危险特性

EVA 粉体与空气可形成爆炸性混合物，当达到一定浓度时，遇火星会发生爆炸。EVA 加热分解产生易燃气体。

4. 有害燃烧产物

EVA 的有害燃烧产物为一氧化碳、二氧化碳。

5. 灭火方法

消防人员须佩戴防毒面具、穿全身消防服，在上风向灭火。灭火剂采用雾状水、泡沫、干粉、二氧化碳、沙土。

6. 健康危害

EVA 对眼睛和皮肤有刺激作用 。

1）皮肤接触：脱去污染的衣物，用流动清水冲洗。

2）眼睛接触：提起眼睑，用流动清水或生理盐水冲洗，及时就医。

3）吸入：脱离现场至空气新鲜处，及时就医。

4）食入：饮足量温水，催吐，及时就医。

7. 应急处理

隔离泄漏污染区，限制出入。切断火源。建议应急处理人员戴防尘面具（全面罩），穿防毒服。避免扬尘，小心扫起，置于袋中转移至安全场所。若大量泄漏，收集回收或运至废物处理场所处置。

8. 操作注意事项

1）密闭操作，提供良好的自然通风条件。

2）操作人员必须经过专门培训，严格遵守操作规程，建议操作人员佩戴自吸过滤式防尘口罩，戴化学安全防护眼镜，穿防毒物渗透工作服，戴橡胶手套。

3）远离火种、热源，工作场所严禁吸烟。

4）使用防爆型的通风系统和设备。

5）避免产生粉尘。

6）避免与氧化剂、碱类接触。

7）搬运时要轻装轻卸，防止包装及容器损坏。

8）配备相应品种和数量的消防器材及泄漏应急处理设备。

9）倒空的容器可能残留有害物，要小心处理。

9. 贮存注意事项

储存于阴凉、通风的库房，远离火种、热源，应与氧化剂、碱类分开存放，配备相应品种和数量的消防器材，储区应备有合适的材料收容泄漏物。

10. 主要用途

制作冰箱导管、煤气管、土建板材、容器和日用品等，亦可制包装用薄膜、垫片、医用器材，还可用作热熔粘结剂、电缆绝缘层等。

11. 制备

乙烯-醋酸乙烯共聚物是乙烯共聚物中最重要的产品，国外一般将其统称为 EVA。图 9-13 为乙烯-醋酸乙烯共聚物。图 9-14 为 EVA 制品。在我国，人们根据其中醋酸乙烯含量的不同，将乙烯与醋酸乙烯共聚物分为 EVA 树脂、EVA 橡胶和 VAE 乳液。醋酸乙烯含量小于 40% 的产品为 EVA 树脂；醋酸乙烯含量在 40% ~70% 的产品很柔韧，富有弹性，人们将

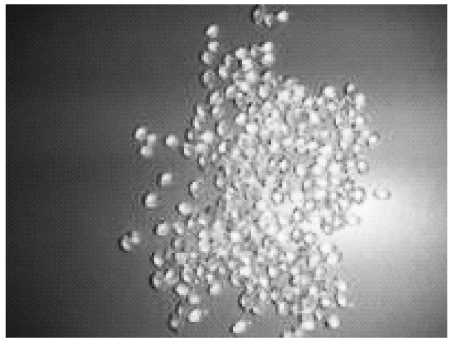


图 9-13　乙烯-醋酸乙烯共聚物

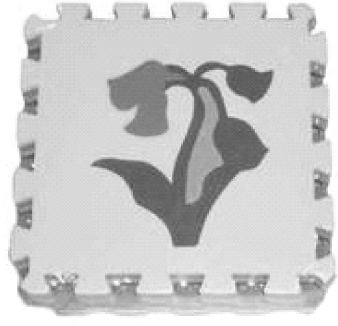


图 9-14　EVA 制品

这一含量范围的 EVA 树脂有时称为 EVA 橡胶；醋酸乙烯含量在 70% ~95% 范围内通常呈乳液状态，称为 VAE 乳液。VAE 乳液外观呈乳白色或微黄色。VAE 乳液是醋酸乙烯-乙烯共聚乳液的简称，是以醋酸乙烯和乙烯单体为基本原料，与其他辅料通过乳液聚合方法共聚而成的高分子乳液。

国外对乙烯-醋酸乙烯共聚物的研究比较早。英国帝国化学公司于 1938 年发表了 EVA 的高压自由基聚合专利，美国杜邦公司于 1960 年实现工业化。国内从 20 世纪 60 年代开始研制 EVA 树脂，到 20 世纪 70 年代中期试产成功。1988 年北京有机化工厂首次从美国引进年产 1.5 万 t 的 VAE 乳液装置，1991 年四川维尼纶厂再次从美国引进同样一套 VAE 乳液装置。2007 年广西广维化工有限责任公司从美国引进了一套年产 5 万 t 的 VAE 装置，2009 年扩产两列年产 2.5 万 t 的 VAE 装置，目前已投入生产。江西化工化纤有限公司自建了一套年产 1000t 的生产线。

聚乙烯是目前产量最大的热塑性树脂之一，以它作为热熔胶的基体，从价格和原料来源上来考虑是十分理想的。但是，由于它分子结构的高结晶性，使它与其他材料的浸润性较差。因此，必须用其他化学基团来进行改性。目前已经出现的有 EVA、乙烯-丙烯酸乙酯共聚体（EEA）、乙烯-丙烯酸共聚体、乙烯-丙烯酸异丁酯共聚体等。其中，EVA 是目前用得最多的热熔剂基体。

EVA 是典型的无规高分子化合物，在它的分子结构中，取代基在中轴分子链上的排列是不规则的，而且分子链中不对称碳原子的构型也不同，排列也不规则，因此结晶性较小，极性和柔韧性较高。它在加热熔融时具有良好的浸润性，在冷却固化时具有良好的挠曲性、抗应力开裂性和胶接强度，因而是十分理想的热熔胶的基体。

在 EVA 中，醋酸乙烯的含量对于热熔剂的性能（特别是物理力学性能）具有明显影响。对于要求胶接强度较高的类型，应采用醋酸乙烯含量较大的品种。另外，如果要进一步提高共聚体的胶接强度，还可以采用皂化法合成的三元共聚体（如乙烯-醋酸乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚体），或者加入经聚丁二醇改性的聚酯树脂，以及添加一定量的环氧树脂或聚氨酯树脂，均可达到同样效果。热熔剂在施工时不产生交联反应，因此无须加入硫化剂和固化剂，它在配制时加入的各种添加剂主要为了进一步提高和改善基体的物理力学性能。在各种类型热熔胶中，所加入的添加剂的品种及其作用是基本相同的，现以 EVA 热熔剂为例进行介绍。

热熔剂在进行配制时，所加入的添加剂主要有稀释剂、增粘剂、增塑剂、填料和防老化剂等。

（1）稀释剂　稀释剂的作用是降低基体的粘度，提高施工时的流动性，控制固化速度和增加胶液对接合表面的浸润性。稀释剂主要有烷烃石蜡、微晶石蜡、地蜡、植物石蜡、矿物蜡等蜡类化合物。一般应选择与基体熔点比较接近的石蜡品种，因蜡的熔点太低，会降低热熔胶的耐热性。EVA 和蜡类化合物的相容性与醋酸乙烯含量及蜡类化合物的熔点有较大关系，通常醋酸乙烯含量大的相容性较差，蜡类化合物熔点越高相容性越差。

（2）增粘剂　增粘剂的作用主要是增加基体的胶接强度和柔韧性，提高胶液与接合表面的浸润性。常用的增粘剂有松香树脂、萜烯树脂、石油树脂、古马隆树脂和油溶性酚醛树脂等。松香树脂的主要成分是 C19H29COOH ，有十多种异构体，它和 EVA 等基体具有良好的相容性。如果要提高软化点，可以用聚合、酯化和氢化等方法加以改性。萜烯树脂的主要

成分是（C5H8）n，也是有多种异构体，常用的有萜烯油聚合体和萜烯酚醛聚合体等。松香树脂和萜烯树脂是热熔胶最主要的增粘剂。增粘剂的用量对胶液的胶接强度具有明显影响。

（3）增塑剂　加入增塑剂的作用也是为了提高柔韧性和浸润性。常用的增塑剂有邻苯二甲酸酯类、甘醇酸酯类、矿物油类和聚丁烯类等。

（4）填料　在配制热熔剂时必须考虑胶液的收缩应力问题。对于醋酸乙烯含量较低的类型来说，由于结晶度较高，当从加热熔融状态冷却至室温固化时，体积收缩率较高。另外，增加蜡类化合物的用量也将使体积收缩率增大。为此，应加入适量无机填料，如碳酸钙、硫酸钡、滑石粉、二氧化钛和重晶石等。

（5）防老剂　防老剂的添加量一般为0.1%～1%，常用的防老剂有2,6-二叔丁基对甲酚、4.4′-双（2,6-二叔丁基苯酚）甲叉、4.4′-双（叔丁基间甲酚）硫醚等。

此外，为了改善某些方面的性能，还可加入另外一些添加剂。例如，加入适量的丁基橡胶以提高耐寒性，加入少量的过氧化物以提高耐热性，加入廉价的无规聚丙烯以降低成本等。

12. 几种 EVA 热熔胶的配方

配方一：

乙烯-醋酸乙烯共聚体 100，香豆酮-茚树脂 25，合成石蜡树脂 7，滑石粉 20，2,6 叔丁基对甲酚 1。

软化温度为 72～80℃，脆化温度为 -40℃，使用温度范围为 -40～60℃。

掺入不同塑料的剪切强度（MPa）：低压聚乙烯 3.2，聚丙烯 3.8，聚氯乙烯 2.8，聚苯乙烯 5.7，有机玻璃 4.1，ABS 塑料 5.1。

配方二：

EVA 共聚体 100，香豆酮-茚树脂 25，石蜡树脂 7，滑石粉 20，2,6 叔丁苯对甲酚 1。

软化湿度为 72～80℃，脆化温度为 -40℃，使用温度范围为 -40～60℃，对难粘塑料具有较高的粘接性。

配方三：

EVA 共聚体 70，丁苯橡胶 30，抗氧剂 0.25。

200℃时的熔融粘度为 40Pa·s，伸长率为 30%，具有优良的涂布性和粘弹性。

三、聚乙烯醇缩丁醛（PVB）

1. 概述

英文	polyvinyl butyral（简称为 PVB）
类型	热塑性树脂
密度/g/cm^3	1.07
折射率（20℃）	1.488
拉伸强度/MPa	39.2～49.0
伸长率	5%～60%
吸水率	≤4%
软化温度/℃	60～65
玻璃化温度/℃	66～84（以聚合度不同而不同）

2. 特点

PVB 是聚乙烯醇缩丁醛的简称。PVB 无毒、无臭、无腐蚀性，具有优良的透明性、良好的绝缘性、抗冲击和拉伸性能，抗张强度高、粘接性好、弹性好，能耐无机酸和脂肪作用，无色透明。它具有高拉伸强度，高弹性模量，耐磨，耐冲击，耐热，耐光，耐氧和臭氧，耐无机酸和脂肪烃类，还具有耐寒、耐老化等优良的综合性能。PVB 具有良好的柔软性、挠屈性、粘接性、耐水性、耐候性、电绝缘性。建筑幕墙玻璃、汽车挡风玻璃、防弹玻璃等安全玻璃的中间夹层膜就是 PVB 胶片，它和金属与玻璃有极强的粘接力。PVB 膜有良好的粘接性、韧性和弹性，在夹层玻璃受到外力猛烈撞击时，这层膜会吸收大量能量，玻璃碎片会牢牢粘附在 PVB 中间膜上不会飞散，从而使可能产生的伤害减少到最低程度。PVB 有安全、保温、控制噪声和隔离紫外线等多项功能。

PVB 由聚乙烯醇和丁醛在水中经盐酸催化缩合而成，是热塑性高分子化合物，白色或微黄色颗粒或粉末，溶解度参数 $\delta = 8.4 \sim 10.9$，可以溶解于大多数醇/酮/醚/酯类有机溶剂，溶于甲醇、丙醇、乙醇、丁醇、醋酸乙酯、醋酸丁酯、甲乙酮、环己酮、二氯甲烷、二氯乙烷、二氧六环、四氢呋喃、三氯甲烷、冰醋酸等，不溶于碳羟类溶剂，如汽油等石油溶剂；可燃，燃烧时冒出黑烟，熔融滴落并发出特殊气味。

3. 应用领域

1）制得的薄膜用于制作安全玻璃的夹层材料，该安全玻璃透明性好，抗冲击强度大，广泛用于航空和汽车领域。

2）在涂料工业用于制造防腐蚀涂料，防锈能力强，附着力、耐水性好的金属底层涂料和防寒漆。在陶瓷工业用于制造花纹鲜艳的薄膜花纸，可代替陶瓷花纸。在树脂工业用于制造代替钢、铅等有色金属的压塑料，可配成多种粘结剂，广泛用于木材、陶瓷、金属、塑料、皮革、层压材料等的粘接。在纺织工业用于制造织物处理剂和纱管。在食品工业用于制造无毒包装材料。在造纸工业用于制造纸张处理剂。此外，还可用于制造防缩剂、硬挺剂及其他防水材料。

3）可用于印刷工业的柔印、凹印、凸印（Flexo/Gravia）、丝网印、热转印。由于其溶于醇类且无毒，印件不残留异味，因此可用于食品工业中对异味敏感的包装，如茶叶、香烟等。因树脂为阳离子型，对带有强烈阴离子的玻璃表面有极好的附着力，特别适用于玻璃板装饰丝印。

4. 制备

将聚乙烯醇溶于水中，在搅拌下加入丁醛及催化剂（如盐酸或硫酸），在 15～50℃的温度下进行缩醛反应，生成的缩醛物经水洗、离心干燥即得 PVB，主要用于制造夹层玻璃、涂料及粘结剂等。

质量指标（低相对分子质量的 SD-1）：

外观	白色粉末
黏度（10% 乙醇溶液）/mPa·s	11～20
缩醛度（%）	68～88
酸值/(mgKOH/g)	≤4.0
灰分（%）	≤0.10
挥发分（%）	≤3.0

PVB 的质量分数（%）	≥98.0
透明度（乙醇溶液）	透明或微透明
国外牌号	Merion BR（美国），Butrar B（加拿大）

5. 应用

（1）印刷油墨　好的耐水性结合好的防粘连性、好的流动性和优良的颜料湿润性使 PVB 树脂系列很适合作印刷油墨的粘接料，如果适当地拟定配方，这种油墨是无臭无味的。低相对分子质量的 SD-1、SD-2、SD-3 是优先选择。丝印印刷油墨能和 SD-5、SD-6 配制。

（2）热封漆　以 PVB 为基料的涂层能热封和热活化，如果需低的热封温度，能通过加入少量增塑剂达到；如果需较高的热封温度，则能通过加入像硝酸纤维素这样的硬树脂来达到。

（3）双组分漆　PVB 能用在双组分聚氨酯漆中，既可单独也可与其他多元醇组分合起来使用，在后一情况中它们能起活性增稠剂的作用。

（4）陶瓷混合料　基于其优良的湿润性、很好的湿态强度以及在 300 ~ 400℃时不形成腐蚀性气体，且无残渣分解，PVB 树脂特别适合按刮板工艺制造的陶瓷混合料用粘结剂。

（5）防渗涂层

1）沥青：PVB 可用来配制防水沥青和增塑剂，作为从老的沥青片材上迁移的防渗底漆。

2）木材：以 PVB 为基料的底漆对木材，特别是奇异木材中的能阻凝漆干燥和固化的物质起阻挡层的作用。

3）纸：用 PVB（例如 SD-3）为基料的底涂料施于衬纸上，在生产不粘隔离纸中能更经济地利用聚硅氧烷。

（6）底涂料

1）蚀洗用涂料。PVB 膜对钢、铁、铝、锌和其他金属显示很好的黏附性，而黏附性能通过加入磷酸进一步改善。PVB、耐腐蚀颜料和磷酸的混合物被称为蚀洗用涂料。它们用作底层并与合适的面涂层一起防止金属表面生锈和锈在金属表面扩展。

2）增强底漆。为了进一步改善耐水性和黏附性，将 PVB 和反应性树脂合用，如酚醛树脂。这种含有耐腐蚀颜料和磷酸的配方被称为增强底漆。如果磷酸是在制造过程中加入的，该底漆被称为单组分或工厂底漆。必须保证容器是耐磷酸腐蚀的。在双组分底漆的情况下，磷酸是在恰好施用前搅拌加入的，通常适用期限仅为几个小时，而工厂底漆将在 6 ~ 12 个月内保持可用。

增强底漆将长期保护金属表面而无需施用表面涂料，PVB 不仅能用于传统的铬酸盐型底漆，而且也能用于具有优良抗盐雾性的无铬酸盐底漆。

（7）改性增塑剂　由于其化学组成，PVB 可生成很柔顺的膜。其低温柔顺性能通过加入增塑剂（外增塑）增强，增塑剂还将降低溶液的粘度。PVB 树脂与许多增塑剂相容。

6. 我国 PVB 的发展现状

PVB 目前在国内应用还不是特别广，其中主要是经增塑剂塑化挤压成型的一种高分子材料——PVB 中间膜制造技术未过关。由于 PVB 膜片的加工工艺复杂，目前世界上只有美国、日本、德国等的少数几家国际跨国公司拥有该项技术。我国厂家在设备和制作工艺上的技术未能达到国外的水平，产品质量上还是有一定的距离。我国现有的 PVB 胶片生产厂家不少于 20

家，在这20多家生产厂中，完全用树脂粉料来制作的寥寥无几。因PVB胶片是可以再生利用的材料，许多厂家都采用PVB边角料和国外厂家的副牌产品来制作，再生的PVB胶片在质量的稳定性和产品的耐候性上变动较大，因此很多知名玻璃企业都采用进口PVB胶片。

2010年以前跨国PVB生产企业并不重视PVB边料的回收再生问题，但我国为数不多的几家PVB回收企业，生产的产品在国内市场以低价销售，对他们的产品销售量造成了一定的影响。如今那几家跨国企业也在世界各地建立起了自己的PVB回收生产厂，以回应我国企业的竞争。

第四节　气体导电浆料及靶材

一、各种气体

1. 非晶硅薄膜太阳电池用气体

硅烷（SiH_4）、乙硅烷（Si_2H_6）。制备n型掺杂材料加入磷烷（PH_3），制备p型掺杂材料加入乙硼烷（B_2H_6）、三甲基硼烷（$B(CH_3)_3$）或三氟化硼（BF_3）。用氢气（H_2）或惰性气体氦气（He）、氩气（Ar）稀释硅烷。锗烷（GeH_4）用于多结电池。

2. 微晶硅薄膜太阳电池用气体

所用材料与非晶硅相近，在玻璃衬底上制作背反射层，用等离子CVD沉积一层n型硅，然后用等离子CVD沉积工作层，即本征多晶硅薄膜（硅烷），最后依次沉积p型硅薄膜和氧化铟锡（ITO）薄膜，再在顶上做上梳状栅电极。

3. 铜铟镓硒薄膜太阳电池用材料

背接触层钼（Mo）、氩气（Ar），吸收层铜、铟、镓、硒四元素，缓冲层硫化镉（CdS），窗口层氧化锌（ZnO），磁控溅射法精确控制化学计量比，最后盖上超白低铁玻璃。

4. 砷化镓薄膜太阳电池用气体

用金属有机化学气相沉积法（MOCVD），通入H_2、三钾基镓（TMGa）、三钾基铝（TMAl）、三钾基铟（TMIn）金属有机化合物气体及砷烷（AsH_3）、磷烷（PH_3）等氢化物，在适当的温度下，这些气体进行多种化学反应，生成GaAs、GaInP、AlInP等Ⅲ-Ⅴ族化合物，并在GaAs衬底或Ge衬底上沉积，实现外延生长。n型掺杂剂用硅烷（SiH_4），p型掺杂剂用二乙基锌（DEZn）或CCl_4。

5. 碲化镉薄膜太阳电池用材料

ITO + SnO_2作透明导电膜；粉末或颗粒CdS；粉末或颗粒CdTe用升华法沉积作为吸收层；硅烷、氨气、四氯化碳、液氧、氮气、氢气。

二、导电浆料及靶材

Uninwell International作为世界高端电子粘结剂品牌与上海常祥实业有限公司联合，共同开发我国高端电子粘结剂市场。Uninwell International太阳电池专用导电浆料、导电银浆可以用作太阳电池正面和背面的电极，也可以用于电池的引出电极和太阳电池硅片上的修补；既有常温固化型，也有高温烧结型。常用的系列有：

1）SC-666-25系列：双组分，A∶B = 1∶1；特别适合非晶硅薄膜太阳电池用，适合涂布工艺。

2）1SC-666-50 系列：可以在 50℃的温度下 30min 固化，用于不能耐高温的场合。

3）SC-999-70 系列：低温快速固化，能粘接多种难粘基材。

4）SC-666-80R 系列：低温快速固化，对各种材质的薄膜太阳电池基材都有很好的粘接性能，具有很好的导通粘接效果、极好的丝印效果，薄膜太阳电池专用。

5）SC-666-80 系列：可以在 80℃的温度下 30min 固化，极大提高生产效率。

6）SC-666-120 系列：中温固化，特别适合染料敏化二氧化钛太阳电池用，具有很好的导通效果和附着力，很好的丝网印刷性，很高的性价比，薄膜太阳电池专用。

7）SC-666-150 系列：中温固化，具有很好的导通效果和附着力，很高的性价比，薄膜太阳电池专用，适合点胶工艺。

8）SC-666-180 系列：高温快速固化，可以在 180℃的温度下 30s 快速固化，极大提高工作效率。

9）SC-666-200 系列：高温快速固化，200℃20s 就能固化，极大提高生产效率，薄膜太阳电池专用。

10）SC-666-400 系列：中温烧结型，碲化镉/硫化镉薄膜太阳电池专用，也可用于中温烧结的场合。

11）SC-666-UV 系列：UV 紫外线光固化型导电浆料，可以广泛应用于热敏器件和不需要加热固化部件的粘接导通，特别适用于大规模流水线作业。

12）SC-11XX 系列：薄膜太阳能导电碳胶。

13）SC-12XX 系列：薄膜太阳能导电铜胶。

14）Uninwell 透明导电氧化物（Transparent Conductive Oxides，TCO）包括：

氧化铟锡（Indium Tin Oxide，ITO）（In2O3/SnO2）。

CF-80XX ITO 粉末系列：应用于薄膜太阳电池 ITO 薄膜（Film）和 ITO 玻璃（Glass）。

CF-81XX ITO 靶材系列：应用于薄膜太阳电池 ITO 薄膜和 ITO 玻璃。

15）CF-82XX In（OH）$_3$ 系列：应用于薄膜太阳电池。

16）CF-88XX ITO/ ZAO/ZTO/ZnO 浆料系列：应用于薄膜太阳电池透明电极的制作。

17）铜铟镓硒薄膜太阳电池靶材（CIGS Targets）：ITO、In、ZnO、CuGa、Mo、CuIn。

18）非晶硅薄膜太阳电池靶材（a-Si Targets）：ZnO、Al、Mo、NiV、Ag。

19）碲化镉/硫化镉薄膜太阳电池靶材（CdTe/CdS Targets）：ITO、Sn、Mo、NiV。

三、半导体化合物气体安全技术规程

1. 硅烷（SiH_4）

（1）危险性

1）浓度 3% 时自燃。

2）在空气、氯气中能发生爆炸性燃烧。

3）遇空气、氧气引起爆炸。

4）对呼吸道、皮肤有刺激性。

（2）防护措施

1）禁烟火。

2）通风。

3）经常检查瓶阀、管道系统密封是否良好。

4）穿戴使用防毒护品（具）。
5）氮气保护。
6）备灭火器。
（3）泄漏处理
1）穿戴使用防毒护品（具）。
2）系统充氮气。
3）喷水。
4）切断气源。
5）气瓶阀门关不紧时迅速通知主管部门处理。
（4）急救措施
1）眼、皮肤接触用大量水冲洗。
2）脱离现场到空气新鲜处。
3）就医。
（5）灭火处理
1）容器降温。
2）系统充氮气。
3）切断气源。
4）使用 1211 灭火器。
（6）禁忌物/禁忌　强氧化剂、抗醇灭火剂。

2. 磷烷（PH_3）

（1）危险性
1）对神经系统、心、肝、肾有损害。
2）暴露在空气中能自燃。
3）遇明火、高热极易燃料爆炸。
4）接触可灼伤眼、皮肤。
（2）防护措施
1）严格按规程操作。
2）禁烟火。
3）穿戴使用防毒护品（具）。
4）通风，滤毒。
5）氮气保护。
6）经常检查瓶阀、管道系统密封是否良好。
7）避禁忌物和禁忌。
8）备水、1211 灭火器、吸收中和剂。
（3）泄漏处理
1）无关人员撤离现场。
2）切断火源。
3）穿戴使用防毒护品（具）。
4）切断气源。

5）强力通风。

6）气瓶阀门关不紧时迅速通知主管部门，同时将钢瓶移室外进行安全处置——吸收中和剂（高锰酸钾的硫酸水溶液）。

7）禁排入下水道。

（4）急救措施

1）脱离现场到空气新鲜处。

2）立即就医。

（5）灭火方法

1）喷水冷却容器。

2）系统充氮气。

3）切断电源。

4）使用 1211 灭火器。

（6）禁忌物/禁忌　空气、氧化剂、氯酸、卤化烃/潮湿。

3. 氨（NH_3）

（1）危险性

1）具有强烈刺激性。

2）遇明火、高热能引起燃烧爆炸。

3）与水银接触形成爆炸性混合物。

（2）防护措施

1）通风。

2）穿戴使用防毒护品（具）。

3）与卤素（氟、氯、溴）、酸类等分开放置。

4）对气瓶、系统经常进行检漏。

5）气瓶架固定。

6）禁用易产生火花的工具。

7）备水、1211 灭火器。

（3）泄漏处理

1）无关人员撤离现场。

2）穿戴使用防毒护品（具）。

3）切断气源。

4）高浓度泄漏喷含盐酸的水中和、稀释、溶解。

5）强力通风。

（4）急救措施

1）脱去污染衣物，用流动清水冲洗。

2）脱离现场到空气新鲜处。

3）就医。

（5）灭火方法　用 1211 灭火器。

（6）禁忌物/禁忌　强氧化剂、金、银、钙、次氯酸、漂白剂、卤素/烟火。

4. 氢气（H_2）

（1）危险性

1）高浓度可引起窒息、麻醉。

2）遇明火能引起爆炸。

3）与空气、氧气、甲烷混合有燃烧爆炸的危险。

4）与氟化合可发生爆炸。

5）与卤素发生剧烈反应。

（2）防护措施

1）通风、禁烟火、防静电。

2）专人操作，严格按规程操作。

3）使用防毒护品（具）、防爆电器和工具。

4）对气瓶、系统定期检验、检漏。

5）配氢气报警器。

6）系统装回火器。

7）备氮气、水、1211 灭火器。

（3）泄漏处理

1）通风。

2）禁止一切明火。

3）使用防毒护品（具）、防爆工具。

4）系统充氮，无明火或切断气源。

5）气瓶阀门关不紧时迅速将瓶移至室外安全处慢慢放空。

（4）急救措施

1）脱离现场到空气新鲜处。

2）就医。

（5）灭火方法　关小气源、系统充氮气、1211 灭火器灭火、关闭阀门。

（6）禁忌物/禁忌　氧、臭氧、氧化亚氮、甲烷、氟、氯/高温、明火、静电火花。

5. 三氟化硼（BF_3）

（1）危险性

1）容器受热、压力增加有爆炸危险。

2）湿气体有强腐蚀性。

3）遇水迅速分解。

4）气体和烟雾对皮肤、眼睛、呼吸道有刺激性，吸入可中毒窒息。

（2）防护措施

1）专人操作，严格按规程操作。

2）通风。

3）使用防毒护品（具）。

4）系统密闭，定期检漏。

5）与强碱、碱土金属、烷基氨、氧化钙和水分开放置。

6）备水、吸收中和剂（苛性钾等碱性溶液）、灭火器。

（3）泄漏处理

1）撤离周围无关人员。

2）使用防毒护品（具）。

3）切断气源。

4）喷水雾稀释。

5）强力通风。

6）如瓶阀关不死，将钢瓶置于吸收剂溶液中。

（4）急救措施

1）皮肤等接触部位立即用水冲洗。

2）脱离现场到空气新鲜处。

3）就医。

（5）灭火方法　喷水、使用 1211 灭火器。

（6）禁忌物　强碱、碱土金属、烷基氮、氧化钙、水。

6、三氯氢硅（BF_3）

（1）危险性

1）遇高温分解放出氯化物有毒烟雾。

2）遇水和水蒸气产生有毒、腐蚀性烟雾。

3）与氧化剂反应有燃烧爆炸危险。

4）遇明火强烈燃烧。

5）具有刺激性。

（2）防护措施

1）严禁烟火。

2）穿戴使用防毒护品（具）。

3）通风柜内严格按规程操作。

4）避禁忌物和禁忌。

5）备灭火器、吸收中和剂（水、碱性水溶液）。

（3）泄漏处理

1）无关人员撤离现场。

2）切断火源。

3）使用防毒护品（具）。

4）现场通风，站上风向。

5）用水、碱性水溶液吸收中和，收集于密闭容器中待处理。

6）勿触摸泄漏物。

7）禁直接排入下水道。

（4）急救措施

1）眼、皮肤等接触部位立即用水冲洗。

2）吸入者脱离现场到空气新鲜处。

3）就医。

（5）灭火方法　使用灭火剂。

（6）禁忌物/禁忌　酸类、碱类、水、氧化剂/烟火。

7. 三甲基镓［$Ga(CH_3)_3$］

（1）危险性

1）能在空气中自燃。

2）遇水发生爆炸。

3）有毒，对呼吸道、眼、支气管有刺激性，可引起肺气肿。

4）皮肤接触可被灼伤。

（2）防护措施

1）专人操作，严格按规程操作。

2）在高纯氮气保护下装、卸料。

3）通风。

4）系统密闭，定期检漏。

5）穿戴使用防毒护品（具）。

6）避禁忌物和禁忌。

7）备灭火器、高纯氮气、煤油、95% 工业乙醇。

（3）泄漏处理

1）无关人员撤离现场。

2）切断火源。

3）使用防毒护品（具）。

4）现场通风，站上风向。

5）高纯氮气保护。

6）添加煤油覆盖，滴加 95% 工业乙醇稀释到流动性良好后装入废液桶中统一处理。

7）禁直接排入下水道。

（4）急救措施

1）眼、皮肤等接触部位立即用水冲洗。

2）就医。

（5）灭火方法

1）系统充氮气。

2）使用 1211 灭火器。

（6）禁忌物　水、氧、空气、酸。

8. 三甲基铟

（1）危险性

1）能在空气中自燃。

2）遇水发生爆炸。

3）有毒，对呼吸道、眼、支气管有刺激性，可致肺水肿，皮肤接触可被灼伤。

（2）防护措施

1）专人操作，严格按规程操作。

2）防火防爆。

3）在高纯氮气保护下装、卸料。
4）通风。
5）系统密闭，定期检漏。
6）使用防毒护品（具）。
7）避禁忌物和禁忌。
8）备高纯氮气、灭火器。
（3）泄漏处理
1）无关人员撤离现场。
2）用高纯氮气保护。
3）使用防毒护品（具）。
4）现场通风。
5）沙土覆盖并收集在容器中待处理。
6）禁排入下水道。
（4）急救措施
1）眼、皮肤接触用水冲洗。
2）脱离现场到空气新鲜处。
3）就医。
（5）灭火方法
1）系统充氮气。
2）使用 1211 灭火器。
（6）禁忌物　水、氧、空气、酸。

9. 三甲基铝［$Al(CH_3)_3$］

（1）危险性
1）能在空气中自燃。
2）遇水发生爆炸。
3）分解时放出有毒气体。
4）对呼吸道、眼、支气管有刺激性，皮肤接触可被灼伤。
（2）防护措施
1）专人操作，严格按规程操作。
2）防火防爆。
3）在高纯氮气保护下装、卸料。
4）通风。
5）系统密闭，定期检漏。
6）使用防毒护品（具）。
7）避禁忌物和禁忌。
8）备高纯氮气、灭火器、煤油、95% 工业乙醇。
（3）泄漏处理
1）无关人员撤离现场。
2）穿戴使用防毒护品（具）。

3）通风。

4）高纯氮气保护，添加煤油覆盖，滴加95%工业乙醇稀释到流动性良好后装入废液桶中待处理。

5）禁排入下水道。

（4）急救措施

1）眼、皮肤接触用水冲洗。

2）脱离现场到空气新鲜处。

3）就医。

（5）灭火方法　使用1211灭火器。

（6）禁忌物　水、氧、空气、氧化剂、酸、卤化烷烃类、不饱和烃气体、醇类、烷类。

10. 砷（As）

（1）危险性

1）遇火可产生有毒气体。

2）长期接触影响神经系统及血液系统。

3）对皮肤、呼吸道、消化道有刺激作用。

（2）防护措施

1）专人操作，严格按规程操作。

2）穿戴使用防毒护品（具）。

3）通风柜内操作、滤毒。

4）避禁忌物和禁忌。

5）备吸收剂。

（3）泄漏处理

1）穿戴使用防毒护品（具）。

2）避粉尘飞扬。

3）避直接接触。

4）将泄漏固体收入容器中；如为液体，则用吸收剂覆盖收入容器中待处理。

5）禁排入下水道。

（4）急救措施

1）眼接触用流动清水冲洗。

2）皮肤接触用肥皂水冲洗。

3）脱离现场到空气新鲜处。

4）就医。

（5）灭火方法

1）使用灭火器。

2）喷水。

（6）禁忌物　强氧化剂、酸、活泼金属、水。

11. 砷烷（AsH_3）

（1）危险性

1）高毒，致癌，吸入可发生中毒。

2）具有溶血作用。
3）具有强还原性。
4）容器在高温下易爆，与空气混合有燃烧爆炸的危险。
5）有水存在时助长起火，遇火产生剧毒气体。
6）刺激眼、鼻、嘴、皮肤、呼吸道、黏膜。
（2）防护措施
1）专人操作，严格按规程操作。
2）严禁烟火。
3）穿戴使用防毒护品（具）。
4）容器定期检验。
5）系统密闭、通氮气、定期检漏。
6）配报警器，备吸收中和剂。
（3）泄漏处理
1）无关人员迅速撤离现场。
2）切断火源。
3）穿戴使用防毒护品（具）。
4）强力通风。
5）系统充氮气。
6）切断气源。
7）喷雾水稀释。
8）用稀释剂稀释和用中和剂中和。
（4）急救措施
1）脱离现场到空气新鲜处。
2）立即就医。
（5）灭火方法　使用 1211 灭火器。
（6）禁忌物/禁忌　强氧化剂、氯气、硝酸/明火、高温。

12. 四氟化硅（SiF_4）

（1）危险性
1）容器受热有爆炸危险。
2）有水存在时因水解而有腐蚀性。
3）刺激黏膜等组织。
（2）防护措施
1）通风滤毒。
2）通风柜内操作，严格执行操作规程。
3）使用防毒护品（具）。
4）系统密闭，定期检漏，容器定期检验。
5）备吸收中和剂（水、碱性溶液）、灭火器。
（3）泄漏处理
1）无关人员撤离现场。

2）通风。
3）穿戴使用防毒护品（具）。
4）站上风向，关闭气源。
5）若气瓶阀门关不紧，则将其移到吸收中和剂溶液中。
（4）急救措施
1）皮肤等接触部位用温水浸泡。
2）脱离现场到空气新鲜处。
3）立即就医。
（5）灭火方法
1）喷水冷却容器。
2）使用 1211 灭火器。
（6）禁忌物　酒精、水、热。

13. 氯化氢（HCl）

（1）危险性
1）容器受热、压力增加有爆炸危险。
2）与金属反应产生氢气。
3）遇氰化物产生剧毒气体（HCN）。
4）刺激、腐蚀、灼伤皮肤、眼、呼吸道、消化道等。
（2）防护措施
1）专人操作，严格按规程操作。
2）穿戴使用防毒护品（具）。
3）通风滤毒。
4）避禁忌物和禁忌。
5）系统密闭，定期检漏。
6）钢瓶定期检验。
7）备吸收中和剂、灭火器、苛性碱等碱性水溶液。
（3）泄漏处理
1）无关人员撤离现场。
2）穿戴使用防毒护品（具）。
3）切断电源。
4）禁止直接喷水。
5）将容器移安全处，置吸收中和剂溶液中。
6）禁排入下水道。
（4）急救措施
1）眼、皮肤等接触部位立即用水清洗。
2）脱离现场到空气新鲜处。
3）立即就医。
（5）灭火方法　使用 1211 灭火器。
（6）禁忌物　氰化物、碱、金属粉末。

第五节　接　线　盒

1. 技术要求

1）外壳有极强的抗老化、耐紫外线能力。

2）能在室外恶劣环境下安全使用。

3）散热空间大，过电流结温低，低损耗，快捷安装。

4）所有连接方式均采用双加强连接方式：内鼓形广片接插，公母头插拔带有自锁机构。

5）装备不同规格的二极管，可改变接线盒的工作电流。

2. 主要技术参数

表 9-4 为接线盒的主要技术参数。

表 9-4　接线盒的主要技术参数

额定电流/A	13/16
额定电压/V	DC 1000
接触电阻/mΩ	≤5
外形尺寸	131mm × 105mm × 25mm
二极管数量	6PCS
绝缘材料	聚苯醚(黑色)
接触材料	铜镀锡
安全等级	Class Ⅱ
防护等级	IP65
连接线规格(截面积)	$4mm^2$、$6mm^2$
阻燃等级	UL94-5VA
环境温度范围/℃	-40 ~ 85
认证	TUV、UL、IEC

图 9-15 为接线盒



图 9-15　接线盒

第六节　光 伏 电 缆

沙漠电站在恶劣环境条件（长时间的高温、紫外线辐射、昼夜温差大、臭氧、化学侵

蚀）下运营，在这种环境中使用普通电线电缆，将导致电缆护套碎裂、分解电缆绝缘层、发生电缆短路的风险。光伏电站应采用太阳能专用电缆，以保证电站的寿命。

光伏电缆的特点是铜导线经过镀锡处理，绝缘层采用低烟无卤阻燃环保型材料，该材料经过高能射线辐照交联工艺，外径比普通电缆要大。

铜在温度高于90℃时，表面颜色改变，焊接性能降低，会和绝缘材料发生反应，因此要进行镀锡处理。经电子束辐射过的材料，称为交联PE，改变了聚合物的化学结构，可熔性热塑材料转换为非可熔性弹性体材料，改善了电缆绝缘材料的热学特性、力学特性和化学特性。经过这些措施的电线电缆具有耐高温、抗臭氧、抗紫外线、耐水蒸气、抗微生物、短时过载能力强、寿命长、耐磨、耐油、防腐、高抗拉性等特点，产品符合IEC61215、TUV 2Pfg-2007、UL4703等相关标准。

全球最大的太阳能市场德国，光伏产业历史悠久，电缆发生的问题都遇到过。如今在德国，50%以上的电站都采用太阳能专用电缆HUBER + SUHNER RADOX&reg。HUBER + SUHNER RADOX&reg太阳能电缆是一种交联PE电缆，这些电缆和部件具有最佳的耐风雨性、耐紫外线和臭氧侵蚀性，能承受更大范围的温度变化（例如从 -40℃至125℃）。HUBER + SUHNER RADOX&reg太阳能电缆的额定温度为120℃（可使用20000h），这一额定值相当于在90℃的持续温度条件下使用18年，而当温度低于90℃时，其使用寿命更长。根据国际标准IEC216，RADOX&reg太阳能电缆在户外环境下，其使用寿命是橡胶电缆的8倍，是PVC电缆的32倍。HUBER + SUHNER RADOX&reg太阳能电缆的生产已有20多年的历史。欧洲采用此类电缆的太阳能设备也已使用了20余年，而且至今仍然处于很好的工作状态。

国内的厂家已能生产光伏电线电缆。图9-16为光伏电缆。表9-5为光伏电线电缆的主要技术参数。表9-6为光伏电线电缆的主要规格。

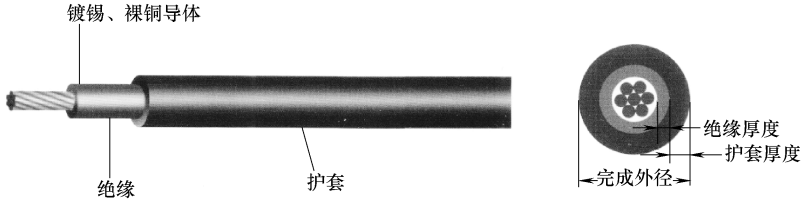


图9-16　光伏电缆

表9-5　光伏电线电缆的主要技术参数

额定电压	DC 1800V
测试电压	6500V,50Hz,5min
额定温度	-40～120℃
使用寿命	≥25年
短路使用温度	280℃
导体最高使用温度	120℃
最小弯曲半径	≤8mm
阻燃测试	IEC60322-1,UL1581VW-1
烟密度	IEC61034,EN50268-2
卤酸气体释放量	IEC670754-1,EN50267-2-1

表 9-6 光伏电线电缆的主要规格

规格	截面积 /mm^2	结构［股数/每股直径/mm］	导体绞合外径 /mm	成品外径 /mm	导体最大电阻（20℃）/（Ω/km）	额定电流 /A
PV1-f1 ×2.5	2.5	49/0.254	2.20	5.39	8.21	41
PV1-f1 ×4.0	4.0	56/0.30	2.70	6.36	5.09	55
PV1-f1 ×6.0	6.0	84/0.30	3.30	7.36	3.39	70
PV1-f1 ×10.0	10.0	80/0.40	4.56	8.83	1.95	98
PV1-f1 ×16.0	16.0	128/0.40	5.60	10.39	1.24	132

连接正负极的导线是不透明材料，阻碍可见光的进入。现在可用一种环保、非金属、透明的化合物导电材料来代替。

第七节 太阳电池工业用水

1. 去离子水

将水通过阳离子交换树脂（常用的为苯乙烯型强酸性阳离子交换树脂），则水中的阳离子被树脂所吸收，树脂上的阳离子 H^+ 被置换到水中，和水中的阳离子组成相应的无机酸，含此种无机酸的水再通过阴离子交换树脂（常用的为苯乙烯型强碱性阴离子交换树脂），OH^- 被置换到水中，和水中的 H^+ 结合成水，即为去离子水。由于去离子水中的离子数可以被人为地控制，因而它的电阻率、溶解度、腐蚀性、病毒等物理、化学及病理指标均能得到良好控制。

2. 纯水

天然水中常含有以下 5 种杂质：

1）电解质（包括带电粒子），常见的阳离子有 H^+、Na^+、K^+、NH_4^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Fe^{3+}、Cu^{2+}、Mn^{2+}、Al^{3+} 等，阴离子有 F^-、Cl^-、NO_3^-、HCO_3^-、SO_4^{2-}、PO_4^{3-}、$H_2PO_4^-$、$HSiO_3^-$ 等。

2）有机物质，如有机酸、农药、烃类、醇类和酯类。

3）颗粒物。

4）微生物。

5）溶解气体。

所谓水的纯化，就是要去掉这些杂质，杂质去得越彻底，水质也就越纯净。一般的蒸馏水、去离子水都是纯水，高纯水和超纯水是水的纯度更高，如水的电阻值大于 18MΩ · cm，则称为超纯水。高纯水国家标准为 GB/T 11446.1～10—1997，高纯水分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ五个级别。

第十章　薄膜太阳电池的检测技术及设备

薄膜太阳电池检测包括两方面内容，即电池电性能参数检测与电池质量参数检测。电池电性能关系到电池的效率如何，能否保证电池产能满足投资者的要求；电池质量关系到电池的使用寿命，能否达到25年。

第一节　太阳电池测量条件

要正确、准确地测出太阳电池的性能首先要认识太阳电池的本身特性。太阳电池把光转换成电，它的性能是对太阳辐射的响应，而太阳辐射是动态的，影响太阳辐射的因素有三个方面，即天文因素、地理因素、物理因素。天文因素有日地距离变化、太阳赤纬变化（地球自转使接收面倾斜度和方位不同，产生早、中、晚及昼夜交替）；地理因素有接收地点经纬度、海拔、地势地貌不同；物理因素有大气吸收、散射、反射、接收面的粗糙度。太阳光或太阳辐射能通过大气层的路程越长，大气层对其吸收、反射和散射的程度就愈大，到达地球表面的太阳辐射能量也就愈小。由于这些因素，就引出了要测量太阳电池性能首先要明确的两个问题，一个是要明确一定距离下的太阳光或太阳辐射能，即太阳常数；一个是要明确大气的质量要求。

一、太阳常数

太阳常数 E_{sc} 定义为：地球位于日地平均距离处（约 1.5×10^{8}km），在大气层上界（从地面可延伸到6400km）垂直于太阳辐射束平面上，单位面积、单位时间所得到的太阳总辐射能量称为一个太阳常数。

太阳辐射的波长范围为0.15～4μm，入射到太阳电池上的光能是这些波长的光能之和。

太阳常数不是从理论推导出来的，也不具有严格的物理内涵。

二、大气质量

大气质量定义为太阳光线通过大气的路程与太阳在天顶时光线通过大气的路途之比，用AM表示（参见第二章第二节太阳辐射）。

国际电工委员会第82技术委员会（IEC-TC 82）规定了地面用太阳电池和太空用太阳电池的标准测试条件：

（1）地面用太阳电池的标准测试条件　大气质量为AM1.5，辐照度为1000W/m^2，测绘温度为（25±2）℃。

（2）太空用太阳电池的标准测试条件　大气质量为AM0，辐照度为1367W/m^2，测绘温度为（25±1）℃。

三、太阳模拟器

太阳模拟器即用人造光源来模拟太阳光。测量的步骤是产生标准电池→模拟器→测量被测电池。标准电池从何而来是首先要解决的问题。在阳光下标定的电池称为一级标准电池，通过模拟器标定的电池称为二级标准电池。空间用一级标准电池的校准是用高空气球、航天

器在最接近 AM0 的光谱条件下测量电池短路电流 I_{sc} 进行校准的；地面用一级标准电池的校准是在天气晴朗、辐照度稳定、AM1.5 条件下测量电池短路电流 I_{sc} 进行校准的，且总辐照度通过绝对腔体辐射计测量。调节模拟器的发光强度，使二级标准电池的短路电流输出值等于其标定值，然后把二级标准电池取下，换上被测电池，即可对其性能进行测试。目前有两种太阳模拟器。

1）稳态太阳模拟器：工作时可提供连续、不变辐照度的光源，使测量工作能从容地进行。

2）脉冲式太阳模拟器：工作时不连续发光，只在极短时间内，通常是毫秒以下数量级，以脉冲形式发射。其优点是瞬时功率可以做得很大，而平均功率却很小。

太阳模拟器的电光源有卤钨灯、冷光灯、氙灯、脉冲氙灯等。任何光源都存在不均匀、不稳定、光谱时刻变化的问题，可以通过计算修正。

1. 辐照不均匀度

辐照不均匀度是对测试平面上不同点的辐照度而言的，当辐照度不随时间改变时，辐照不均匀度按下式计算：

$$\text{辐照不均匀度} = \pm\frac{\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}}{\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度}} \times 100\%$$

在测量单体电池时，辐照不均匀度应使用不超过被测电池面积 1/4 的检测电池来检测；在测量组件时，应使用不超过待测组件面积 1/10 的检测电池来检测。

2. 辐照不稳定度

$$\text{辐照不稳定度} = \pm\frac{\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}}{\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度}}$$

3. 光谱失配误差计算

$$\text{光谱失配误差} = \int [F_{\mathrm{T,AM1.5}}(\lambda) - F_{\mathrm{S,AM1.5}}(\lambda)][B(\lambda) - 1]\mathrm{d}\lambda$$

$F_{\mathrm{T,AM1.5}}(\lambda)$ 是指被测电池 T 在 AM1.5 状态下的相对光谱电流，为光谱电流与短路电流之比。

$$F_{\mathrm{T,AM1.5}(\lambda)} = \frac{i_{\mathrm{T,AM1.5}}(\lambda)}{\int i_{\mathrm{T,AM1.5}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda} = \frac{i_{\mathrm{T,AM1.5}}(\lambda)}{I_{\mathrm{T,AM1.5}}}$$

$F_{\mathrm{S,AM1.5}}(\lambda)$ 是标准电池在 AM1.5 状态下的相对光谱电流，为光谱电流与短路电流之比。

$$F_{\mathrm{S,AM1.5}(\lambda)} = \frac{i_{\mathrm{S,AM1.5}}(\lambda)}{\int i_{\mathrm{S,AM1.5}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda} = \frac{i_{\mathrm{S,AM1.5}}(\lambda)}{I_{\mathrm{S,AM1.5}}}$$

$B(\lambda) - 1$ 定义为光谱，表示太阳模拟光谱辐照度 $e_{\mathrm{sim}(\lambda)}$ 与 AM1.5 光谱辐照度的相对偏差。

$$B(\lambda) - 1 = \frac{e_{\mathrm{sim}}(\lambda) - e_{\mathrm{AM1.5}}(\lambda)}{e_{\mathrm{AM1.5}}(\lambda)}$$

在两种情况下光谱失配误差会消失，一种是太阳模拟器的光谱和标准太阳光谱完全一致；另一种情况是被测太阳电池的光谱响应与标准太阳电池的光谱响应完全一致。但这两种

情况都难以做到，可行的办法是设计光谱分布和标准太阳光谱非常接近的太阳模拟器。图 10-1 为太阳模拟器的基本结构。

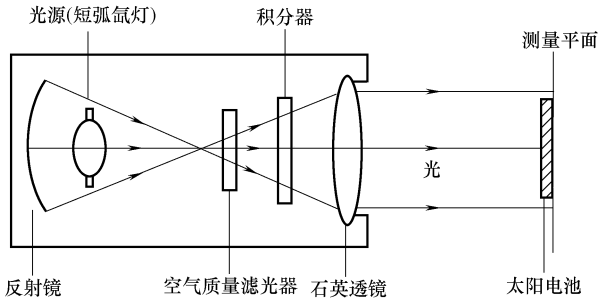


图 10-1　太阳模拟器的基本结构

太阳模拟器一般由短弧氙灯与滤光器组合而成，氙灯发出的光经凹面反镜聚焦，然后通过一组由多层蒸发膜组成的滤光器，去除氙灯特有的在 800 ~ 1000nm 内的线状光谱，以使整个出射光谱更接近 AM1.5 或 AM0 的太阳光，然后通过积分器使光的面分布均匀，再通过石英透镜形成平行光，使位于测量平面上的太阳电池受到均匀的模拟太阳光的照射。太阳模拟器光谱是在 AM1.5 还是 AM0，取决于多层蒸发膜组成的滤光器的设计。

进一步了解可参见 GB/T 6495.4—1996《晶体硅光伏器件的Ⅰ-Ⅴ实测特性的温度和辐照度修正方法》和 GB/T 6495.8—2002《光伏器件　第 8 部分：光伏器件光谱响应的测量》。

四、薄膜太阳电池的测量条件及仪器

（1）标准测量条件　总辐射采用 AM1.5 的标准阳光光谱，辐照度为 1000W/m^2，测量温度为 25℃。对于定标测量，标准测量温度允差为 ±1℃；对于非定标测量，标准测量温度允差为 ±2℃。如受客观条件限制，只能在非标准条件下测量，则必须将测量结果换算到非标准测量条件。

（2）标准薄膜太阳电池　标准薄膜太阳电池用于校准测量光源的辐照度。对 AM1.5 工作标准太阳电池作定标测量时，用 AM1.5 二级标准太阳电池校准光源的辐照度；在非定标测量时，一般用 AM1.5 工作标准太阳电池校准测量光源的辐照度，要求高时，直接用 AM1.5 二级标准太阳电池校准光源的辐照度。

（3）电压表　精度应不低于 0.5 级，其内阻应不低于 20kΩ/V，一般使用数字式电压表。

（4）电流表　精度应不低于 0.5 级，其内阻应小到能保证在测量短路电流时，被测电池两端的电压不超过开路电压的 3%；当要求更精确时，在开路电压的 3% 以内可利用电压和电流的线性关系来推算完全短路时的短路电流；可用数字毫伏表测量取样电阻两端电压降的方法来测量电流。

（5）取样电阻　精度应不低于 ±0.2% 级，必须采用四端精密电阻；电池短路电流和取样电阻阻值的乘积应不超过电池开路电压的 3%。

（6）负载电阻　负载电阻采用可变电阻，应能从 0 平滑地调节到 10kW 以上；该可变电阻必须有足够的功率容量，以保证在通电测量时不会因发热而影响测量精度。当可变电阻不能满足上述条件时，应采用等效的电子可变负载。

（7）温度计　温度计或测温系统的仪器误差应不超过 ±0.5℃，测量系统的时间响应不超过 1s，测量探头的体积和形状应保证使用它能尽量靠近太阳电池 p-n 结安装。

（8）太阳模拟器光源　太阳模拟器光源的辐照度、辐照不均匀度、稳定度、准直度及光谱分布均应符合国家标准 GB/T 6495.9—2006《太阳模拟器性能标准》。

第二节　太阳电池测量仪器

太阳电池测量仪器门类齐全，品种繁多，有实验室用的，有工业生产中用的，这里主要介绍工业生产中常用的仪器，如太阳总辐射表、杂质元素的检测仪器、太阳电池组件测试仪等。

一、LVTBQ-2-B 太阳总辐射表

太阳总辐射表又称为总表，该表用于测量光谱范围为 0.3 ~ 3μm 的太阳直辐射量。当太阳直辐射量超过 120W/m^2 时，与日照时数记录仪连接，也可直接测量日照时数。所以，该仪表可广泛应用于太阳能利用、气象、农业、建筑材料老化检测、生态考察、大气环境监测等部门的太阳辐射能量的测量。图 10-2 为太阳总辐射表。



图 10-2　太阳总辐射表

1. 工作原理

采用热电效应原理，感应元件是该表的核心部分，它由快速响应的绕线电镀式热电堆组成，感应面涂有高吸收率、高发射率的无光黑漆，其涂层可保证仪表的方位响应和余弦响应的偏差很小。感应面为热结点，而冷结点则位于机体内，当有阳光照射时热结点温度升高，它与另一面的冷结点形成温差电动势，该电动势与太阳辐射强度成正比，然后将该电动势换算成辐照度密度。为了只让太阳辐射到达感应面，使用一个 0.5°张角的遮光筒。遮光筒的 α 角为 10°，内有数层光栅，可减少光漫射，对准太阳时，太阳的光恰好落在筒底的热电堆感应面上，热电堆的引线通过跟踪装置连接到记录仪。

如感应面向下可测量反射辐射，也可用于测量入射到斜面上的太阳辐射，如加遮光带可测量散射辐射。

2. 特点

1）符合 WMO（世界气象组织）规范（CIMO Guide）。

2）适用于各种恶劣环境。

3）可作为一级标准总辐射表使用。

4）无源精确测量。

5）灵敏度高。

6）使用方便，免维护。

3. 结构

太阳总辐射表由双层石英玻璃罩、感应元件、遮光板、表体、干燥剂等部分组成。

防风玻璃半球罩采用美国 JGS 3 石英玻璃，当透过光波长在 350 ~ 2600nm 的范围内，玻璃均匀平滑地保持 0.95 以上的透过率。防风玻璃罩为双层，双层玻璃罩是为了减少空气对流对辐射表的影响。内罩是为了截断外罩本身的红外辐射而设的。内罩对红外波段有隔绝功能，这样可以使辐射测量仅限于短波部分；内罩同时可以隔绝外罩的红外辐射。

仪表内安放了精密器件组成的集成电路，对仪器输出的非线性进行补偿，减小仪表受温度和非线性的影响。

4. 技术参数

灵敏度	7～14μV/(W·m^{-2})
响应时间	≤30s（99%）
内阻	约350Ω
精确度	±2%
方位	≤±5%（太阳高度角为10°时）
余弦响应偏差	≤±5%（太阳高度角为10°时）
跟踪精度	96h+30s
温度特性	±2%（-20～40℃）
非线性	±2%
重量	2.5kg
测试范围	0～2000W/m^2
信号输出	0～20mV

5. 类型

太阳总辐射表有直接辐射表、双金属片日照传感器与旋转式日照传感器三种类型。

6. 安装使用与维护

1）安装场地的条件。要使玻璃半球罩上半部没有障碍物遮挡，使整个半球的辐射都来自于天空，要保证障碍物不遮挡直接太阳辐射，因此在仪器的正东和正西方应当有较好的观测条件。将辐射表水平安装在观测平台上，使表输出插头朝北，调好水平并固定，再把输出线与记录仪连接。

2）将直接辐射表的底板固定在观测平台上，调整水平，根据当地纬度确定直接辐射表纬度盘纬度位置。

3）根据使用说明书中时差表及当地经度计算出当地真太阳时，转动跟踪装置后钮子开关跟踪到确定位置后，再调回到自动跟踪状态。

4）按使用说明书中赤纬角表调整光筒高低。

5）确定底盘方向，使光筒上校正光点重合，再把底盘固定牢固。

6）下雨及冰雹时应停止观测，扣上保护盖。为保证数据准确，观测人员应定期擦拭玻璃罩上尘土，如发现干燥剂硅胶粒变色应及时更换。

二、硅材料中杂质元素的检测仪器

1. GDMS（辉光放电质谱仪）

GDMS是目前唯一一种一次可以扫描几乎所有杂质元素的分析手段，最多一次支持多达75种元素。GDMS分析中，原料是不需要溶解的，通过辉光放电，离子轰击样品表面，收集和分析打出的离子。对于希望检测材料中多种杂质的浓度级别或纯度，GDMS是比较理想的检测方法，检测范围从100%～10ppt级别。但是缺点也比较明显，因为GDMS不使用标样，相对误差较SIMS等其他检测方法要大，但在确定杂质浓度级别方面有很好的参考意义，GDMS的长处在于全元素扫描、全元素分析，一次扫描就可以知道几乎所有关心的杂质元素级别，量级不会错。尤其对于界定材料纯度等级，GDMS非常适用。如果需要确切知道浓度量值，对其中某些元素需要准确定量，可以与SIMS（误差<15%，最低2%～3%）、ICP等其他分析手段配合。GDMS与ICP两者侧重点不同，ICP的精度更高，但是ICP使用标样，

反复使用标样，针对不同杂质元素的标样，使 ICP 的测试程序十分繁琐，周期长，全元素测试周期更长，成本也会高很多，对于有些杂质难于被化学药品溶解，就没法用 ICP 准确测量。国内 ICP 的设备非常多，使用也比较方便。提供 GDMS 分析服务的供应商非常少，国内上海硅酸盐研究所有一台 VG9000 型。Shiva 是美国的实验室，有 18 台 GDMS。

2. ICPE 全谱发射光谱仪

全谱发射光谱仪可以检测石英砂中常见金属元素 Al、Ca、Fe、Na、Li 和 K 的含量，试样用 HF 和 H_2SO_4 加热分解，HCl 溶解盐类，试样的处理只需一次便可做多元素的分析，测定结果准确、快速，相对偏差小，在操作上更易掌握，适用于太阳能光伏产业的质量检测，为高纯硅材料研究和质量控制提供了解决方案。图 10-3 为 ICPE-9000 全谱发射光谱仪。



图 10-3　ICPE-9000 全谱发射光谱仪

全谱发射光谱仪的特点：

1）采用真空型分光器，分光器内无需使用吹扫器，快速启动，使分析成本降低，实现真空紫外区谱线简便测定。

2）采用快速测定的中阶梯分光器和高像素 1in CCD 检测器。

3）注重分光器波长的选择，可准确地进行基本成分复杂的样品分析。

4）观察方式先进，矩管始终保持垂直位置，可测定高浓度样品。

5）采用津岛微型矩管，与通用型矩管比较，氩气消耗减半。

3. SIMS（二次离子质谱仪）

对于检测硅片中特定杂质元素，SIMS 探测极限高，几乎可以涵盖元素周期表中所有元素，可以提供完美的浓度随深度变化曲线。

目前 SIMS 检测技术的探测极限（Si 材中）：

B 探测极限：$<2e13at/cm^3$ 最低可达 $5e12at/cm^3$。

P 探测极限：$<1e13at/cm^3$ 最低可达 $5e12at/cm^3$。

C 探测极限：$<2e15at/cm^3$。

O 探测极限：$<5e15at/cm^3$。

N 探测极限：$<3e13at/cm^3$。

提供这种分析服务的实验室以 Evans Analytical Group（埃文思分析集团）规模最大，超过 28 年历史，拥有超过 40 台 SIMS 的分析平台。

石英中的众多元素影响石英的品质：在半导体用石英玻璃和光导纤维中，微量的铝会促进光导石英玻璃纤维析晶，铝和硼结合增强石英玻璃的析晶作用；重金属和扩散系数大的钠、钙、钾等碱金属能降低半导体的使用寿命，影响石英玻璃的热学特性和光学特性，降低石英玻璃的使用温度，增大石英玻璃的介电系数和介电损失，降低石英玻璃的机械强度和光的传播速度等。因此，测定这些影响元素是为保证石英品质而不可或缺的重要工作。

三、太阳电池测试仪

采用恒定光强脉冲氙灯作为太阳模拟器，该氙灯小巧轻便、功耗低，能够保证在数据采集期间发光强度不变，测试不会造成被测太阳电池温度升高，高精度的微机测控系统保证了测试的精度。其特点：

1）可测量Ⅰ-Ⅴ曲线等主要参数。

2）可按功率或定电压电流自动分档，并在测试仪上用数字直接显示分档结果，方便生产线使用。

3）采用四线连接，确保了太阳电池测量的准确性。

4）同时测量温度和发光强度，确保太阳电池温度和发光强度自动修正的准确性。

太阳电池测试仪有以下几种：太阳电池单体测试仪、薄膜太阳电池测试仪、太阳电池串测试台等。

1. 太阳电池单体测试仪

太阳电池单体测试仪在测量电池Ⅰ-Ⅴ曲线和参数的同时，可以测试出该电池在反向电压下（0～15V）的逆电流，如果逆电流大于设定值（0～6A）时，仪器会给出提示。图10-4为太阳电池单体测试仪。10-1为太阳电池单体测试仪的性能指标。



图10-4　太阳电池单体测试仪

表10-1　太阳电池单体测试仪的性能指标

性能指标		参　数
概况	太阳模拟器等级	AAA
	测量方式	标准组件传递,自动校准发光强度
	测试功能	I_{sc}、U_{oc}、I_m、U_m、P_m、FF、R_s、R_{sh}、E_{ff}和Ⅰ-Ⅴ特性曲线
光学性能	测试面积	16cm×16cm/20cm×20cm
	光源方向	上打光光源
	光谱等级	AM1.5,Class A
	发光强度不均匀度	±2%
	发光强度不稳定度(LTI)	±1%
	脉冲宽度	4～5ms
	灯管寿命	30万次
	发光强度范围及调节方式	750～1250W/m^2,设置或自动调节
电学性能	电压测量范围	0～0.8V,0～16V(可定制)
	电流测量范围	0～12A
	测量功率的不重复度	±0.5%
	电压/电流分辨率	$1/2^{14}$×量程
	测试接线方式	精密电机,进口弹性触针
	反向电压范围	0～15V
	逆向电流范围	小于6A
软件系统	测试控制方式	键盘或按键控制
	测试时间	小于2s
	数据采集时间	3～4ms
	软件升级	免费升级

（续）

性能指标		参　数
软件系统	分选设置	可依据 P_m 和 I_d 等参数分档
	温度修正	自动测温，自动温度校正
	控制软件数据库	有，历次数据和图像可保存
机械参数	测试仪器尺寸（不含计算机和液晶显示器）	400mm（L）×510mm（W）×860mm（H）
	供电要求	AC 220V，±10%，5A，50Hz，单相电
	使用环境	25℃ ±10℃，相对湿度≤80%（25℃）

2. 薄膜太阳电池测试仪

图 10-5 为薄膜太阳电池测试仪。表 10-2 为薄膜太阳电池测试仪的性能指标。

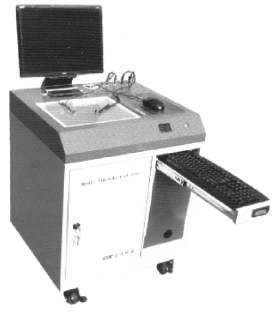


图 10-5　薄膜太阳电池测试仪

表 10-2　薄膜太阳电池测试仪的性能指标

性能指标		参　数
概况	太阳模拟器等级	AAA
	测量方式	标准组件传递，自动校准发光强度
	测试功能	I_{sc}、U_{oc}、I_m、U_m、P_m、FF、E_{ff}和Ⅰ-Ⅴ特性曲线
光学性能	测试面积	20cm×20cm
	光源方向	上/下打光光源
	光谱等级	AM1.5，Class A
	发光强度不均匀度	±2%
	发光强度不稳定度（LTI）	±1%
	脉冲宽度	10ms
	灯管寿命	30 万次
	发光强度范围及调节方式	300～1100W/m^2，设置或自动调节
电学性能	电压测量范围	1V/16V（可定制）
	电流测量范围	0～1A（可定制）
	测量功率的不重复度	±0.5%
	电压/电流分辨率	$1/2^{14}$×量程
	测试接线方式	四线制

（续）

性能指标		参　数
软件系统	系统操作	下拉式菜单操作
	测试控制方式	键盘或按键控制
	测试时间	小于6s
	数据采集时间	4～8ms
	软件升级	免费升级
	分选设置	可依据 P_m 等参数或参数组合分档
	温度修正	自动测温，自动温度校正
	控制软件数据库	有，历次数据和图像可保存
机械参数	测试仪器尺寸（不含显示器）	620mm×580mm×790mm
	供电要求	AC 220V，±10%，10A，50Hz，单相电
	使用环境	25℃±10℃，相对湿度≤80%（25℃）

3. 太阳电池串测试台

图10-6为太阳电池串测试台。表10-3为太阳电池串测试台的性能指标。



图10-6　太阳电池串测试台

表10-3　太阳电池串测试台性能指标

性能指标		参　数
光学性能	测试面积	200cm×40cm
	发光强度不均匀度	±3%
	发光强度不稳定度（LTI）	±0.5%
	灯管寿命	50万次
	发光强度范围	750～1250W/m^2
电学性能	电压测量范围	0～25V
	电流测量范围	0～12A
	测量结果重复性	≤±0.5%（U_{oc}、I_{sc}、P_m）
	测试精度	电压0.1%，电流0.1%
软件系统	测试控制方式	键盘或按键控制
	测试时间	小于6s

（续）

性能指标		参　数
软件系统	数据采集时间	3～4ms
机械参数	测试仪器尺寸	2500mm×800mm×950mm
	供电要求	AC220V，±10%，5A

第三节　太阳电池性能参数的测量

薄膜太阳电池的电性能参数包括Ⅰ-Ⅴ特性曲线、开路电压 U_{oc}、短路电流 I_{sc}、最佳工作电压 U_m、最佳工作电流 I_m、最大输出功率 P_m、光电转换效率 η、填充因子 FF、短路电流温度系数 α（简称电流温度系数）、开路电压温度系数 β（简称电压温度系数）、内部串联电阻 R_s、内部并联电阻 R_{sh}。

一、测量方法

1）开路电压 U_{oc}、短路电流 I_{sc} 可以用电表直接测量。

2）Ⅰ-Ⅴ特性曲线应在标准地面阳光或太阳模拟器下测量，且在标准条件下测量，如受条件限制，只能在非标准条件下测量，应将测量结果换算到标准测量条件。

3）电流和电压换算公式。当辐照度、测量温度和标准测量条件不一致时，可用以下换算公式校正到标准测量条件：

$$I_2 = I_1 + I_{sc}\left(\frac{I_{SR}}{I_{MR}} - 1\right) + \alpha(T_2 - T_1)$$

$$U_2 = U_1 - R_s(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)$$

式中　I_1——实测到的电流值；

U_1——实测到的电压值；

I_2——校正后的电流值；

U_2——校正后的电压值；

I_{sc}——实测到的短路电流；

I_{MR}——标准电池在实测条件下的短路电流；

T_1——实测温度；

T_2——标准测量温度，25℃；

R_s——实测到的电池内部串联电阻；

K——曲线校正因子，一般取 $1.25\times10^{-3}\Omega/℃$；

α——所测电池在标准辐照度下，以及在所需的温度范围内的电流温度系数；

β——所测电池在标准辐照度下，以及在所需的温度范围内的电压温度系数。

计算时，各参数单位要统一。

4）单体太阳测量温度必须恒定在标准测量温度（室外可用遮光法）。

5）太阳模拟器只能用标准薄膜太阳电池来校准，该标准薄膜太阳电池应和待测薄膜太阳电池具有基本相同的光谱响应（指同材料、同结构、同工艺）。

6）阳光下测量：

① 测量场地的选择。测量场地周围应空旷，没有造成遮光、反光及散光的楼房、高树、围墙等；周围的地面上没有高反射的物体，如冰雪、石灰和亮沙子等；周围空气清洁，无灰尘、烟雾等。

② 气象条件。天气晴朗，测量场地上空或周围无云；阳光总辐照度不低于标准总辐照度的80%；天空散射光所占比例不大于总辐射的25%；在测量周期内，辐照的不稳定度应不大于±1%。

③ 安装要求。所测电池、标准电池应安装在同一平面上，并尽量靠近，测量平面的法线和入射光线的夹角应不大于5°。

二、主要参数的测量

1. Ⅰ-Ⅴ特性曲线的测量

Ⅰ-Ⅴ特性测量原理如图10-7所示。标准电池（二级）短路电流的标定值用于校准太阳模拟器的辐照度，温度监控在25℃。为了减少光谱失配误差，太阳模拟器的光谱应接近标准阳光光谱，或与被测电池的光谱响应基本相同。太阳模拟器的光谱取决于滤光器的设计。标准电池与待测电池应置于均匀光照范围内的同一水平面内，如果均匀光照范围不足以同时容纳标准电池与待测电池，则在用标准电池调整太阳模拟器达到所需辐照度后，移开标准电池，再将待测电池放到原标准电池的位置。测量待测电池的电压和电流应从被测点的端点单独引出电压线和电流线。通过不断采集电流、电压点，就能得到Ⅰ-Ⅴ特性曲线。

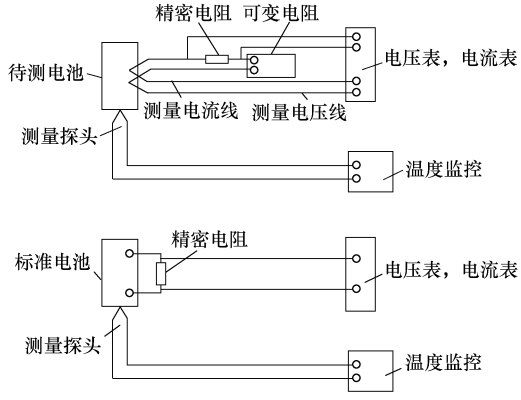


图10-7　Ⅰ-Ⅴ特性测量原理

但是图10-7所示的Ⅰ-Ⅴ特性测量原理有两个不足的地方：一是电池串联了提取电流的精密电阻，使电池不能达到短路状态；二是可变电阻不可能从零变到无穷大，所以达不到开路状态。测量后所画的曲线如图10-8所示，该Ⅰ-Ⅴ特性曲线是有缺陷的，不能与纵轴电流密度轴及横轴电压密度轴相交，测不出短路电流及开路电压。为了弥补这两点不足，一般增加补偿电路。图10-9为Ⅰ-Ⅴ特性补偿测量。

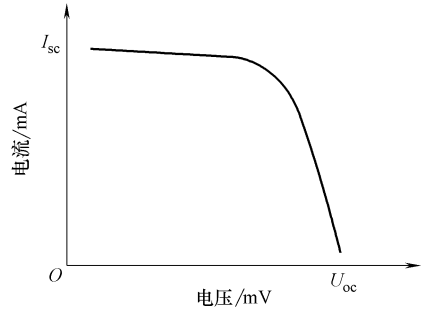


图10-8　Ⅰ-Ⅴ曲线缺陷

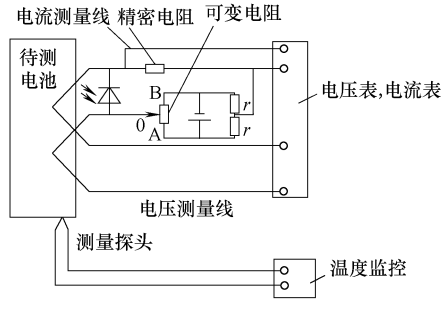


图10-9　Ⅰ-Ⅴ特性补偿测量

在可变电阻两端加了外电源及两个相同电阻r，构成桥式电路。当可变电阻在中间零位时，电桥平衡；当可变电阻滑动头从零点向A点移动时，电桥平衡破坏，外加电源给被测

电池以正向偏置，移动距离加大，正向电流也随之加大，并可使流过 p-i-n 结的电流略大于光生电流，二极管导通，负载曲线就越过横轴电压密度轴进入第四象限，从而测出开路电压 U_{oc}；当可变电阻滑动头从零点向 B 点移动时，被测电池受外加电源反向偏置，移动距离加大，反向电流和正向电流相等，二极管截止，移动距离继续加大，负载曲线就越过纵轴电流密度轴进入第二象限，从而测出短路电流 I_{sc}。图 10-10 为测得的Ⅰ-Ⅴ特性曲线。

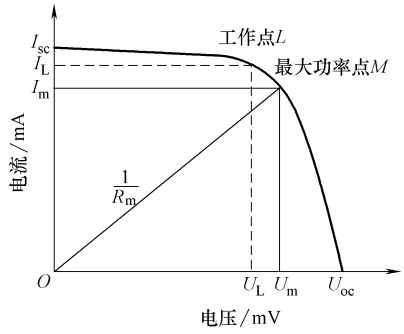


图 10-10　测得的Ⅰ-Ⅴ特性曲线

2. 最大功率点

图 10-10 中曲线上的任一点 L 都称为工作点，工作点和原点的连线称为负载线，负载线斜率的倒数即等于负载 R_L，与工作点对应的纵、横坐标即为工作电流和工作电压。当调节负载电阻 R_L 达到某一数值时，由曲线上得到一点 M，该点所对应的工作电流 I_m 和工作电压 U_m 之积最大，称为最大功率点或最佳工作点，I_m 为最佳工作电流，U_m 为最佳工作电压，R_m 为最佳负载电阻，P_m 为当太阳电池受到照射时，在负载 R_m 上得到的最大输出功率。求出该点的方法有两种。

（1）数学方法

① 建立Ⅰ-Ⅴ曲线的数学方程。

② 建立面积 $S = I \times U$ 的数学方程。

③ 求 S 的一阶导数。

④ 令 S 的一阶导数为零，求出自变量 U 的值。

⑤ 将值代入Ⅰ-Ⅴ曲线的数学方程，解出 I 的值。

（2）逐步逼近法。可参见逆变器一章中最大功率跟踪的讲解。

3. 填充因子 *FF*

图 10-11 为Ⅰ-Ⅴ特性曲线填充因子。填充因子 FF 的几何意义就是图 10-11 中四边形 OI_mMU_m 与 $OI_{sc}AU_{oc}$ 的面积之比，是衡量太阳电池输出性能优劣的重要指标之一。在一定发光强度下，填充因子 FF 越大，曲线越方，输出功率越大。填充因子 FF 的数学表达式为最大输出功率 P_m 与短路电流 I_{sc} 和开路电压 U_{oc} 的乘积之比。

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc}U_{oc}} = \frac{I_mU_m}{I_{sc}U_{oc}}$$

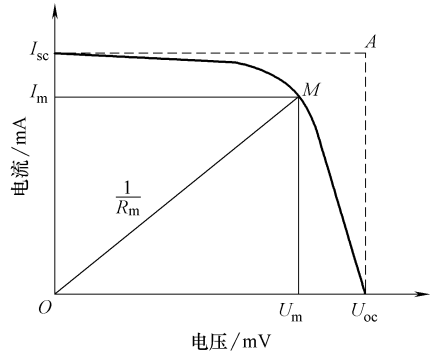


图 10-11　Ⅰ-Ⅴ特性曲线填充因子

4. 太阳电池的效率

太阳电池在太阳光的照射下，其输出的电功率与入射的光功率之比 η 称为太阳电池的效率，也称光电转换效率。

5. 电流温度系数 α_c、电压温度系数 β_c 的测量

太阳电池的电性能参数是随温度的变化而变化的，电参数与温度的这种关系可以用温度系数来描述。一般是在标准状态下来测出温度系数，其具体步骤如下：

1）采用脉冲式太阳模拟器。

2）温度传感器附着在被测的太阳电池上，尽量靠近 p-i-n 结。

3）将测试环境温度及被测电池温度控制在标准测试温度 25℃。

4）标准电池与被测电池并排放置在测量平面的有效辐照区内，用标准电池校准辐照度。

5）把温度调节到所需温度范围的最低点，测量短路电流和开路电压。

6）把温度升高 10℃，稳定后再测量短路电流和开路电压。

7）重复 6），直到所需温度范围的最高点。

8）根据测量得出的数据，画出短路电流-温度和开路电压-温度两条曲线。

9）在所需温度范围的中点，求出两条曲线的斜率，即为电流温度系数 α_c、电压温度系数 β_c。

10）太阳电池组件、组合板及方阵的温度系统可按下式算出：

$$\alpha = n_p \alpha_c$$

$$\beta = n_s \beta_c$$

式中　α——组件、组合板及方阵的电流温度系统；

n_p——单体电池的并联个数；

α_c——单体电池的电流温度系数；

β——组件、组合板及方阵的电压温度系统；

n_s——单体电池的串联个数；

β_c——单体电池的电压温度系数。

6. 内部串联电阻 R_s

内部串联电阻 R_s 可用不同辐照度下 3 组Ⅰ-Ⅴ特性曲线得到，辐照度大致取 700W/m²、900W/m²、1100W/m²，所使用的测量装置和测量Ⅰ-Ⅴ特性曲线的装置相同。其步骤如下：

1）大致取 900W/m²、1100W/m²，不需知道准确数值，分别测量出两条伏安特性曲线，曲线 1、曲线 2 画在同一坐标线上。辐照度改变时，温度变化不超过 2℃。图 10-12 为内部串联电阻的测量。

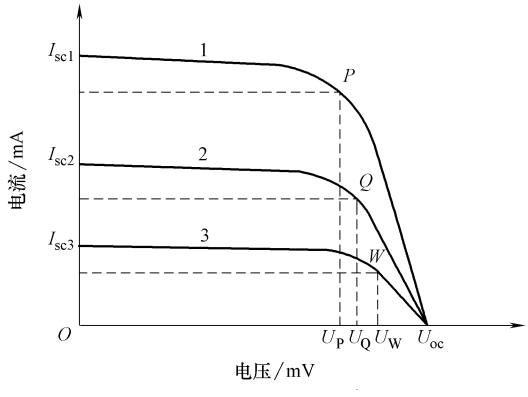


图 10-12　内部串联电阻的测量

2）在两条曲线的最大功率点附近各取一点 P 和 Q，使其满足

$$I_{sc1} - I_P = I_{sc2} - I_Q$$

3）按下式算出 R_{s1}：

$$R_{s1} = \frac{U_Q - U_P}{I_{sc1} - I_{sc2}}$$

4）保持温度不变，把辐照度调到 700W/m² 左右，再测量一条Ⅰ-Ⅴ特性曲线 3，取一点 W。

5）重复 2）、3），由曲线 2、曲线 3 算出 R_{s3}，从曲线 1、曲线 3 算出 R_{s2}。

6）被测太阳电池的内部串联电阻 R_s 为

$$R_s = \frac{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}{3}$$

第四节　太阳电池组件的测量

一、电气性能的测量

采用 JDSGC-9 太阳电池组件测量台。图 10-13 为 JDSGC-9 太阳电池组件测量台。表 10-4 为太阳电池组件测量台的性能指标。

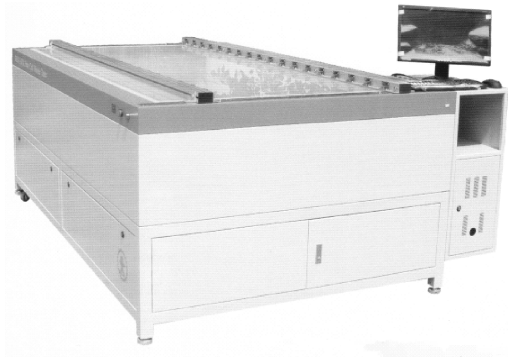


图 10-13　JDSGC-9 太阳电池组件测试台

表 10-4　太阳电池组件测量台的性能指标

性能指标		参　数
概况	太阳模拟器等级	AAA
	测量方式	标准组件传递,自动校准发光强度
	测试功能	I_{sc}、U_{oc}、I_m、U_m、P_m、FF、R_s、R_{sh}、E_{ff}和Ⅰ-Ⅴ特性曲线
光学性能	测试面积	2m×1.2m
	光源方向	下打光光源
	光谱等级	AM1.5,Class A
	发光强度不均匀度	±2%
	发光强度不稳定度(LTI)	±1%
	脉冲宽度	5ms/10ms
	灯管寿命	30 万次
	发光强度范围及调节方式	200～1250W/m^2,设置或自动调节
电学性能	电压测量范围	0～100V(可定制)
	电流测量范围	0～12A(可定制)
	测量功率的不重复度	±0.5%
	电压/电流分辨率	1/2^{14}×量程
	测试接线方式	四线制

（续）

性能指标		参　数
软件系统	测试控制方式	键盘或按键控制
	测试时间	小于6s
	数据采集时间	2ms/8ms
	软件升级	免费升级
	分选设置	可依据 P_m 和 I_d 等参数分档
	温度修正	背板、环境温度可选，配置进口红外测温探头，自动温度校正
	控制软件数据库	有，测试数据和图像可保存
机械参数	测试仪器尺寸（不含挂箱）	2500mm×1470mm×950mm
	无损伤滑道	有，间距可调
	供电要求	AC 220V，±10%，10A，50Hz，单相电
	使用环境	25℃±10℃，相对湿度≤80%（25℃）

二、质量性能的测量

薄膜太阳电池长期暴露在自然环境中，受到气象、环境及机械因素的影响。其气象因素有阳光辐射、温差、雨、雪、霜、冰雹、风、砂石等，其环境因素有空气中的化学污染、灰尘、鸟粪等，其机械因素有在存放、运输、安装、使用过程中受到的碰撞、振动、摩擦等。在这种种因素的影响下，要求可靠地、稳定地工作25年，因此对薄膜太阳电池的制造有一系列苛刻的要求。出厂前要进行一系列测试试验，主要有热循环、湿度-冰冻、冰雹冲击、绝缘耐压、浸盐、风载、扭转、长时间热处理、温度交变、高温贮存、低温贮存、恒定湿热贮存、振动冲击、阳光辐照、扭弯试验等。

在测试之前，所有的组件，包括控制件，都必须在开路状态下经过5～5.5kW/m^{2}的8h的太阳光照射。在标准测试条件下，组件的最大输出功率衰减在每个单项测试后不超过规定的极限，每一组试验程序后不超过规定值的8%。

（1）热循环　热循环主要是测试组件接触和层压的膨胀与收缩。测试工艺：

1）测试温度从25℃降至－40℃，在－40℃保持30min。

2）测试温度从－40℃升至90℃，在90℃保持30min。

3）测试温度从90℃降至25℃。

测试温度变化率≤120℃/h，每一个循环周期＜6h，共进行200次循环。

（2）湿度-冰冻　湿度-冰冻主要是测试组件侵入潮气，导致层压塑料的腐蚀和损坏等。测试工艺：

1）测试温度从25℃升至85℃，在85℃保持20h。

2）测试温度从85℃降至－40℃，在－40℃保持30min。

3）测试温度从－40℃升至25℃。

4）测试温度为85℃时，空气相对湿度为85%±2.5%。在测试期间，室内空气或测试箱空气与外界空气隔绝，以使得水蒸气可以冷凝在电池板上，增大冰冻效果。

测试温度变化率≤120℃/h，每一个循环周期＜24h，共进行10次循环。

（3）冰雹冲击　冰雹冲击主要是测试组件能否经受冰雹冲击。冰球从冰球发射机射出，击打在组件前玻璃上，以及两块玻璃的相互连接处。测试器件和要求：

1）冰箱：（－10 ±5）℃。

2）冰球：直径为 25（1 ±5%）mm，质量为 7.53（1 ±5%）g。

3）速度：23（1 ±5%）m/s。

4）天平的准确度 ±2%，速度测试仪表的准确度 ±2%。

（4）绝缘耐压　绝缘耐压主要测试可接触的导电部位、活动部位和暴露的不导电表面间的绝缘性和间距，能承受两倍于系统电压加上 1000V 的直流电压。测试工艺：

1）额定电压≤30V 的组件，施加 500V 电压。

2）组件面积 >0.1m^2 时，绝缘电阻≥40MΩ；组件面积 <0.1m^2 时绝缘电阻≥400MΩ。

3）电压以稳定均匀的速率在 5s 的时间内逐步升到试验电压，并维持该电压直至有泄漏电流，稳定的时间至少为 1min。

4）测试要在三个无相关的样品中进行。这些样品事先要进行过喷淋、热循环、温度-冰冻等试验。当测试的是暴露的绝缘部位时，这一部位应覆上一层导电的金属薄片。

（5）浸盐　浸盐主要测试组件在海蚀情况下是否会出现腐蚀和电性能下降。测试工艺：

配制质量比为 5% 的盐水溶液（普通盐及蒸馏水），溶液的 pH 值在 6.5 ~ 7.2 之间，35℃时的密度为 1.026 ~ 1.040，整个测试过程室内温度保持在 33 ~ 36℃，置入盐水中 3 天。

（6）风载　风载主要测试在风力情况下组件是否会出现松动或电池损坏。测试工艺：组件安装在支架上经受 2400Pa，相当于 200km/h（55.6m/s）的风，进行 10000 次循环。

（7）扭转　扭转主要测试电池是否损坏和电接触损失。测试工艺：组件固定三个角，第四个角抬起约 1″，暴露在 2400Pa 风力下。

（8）长时间热处理　长时间热处理主要测试湿气能否进入。测试工艺：组件在相对湿度 90% 和 90℃环境中保持 5 天。

（9）温度交变　温度交变主要测试玻璃板的性能。从高温到低温反复交替变化称为温度交变。测试工艺：温度交变范围为（－40 ~ 35）℃ ±2℃，钢化玻璃做前面板的组件交变 200 次，超白低铁玻璃做前面板的组件交变 50 次。

（10）高温贮存　测试工艺：将地面用薄膜太阳电池在（85 ±2）℃的高温环境下存放 16h。

（11）低温贮存　测试工艺：将地面用薄膜太阳电池在（－40 ±3）℃的低温环境下存放 16h。

（12）恒定湿热贮存　测试工艺：将地面用薄膜太阳电池在相对湿度为 90% ~95%，温度为（40 ±2）℃的湿热环境下存放 4 天。试验结束要检查外观、测试电性能及绝缘电阻。

（13）振动冲击　振动冲击主要测试耐受运输能力。测试工艺：将薄膜太阳电池良好包装。

测试条件：

1）振动频率：10 ~ 15Hz。

2）振幅：0.35mm。

3）振动时间：法向、切向各 20min。

4）冲击波形：半正弦、梯形、后峰锯齿，各持续 11s。

5）冲击的峰值加速度：150m/s^2。

6）冲击循环次数：法向、切向各3次。

（14）阳光辐照　阳光辐照主要测试功率下降程度。测试工艺：

1）在辐照试验箱中进行。

2）太阳模拟器垂直照射组件，辐照度为（1120±10）W，并具有地面阳光光谱分布。

3）一周期为24h小时，其中光照20h，温度为55℃，停照4h，温度为25℃。持续进行18个月。

4）最大功率下降应<10%。

（15）扭弯试验　测试工艺：

1）室温在15~35℃，将薄膜太阳电池组件三个角固定，另一个角安装在扭弯测试仪上，使组件的一外短边扭转1.2°。

2）试验完毕，检查外观及电性能。

第五节　多结叠层太阳电池的测量

多结叠层太阳电池是将不同禁带宽度的子电池，以太阳入射方向，依照禁带宽度从大到小的顺序串联叠加制作而成的，依次吸收太阳光谱的短波、中波及长波部分，实现更高的光电转换效率。图10-14为GaInP/InGaAs/Ge三结叠层太阳电池的示意图。

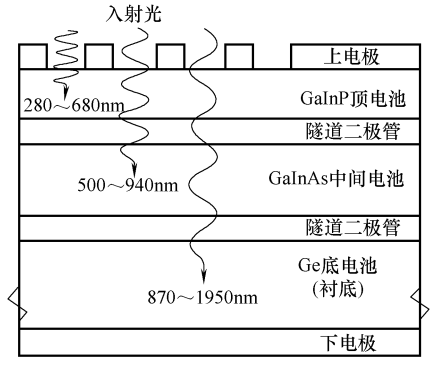


图10-14　GaInP/InGaAs/Ge三结叠层太阳电池的示意图

多结叠层太阳电池在实际太阳光谱下的电性能会受到各个子电池性能参数的影响，其光谱响应及Ⅰ-Ⅴ特性曲线的测试比单结电池要复杂得多。

一、多结叠层太阳电池的测试原理

多结太阳电池测试要加多个不同波段的偏置光和偏置电压。

1. 偏置光

当单色光照到多结叠层太阳电池上，多个子电池分别响应太阳光谱的不同波段，因此，当其中一个子电池有响应时，另外的子电池没有响应，没有响应的子电池使pn结处于反偏的状态，使整个多结叠层太阳电池没有电流输出，这样就得不到有响应的子电池的任何信息。如果当其中一个子电池有响应时，另外两个子电池处于正向光偏置状态，情况就不同了。加偏置光的目的有两个：

1）与单结电池相同，使被测电池的测试条件与实际应用时的工作条件相近。

2）使被测子电池在偏置光条件下的短路电流低于其他子电池。根据基尔霍夫定律，串联叠层电池的电流将受到最小的被测子电池电流的限制，这样光谱测试得到的是被测子电池的光谱响应曲线。图10-15为加偏置光源测试多结叠层太阳

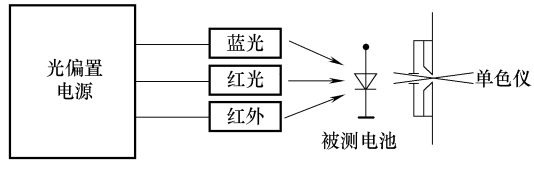


图10-15　加偏置光源测试多结叠层太阳电池

电池。

加了偏置光后，在测绘一个子电池时，其他子电池处于不相干扰的偏置光源下，并且保证了其他子电池的电流高于被测子电池的电流，被钳制。当然，偏置光源的强弱要仔细调节到对应其他子电池的响应区域。

2. 偏置电压

加偏置电压是要测量到被测子电池的短路电流。因为在偏置光条件下，测试得到的是被测电池最大功率点附近的电流，而非短路电流，在被测子电池反向特性差时，两者之间的区别更大，为了测到短路电流，必须要加偏置电压。

二、多结叠层太阳电池光谱响应曲线的测试

加了偏置光与偏置电压后，按照单结电池光谱响应的测试方法，对每一个电池的光谱进行测试，最终得到多结叠层电池的光谱响应曲线。图 10-16 为三结叠层太阳电池的光谱响应曲线。

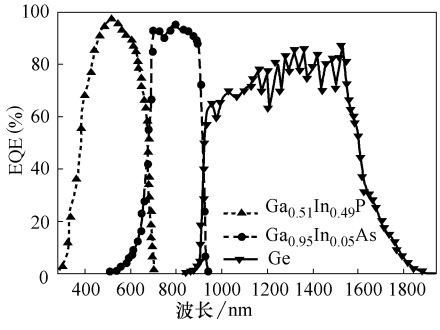


图 10-16　三结叠层太阳电池的光谱响应曲线

三、多结叠层太阳电池 I-V 特性曲线的测试

1. 多光源模拟器

多结叠层太阳电池 I-V 特性曲线的测试需要不同波段、可独立调节的多光源模拟器，从而，要建立与各个子电池相应的标准电池。这些标准电池应与被测电池具有相同材料、相同结构，并在相同工艺条件下制作。参照单结电池的方法，对多结标准电池进行航天飞行或地面光谱标定，以确定它们在 AM0 或 AM1.5 条件下的标定值。

利用各个子电池的标准电池对多光源模拟器的相应波段进行反复调节，使各个子电池的标准电池达到标定值。

2. 测试

可按第三节电池性能参数测量方法，对多结叠层太阳电池的 I-V 特性曲线进行测试。

第六节　空间太阳电池的测试

产业化生产的太阳电池是在太阳模拟器下进行测量，以测出其电性能参数及判断是否是合格产品，而太阳模拟器本身的光谱调试是要用合适的标准电池来调试的。用合适的标准电池将太阳模拟器的光谱调到 AM0 状态，经过这番调试合格的太阳模拟器才能用来对太阳电池进行测试。标准太阳电池都是在自然光下进行标定的，可在空间自然光下进行，也可在地面条件合适的自然光下进行，分别称为空间标定和综合法标定。由于标定的难度很大，成本很高，所以标准电池都很珍贵。

一、空间标定

在高空中标定，大气质量很小，能够展示真实的环境。空间标定有高空气球和飞机两种方法。

1. 高空气球

在 36km 的平流层，太阳辐照接近 AM0，这时可以实施标定，但是太阳与地球的距离总

在变化，导致温度和辐照度变化，还有残存的大气质量等都会影响测量的准确性。因而，对测量到的数据要进行修正。美国的 JPLNASA 研究所和法国的 CNES 研究所，每年要在空间标定一次太阳电池。

2. 飞机

在 15～18km 的高空进行，待标定电池固定在具有温控面板的平行光管的底盒盖上进行标定。飞机上配有分光辐射计测量太阳光谱，飞机要飞 25 次完成一次标定试验。数据的修正要考虑臭氧层的吸收。

二、综合法标定

自然光下有两种标定方式。

1. 总辐射法

把待标定太阳电池和辐照计放在同一水平面，在总辐射下，同时读取辐照计的读数和电池的短路电流值。实施标定的地点应满足几个与总辐照和散射水平、太阳仰角和光线能畅通照射整个半球等有关的条件。短路电流值 I_{sc} 用下列公式进行校准：

$$I_{sc} = I_{sg}\frac{\int(k_2E_{g\lambda})\,d\lambda}{E_{glob}}\frac{\int(k_1s_\lambda)E_{s\lambda}\,d\lambda}{\int(k_1s_\lambda)(k_2E_{g\lambda})\,d\lambda}$$

式中　k_1s_λ——电池的绝对光谱响应；

$k_2E_{g\lambda}$——太阳在标定地点的绝对光谱辐照；

$E_{s\lambda}$——AM0 时的光谱辐照；

E_{glob}——日辐射计的读数；

I_{sg}——被测电池的短路电流值。

最后确定的标定值是三天标定的平均值。

2. 太阳光直射

待标定电池被放置在平行光管的底部，并确保入射光辐照计、分光辐照计能时刻正对准太阳，此时记录电池的短路电流、总辐照和光谱辐照。实施标定的地点和环境需要满足几个条件：辐照度达到或接近标准值、短路电流读数稳定、散射率测定。短路电流值 I_{sc} 用下列公式进行校准：

$$I_{sc} = \frac{I_{sd}\int E_{d\lambda}\,d\lambda\int E_{s\lambda}s_\lambda\,d\lambda}{E_{dir}\int E_{d\lambda}s_\lambda\,d\lambda}$$

式中　I_{sd}——被测电池的短路电流值；

$E_{d\lambda}$——分光谱辐照；

$E_{s\lambda}$——AM0 时的分光辐照；

s_λ——电池相对被校准值的相对光谱响应；

E_{dir}——总辐照。

被校准的短路电流值是三天校准值的平均值。我国采用该法标定。

三、空间太阳电池及其方阵测试过程

空间太阳电池及其方阵在特定空间的性能测试，从项目的最初阶段就要开始展开，包括 4 个阶段：

1）开发阶段。在了解电池的性能、电池对空间环境的耐受性后，确定适用的太空电池。

2）设计阶段。将太阳电池放在不同的环境中测试，准确地估算太阳电池在运行期间的输出功率，从而确定电池方阵的尺寸、方阵的连接及运输安装。

3）质量鉴定阶段。检查生产线上的太阳电池能否满足空间运行所需要求。

4）验收阶段。要求厂商提供电池性能和物理特性方面的数据，以便进行电气一次、电气二次的设计。

空间太阳电池及其方阵测试可分为电性能测试，环境测试，物理、力学性能测试，飞行测试。

（1）电性能测试

1）测试基本要求。无论是测试单结太阳电池，还是多结太阳电池，太阳模拟器的发光强度都要调整到标准发光强度，即 AM0 状态，在标准发光强度和恒温下测试组件的Ⅰ-Ⅴ特性曲线。恒温与不同温度是两个不同的概念和要求，通过测量不同温度下组件的性能，才能计算出温度系数。

2）相对光谱响应。相对光谱响应数值，是在单位辐照度下，一定波长下产生的短路电流。用窄带光源照射太阳电池完成相对光谱响应。相对光谱响应为改善太阳电池的开发和太阳模拟器的鉴定提供了宝贵的数据。窄带可用单色仪或窄带滤波器。

3）反向特性。电池反向电压的特性可用于估算太阳电池串的阴影和热斑效应。因为处于反偏置的电池可能会产生较多的热量，导致输出功率减少或永久短路失效。单结和多结砷化镓太阳电池对反向偏置比硅电池更敏感。图 10-17 为空间电池的反向特性。可通过旁路二极管对每支电池进行有效保护。反向特性的测试设备与过程和电性能测试类似，但是应注意要限制电流和功率以避免失效。

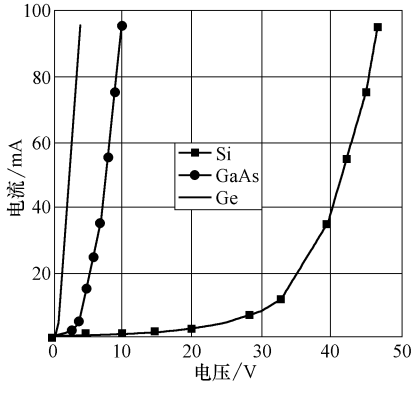


图 10-17　空间电池的反向特性

4）电容特性。电池方阵的控制系统对太阳电池电容有特殊要求。太阳电池电容有两种方法测量：

① 小信号或频域方法。在暗光下通过电压偏置，来测量某个偏置点周围的高频阻抗。

② 大信号或时域方法。太阳电池两个工作点之间的升压会使电池拥有电容特性。计算公式为

$$C = \frac{I_{sc}(t_2 - t_1)}{U_2 - U_1}$$

式中　t_2、t_1——两个工作点的时间；

U_2、U_1——两个工作点的电压。

（2）环境测试　环境测试是用于检测太阳电池方阵在整个寿命期对周围不同曝光环境的耐受性。最恶劣的环境有地面、发射及空间。

地面：在太阳电池方阵的生产、组合、安装和运输阶段，电池方阵可能受到物理破坏；在长期贮存阶段，太阳电池可能会受到湿气的腐蚀。因此，在相应的阶段要进行测试。

发射：发射产生的振动、冲击、加速度和声场都会影响电池方阵，振动、冲击、加速度和声场试验通常是在组合的最后阶段进行。

空间：粒子、温度、真空和太空碎片是造成电池方阵在空间衰降的主要因素，每个因素都会影响电池方阵的不同部位和结区。测试在电池、组件和试样阶段进行。

电性能测试和外观检查应在进行任何环境测试的前、后进行。

针对最恶劣的环境——地面、发射及空间环境，具体进行辐照、紫外辐照、原子氧、温度循环、真空、太空碎片、静电放电及湿度等8个方面的测试。

1）辐照测试。空间辐照环境通常是由不同光谱能量的电子和质子组成的，它们会对太阳电池的晶体结构造成位移，降低少子在电池基极区的扩散长度和寿命，使电性能参数衰退；另外，辐照会使玻璃盖板和粘结剂涂层变黑，产生传输损耗，并使工作温度升高。目前可采用JPL法来测试太阳电池在空间辐射环境中的性能。JPL法是把空间环境中所有的质子和电子的能量降低到对等垂直入射和单能辐射条件下进行测试。

用电子和质子辐射设备对电池进行测试。Van der Graaff发生器产生的能量为2～1MeV，回旋加速器产生的能量为10～50MeV，同步回旋加速器产生的能量为50～155MeV。

电子由Van der Graaff发生器产生，电子能量在0.6～2.5MeV范围内，流动率在1×10^{10}～1.5×10^{12}e/(cm^2/s)范围内；低能量质子（低于2MeV）由氢气电离室和同位素分离器产生。电池在真空或惰性气体中被辐射，受辐照的太阳电池，电池晶格的破坏和性能衰退通常是不稳定的。当暴露在阳光下，温度高于20℃时，电池就会发生退火现象，其性能就会出现恢复或进一步衰退。

2）紫外辐照测试。紫外辐照可使某些太阳电池前板或粘结剂涂层变黑，从而降低光的透过率，使电池温度升高，最终降低电池的电性能。测试应在真空室内、在轨温度下进行，紫外光源可用长弧氙灯、高压汞灯或卤放电灯提供。

3）原子氧（ATOX）测试。在低轨道（180～650km），ATOX的出现会使电池互联条和支撑框架上的薄膜腐蚀。太阳电池的方阵ATOX耐受性测试应在等离子化机室内进行，在该室内，空气变成了ATOX和其他微粒。ATOX射线的剂量可用未加薄膜样品来确定，因为未加薄膜样品的腐蚀率可从飞行数据中获取。

4）温度循环测试。在轨太阳电池方阵经历的温度循环会导致导线、汇流条、互联条材料和焊点出现疲劳裂纹，还会导致电池及互联条接口的串联电阻增加。采用真空热循环或在流通惰性气体室内获得温度变化率。后者测试成本和测试周期会大大缩短。

5）真空测试。空间真空可使金属材料，如Me、Cd、Zn蒸发，还可使粘结剂汽化。热真空测试是针对部件和电池方阵的耐受性而进行的标准测绘。

6）太空碎片测试。太空微碎片（10^{-6}～10^{-3}g）的冲击将严重破坏太阳电池的前玻璃板，并影响导线，造成永久性的光损失和方阵性能衰退。可用等离子体加速器和轻气炮测试。

7）静电放电测试。太阳电池方阵介电表面主要有玻璃板，会因地磁亚暴活动或航天器周围的等离子体而贮存静电荷，随后的静电放电会对太阳电池方阵造成永久破坏。测试方法是在玻璃前板表面上涂上导电涂层（ITO），并接地来降低带电，为测试提供一个等势面。可测量出静电破坏程度及导电涂层在运行环境中的寿命。

8）湿度测试。太阳电池湿度测试是为了检测电池接触和减反射涂层在长期运行下的稳

定性。带有 AlGaAs 窗口层的 GaAs 太阳电池必须接受这种测试，以确保减反射涂层保护窗口层腐蚀的有效性。

（3）物理、力学性能测试

表 10-5 为太空电池的物理、力学性能测试，共有 9 项测试项目。

表 10-5 太空电池的物理、力学性能测试

序号	测试项目	目的	测试方法	要求
1	外观	寻找明显缺陷	目测或低倍放大镜	不得影响光线进入及电性能
2	互联条粘力	互联条与接触点的焊接或粘接	拉力试验	不得低于最大拉力值
3	涂层粘力	接触点和涂层粘力	胶带脱层	分层区≤1%
4	外形尺寸	标准化	卡尺	符合图纸要求
5	质量	标准化	电子秤	符合图纸要求
6	接触厚度	互联条组合数据库	X 射线分光镜	符合工艺要求
7	接触表面光洁度	互联条组合数据库	粗糙度测试仪	符合图纸要求
8	半球发射	电池的发射能量	红外分光计	符合图纸要求
9	太阳吸收	电池接收能量	分光计	最大吸收功率

（4）飞行测试

为了验证太阳电池对空间环境的耐受性，一般要进行几次飞行测试，大多数飞行测试都要测绘电池的电性能参数、太阳视线角和工作温度。

（5）航天器上太阳电池的失效

20 世纪 90 年代众多运行多年、返回地面的航天器提供了太阳电池失效的现象，有些失效原因较为明朗，有些失效原因是很复杂的。这些在轨运行过几年、又返回到设计人员手上的太阳电池的资料是宝贵的，它们将指引人们对太阳电池及方阵做深入研究和进一步的改进。表 10-6 为在轨太空太阳电池方阵失效现象及其原因。

表 10-6 在轨太空太阳电池方阵失效现象及其原因

序号	航天器名称	失效现象	轨道	运行时间	失效原因	改进方案
1	欧洲通信卫星	硅太阳电池功率损失，电池网与电池板短路	地球同步轨道	1.5 年	薄膜瑕疵，绝缘层嵌进微粒，静电荷、温度循环、电晕、碎片	并联电池串代替串联电池串
2	X 射线同步探测器	钢性硅太阳电池电流持续下降及电池损失		1995 年 12 月发射	电池裂缝地面未检出，在轨温度循环，裂缝加大	加强测试控制
3	全球卫星定位系统	硅太阳电池衰降增大 2%	20000km	2 年	航天器表面材料蒸气的气体覆盖太阳电池玻璃盖板	
4	“先驱者”金星人造卫星	电池串损坏，功率下降		2 年	电池在阴影区形成反向偏置（未设旁路二极管），电池彻底损坏，反向偏置才会结束	

（续）

序号	航天器名称	失效现象	轨道	运行时间	失效原因	改进方案
5	哈勃太空望远镜	双帆板，每个帆板用两个挠性硅太阳电池，共 48760 块，两年后应为 4.4kW		1993 年 12 月返回，3.5 年	互联条未出现疲劳；导线出现疲劳，但没断裂；原子氧防护涂层变黑，使工作温度升高；4000 多处冲击，没有造成长期短路；功耗因素与观察到的衰减吻合；对帆板伸缩性能进行解体研究	
6	EURECA	5 个刚性硅太阳电池帆板，约 100m^2，5kW，电池串开路；阴影区方阵放电；MoAg 互联条裸露部分被原子氧氧化腐蚀；防护原子氧的粘结剂变黑；所有面都有碳和硅的污染物	500km	1992 年 7 月发射，1993 年 7 月返回	配线收集板疲劳失效使电池串开路（压力释放环的弯曲半径不够大）；未设旁路二极管，方阵短路；绝缘线（氟化乙丙烯）涂层已被 X 射线和 UV 辐射完全腐蚀	防护原子氧粘结剂改为 SiO_2
7	MIR（太阳电池设计完整）	效率 11% 硅太阳电池功率衰退 50%；帆板所有裸露部位都有大量 SiO_2，造成功率损失 0.72%	380km	10.5 年，1998 年 1 月取回残片研究	热斑是造成功率衰退 50% 的主要原因，未装旁路二极管，热斑造成的高温摧毁了逆变器；太空碎片造成损失 1%；温度升高 7℃，这是辐射升高，吸收率降低；未受热斑影响的太阳电池功率衰退 10% ~15%	

第七节　取　　证

产品认证是一种正规的过程，它由可信的测试实验室和认证机构来实施，然后给制造企业颁发认证证书，说明厂家的产品已经通过测试，符合标准要求。有许多独立的光伏实验室都提供正规的或依要求进行的认证测试服务。这些实验室有：

1）UL——美国保险商试验室（Underwrites Laboratories Inc.），位于美国伊利诺伊州北布鲁克。

2）TUV——技术监督协会（Technischer U berwachungs Verein），位于德国柏林勃兰登堡。

3）美国亚利桑那州立大学光伏测试实验室，位于美国亚利桑那州梅萨市。

4）欧洲联合研究中心 ESTI 实验室（环境可持续发展研究所）可再生能源部，位于意大利 ISPRA。

5）VDE 测试和认证协会，位于德国奥芬巴赫市。

中国太阳电池组件产品要进入美国和欧洲，分别需要通过 UL 和 TUV 认证。

中篇　薄膜太阳电池光伏电站

第十一章　光伏并网逆变器

并网逆变器是太阳能光伏并网发电系统中的核心部件，太阳能能量通过光伏组件转化为直流电力，再通过并网逆变器将直流电能转换为与电网同频率、同相位的正弦波交流电力馈入电网。随着光伏发电等新能源产业的不断发展，逆变器作为并网发电系统中不可缺少的组成部分，正逐渐成长为一种产业。本章主要介绍用于兆瓦（MW）级光伏电站建设常用的500kW 逆变器。

第一节　光伏并网逆变器概况

一、逆变器的定义及分类

1. 逆变器定义

逆变器是通过半导体功率开关的开通和关断作用，把直流电能转换成交流电能的一种变换装置，是整流变换的逆过程。

2. 逆变器分类

逆变器按不同的特征分为以下 8 类：

1）按输出电压波形分类：方波逆变器、阶梯波逆变器、正弦波逆变器

2）按输入直流电源性质分类：电压源型逆变器、电流源型逆变器

3）按负载是否有源分类：有源逆变器、无源逆变器

4）按输出交流电相数分类：单相逆变器、三相逆变器、多相逆变器

5）按主电路拓扑分类：推挽逆变器、半桥逆变器、全桥逆变器

6）按输出交流电的频率分类：低频逆变器、工频逆变器、中频逆变器、高频逆变器

7）按功率流动方向分类{单向逆变器 / 双向逆变器

8）按直流环节特性分类{低频逆变器 / 高频逆变器

采用何种逆变器主要取决于技术上的边界条件：带有 50Hz 变压器的逆变器，拓扑简单、可靠性高、体积大、重量重，最高效率为 95%；带有高频变压器的逆变器，价格昂贵、体积小、重量轻，最高效率为 91%；无变压器的逆变器，最高效率为 95%；谐振逆变器控制复杂，最高效率为 95%。目前实际使用的一台光伏并网逆变器大多都具有输入电压波形正弦波、电流源型、有源、三相、全桥、输出工频交流电、功率单向流动、直流环节高频的特征。

二、光伏并网逆变器的安装位置及其组成

并网技术是光伏发电系统的核心技术，包括减小并网电流谐波、改善发电质量、保证光伏发电系统的整体性能及可靠性、最佳并网时机等。这些技术都与逆变器密切相关，因此逆变器是并网技术的核心。光伏并网发电系统框图如图 11-1 所示。

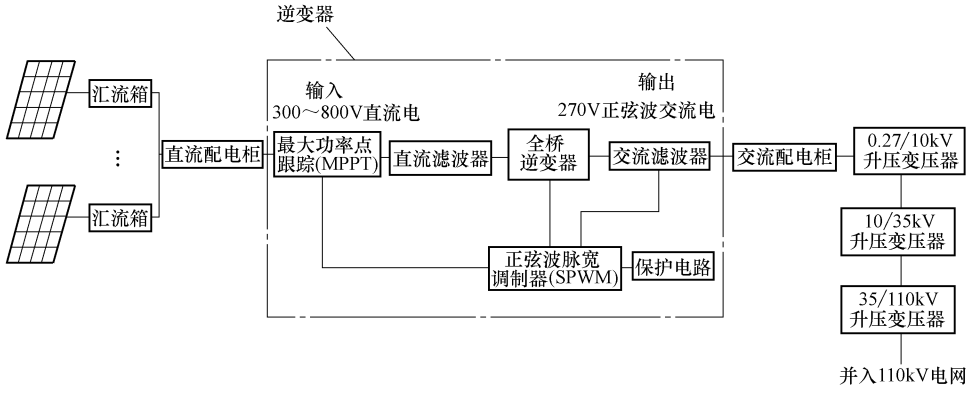


图 11-1　光伏并网发电系统框图

太阳电池产生的电流经汇流箱→直流配电柜→逆变器→交流配电柜→升压至 10kV→升压至 35kV→升压至 110kV→并入 110kV 高压电网。

逆变器由六大部分组成：最大功率点跟踪（MPPT）、直流滤波器、全桥逆变器、正弦波脉宽调制器（SPWM）、交流滤波器及保护电路。本章主要介绍用于兆瓦（MW）级光伏电站建设常用的 500kW 逆变器。介绍最大功率点跟踪（MPPT）、逆变桥及正弦波脉宽调制器（SPWM）。

第二节　最大功率点跟踪（MPPT）

一、最大功率的存在

1. 太阳电池等效电路

假设太阳电池自己产生独立电源供给负载做功，其等效电路如图 11-2 所示。

2. 太阳电池参数的数学表达

根据太阳电池等效电路以及 PN 结半导体的特性，可以用数学方程式表达太阳电池输出电流 I、太阳电池反向饱和电流 I_{sat}、太阳电池产生的电流 I_{ph} 以及太阳电池输出功率 P。

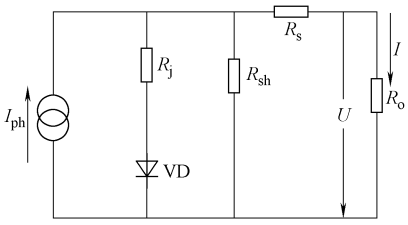


图 11-2　太阳电池等效电路

I_{ph}—电流源　R_j—PN 结的非线性阻抗　VD—PN 结二极管　R_{sh}—材料内部等效并联电阻　R_s—材料内部等效串联电阻　U—太阳电池输出电压　I—太阳电池输出电流　R_o—外接负载

（1）太阳电池输出电流 I

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{sat}\left[\exp\left(\frac{q}{kTA}\frac{U}{n_s}\right) - 1\right] \quad (11\text{-}1)$$

式中　n_p——太阳电池并联个数；

I_{ph}——太阳电池产生的电流；

I_{sat}——太阳电池反向饱和电流；

n_s——太阳电池串联个数；

q——一个电子所包含的电荷量（1.6×10^{-19}C）；

k——玻耳兹曼常数（1.38×10^{-23}J/K）；

T——太阳电池温度（热力学温度）；

A——太阳电池理想因数（$A=1\sim5$）。

（2）太阳电池反向饱和电流 I_{sat}

$$I_{sat} = I_{rr}\left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_{Gap}}{kA}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (11\text{-}2)$$

式中　I_{sat}——太阳电池反向饱和电流；

I_{rr}——太阳电池在温度 T_r 时的反向饱和电流；

T——太阳电池温度（热力学温度）；

T_r——太阳电池的参考温度；

E_{Gap}——半导体材料跨越能带间隙时所需的能量（硅的 $E_{Gap}\approx1.1$eV）。

（3）太阳电池产生的电流 I_{ph}

$$I_{ph} = [I_{sso} + K_i(T - T_r)]S_i/100 \quad (11\text{-}3)$$

式中　I_{sso}——太阳电池在参考温度和日照条件下（100mW/cm^2），所测量的短路电流值；

K_i——太阳电池短路电流温度系数；

S_i——太阳日照强度（mW/cm^2）。

（4）太阳电池输出功率 P

$$P = IU = n_p I_{ph} U - n_p I_{sat} U\left[\exp\left(\frac{q}{kTA}\frac{U}{n_s}\right) - 1\right] \quad (11\text{-}4)$$

采用表 11-1 多晶硅太阳电池组件主要电气参数（1000W/m^2，25℃时）及 Mathematica 软件，可解出式（11-1）~式（11-4），清晰地描绘出太阳电池的电压、电流及功率与日照强度和温度之间的关系。

可作出四幅图表，即在固定的日照强度下，温度从 0℃到 100℃时，太阳电池输出电流与输出电压的关系图、输出功率与输出电压的关系图；在固定大气温度下，日照为 200~1000W/m^2

表 11-1　多晶硅太阳电池组件主要电气参数（1000W/m^2，25℃时）

参　数	规　格	参　数	规　格
标称(峰值)功率 P_p/W	60	开路电压温度系数/(mV/℃)	-73
峰值电压 U_{pp}/V	17.1	短路电流温度系数 K_i/(mA/℃)	3
峰值电流 I_{pp}/A	3.5	温度对功率的影响/(W/℃)	-0.38
短路电流 I_{sso}/A	3.8	电池额定工作温度/℃	49
开路电压 U_{oc}/V	21.1		

时，太阳电池输出电流与输出电压的关系图、输出功率与输出电压的关系图。

图 11-3 所示为固定的日照强度下，温度从 0℃到 100℃时，太阳电池输出电流与输出电压的关系。图 11-4 所示为固定的日照强度下，温度从 0℃到 100℃时，太阳电池输出功率与输出电压的关系。图 11-5 所示为固定大气温度下，日照为 200～1000W/m^2 时，太阳电池输出电流与输出电压的关系。图 11-6 所示为固定大气温度下，日照为 200～1000W/m^2 时，太阳电池输出功率与输出电压的关系。

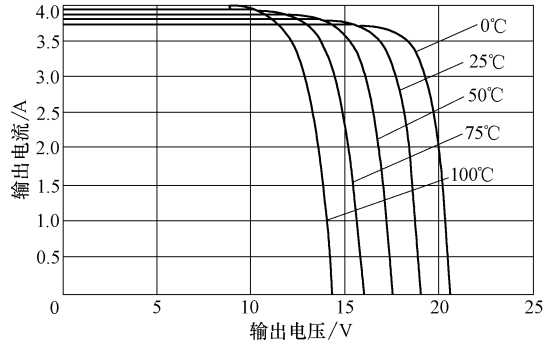


图 11-3　固定日照强度，从 0℃到 100℃时，输出电流与输出电压的关系

当温度升高时，输出电压下降，输出电流上升。

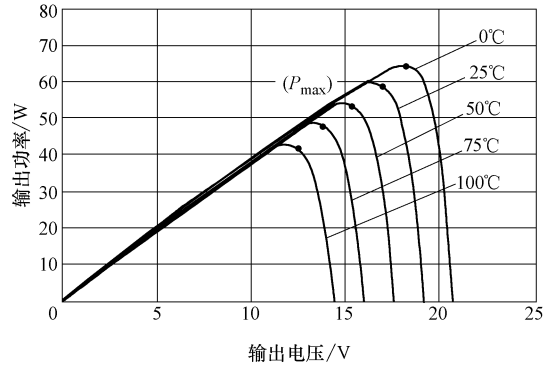


图 11-4　固定日照强度，从 0℃到 100℃时，输出功率与输出电压的关系

当温度升高时，输出电压下降，输出功率略微下降。可见工作环境温度的高低对太阳电池输出功率有直接影响。

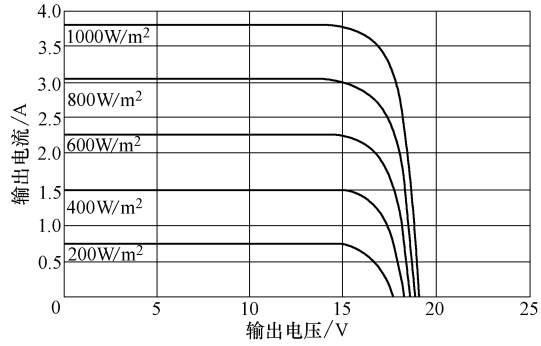


图 11-5　固定大气温度，日照为 200～1000W/m² 时，输出电流与输出电压的关系

当日照变化时，对输出电压没有太大影响，输出电流有相当大的变化。

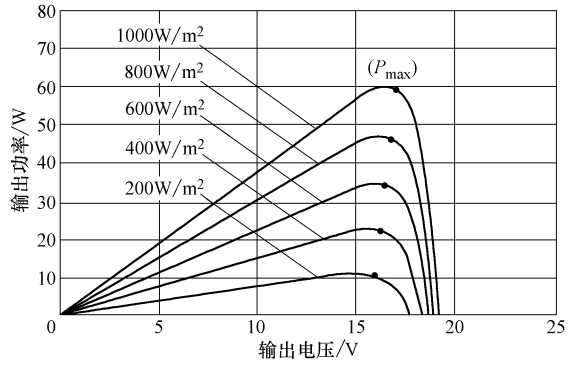


图 11-6　固定大气温度，日照为 200～1000W/m² 时，输出功率与输出电压的关系

当日照变强时，输出功率随之提高。所以日照强弱是影响太阳电池输出功率的重要因素。

工作环境温度和日照强度是影响太阳电池特性的两个重要因素，太阳电池的电压与电流是非线性的关系，电压随电流增大而下降，在不同的工作环境下，由于温度和日照强度不同，均具有各自独特的工作曲线，从图 11-6 中可看出，每一条工作曲线均有一个最大功率点（P_{max}），因此存在能获取最大功率的可能性。为了提高效益，充分利用太阳电池，就要找出一个控制方法，使太阳电池时时在最大功率时输出功率。这个控制方法就是最大功率点跟踪法。最大功率点跟踪法有电导增量法、模糊法、改进型电压法等。

二、电导增量法

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}=\frac{\mathrm{d}(UI)}{\mathrm{d}U}=\frac{I\mathrm{d}U+U\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=I+U\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}$$

由高等数学微积分可知，函数一阶导数为零，函数取得极大值。

令
$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}=I+U\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=0$$

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=-\frac{I}{U}$$

式中　dI——增量前后测量到的电流差值；

dU——增量前后测量到的电压差值。

通过测量增量值$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}$与瞬时太阳电池的电导值$\frac{I}{U}$，可以决定下一次的扰动，当增量值与电导值符合$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=-\frac{I}{U}$时，表示已达到最大功率点，就不用进行下一次扰动。此即为电导增量法的工作原理。

电导增量法理论推导严密、控制精确、响应速度较快，适用于大气条件变化较快的场合。此方法需要对光伏阵列的电压和电流进行采样，传感器的精度要求较高，系统各部分响应要求比较快。图 11-7 所示为电导增量法控制流程图。

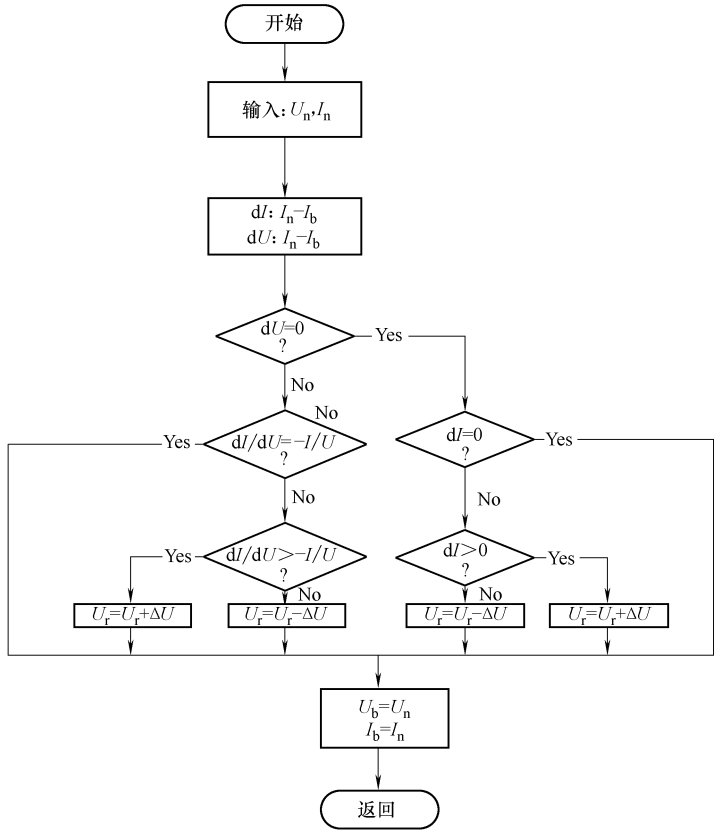


图 11-7　电导增量法控制流程图

三、模糊法

“模糊”是人类感知万物、获取知识、思维推理、决策实施的重要特征。“模糊”比“清晰”所拥有的信息容量更大，内涵更丰富，更符合客观世界。在日常生活中，人们的思维中有许多模糊的概念，如大、小、冷、热等，都没有明确的量化，只用模糊集合来描述。人们常用的经验规则都是用模糊条件语句表达，例如，当我们拧开水阀往水桶里注水时，有这样的经验：桶里没水或水较少时，应开大水阀；桶里水较多时，应将水阀关小一些；当水桶里水快满时，则应把阀门关得很小；而水桶里水满时应迅速关掉水阀。其中一些词，“较

少”、“较多”、“小一些”、“很小”等，这些表示水位和控制阀门动作的概念都具有模糊性。即有经验的操作人员的控制规则具有相当的模糊性。模糊控制就是利用计算机模拟人的思维方式，按照人的操作规则进行控制，实现人的控制经验。

模糊控制理论是由美国著名的学者加利福尼亚大学教授 Zadeh·L·A 于 1965 年首先提出的，它以模糊数学为基础，用语言规则表示方法和先进的计算机技术，由模糊推理进行决策的一种高级控制策略。1974 年，英国伦敦大学教授 Mamdani·E·H 研制成功第一个模糊控制器，充分展示了模糊技术的应用前景。

太阳电池是一种非线性直流电源。在不同的日照强度和环境温度下，太阳电池阵列的最大功率点是不同的。模糊法用于光伏电池阵列最大功率点跟踪，不需要知道太阳光伏阵列精确的数学模型，也不需要知道环境温度和日照强度，而是在运行的过程中不断改变可控参数的整定值，使得当前工作点逐渐向峰值功率点靠近，最后工作在最大功率点附近，因此，运用模糊自寻优方法可以实现最大功率点的跟踪。其步骤为：对光伏发电系统进行建模分析，将占空比步长作为控制变量，根据光伏功率变化的幅度对占空比进行自适应调整，参考占空比扰动观察法的原理，取目标函数为光伏电池的输出功率，可控量为用来控制 Boost（升压式）变换器的 PWM 信号的占空比 ρ。PWM 为定频调宽，即 $f=\frac{1}{T}$恒定，只改变导通时间 t_{on}或关断时间 t_{off}，亦称为脉冲宽度调制。其中：占空比 $\rho=\frac{t_{on}}{T}$，$T=t_{on}+t_{off}$，T 为工作周期。

根据功率值的变化量和前一刻的占空比调整步长，来决定这一刻的调整步长大小。模糊控制器的第 n 时刻的输入量为光伏系统第 n 时刻功率的变化量和第 $n-1$ 时刻的占空比步长。第 n 时刻的输出量为第 n 时刻的占空比步长。遵循以下原则：

若输出功率增加，则继续原来的步长调整方向，否则向相反方向调整步长。离最大功率点较远时，采用较大步长，加快跟踪速度；离最大功率点较近时，采用小步长减少功率损失。

根据光伏系统的特点，选择三角形作为隶属度函数的形状，并且曲线距离原点越近，曲线越陡；距离原点越远，曲线越缓。

由光伏系统占空比和输出功率之间的特性曲线分析得到以下几条原则：

1）如果输出功率增加，则继续向原来步长方向调整，否则取相反方向。

2）最大功率点附近，采用较小的步长，减少搜索损失；最大功率点较远处，采用较大步长，以加快跟踪速度。

3）温度、日照强度等因素发生变化导致光伏系统功率发生较大变化时，系统能迅速地作出反应。

四、改进型电压法（恒压法）

太阳电池组件的最大功率点随太阳辐照度的变化呈现一条垂直线，即保持在同一电压水平上，只要保证太阳电池恒压输出即可，这是电压法的工作原理。但是，在环境温度变化较大的场合，电压法很难保证太阳电池组件工作在最大功率点。因此，可对电压法进行改进，增加温度补偿，在恒压控制的同时监视太阳电池组件的结温，对于不同的结温，调整到相应的恒压控制点，即可跟踪到太阳电池组件的最大功率点。

第三节　正弦波脉宽调制（SPWM）技术

一、PWM 技术

1. 基本电路

图 11-8 所示为 PWM 变换技术的基本结构及波形。

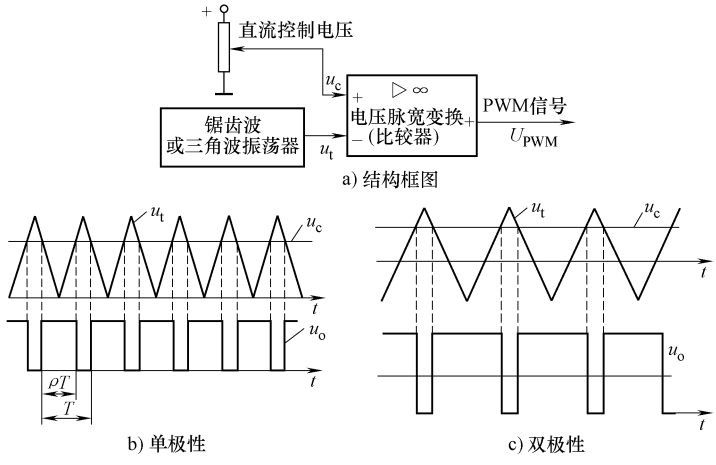


图 11-8　PWM 变换技术的基本结构及波形

图中 u_o 为输出电压，u_c 为输入直流电压，u_t 为输入的三角波载波信号。

PWM 变换有单极性和双极性两种：单极性即 0、$+u_c$ 一个方向，如图 11-8b 所示；双极性即 $-u_c$、$+u_c$ 两个方向，如图 11-8c 所示。

2. PWM 变换技术的基本原理

用幅值 u_c 直流电压与锯齿波或三角波振荡器载波信号比较，可得到用于驱动功率管基极的驱动信号 U_{PWM}，如图 11-8a 所示。输入为可调直流控制电压，输出为幅值恒定宽度可变的脉冲，实际上是一个电压比较器。调节直流电压大小，就能方便地改变脉冲宽度。

现代 PWM 变换技术在基本原理的基础上，已有完善的过电压、过电流、欠电压保护电路以及程序控制、遥控、同步运行的集成芯片。

3. PWM 变换技术的应用

PWM 变换几乎可以用于所有的逆变主电路拓扑形式，如单端式、推挽式、半桥式、全桥式、降压式、升压式、升降压式、隔离式、非隔离式、单相逆变、三相逆变、无源逆变、有源逆变、方波输出逆变、正弦输出逆变、GTO 逆变、GTR 逆变、VMOSFET 逆变、IGBT 逆变等，都可以采用 PWM 控制方式。

二、SPWM 技术

1. 几个基本概念

1）正弦脉宽调制（SPWM）。它是将每一正弦周期内的多个脉冲作自然或规则的宽度调制，使其依次调制出相当于正弦函数的相位角和面积等效于正弦波的脉冲序列，形成等幅不等宽的正弦化电流输出。

2）载波比。每周基波（正弦调制波）与所含调制输出的脉冲总数之比即为载波比。理

论上载波比越大，输出精度越高，但过大的载波比也意味着极高的开关频率，在高频率应用场合会带来很大的开关损耗，甚至没有合适的器件可供选择。所以设计 SPWM 电路时，载波比是最先要考虑的参数。

3）调制度。调制度即调制信号幅度与载波幅度之比。

4）死区时间。死区时间是 PWM 输出时，为了使 H 桥的上、下管不会因为同时导通而设置的一个保护时段，也就是上、下桥同时关断时间。由于 IGBT 等功率器件都存在一定的结电容，所以会造成器件导通、关断的延迟现象。一般在设计电路时已尽量降低该影响，比如尽量提高控制极驱动电压电流，设置结电容释放回路等。为了使 IGBT 工作可靠，避免由于关断延迟效应造成上、下桥臂直通，有必要设置死区时间，可有效地避免延迟效应产生的影响；由于上、下桥臂未完全关断，而另一桥臂又处于导通状态，避免了直通烧坏模块。死区时间大，模块工作更加可靠，但会带来输出波形的失真及降低输出效率；死区时间小，输出波形要好一些，但会降低可靠性，此时的死区时间单位一般为 μs。一般死区时间取决于元器件制作工艺，是不可以改变的。

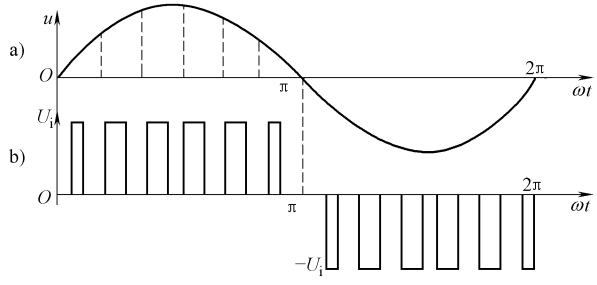


图 11-9　SPWM 工作原理波形

2. SPWM 工作原理

1）图 11-9 所示为 SPWM 工作原理波形。

如将正弦波每半周划分为 N 等份（图中 $N=6$），每一等份的正弦电压与横轴所包围的面积都用一个与此面积相等的等高矩形脉冲所代替，且使矩形脉冲的中点与相应正弦等份的中点重合，则各脉冲的宽度将是按正弦规律变化的。按照采样控制理论中冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性环节上，其效果基本相同的结论，图中所示的由 N 个等幅而不等宽的矩形脉冲所组成的波形便与正弦波等效。

2）用模拟电路产生等幅不等宽脉冲的方法，通常采用期望的正弦波（调制波 Modulation Wave）与三角波（Carrier Wave）相交的办法来确定各分段矩形脉冲的宽度。因为等腰三角形上下宽度与高度成线性关系且左右对称，当它与一个光滑的曲线相交时，即可得到一组脉冲宽度正比于该曲线函数值的矩形脉冲。图 11-10 所示为单极性调制波形。

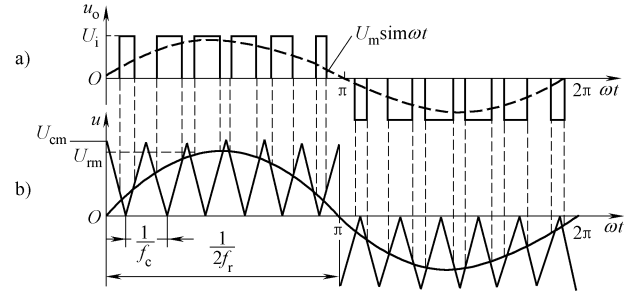


图 11-10　单极性调制波形

正弦波与三角波相交点如图 11-10b 所示，由此可得到一组等幅矩形脉冲如图 11-10a 所示，其宽度按正弦规律变化。再用这组矩形脉冲作为逆变器各功率开关器件的控制信号，则在逆变器输出端就可以获得一组矩形脉冲，图 11-11 为逆变器输出基波波形。

逆变器输出基波幅值为逆变器直流侧电压，脉冲宽度是它在周期中所处相位角的正弦函

数。该矩形脉冲可用正弦波来等效，如图 11-11 中虚线所示。逆变器输出频率与正弦调制波频率相同。

当逆变器输出端需要变频时，只需改变调制波的频率。图 11-12 为逆变器变频波形。

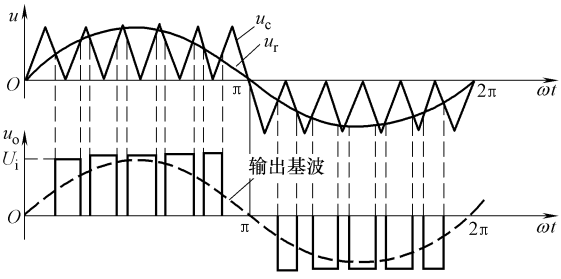


图 11-11　逆变器输出基波波形

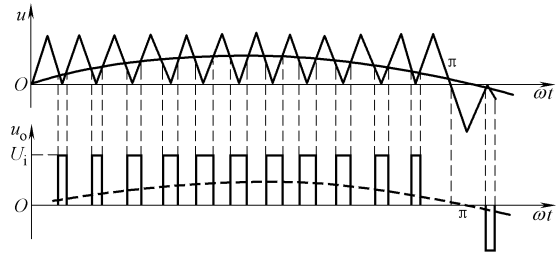


图 11-12　逆变器变频波形

三角波与正弦调制波的交点即确定了逆变器输出脉冲的宽度和相位，通常采用恒幅的三角波，而用改变调制波幅值的方法，可以得到逆变器输出波形的不同宽度，从而得到不同的逆变器输出电压。如改变图 11-11 中的调制波幅值，即得到不同的逆变器输出电压。图 11-13 为不同的逆变器输出电压波形。

3. 双极性调制

正弦波与双极性三角波的调制波形如图 11-14 所示。

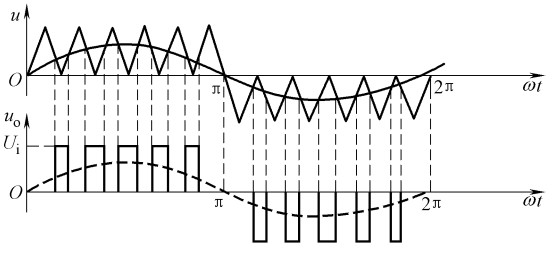


图 11-13　不同的逆变器输出电压波形

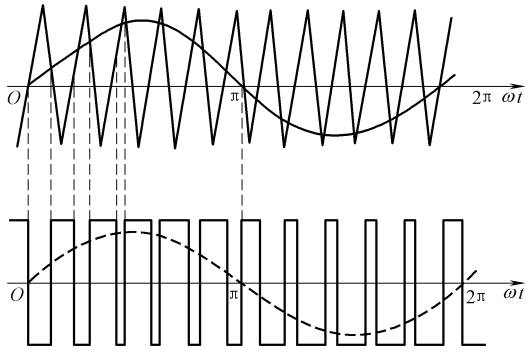


图 11-14　正弦波与双极性三角波的调制波形

这时三角波和 PWM 波形均有正负极性变化，但正半周内，正脉冲较负脉冲宽，负半周则反之，但每个半周期均有正、负两种极性的脉冲调制波。对单相桥式逆变电路采用单极性调制时，在正弦波的半个周期内每臂上、下只有一个功率开关器件导通或关断；而双极性调制时，逆变器半周期内两对角及同一臂上、下两个功率开关器件交替通断，处于互补的工作方式。

三、SPWM 逆变器

1. SPWM 逆变器的类型

SPWM 逆变器一般都用电压型。图 11-15 为 SPWM 逆变器主电路图。

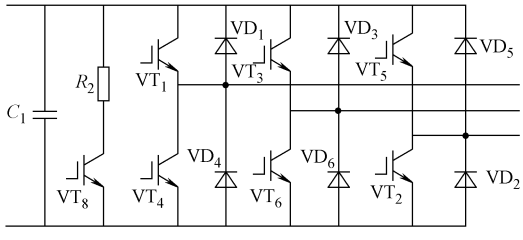


图 11-15　SPWM 逆变器主电路图

图 11-16 为 SPWM 逆变器有关波形。

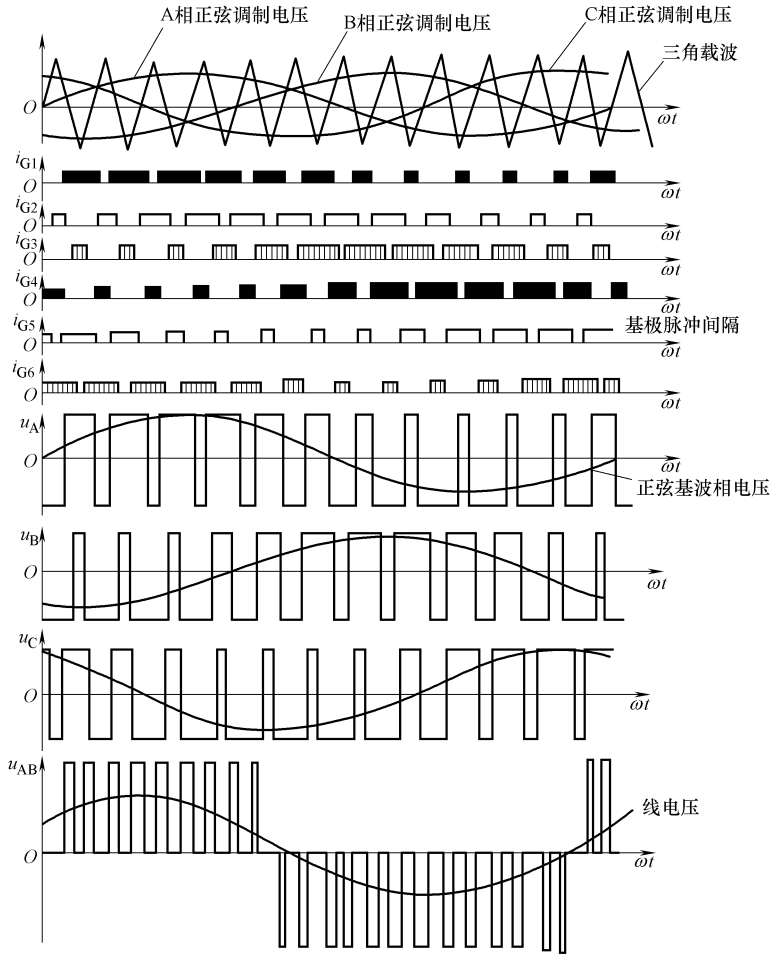


图 11-16　SPWM 逆变器有关波形

在三相 SPWM 逆变电路中，通常共用一个三角载波信号，用三个相位互差 120°的正弦波作调制信号，以获得三相对称输出；i_{G1}与 i_{G4}、i_{G3}与 i_{G6}、i_{G2}与 i_{G5}互补（相位差 180°），i_{G1}、i_{G3}、i_{G5}之间及 i_{G4}、i_{G6}、i_{G2}之间分别相差 120°；u_A、u_B、u_C为正弦基波相电压；u_{AB}为线电压，$u_{AB}=u_A-u_B$。基波电压的大小和频率也是通过改变正弦调制信号的幅值和频率来改变的。

2. SPWM 逆变器的优点

1）既可分别调频、调压，也可同时调频、调压，都由逆变器统一完成，仅有一个可控功率级，从而简化了主电路和控制电路的结构，使装置的体积小、重量轻、造价低、可靠性高。

2）输出频率和电压都在逆变器内控制和调节，其响应速度取决于电子控制电路，而与直流电路的滤波参数无关，所以调节速度快，且可使调节过程中频率和电压相配合，以获得好的动态性能。

3）输出电压或电流波形接近正弦，从而减少谐波分量。

SPWM 实际上就是用一组经过调制的幅值相等、宽度不等的脉冲信号代替调制信号，用开关量代替模拟量。调制后的信号中除含有频率很高的载波频率及载波倍频附近的频率分量外，几乎不含其他谐波，特别是接近基波的低次谐波。因此，载波频率越高，谐波含量越少。这从 SPWM 原理也可直观看出，当载波频率越高时，半周期内开关次数越多，把期望的正弦波分段也越多，SPWM 的基波就越接近期望的正弦波。但是 SPWM 的载波频率除受功率器件的允许开关频率制约外，开关频率不宜过高，这是因为开关器件工作频率提高，开关损耗和换流损耗会随之增加。另外，开关瞬间电压或电流的急剧变化形成很大的 $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$ 或 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$，会产生强的电磁干扰；高 $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$ 或 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 还会在线路和器件的分布电容和电感上引起冲击电流和尖峰电压；这些也会因频率提高而变得严重。

四、SPWM 技术的实现

1. SPWM 波形的软件生成

SPWM 波形可以由模拟和数字电路用调制的方法生成，随着微机控制技术的发展，用软件生成 SPWM 波形已经成为可能，因此，目前 SPWM 波形的生成和控制多用微机实现。

按照 SPWM 的基本原理，对正弦波与三角波的交点进行脉冲宽度与间隙时间采样，从而生成 SPWM 波形，这种方法叫做自然采样法。但是，用该法推导出来的公式是一个超越方程，难以求解，计算工作量过大，为此，工程实用的方法是规则采样法。规则采样法既力求采样效果尽量接近自然采样法，又不必花费过多的计算机运算时间。规则采样法是用三角波的峰值与正弦波的交点，作一水平线，该水平线与三角波的截点作为脉冲宽度与间隙时间采样点，所得脉冲宽度与自然采样法很接近，而计算工作量可减轻。图 11-17 为产生 SPWM 波形的规则采样法。

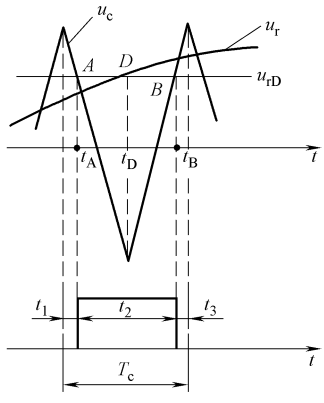


图 11-17　产生 SPWM 波形的规则采样法

仍以三角形作为载波。在三角形负峰值这一固定时刻找到正弦调制波的对应点（如 D 点），以此点电压 u_{rD} 作采样电压。在三角载波上由 u_{rD} 水平线（自然法是 u_{rD} 弧线）截得 A、B 两点，从而确定了脉冲时间 t_2（从图 11-17 中可以看出，所得脉冲宽度与自然采样法非常接近），并在 t_A、t_B 时刻控制开关器件的通断。由三角形相似可得

$$\frac{2}{T_c/2}=\frac{1+M\sin\omega_1 t_D}{t_2/2}$$

$$t_2=\frac{T_c}{2}(1+M\sin\omega_1 t_D)$$

$$t_1=t_3=\frac{1}{2}(T_c-t_2)$$

此公式较简洁，计算工作量可减轻。

规则采样法还有多种取法（如取三角载波正峰值与正弦波对应点进行采样），另外锯齿波等也可作为载波，选取标准都是在输出波形产生的谐波多少与实现的难易程度之间权衡。

在用软件生成 SPWM 时，通常用两种方法：

（1）查表法　根据不同的调制度 M 和正弦调制信号的角频率 ω_r，先离线计算出各开关

器件的通、断时刻，把计算结果存于 EPROM 中，运行时根据需要查表读出各相脉宽时间和间隙时间，进行实时控制。查表法适用于计算量较大、在线计算困难的场合。

（2）实时计算法　事先在内存中存入正弦函数表和不同载波频率时的 $T_c/2$，运行时按采样原理和计算公式进行在线计算，求得所需数据，适用于计算量不大的场合。

实际所用的方法往往是上述两种方法的结合，即先离线进行必要的计算存入内存，运行时再进行较为简单的在线计算。

2. 集成电路芯片

现已有专门产生 SPWM 波形的大规模集成电路芯片，采用专用芯片可简化控制电路和软件设计，降低成本，提高可靠性。现在市场上有全数字化三相 SPWM 芯片 HEF4752、SLE4520、MA818 和 8XC196MC。

（1）HEF4752 芯片　此芯片可提供三组互差 120°的互补输出 SPWM 控制脉冲，以供驱动逆变器六个功率开关器件产生对称的三相输出，适用于功率晶体管。它依据 SPWM 形成原理，采用不对称规则采样，对一个等宽矩形脉冲从两侧边缘各用一个可变的角度调制成 SPWM 波，即采用的是脉冲宽度双边缘正弦调制方式。该芯片有 8 段载波比（15、21、30、42、60、84、120、168）自动切换，调制频率范围为 0 ~ 200Hz，开关频率一般不超过 2kHz。

（2）SLE4520 芯片　此芯片实际是三个定时器或计数器，由三个预置减计数器通过 8 位数据总线接受来自微机的地址和脉宽数据，将 8 位数据转化为相应宽度的矩形脉冲（脉冲宽度由减计数器内的数值决定），为单边缘调制。六个输出产生三相 PWM 矩形脉冲，互差 120°，以控制逆变器的六个开关器件，其开关频率和输出频率分别可达 23.4kHz 和 2.6kHz。芯片内有一个四位死区锁存器，可设置逆变桥同相上、下两开关器件转换的死区时间，以防直通事故。还有一“禁止：信号”端，当其为高电平时，将使功率开关器件处于关断状态，可以方便地实现各种保护。

（3）MA818 芯片　此芯片采用规则采样法，属双边缘调制。其三角载波频率可供选择，最高可达 24kHz，调制频率可达 4kHz。

五、其他 PWM 技术

1. 指定谐波消除法（SHEPWM）

不用载波与调制波相比较，而是事先进行谐波分析，计算出能够消除某些谐波的一组调制脉冲相位角，据此确定逆变器功率开关器件的通、断时刻，求得各分段矩形脉冲的宽度。如果在输出信号的半周期内开关器件开通和关断各 k 次，则共有 k 个自由度可以控制，除用一个自由度来控制基波幅值外，可以消除 k-1 个谐波。

2. 跟踪 PWM（SHBPWM）

不用载波对正弦波进行调制，而是把希望输出的电流或电压作给定信号，与实际电流或信号进行比较，由此来决定逆变电路功率开关器件的通、断，使实际输出跟踪给定信号。SHBPWM 电流跟踪应用较多，称为电流滞环跟踪 PWM。电流跟踪有许多类型，主要有电流滞环控制型和固定开关频率型。电流滞环控制是由一个电压型 PWM 逆变器加一个电流闭环构成的继电控制系统，它可以提供一个瞬时值电流可控的交流电源。图 11-18 为电流滞环控制。

正弦给定电流 i_r 与实际电流检测信号 i_a 相比较，其偏差 i_e 经过具有滞环特性的比较器，

一路直接，一路倒相，产生互补信号，去控制逆变电路上、下两功率开关 S_1、S_2。当 $i_r > i_a$，且偏差达到 ΔI 时，S_1 导通，S_2 关断，电流增加；反之，S_1 关断，S_2 导通，电流减小。如此上、下两管反复导通、关断，使实际电流以锯齿状不断跟踪给定电流变化，并将偏差限制在允许范围内。与此同时，逆变器输出的电压成 PWM 波，电流、电压波形如图 11-18b 所示。

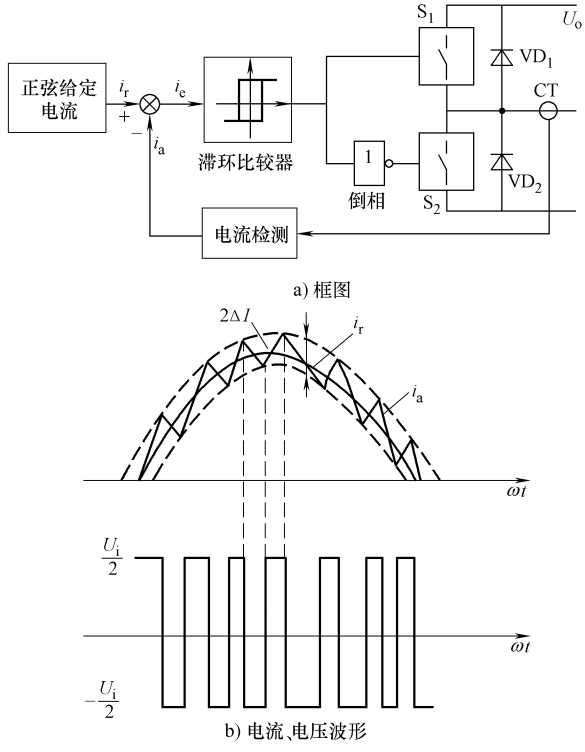


图 11-18　电流滞环控制

图 11-18a 中的 CT 为电流检测元件，它必须有很宽的通频带，例如用高灵敏度的霍尔电流传感器。不难看出，滞环的宽度 $2\Delta I$ 对跟踪性能有很大影响，环过宽，开关频率和开关损耗可降低，但跟踪误差增大；环过窄，跟踪误差减小，但开关频率和开关损耗增加，这会受开关器件允许工作频率的限制，而且对给定的滞环宽度，开关频率也不是一个常数。另外，滞环电流控制不能使输出电流幅值达到很低，因为当给定电流太低，处于滞环之内时，将失去调制作用。

SPWM 控制主要着眼于使逆变器的输出电压尽量接近正弦波，以减少谐波，并未涉及输出电流波形，而电流滞环控制型则直接控制输出电流，使之在正弦波附近变化，这样比只要求正弦电压接近正弦波前进了一步。

SPWM 控制是逆变器的关键技术之一，是不断深入研究的重要课题。现在一种智能的、主要由 SPWM 芯片组成的微小型逆变器已可以直接安装在光伏组件背面，即可将光伏组件发出的直流电直接变成标准的正弦波交流电而与电网相连，用于光伏建筑一体化，减少光伏组件互连组装损失。

第四节　逆　变　桥

一、基本概念

1. 晶闸管（Thyristor）

晶闸管俗称可控硅。它是一种大功率开关型半导体器件，在电路中用文字符号“V”、“VT”表示（旧标准中用字母“SCR”表示，Silicon Controlled Rectifier，即 SCD 可控硅）。图 11-19 为晶闸管外形。

1957 年美国通用电气公司开发出世界上第一个晶闸管产品，并于 1958 年使其商业化；自 1957 年美国贝尔电话实验室将第一只晶闸管用于工业领域以来，由于它的优异性能，很

快受到各国重视。随着新材料的出现和新工艺的采用，单只晶闸管的电流容量从几安发展到几千安，耐压等级从几百伏提高到几千伏，工作频率大大提高，器件的动态参数也有很大改进。20 世纪 80 年代普通晶闸管的通流能力和耐压等级达到 3500A/6500V，门极关断（GTO）晶闸管达 3000A/4500V。晶闸管具有硅整流器件的特性，能在高电压、大电流条件下工作，且其工作过程可以控制，被广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等电子电路中，随着应用领域的拓展，晶闸管正沿着高电压、大电流、快速、模块化、功率集成化、廉价的方向发展。

（1）晶闸管的结构　图 11-20 为晶闸管结构及电路符号。晶闸管是 P-N-P-N 四层半导体结构，形成三个 PN 结，即 J_1、J_2、J_3，有三个引出端，其中两个是功率引出端，即阳极 A（anode）和阴极 K（cathode），另一个是控制引出端，即门极 G（gate）。图 11-20b 是 P 型门极、阴极侧受控晶闸管符号，图 11-20c 是 N 型门极、阳极侧受控晶闸管符号，图 11-20d 是没有必要规定门极类型时的晶闸管符号。



图 11-19　晶闸管

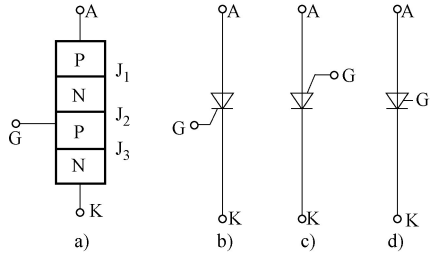
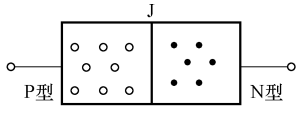


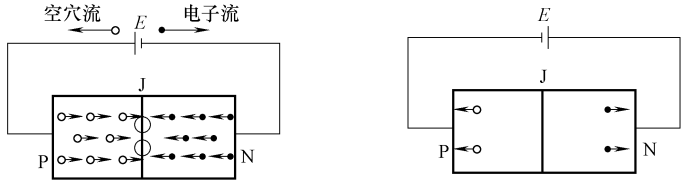
图 11-20　晶闸管结构及电路符号

（2）晶闸管的工作原理　晶闸管工作在两个状态：通态或断态。

1）PN 结。P 型半导体材料的多数载流子是空穴，N 型半导体材料的多数载流子是电子，它们的结合面形成 PN 结。图 11-21 为 PN 结。



a) PN结结构



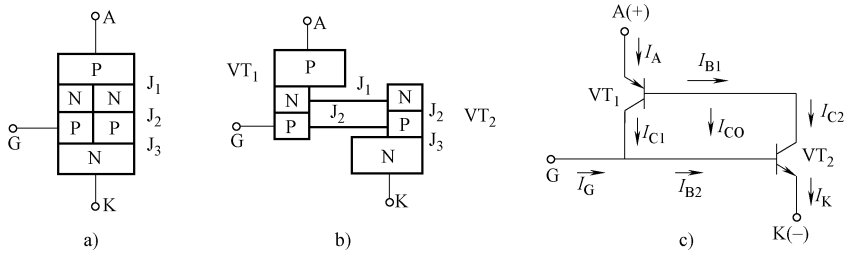
b) 正向偏置　　c) 反向偏置

图 11-21　PN 结

当外加一个电源 E，正端接 P，负端接 N 时，在外电压作用下，空穴和电子流向结 J，在结 J 处，空穴和电子相结合而中和，失去的空穴和电子由电源 E 补充，这样不断结合和补充，形成电流，此时，PN 呈低阻导通状态，即 PN 正向偏置导通。

当外电源 E，正端接 N，负端接 P 时，在外电压作用下，空穴和电子均背离结 J，在结 J 处，它们不可能结合，空穴和电子耗尽，PN 呈高阻阻断状态，即 PN 反向偏置阻断，只有很小的漏电流。

2）晶闸管的工作状态。若将晶闸管中间部分分成两部分如图 11-22a 所示，并用导体连接起来，如图 11-22b 所示，可看做两只复合晶体管，即 PNP 型晶体管 VT_1 和 NPN 型晶体管 VT_2，如图 11-22c 所示。晶闸管在工作过程中，它的阳极 A 和阴极 K 与电源和负载连接，组成晶闸管的主电路，晶闸管的门极 G 和阴极 K 与控制晶闸管的装置连接，组成晶闸管的控制电路。



a)　　b)　　c)

图 11-22　晶闸管等效电路

在正向偏置下，由图 11-22c 可得电流方程为

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{CO} \tag{11-5}$$

$$I_K = I_A + I_G \tag{11-6}$$

式中　α_1——VT_1 的共基极电流放大系数（$\alpha_1 = I_{C1}/I_A$）；

α_2——VT_2 的共基极电流放大系数（$\alpha_2 = I_{C2}/I_K$）；

I_G——门极电流；

I_{CO}——VT_1、VT_2 的漏电流；

I_{C1}——VT_1 集电极电流；

I_A——VT_1 发射极电流；

I_{C2}——VT_2 集电极电流；

I_K——VT_2 发射极电流。

将式（11-6）代入式（11-5），得

$$I_A = \frac{I_{CO} + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \tag{11-7}$$

α_1、α_2 由晶闸管制造工艺所决定，并随 I_A、I_K 变化，其关系曲线如图 11-23 所示。

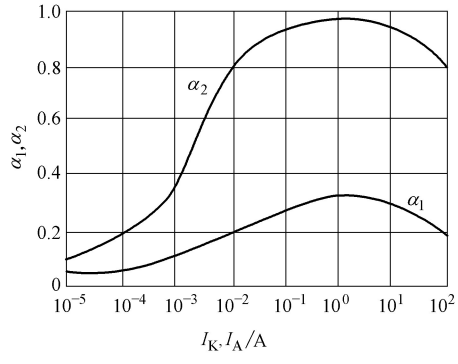


图 11-23　α_1、α_2 随发射极电流的变化曲线

当门极电流 I_G 为零时，则

$$I_A = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

由于 I_{CO} 很小，$(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$，则 $I_A \approx I_{CO}$，电路处于阻断状态。

当存在门极电流 I_G 时，I_K 增加，从而使 I_{C2} 增加，相继使 I_A、I_{C1} 增加，而 I_{C1} 增加又使 I_{B2} 和 I_K

增加，这是一个强烈的正反馈过程。在电流增加的同时，α_1、α_2也随之增加，当（$\alpha_1+\alpha_2$）≈1 时，两晶体管处于饱和导通，即晶闸管由阻断转为导通。晶闸管导通后，由于两晶体管间的正反馈作用，仍然保持导通，且处于深度饱和状态（$\alpha_1+\alpha_2\approx1.15$），而与门极电流 I_G是否继续提供无关，即门极信号只需控制晶闸管的正向导通时刻，而一旦导通，门极信号即使失去了，晶闸管仍然保持导通。

当晶闸管加反向偏置电压时，由于晶体管 VT_1、VT_2 在反偏时放大系数很小，即使存在门极电流 I_G也不能使其导通。

由于两个等效晶体管的电流放大系数较小，可使用较厚的基片，因此可获得比普通晶体管高得多的耐压（最高可达 10kV）；由于晶闸管对门极电流有正反馈作用，因此它可获得极高的电流增益（10^4）和功率增益（10^6）。

（3）晶闸管的工作特性　晶闸管是能从断态转入通态，或由通态转入断态的双稳态电力电子器件。晶闸管的工作特性如下：

1）晶闸管承受反向偏置电压时，不管门极承受何种电压，晶闸管都处于关断状态。

2）晶闸管承受正向偏置电压时，仅在门极承受正向电压的情况下晶闸管才导通。

3）晶闸管在导通情况下，只要有一定的正向阳极电压，不论门极电压如何，晶闸管保持导通，即晶闸管导通后，门极失去作用。

4）晶闸管在导通情况下，当主电路电压（或电流）减小到接近于零时，晶闸管关断。

（4）晶闸管的分类

1）按关断、导通及控制方式分类。晶闸管按其关断、导通及控制方式可分为普通晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、门极关断（GTO）晶闸管、BTG 晶闸管、温控晶闸管和光控晶闸管等多种。

2）按引脚和极性分类。晶闸管按其引脚和极性可分为二极晶闸管、三极晶闸管和四极晶闸管。

3）按封装形式分类。晶闸管按其封装形式可分为金属封装晶闸管、塑封晶闸管和陶瓷封装晶闸管三种类型。其中，金属封装晶闸管又分为螺栓形、平板形、圆壳形等多种；塑封晶闸管又分为带散热片型和不带散热片型两种。

4）按电流容量分类。晶闸管按电流容量可分为大功率晶闸管、中功率晶闸管和小功率晶闸管三种。通常，大功率晶闸管多采用金属壳封装，而中、小功率晶闸管则多采用塑封或陶瓷封装。

5）按关断速度分类。晶闸管按其关断速度可分为普通晶闸管和高频（快速）晶闸管。

2. 全控型器件

控制极不仅可以控制导通，而且可以控制关断。普通晶闸管只可控制导通，不可控制关断。GTO、MOSFET、IGBT 是全控型器件，亦称自关断器件。

3. 单极型晶体管

导通时只有一种极性的载流子参与导电。MOSFET 导通时仅电子参与导电，所以是单极型晶体管。

4. 双极型晶体管

导通时电子、空穴两种载流子同时参与导电，称为双极型。IGBT 是双极型晶体管。

5. MOSFET

金属-氧化物-半导体场效应晶体管（Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor）简称 MOS，是一种电压全控型单极晶体管，通过栅极电压来控制漏极电流，又称为绝缘栅场效应晶体管。特点是驱动电路简单、驱动功率小，仅由多数载流子导电，无少子存储效应，高频特性好，工作频率达 100kHz 以上，为所有功率电子元器件之最，因而最适合应用于开关电源、高频感应加热等高频场合；没有二次击穿问题，安全工作区广，耐破坏力强。缺点是电流容量小、耐压低、通态压降大，不适宜运用于大功率装置，目前的制造水平是 1kV/6A/2MHz、60V/200A/2MHz。在 200kHz 以上的高频应用领域是 MOSFET 器件巨大的市场所在。低电压 MOSFET 的低导通电阻、极高的开关速度，以及其良好的并联自均流特性（双极型器件难以达到），使其成为大功率 IGBT 不可缺少的组成部分。

6. GTO

门极关断晶闸管（gate turn-off thyristor），简称 GTO，是在普通晶闸管的基础上发展起来的全控型电力半导体器件。图 11-24 为 GTO 结构与符号。

GTO 可看做由多个小的晶闸管并联而成，这些小晶闸管共有阳极 A，门极 G 和阴极 K 则形成多个独立的 PN 单元。每个门极 G 和阴极 K 单独引线，成为单胞 GTO（例如，一个 700A 的 GTO 有 300 多个单胞 GTO，一个 2500A 的 GTO 有 1200 多个单胞 GTO）。一个单胞 GTO 阴极 K 与门极 G 的面积差不多，阴极 K 是被门极 G 包围的条状小岛，条状阴极 K 的宽度越窄，通态电流越容易被关断。集成一个 GTO 器件的所有单胞 GTO 的开关特性应该一致，否则对于先开通和后关断的单胞 GTO，将由于电流集中通过，而将它们烧毁。

GTO 的关断过程可用双晶体管模型来分析。图 11-25 为 GTO 双晶体管模型。

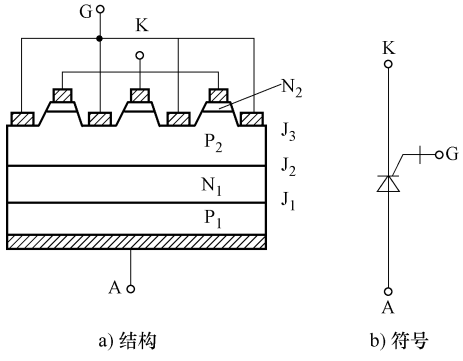


图 11-24　GTO 结构与符号

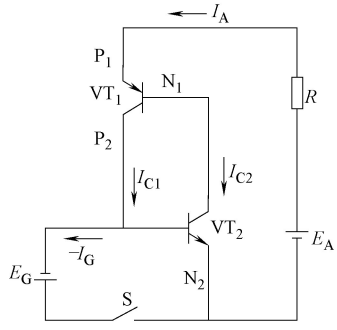


图 11-25　GTO 双晶体管模型

如果在门极 G 相对阴极 K 加负电压时，晶体管 $P_1N_1P_2$ 集电极电流 I_{C1}（也是晶体管 $N_1P_2N_2$ 基极电流）的一部分被抽出，形成了门极负电流 I_G。由于 I_{C1} 被抽走，$P_1N_1P_2$ 晶体管基极电流减小，因而它的集电极电流 I_{C2}（也是晶体管 $P_1N_1P_2$ 基极电流）也减小，于是引起 I_{C1} 的进一步下降。因为 GTO 导通时 α_1（VT_1 共基极电流放大系数，$\alpha_1 = I_{C1}/I_A$）远小于 1，所以 $P_1N_1P_2$ 晶体管电流 I_{C1} 只是发射极电流（也即 GTO 阳极电流 I_A）的很小一部分，抽走了这部分电流就可以使两个晶体管截止，即 GTO 关断。图 11-26 为 GTO 关断时的电压、电流和功耗波形。

当 i_G 达到最大值 $-I_{GM}$ 时，阳极电流开始下降，于是 α_1 和 α_2（VT_2 共基极电流放大系数，$\alpha_2 = I_{C2}/I_K$）也不断减小，当 $\alpha_1 + \alpha_2 \leqslant 1$ 时，器件内部正反馈作用停止（此点为临界关断点）。GTO 的关断条件是 $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$。图中 t_s 为存储时间，这时 GTO 仍在导通状态，t_f 为 i_A 下降时间，t_{Rt} 为尾部拖流时间，u_A 和 $-u_G$ 分别为阳极和门极点上承受的电压，P_{Aoff} 和 P_{Goff} 分别为阳极和门极关断损耗。GTO 和晶闸管导通条件虽然一样，都是 $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$，但由于 GTO 要兼顾到关断的性能，而晶闸管不必顾及这一点，所以它们导通的饱和程度是不一样的，晶闸管的 $\alpha_1 + \alpha_2$ 值比较大，是深度的饱和导通，为 1.5 左右，而 GTO 的导通则处于临界饱和状态，$\alpha_1 + \alpha_2$ 稍大于 1，而且要更严格地控制 α_1 和 α_2 的分配。（α_2 较大、α_1 较小，GTO 控制灵活，关断容易）。

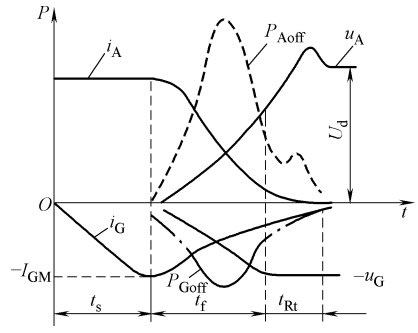
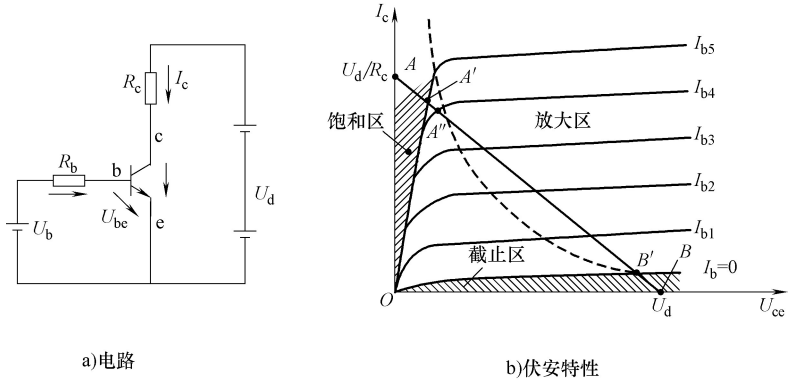


图 11-26　GTO 关断时的电压、电流和功耗波形

7. GTR

电力晶体管（Giant Transistor，GTR），又称为双结型晶体管。它是一种具有发射极、基极和集电极区的三层三极器件，要求耐压高、通态电流大、开关性能好。

（1）特性　晶体管通常连接成共发射极电路，NPN 型晶体管的共射连接和伏安特性如图 11-27 所示，图 11-27a 为 NPN 型晶体管共射连接，图 11-27b 为伏安特性。



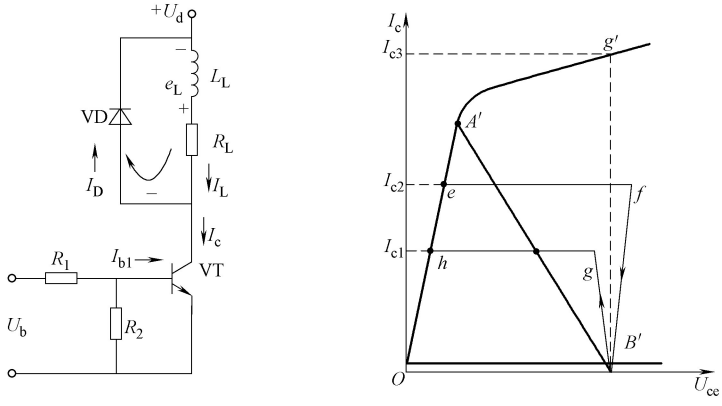
a)电路　　b)伏安特性

图 11-27　NPN 型晶体管的共射连接及伏安特性

特性的截止区、饱和区和放大区相应于晶体管工作在断态、通态和线性放大状态。乘积 $I_c U_{ce}$ 代表晶体管的损耗。断态时只有很小的漏电流，通态时管压降很小，这两种状态的损耗均很小，而放大区的损耗则很大，图中虚线表示最大允许的功率损耗线。所以，在电力电子装置中用 GTR 作功率开关器件时，只允许它工作在关、开（截止、饱和）状态，而不允许运行在放大区。晶体管必须用基极连接的电流驱动信号才能维持在通态，当移去这个信号时，GTR 便自动关断。

（2）缓冲电路　当 GTR 带电感电阻负载时，不论 I_c 是连续还是断续，其工作点都可能超出安全区。为了保证 GTR 安全工作，必须消除负载电感中自感电动势击穿 GTR 的可能

性，常用的方法之一是在负载两端并联一个二极管 VD，图 11-28a 为 GTR 电感电阻负载电路。



a) 有钳位二极管的电路　　b) 动态负载线

图 11-28　GTR 电感电阻负载电路及 GTR 动态负载线

当 GTR 关断时，自感电动势 e_L 使 VD 正向导通，给负载电流提供一个续流回路（因此称 VD 为续流二极管），同时将 GTR 的集电极钳位于 U_d，从而可避免被击破，此时开关过程工作点移动轨迹即为 GTR 动态负载线，如图 11-29b 所示。在导通期间，I_{b1} 使 GTR 处于饱和导通，I_c 和 I_L 按指数规律从 I_{c1} 增加到 I_{c2}，工作点沿饱和线从 h 移到 e 点，这时 L_L 中的自感电动势 e_L 阻止 I_L（$=I_c$）增长。当施加反向驱动电流时，I_c 开始突然减小，e_L 反向，见图 11-28a；当 e_L 大于 R_L 上压降和 VD 正向压降时，VD 导通，$U_{ce}=U_d$ 工作点基本上瞬时地由 e 点过渡到 f 点；接着 I_c 下降，工作点由 f 向 B' 下降，VD 中的电流按 $I_D=I_L-I_c$ 的关系增大；至 B' 点时，负载电流 I_L 全部转移至二极管回路。在截止时间内，工作点位于 B' 点，I_c 几乎为零，I_L 经 VD 由 I_{c2} 减小到 I_{c1}。当再次加 I_{b1} 时，因 VD 处于正向导通状态，U_{ce} 仍为 U_d，在 I_{b1} 驱动下，I_c 增长，I_D 减小，I_L 基本不变，工作点由 B' 提高到 g 点。在 g 点，$I_c=I_{c1}=I_L$，$I_D=0$，VD 阻断。在图 11-28b 中，当 VD 续流尚未结束，而 VT 又导通时，VD 便承受反压，由于 VD 阻断时有反向恢复电流，这一附加电流有可能使 GTR 集电极电流短时间冲到 I_{c3}，见图 11-28b 中 g' 点；恢复电流终止后，工作点再回到 g 点，随即跳到 h 点进入饱和状态。

加了续流二极管，虽然能在关断过程中把 U_{ce} 限制在电源 U_d 值，但由于在关断瞬间 I_c 不变，工作点仍有冲出安全工作区的危险。为了保证 GTR 的安全工作，还需设置缓冲电路。GTR 的缓冲电路除和晶闸管、GTO 缓冲电路一样能降低附加于器件的浪涌电压、$\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$ 和 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$，减少器件的开关损耗外，还可以改变开通和关断轨迹即动态负载线，以避免 GTR 的二次击穿。GTR 基本缓冲电路如图 11-29 所示。

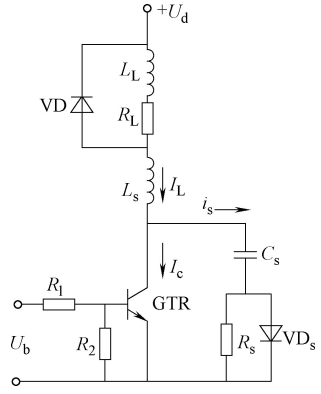


图 11-29　GTR 基本缓冲电路

其中 L_s 是串联缓冲电感，用以限制 GTR 开通时的电流上升率，起到改善开通负载动态轨迹的作用；C_s、R_s 和 VD_s 构

成 RCD 型并联缓冲器，主要在 GTR 关断时限制 U_d 在安全工作区内。

（3）开关特性

1）开关过程。GTR 的电流是由电子、空穴两种载流子同时参与导电形成的，对 NPN 管，N 发射区中电子是多数载流子，发射极作为载流子源，由于浓度差异，电子由发射区扩散到基区，且它们中的大多数在很薄的基区继续扩散到达集电结，此时在外加电压 U_d 作用下产生漂移运动，这样由发射区注入的电子进入集电区便形成集电极电流 I_c，而另一些电子在基区与空穴复合并由正偏基区不断补充空穴形成基流 I_b（由于基区的空穴浓度比发射区电子浓度小得多，空穴电流很小，因此可以忽略）。GTR 的开关过程实际上就是电荷的建立和消失的过程，该过程均需要一定的时间，包括延迟时间、上升时间、存储时间、下降时间。

2）开关损耗。GTR 功率损耗包括饱和导通与截止的稳态损耗、开关过程与关断的动态损耗。饱和导通时，管压降只有 0.7V；截止时，漏电流只有几毫安，损耗很小，因此动态损耗是开关工作状态的主要损耗。开关过程包括开通过程和关断过程，动态损耗包括开通过程损耗和关断过程损耗。开通过程损耗主要集中在集电极电流的上升过程；关断过程损耗主要在集电极电流下降时间段。开关损耗也因负载而异，感性负载的动态损耗是纯负载动态损耗的三倍。

（4）驱动电路　优良的驱动电路能减小开关损耗和提高 GTR 的工作可靠性。GTR 所需的正向和反向基流由驱动电路提供，GTR 的开关特性与驱动电路的性能密切相关。GTR 驱动电路形式繁多，本书不作介绍。

8. 功率因数

（1）定义　有功功率与视在功率之比即为功率因数。

在交流电路中，电压与电流之间的相位差（Φ）的余弦叫做功率因数，用符号 $\cos\Phi$ 表示。在数值上，功率因数是有功功率 P 和视在功率 S 的比值，即 $\cos\Phi = P/S$。

在直流电路里，电压乘以电流就是有功功率。但在交流电路里，电压乘以电流是视在功率，而能起到做功的一部分功率（有功功率）将小于视在功率。功率因数简单的测量方式就是测量电压与电流之间的相位差，得出的结果就是功率因数。功率因数越高，有用功与总功率间的比率便越高，系统运行则更有效率。

（2）功率因数的大小原因　功率因数的大小与电路的负荷性质有关，如白炽灯泡、电阻炉等电阻负荷的功率因数为 1，一般具有电感性负载的电路功率因数都小于 1。功率因数是电力系统的一个重要的技术数据，是衡量电气设备效率高低的一个系数。功率因数低，说明电路用于交变磁场转换的无功功率大，从而降低了设备的利用率，增加了线路供电损失。例如：设备额定功率为 100W，也就是说，要有 100W 的功率输送到设备中，然而，因大部分电气系统存在固有的无功损耗，只能使用 70W 的功率，其他 30W 给无功损耗了，虽然设备仅仅使用 70W，却要付 100W 的费用。在这个例子中，这台设备的功率因数是 0.7。这种无功损耗主要存在于电机设备中（如鼓风机、抽水机、压缩机等），这类设备又叫感性负载。在感性负载电路中，电流的相位落后电压的相位，电流波形峰值在电压波形峰值之后发生。两种波形峰值的分隔可用功率因数表示。功率因数越低，两个波形峰值则分隔越大。功率因数补偿就是使相位差减小直至为零，$\cos0° = 1$。

大部分的无效功都呈电感性，也就是一般所谓的电动机、变压器、荧光灯、电弧炉等。

电容性的非常少见，例如变频器就是容性的，在变频器电源端加入电抗器可提高功率因数。电感性的设备在运行过程中向电力系统吸收有功功率，同时还吸收无功功率，在电网中安装并联电容器无功补偿设备后，可以提供补偿感性负荷所消耗的无功功率，减少了电网电源侧向感性负荷提供的无功功率。由于减少了无功功率在电网中的流动，因此可以降低输配电线路中变压器及母线因输送无功功率造成的电能损耗，这就是无功补偿的效益。无功补偿的主要目的就是提升补偿系统的功率因数。供电局发出来的电是视在功率（以 kVA 或者 MVA 为单位），三者之间是一个三角函数的关系，即

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

如果无功功率 Q 的值为零的话，视在功率 S 就会与有功功率 P 相等，那么供电局发出来的 1kVA 的电就等于用户 1kW 的消耗，此时成本效益最高，所以功率因数是供电局很重视的一个指标。用户如果没有达到理想的功率因数，相对地就是在消耗供电局的资源，所以供电局为了提高供电的效益，对用电单位的功率因数有一定的要求，功率因数必须介于 0.9 ~ 1 之间，低于 0.9 时需要接受处罚。

（3）提高功率因数对用户端的好处

1）通过改善功率因数，减少了线路中总电流和供电系统中的电气元件，如变压器、电器设备、导线等的容量，因此不但减少了投资费用，而且降低了本身电能的损耗。

2）减少供电系统中的电压损失，可以使负载电压更稳定，改善用户电能的质量。电力系统向用户供电的电压，是随着线路所输送的有功功率和无功功率变化而变化的。当线路输送一定数量的有功功率时，如输送的无功功率越多，线路的电压损失越大，即送至用户端的电压就越低。110kV 以下的线路，其电压损失可近似为

$$\Delta U = (PR + QX)/U_e$$

式中 ΔU——线路的电压损失，kV；

U_e——线路的额定电压，kV；

P——线路输送的有功功率，kW；

Q——线路输送的无功功率，kvar；

R——线路电阻，Ω；

X——线路电抗，Ω。

由此可见，当用户功率因数提高以后，它向电力系统吸取的无功功率就要减少，因此电压损失也要减少，从而改善了用户的电压质量。

3）可以增加系统的裕度，如果系统的功率因数低，那么在既有设备容量不变的情况下，装设电容器后，可以提高功率因数，增加负载的容量。例如，将 1000kVA 变压器的功率因数从 0.8 提高到 0.98 时，有

补偿前：$1000 \times 0.8\text{kW} = 800\text{kW}$

补偿后：$1000 \times 0.98\text{kW} = 980\text{kW}$

同样一台 1000kVA 的变压器，功率因数改变后，它就可以多承担 180kW 的负载。

4）减少了用户的电费支出，通过上述各元件损失的减少及功率因数提高，使电费支出减少。

（4）功率因数提高的方法

1）提高自然功率因数。自然功率因数是在没有任何补偿情况下，用电设备的功率因数。提高自然功率因数的方法有，合理选择异步电动机容量，避免变压器空载运行；合理安排和调整工艺流程，改善机电设备的运行状况；在生产工艺允许的条件下，采用同步电动机代替异步电动机。

2）采用人工补偿无功功率。利用无功功率补偿设备进行人工补偿，电力用户常用的无功功率补偿设备是电力电容器。

9. 死区时间

半桥电路中，两个功率开关有一段同时关闭的时间，这段时间称为死区时间。

二、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）

绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，简称 IGBT）是电压型控制器件，是由单极型和双极型混合组成的复合型全控功率器件。IGBT 是由美国 GE 公司和 RCA 公司于 1983 年首先研制的，于 20 世纪 90 年代初完成第二代产品，第三代智能 IGBT 已经出现，科学家们正着手研究第四代沟槽栅结构的 IGBT。IGBT 可视为双极型大功率晶体管与功率场效应晶体管的复合，通过施加正向栅极电压形成沟道，提供晶体管基极电流使 IGBT 导通；反之，若提供反向栅极电压则可消除沟道，使 IGBT 因流过反向栅极电流而关断。IGBT 集 GTR 通态压降小、载流密度大、耐压高和功率 MOSFET 驱动功率小、开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好的优点于一身，因此备受人们的青睐。它的研制成功为提高逆变器的小型化、高效化、低噪声提供了有利的条件。比较而言，IGBT 的开关速度低于 MOSFET，却明显高于 GTR；IGBT 的通态压降同 GTR 相近，但比 MOSFET 低得多；IGBT 的电流、电压等级与 GTR 接近，而比 MOSFET 高。目前，IGBT 组件模块已取代 GTR 成为 PWM 逆变器的核心器件。IGBT 的发展方向是提高耐压能力和开关频率、降低损耗以及开发具有集成保护功能的智能产品。商业化的 IGBT 已发展成系列，电流为 2～2400A，耐压为 370～6500V。生产 IGBT 的公司有美国的 IR 公司、GE 公司，日本的三菱公司、东芝公司以及德国的西门子公司等。图 11-30 为绝缘栅双极型晶体管（IGBT）。

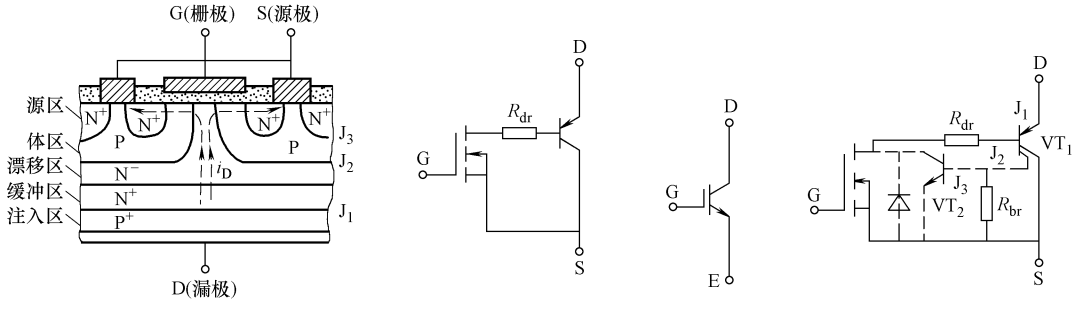


图 11-30　绝缘栅双极型晶体管（IGBT）

1. IGBT 结构

IGBT 集 MOSFET 与 GTR 优点于一身，在 MOSFET 基础上增加了一个 P^+ 层漏极，形成

PN 结 J_1，并由此引出漏极（D）、栅极（G）、源极（S），由结构图 11-30a 可以看出，IGBT 相当于一个由 N 沟道 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 型 GTR，简化等效电路如图 11-30b 所示，它是以 GTR 为主导器件，MOSFET 为驱动器件的复合管，其中为 GTR 厚基区 N^- 内的扩展电阻。图 11-30c 为 IGBT 电路符号。习惯上也将漏极称为集电极（C），源极称为发射极（E）。

IGBT 的开通和关断由栅极（G）控制。当栅极施以正压时，在栅极下的 P 体区内便形成 N 沟道，此沟道连通了源区 N^+ 和漂移区 N^-，为 PNP 型晶体管提供基流，从而使 IGBT 导通。此时，从 P^+ 区注入 N^- 区的空穴（少子）对 N^- 区进行电导调制，减少 N^- 区的电阻 R_{dr}，使高耐压的 IGBT 也具有与 GTR 相当的低通态压降，所以 IGBT 可看做是电导调制场效应晶体管（COMFET）。引起电导调制效应的最低栅极阈值电压 $U_{GE(th)}$ 一般为 3 ~ 6V。当栅极上电压为零或施以负压时，MOSFET 的沟道消失，PNP 型晶体管的基极电流被切断，IGBT 即关断。

IGBT 的四层结构，使体内存在一个寄生晶闸管，其等效电路如图 11-33d 所示。NPN 型晶体管的基极与发射极间的电阻 R_{br} 为体区扩展电阻，P 型体区横向空穴电流在其上产生的压降对 J_3 结来说是一个正偏电压。在规定的漏极电流范围内，这个正偏电压不大，NPN 型晶体管不起作用（所以图中用虚线表示）。当 I_D 大到一定程度时，该正偏压能使 NPN 型晶体管导通，与 PNP 型晶体管形成正反馈。于是寄生晶体管导通，栅极失去控制作用，这时 IGBT 无自关断能力（此即擎住或锁定效应），同时漏极电流增大，造成过高的功耗，导致器件损坏。这种漏极电流的连续值超过临界值时产生的擎住效应称为静态擎住效应。

此外，在 IGBT 高速关断过程中，如 dU_{DS}/dt 过大，在 J_2 结中引起的位移电流流过 R_{br}，产生足以使 PNP 型晶体管开通的正向偏置电压，造成寄生晶体管自锁，也可能形成关断擎住，称为动态擎住效应。结构上，在 P^+ 衬底与 N^- 之间引入一个 N^+ 缓冲区就是为了控制擎住效应，并缩短 PNP 管的开关时间，提高 IGBT 的开关速度。

IGBT 内由于存在少子的存储效应，使其关断存在电流拖尾现象，关断损耗远比 MOSFET 大，这限制了其开关频率的提高。

2. IGBT 特性

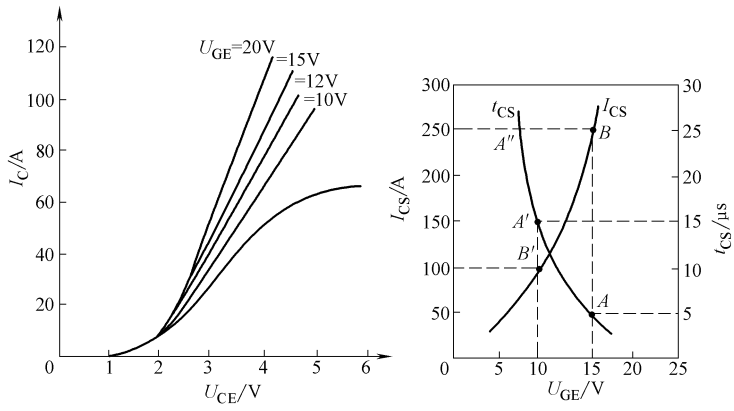
IGBT 有与 GTR 相近的输出特性，也有截止区、饱和区、放大区和击穿区，在导通后的大部分漏极电流范围内，I_c 与 U_{GE} 成线性关系。

IGBT 的优点之一是没有二次击穿，其正向安全工作区由电流、电压、功耗三条边界极限包围而成，最大漏极电流 I_{DM} 根据避免动态擎住确定，最大漏源电压 U_{DSM} 由 IGBT 中的 PNP 型晶体管的击穿电压决定，最大功耗则受限于最高结温（导通时间长，发热严重，安全工作区变窄）；反向安全工作区随关断时的 du_{CE}/dt 而变，du_{CE}/dt 越大，反向安全工作区越窄。

IGBT 能承受过电流的时间通常仅为几微秒，这与 GTR（几十微秒）相比小得多，因此对过电流保护要求很高。

图 11-31 所示为 IGBT 伏安特性和短路特性。由图可见，若 U_{GE} 不变，导通电压 U_{GE} 将随漏极电流增大而增高，因此可用检测漏源电压 U_{DS}（U_{GE}）作为是否过电流的判别信号；若 U_{GE} 增加，则通态电压下降，导通损耗将减小。

此外，IGBT 允许过载能力与 U_{GE} 有关。图 11-31b 为 50A/900V IGBT 的 U_{GE} 与短路电流



a) 伏安特性　　b) 短路特性

图 11-31　IGBT 伏安特性和短路特性

I_{CS}及短路时间 t_{CS}的关系曲线。由曲线可以看出，当 U_{GE} = 15V 时，在 5μs（A 点）内可承受 250A 的短路电流（B 点）；当 U_{GE}由 15V 降为 10V 时，则过电流承受时间为 15μs（A' 点），过电流幅值也由 250A 降至 100A（B'点）。

新一代的 IGBT（单硅型，没有扩散的 N^+层，也称 IGHT），由于采取精心设计和采用特殊工艺，已能做到不必使用 RCD 缓冲电路，具有矩形反向 SOA，不必负压关断，并联时能自动均流，短路电流可自动抑制，并且损耗不随温度正比增加。

3. IGBT 驱动电路

IGBT 以 MOSFET 为输入级，所以 MOSFET 的驱动电路同样适用于 IGBT。这里介绍一个专用于 IGBT 的驱动电路。对具有短路保护功能的驱动电路有如下几点要求：

1）正常导通时，$U_{GE} > (1.5 \sim 2.5)U_{GE(th)}$，以降低饱和压降 $U_{CE(s)}$和运行结温；关断时加 −10 ~ −5V 负偏压，以防止关断瞬间因 du/dt 过高引起擎住现象，造成误导通，并提高抗干扰能力，减少关断损耗。

2）出现短路或瞬时大幅值电流时，立即将 U_{GE}由 15V 降至 10V，IGBT 进入放大区，U_{CE}上升，短路电流受限，使允许短路的时间由 5μs 增加到 15μs；瞬时过电流结束时随即自动使 U_{GE}由 10V 恢复到 15V。

3）如故障电流为持续过电流，应在降栅压后 6 ~ 12μs，使 U_{GE}由 10V 经 2 ~ 5μs，软关断下降至低于 $U_{GE(th)}$。

HL402 是 IGBT 的一种厚膜驱动器，图 11-32 为 HL402 驱动电路。VLC 为带静电屏蔽的高速光耦，实现与输入信号电隔离，提高抗共模干扰能力。AMP 为脉冲放大器，晶体管 VT_1、VT_2 为驱动脉冲功放。N 为降栅压比较器，当端 9 输入 IGBT 的 U_{GE}高于 N 的基准电压 U_{REF}时，N 翻转，输出正电位使晶体管 VT_3 导通，由稳压管 VZ_1 将驱动器输出电压 U_{GE}降低到 10V。T 为软关断定时器，当 N 翻转达设定的时间后，T 输出正电压使晶体管 VT_4 导通，并将 U_{GE}软关断降到 IGBT 的 $U_{GE(th)}$以下。

三、电力场效应晶体管（P-MOSFET）

场效应晶体管（Field-Effect-Transistor，简称 FET）是利用改变电场通过沟道来控制半导体导电能力的器件，其通过的电流随电场信号而改变，它有结型和表面型两大类，前者是以 PN 结上的电场来控制所夹沟道中的电流，后者是以表面电场来控制沟道中的电流。

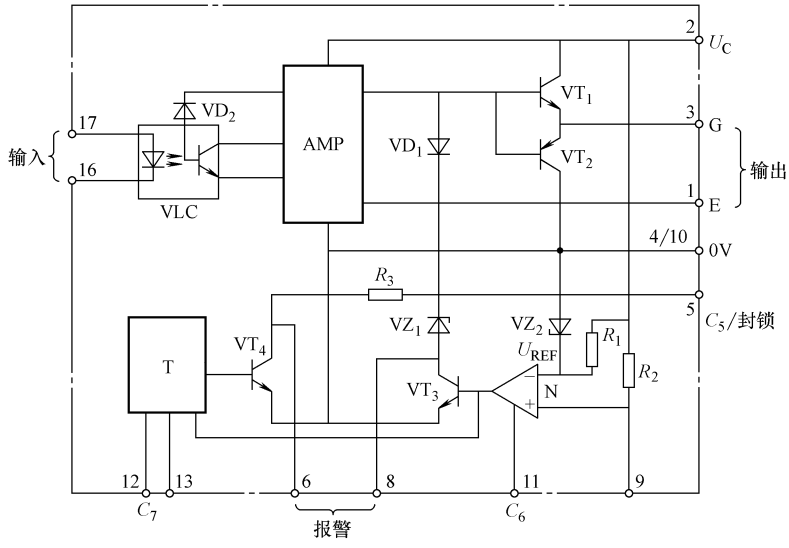


图 11-32　HL402 驱动电路

四、三相电流源型逆变器

电流源型逆变器的直流输入电源是一个恒定的直流电流源，需要调制的也就是电流。电流源型逆变器适合用于并网型应用场合，特别是太阳能、风能并网发电系统中。

1. 电流源型逆变器的特点

1）直流侧接有较大的滤波电感。

2）当负载功率因数变化时，交流输出电流的波形不变，即交流输出电流波形与负载无关。

3）在逆变器的桥式电路中，与功率开关器件串联的是反向阻断二极管。

2. 结构与波形

图 11-33a 为三相电流源型逆变器电路，由三组上下一对开关构成，相当于三个半桥电路的并联，在直流侧串联连接了电抗器 L_d，以便能减小直流电流 I_S 的脉动，而与逆变器的开关动作无关，所以在开关切换时，也必须保持电流连续，如图 11-33b 所示，在上面 3 个开关 VT_1、VT_3、VT_5 中的一个及下面 3 个开关 VT_2、VT_4、VT_6 中的一个，均按每隔 1/3 周期期间分别流过电流 I_S。为此，输出电流波形为高度是 I_S 的 120°通电的方波。另外，在负载是感性负载时，为了在电流急剧变化时不产生过渡电压（浪涌电压），在逆变器的输出端也并联电容器。因此，电流源型逆变器的输出电压变化缓慢，与输出电流相比，波形的畸变较小。如图 11-33b 中的 T 所示，逆变器在 1 个周期内切换 6 次，所以输入电压 u_d 以输出频率的 6 倍频率脉动。

电流源型逆变器的电源即直流电流源是利用可变电压的电源通过电流反馈控制来实现的。该电源通常采用他励式正变换器或自励式正变换器。但是仅仅用电流反馈，不能减小因开关动作形成的逆变器输入电压 u_d 的脉动而产生的电流脉动，所以要与电源串联电抗器 u_d。

注意电流源型逆变器的各个开关，则发现流过开关的电流是单方向的，即为 0 或正，但

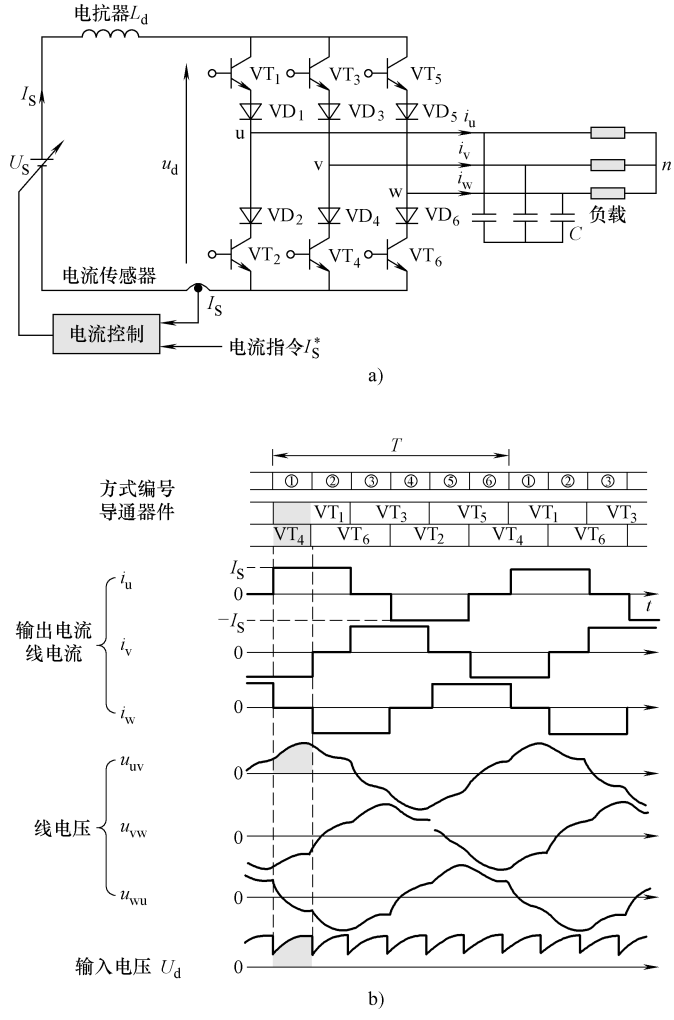


图 11-33　三相电流源型逆变器

加在开关上的电压是双向的，即为正、负。例如，在方式①（VT_1、VT_4 导通）期间，在 $VT_5 + VD_5$ 开关上所加电压为 $u_{uw} = -u_{uw}$，但该电压在期间的最初为负。因而作为开关必须采用具有反向耐压的功率半导体器件，这类开关器件质量尚差，因此，采用功率管串联二极管的形式。

第五节　光伏并网逆变器的技术要求和试验方法

一、术语和定义

1. 光伏并网逆变器（photovoltaic grid-connected inverter）

将太阳电池发出的直流电变换成交流电后馈入电网的设备称为光伏并网逆变器。

2. 逆变器交流输出端（inverter AC output terminal）

逆变器、局部交流负载和电网之间的相互连接点称为输出端。

3. 最大功率点跟踪（maximum power point tracking，MPPT））

对跟随太阳电池表面温度变化和太阳辐照度变化而产生出的输出电压与电流的变化进行跟踪控制，使方阵经常保持在最大输出的工作状态，以获得最大的功率输出称为最大功率点跟踪。

4. 孤岛效应（islanding）

电网失电压时，光伏系统仍保持对失电压电网中的某一部分线路继续供电的状态称为孤岛效应。

5. 计划性孤岛效应（intentional islanding）

按预先配置的控制策略，有计划地发生孤岛效应称为计划性孤岛效应。

6. 非计划性孤岛效应（unintentional islanding）

非计划、不受控地发生孤岛效应称为非计划性孤岛效应。

7. 防孤岛效应（anti-islanding）

应禁止非计划性孤岛效应的发生。

注：非计划性孤岛效应发生时，由于系统供电状态未知，将造成以下不利影响：

1）可能危及电网线路维护人员和用户的生命安全。

2）干扰电网的正常合闸。

3）电网不能控制孤岛中的电压和频率，从而损坏配电设备和用户设备。

8. 模拟电网（simulated utility）

模拟电网用来模拟公共电网的测试装置，其电压和频率可调。

9. 品质因数（quality factor）

品质因数是防孤岛效应保护试验中试验负载谐振能力的评估指标。

注：在并联 *RLC* 谐振电路中，负载品质因数 Q_f 可表示为

$$Q_f = R\sqrt{C/L} \tag{11-8}$$

式中 Q_f——负载品质因数；

R——负载电阻；

C——负载电容；

L——负载电感。

在已知并联 *RLC* 谐振电路消耗的有功、感性无功和容性无功的情况下，Q_f 也可以表示为

$$Q_f = \sqrt{P_{qL}P_{qC}}/P \tag{11-9}$$

式中 P_{qL}——电感 L 消耗的无功；

P_{qC}——电容 C 消耗的无功；

P——电阻 R 消耗的有功。

注意谐振情况下，$P_{qC} = P_{qL}$。

令 $P_{qC} = P_q$，由此得到

$$Q_f = P_q/P \tag{11-10}$$

10. 谐振频率（resonant frequency）

并联 *RLC* 电路谐振时的频率称为谐振频率。定义式为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{11-11}$$

式中 f——谐振频率；

L——负载电感；

C——负载电容。

注：并联 *RLC* 电路谐振时，电路消耗的感性无功与容性无功相等，于是并联 *RLC* 谐振电路相当于纯电阻。

11. 产品分类

1）按并网类型可分为：单相逆变器；三相逆变器。

2）按防护等级可分为：户内型；户外型。

12. 输出功率型谱

逆变器输出功率额定值优先在下列数值中选取（单位 kW）。

单相逆变器单元：1.5，2.5，3，5，6。

三相逆变器单元：10，30，50，100，250，500，1000。

注：当用户要求并与制造厂协商后可以生产所列数值以外的产品。

二、光伏并网逆变器的技术要求

1. 使用条件

逆变器应能在以下的使用条件下达到规定的性能要求。

（1）正常使用的环境条件　使用环境温度：户内型为 -20～40℃，户外型为 -25～60℃（无阳光直射）；相对湿度≤90%，无凝露。

海拔≤1000m；海拔＞1000m 时，应按 GB/T 3859.2—1993 规定降额使用。

无剧烈振动冲击，垂直倾斜度≤5°。

工作环境应无导电爆炸尘埃，应无腐蚀金属和破坏绝缘的气体和蒸汽。

（2）正常使用的电网条件　若无其他规定，符合本标准的逆变器在下列电网条件下，应能以正常方式运行：

公用电网谐波电压应不超过 GB/T 14549—1993 中第 4 章规定的限值。

逆变器交流输出端三相电压不平衡度应不超过 GB/T 15543—2008 规定的数值，允许值为 2%，短时不得超过 4%。

电网电压允许偏差应符合 GB/T 12325—2008 的规定。10kV 及以下三相电压的允许偏差为额定电压的 ±7%，220V 单相电压的允许偏差为额定电压的 7%、-10%。

电网频率允许偏差应符合 GB/T 15945—2008，即偏差值允许为 ±0.5Hz。

2. 机体和结构质量

逆变器的结构和机柜本身的制造质量、主电路连接、二次线及电气元器件安装等应符合下列要求：

1）机架组装有关零部件均应符合各自的技术要求。

2）油漆电镀应牢固、平整，无剥落、锈蚀及裂痕等现象。

3）机架面板应平整，文字和符号要求清楚、整齐、规范、正确。

4）标牌、标志、标记应完整清晰。

5）各种开关应便于操作，灵活可靠。

3. 性能指标

（1）逆变效率　逆变效率是并网逆变器的重要参数之一，逆变器最大效率应不低于 94%，其实际最大效率值应在产品铭牌上明确标注。

（2）并网电流谐波　逆变器在运行时不应造成电网电压波形过度畸变和注入电网过度的谐波电流，以确保对连接到电网的其他设备不造成不利影响。逆变器满负载（线性负载）运行时，电流谐波总畸变率限值为5%，奇次谐波电流含有率限值见表11-2，偶次谐波电流含有率限值见表11-3。

表11-2　奇次谐波电流含有率限值

奇次谐波次数	含有率限值(%)
3rd～9th	4.0
11th～15th	2.0
17th～21st	1.5
23rd～33rd	0.6
35th以上	0.3

表11-3　偶次谐波电流含有率限值

偶次谐波次数	含有率限值(%)
2nd～10th	1.0
12th～16th	0.5
18th～22nd	0.375
24th～34th	0.15
36th以上	0.075

注：由于电压畸变可能会导致更严重的电流畸变，使得谐波测试存在一定的问题。注入谐波电流不应包括任何由未连接光伏系统的电网上的谐波电压畸变引起的谐波电流。满足上述要求的型式试验逆变器可视为符合条件，不需要进一步的检验。

（3）功率因数（*PF*）　当逆变器的输出大于其额定输出的50%时，平均功率因数应不小于0.90（超前或滞后）。一段时期内的平均功率因数（*PF*）公式为

$$PF = \frac{E_{\mathrm{REAL}}}{\sqrt{E_{\mathrm{REAL}}^2 + E_{\mathrm{REACTIVE}}^2}} \tag{11-12}$$

式中　E_{REAL}——有功电量（kW·h）；

E_{REACTIVE}——无功电量（kvar·h）。

注1：在供电机构许可下，特殊设计以提供无功功率补偿的逆变器可超出此限值工作。

注2：用于并网运行而设计的大多数逆变器功率因数接近1。

（4）工作电压　逆变器交流输出端单相电压的允许偏差为额定电压的10%、－15%，三相电压的允许偏差为额定电压的±10%，超出此范围时用户应与制造商协商。电网额定电压：三相为380V，单相为220V。

（5）工作频率　逆变器并网时应与电网同步运行。逆变器交流输出端频率的允许偏差为±0.5Hz，电网额定频率为50Hz。

（6）直流分量　并网运行时，逆变器向电网馈送的直流电流分量应不超过其输出电流额定值的0.5%或5mA，应取二者中较大值。

（7）噪声　当输入电压为额定值时，在距离设备水平位置1m处，用声级计测量满载时

的噪声。户内型的噪声应不大于65dB，户外型的噪声由用户和制造厂协商确定。

（8）电磁兼容性

1）电压波动和闪烁。逆变器并网运行时在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁应不超过GB 17625.2—2007（额定电流不大于16A的设备）或GB/Z 17625.3—2000（额定电流大于16A的设备）规定的限值。

2）电磁发射要求。在居住、商业和轻工业环境中正常工作的逆变器的电磁发射应不超过GB 17799.3—2001规定的发射限值。

连接到工业电网和在工业环境中正常工作的逆变器的电磁发射应不超过GB 17799.4—2001规定的发射限值。

（9）抗扰度要求

1）静电放电抗扰度。静电放电抗扰度应符合GB/T 17626.2—2006标准抗扰度等级3的要求，即空气放电8kV和接触放电6kV，试验结果应符合GB/T 17626.2—2006标准第9条中b类要求。

2）射频电磁场辐射抗扰度。射频电磁场辐射抗扰度应采用GB/T 17626.3—2006试验等级3的要求，试验场强为10V/m，试验结果应符合GB/T 17626.3—2006标准中a类要求。

3）电快速瞬变脉冲群抗扰度。电快速瞬变脉冲群抗扰度应采用GB/T 17626.4—2008试验等级2的要求，电源端±1kV，试验结果应符合GB/T 17626.4—2008标准中a类要求。

4）浪涌（冲击）抗扰度。应对电源端口施加1.2/50μs的浪涌信号，试验等级为线对线±1kV，线对地±2kV，试验结果应符合GB/T 17626.5—2008标准中第9条b类要求。

5）射频场感应的传导骚扰抗扰度。传导抗扰度应采用GB/T 17626.6—2008中试验等级3，试验结果应符合GB/T 17626.6—2008标准中a类要求。

6）电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度。根据逆变器的预期工作环境，按GB/T 17626.11—2008中附录B的规定选择试验等级，逆变器应能承受所选试验等级的电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验。

4. 保护功能

（1）电网故障保护

1）过/欠电压保护。当逆变器交流输出端电压超出规定的电压范围时，逆变器应停止向电网供电，同时发出警示信号。此要求适用于多相系统中的任何一相。

本标准述及到的电压均指当地标称电压。

逆变器应能检测到异常电压并做出反应。电压的方均根值在逆变器交流输出端测量，其值应满足表11-4的条件。

表11-4　异常电压的响应

电压(逆变器交流输出端)	最大跳闸时间
$U<0.5U_{标称}$	0.1s
$50\%\ U_{标称}\leqslant U<85\%\ U_{标称}$	2.0s
$85\%\ U_{标称}\leqslant U\leqslant 110\%\ U_{标称}$	继续运行
$110\%\ U_{标称}<U<135\%\ U_{标称}$	2.0s
$135\%\ U_{标称}\leqslant U$	0.05s

注：最大跳闸时间是指异常状态发生到逆变器停止向电网供电的时间。主控与监测电路应切实保持与电网的连接，从而继续监视电网的状态，使得“恢复并网”功能有效。

2）过/欠频保护。当逆变器交流输出端电压的频率超出规定的频率范围时，逆变器应在0.2s内停止向电网供电，同时发出警示信号。

3）防孤岛效应保护。逆变器应具有防孤岛效应保护功能。若逆变器并入的电网供电中断，逆变器应在2s内停止向电网供电，同时发出警示信号。防孤岛效应保护方案的选取规则参见附录C。

4）恢复并网保护。由于超限状态导致逆变器停止向电网供电后，在电网的电压和频率恢复到正常范围后的20s～5min，逆变器不应向电网供电。

（2）过电流保护　逆变器对交流输出应设置过电流保护。逆变器的过电流应不大于额定电流的150%，并在0.1s内停止向电网供电，同时发出警示信号。故障排除后，逆变器应能正常工作。

（3）防反放电保护　当逆变器直流侧电压低于允许工作范围或逆变器处于关机状态时，逆变器直流侧应无反向电流流过。

（4）极性反接保护　当光伏方阵的极性接反时，逆变器应能保护而不会损坏。极性正接后，逆变器应能正常工作。

（5）过载保护　当光伏方阵输出的功率超过逆变器允许的最大直流输入功率时，逆变器应自动限流，工作在允许的最大交流输出功率处，在持续工作7h或温度超过允许值的任何一种情况下，逆变器应停止向电网供电。恢复正常后，逆变器应能正常工作。

注：具有最大功率点跟踪控制功能的光伏并网逆变器，其过载保护通常采用将工作点偏离光伏方阵的最大功率点的方法。

5. 通信

逆变器应设置本地通信接口。

6. 自动开/关机

逆变器应能根据日出和日落的日照条件，实现自动开机和关机。

7. 软起动

逆变器起动运行时，输出功率应缓慢增加即输出功率变化率应不超过1000W/s，且输出电流无冲击现象。功率不小于100kW的并网逆变器的起动应符合GB/Z 19964—2005相关章节的规定。

8. 绝缘耐压性

（1）绝缘电阻　逆变器的输入电路对地、输出电路对地以及输入电路与输出电路间的绝缘电阻应不小于1MΩ。绝缘电阻只作为绝缘强度试验参考。

（2）绝缘强度　逆变器的输入电路对地、输出电路对地以及输入电路对输出电路应承受50Hz的正弦交流电压1min，试验电压的方均根值见表11-5，不击穿，不飞弧，漏电流<20mA。试验电压应从零开始，以每级为规定值的5%的有级调整方式上升至规定值后，持续1min。

（3）外壳防护等级　应符合GB 4208—2008规定。户内型应不低于IP20；户外型应不低于IP65。

三、光伏并网逆变器的试验方法

以下试验方法以单相并网逆变器说明，三相并网逆变器可以此参照进行。

表 11-5　绝缘强度试验电压

额定电压 U_N/V	试验电压/V
$U_N \leqslant 60$	1000
$60 < U_N \leqslant 300$	2000
$300 < U_N \leqslant 690$	2500
$690 < U_N \leqslant 800$	3000
$800 < U_N \leqslant 1000$	3500
$1000 < U_N \leqslant 1500$	3500

注：1. 整机绝缘强度按上述指标仅能试验一次。用户验收产品时如需要进行绝缘强度试验，应将上列试验电压降低25% 进行。

2. 不带隔离变压器的逆变器不需要进行输入电路对输出电路的绝缘强度测试。

注 1：以下试验方法中 100% 额定交流输出功率通过提供给逆变器足够的输入功率来获得，50% ~66% 额定交流输出功率通过调节直流输入源来获得，25% ~33% 额定交流输出功率通过控制策略限制逆变器的输出来获得。

注 2：若允许输出的最小功率大于额定交流输出功率的 33%，用允许输出的最小功率进行试验。

1. 试验环境条件

除非另有规定，测量和试验在以下条件下进行：

温度：15 ~35℃；

相对湿度：45% ~75%；

气压：86 ~106kPa。

2. 机体和结构质量检查

目检和操作试验。

3. 性能指标试验

（1）性能指标的试验平台　图 11-34 为性能指标试验平台。此平台给出了逆变器性能指标试验的参考电路，部分保护功能的试验平台也可参照此电路。测试要求如下：

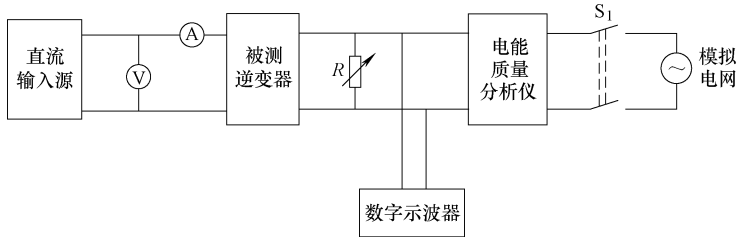


图 11-34　性能指标试验平台

R—可调电阻，功率与逆变器额定功率相当

S_1—逆变器的网侧分离开关

模拟电网应符合技术要求中正常使用的电网条件规定，且容量应大于被测逆变器额定功率的 5 倍。

被测逆变器的直流输入源应为光伏方阵或光伏方阵模拟器，若条件允许，最好为光伏方阵；直流输入源应至少能提供被测逆变器最大直流输入功率的 1.5 倍，且直流输入源的输出

电压应与被测逆变器直流输入电压的工作范围相匹配，试验期间输出电压波动应不超过±5%。

如果被测逆变器有指定的直流输入源，但该输入源不能提供试验中规定的逆变器的输出功率，应在输入电源能够提供的范围内进行测试。

（2）逆变效率试验　最大逆变效率（η_{max}）发生时逆变器输出功率占额定功率的百分比（$x\%$）由制造商与用户协议确定。在逆变器输出 $x\%$ 额定功率时，测量其直流输入功率，计算出 η_{max}，其值应符合前逆变效率的规定。

（3）并网电流谐波试验　按图 11-34 接线，试验分别在逆变器输出为额定功率的(25～33)%、(50～66)%和100%处进行，用电能质量分析仪测量出电流谐波总畸变率和各次谐波电流含有率，其值应符合前并网电流谐波规定。

（4）功率因数测定试验　按图11-34 接线，当逆变器输出大于额定功率的50%时，用电能质量分析仪或功率因数表测量出的功率因数（PF）值应符合前功率因数规定。

（5）直流分量试验　按图 11-34 接线，逆变器正常运行时，测量其输出交流电流中的直流电流分量，其值应符合前直流分量规定。

（6）噪声试验　当输入电压为额定值时，在距离设备 1m 处用声级计测量其满载时的噪声，其值应符合前噪声规定。

（7）电磁兼容试验

1）电压波动和闪烁试验。并网运行时逆变器在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁按 GB 17625.2—2007（额定电流不大于 16A 的设备）或 GB/Z 17625.3—2000（额定电流大于 16A 的设备）规定的方法测量。

2）发射试验。

① 在居住、商业和轻工业环境中正常工作的逆变器的电磁发射试验按 GB 17799.3—2001 规定的方法进行。

② 连接到工业电网和在工业环境中正常工作的逆变器的电磁发射试验按 GB 17799.4—2001 规定的方法进行。

（8）抗扰度试验

1）静电放电抗扰度试验。检验静电放电抗扰度，按 GB/T 17626.2—2006 规定的方法进行。

2）射频电磁场辐射抗扰度试验。检验射频电磁场辐射抗扰度，按 GB/T 17626.3—2006 规定的方法进行。

3）电快速瞬变脉冲群抗扰度试验。检验电快速瞬变脉冲群抗扰度，按 GB/T 17626.4—2008 规定的方法进行。

4）浪涌（冲击）抗扰度试验。检验浪涌（冲击）抗扰度，按 GB/T 17626.5—2008 规定的方法进行。

5）射频场感应的传导骚扰抗扰度试验。检验射频场感应的传导骚扰抗扰度，按 GB/T 17626.6—2008 规定的方法进行。

6）电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验。检验电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度，按 GB/T 17626.11—2008 规定的方法进行。

（9）保护功能试验

1）电网故障保护试验。

① 过/欠电压保护试验。按图 11-34 接线，试验分别在逆变器输出为额定功率的 25% ~ 33%、50% ~66% 和 100% 处进行，分别往正、负方向调整模拟电网的输出电压直至逆变器停止向电网供电，记录下的动作时间以及动作时的电压应符合前技术要求规定。

② 过/欠频保护试验。按图 11-34 接线，试验分别在逆变器输出为额定功率的 25% ~ 33%、50% ~66% 和 100% 处进行，分别往正、负方向调整模拟电网的输出频率直至逆变器停止向电网供电，记录下的动作时间以及动作时的频率应符合前技术要求规定。

2）防孤岛效应保护试验。图 11-35 给出了防孤岛效应保护试验平台，S_1 为被测逆变器的网侧分离开关，S_2 为被测逆变器的负载分离开关。负载采用可变 *RLC* 谐振电路，谐振频率为被测逆变器的额定频率（50/60Hz），其消耗的有功功率与被测逆变器输出的有功功率相当。试验应在表 11-6 规定的条件下进行。

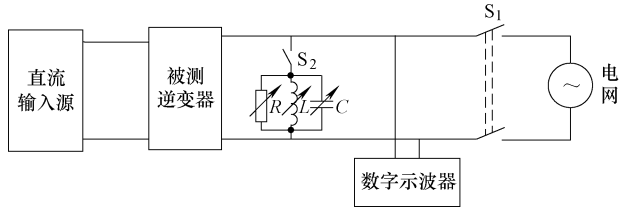


图 11-35　防孤岛效应保护试验平台

注：由于电网从逆变器吸收有功功率和无功功率的不确定性，该项试验使用实际电网比模拟电网更具有说服力。

表 11-6　防孤岛效应保护的试验条件

条件	被测逆变器的输出功率 P_{EUT}	被测逆变器的输入电压	被测逆变器跳闸设定值
A	100% 额定交流输出功率	> 直流输入电压范围的 90%	制造商规定的电压和频率跳闸值
B	50% ~ 66% 额定交流输出功率	直流输入电压范围的50% ± 10%	设定电压和频率跳闸值为额定值
C	25% ~ 33% 额定交流输出功率	< 直流输入电压范围的 10%	设定电压和频率跳闸值为额定值

若直流输入电压范围为 $X \sim Y$，则直流输入电压范围的 90% $= X + 0.9 * (Y - X)$

试验步骤如下：

① 闭合 S_1，断开 S_2，起动逆变器。通过调节直流输入源，使逆变器的输出功率 P_{EUT} 等于额定交流输出功率，并测量逆变器输出的无功功率 Q_{EUT}。

② 使逆变器停机，断开 S_1；通过以下步骤调节 *RLC* 电路使得 $Q_f = 1.0 \pm 0.05$；

RLC 电路消耗的感性无功满足关系式：$Q_L = Q_f P_{EUT} = 1.0 P_{EUT}$；

接入电感 L，使其消耗的无功等于 Q_L；

并入电容 C，使其消耗的容性无功满足关系式：$Q_C + Q_L = -Q_{EUT}$；

最后并入电阻 R，使其消耗的有功等于 P_{EUT}。

③ 闭合 S_2 接入 *RLC* 电路，闭合 S_1，起动逆变器，确认其输出功率符合步骤①的规定。调节 R、L、C，直到流过 S_1 的基频电流小于稳态时逆变器额定输出电流的 1%。

④ 断开 S_1，记录 S_1 断开至逆变器输出电流下降并维持在额定输出电流的 1% 以下的

时间。

⑤ 调节有功负载（电阻 R）和任一无功负载（L 或 C）以获得表 11-7 中负载不匹配状况；表 11-7 中的参数表示的是偏差的百分比，符号表示的是图 11-35 中流经开关 S_1 的有功功率流和无功功率流的方向，正号表示功率流从逆变器到电网；每次调节后，都应记录 S_1 断开至逆变器输出电流下降并维持在额定输出电流的 1% 以下的时间。

⑥ 对于试验条件 B 和 C，调节任一无功负载（L 或 C），使之按表 11-8 的规定每次变化 1%。表 11-8 中的参数表示的是图 11-35 中流经开关 S_1 的无功功率流的方向，正号表示功率流从逆变器到电网；每次调节后，记录 S_1 断开至逆变器输出电流下降并维持在额定输出电流的 1% 以下的时间；若记录的时间呈持续上升趋势，则应继续以 1% 的增量扩大调节范围，直至记录的时间呈下降趋势。

表 11-7　试验条件 A 情况下的负载不匹配状况

试验中负载消耗的有功功率与额定值的偏差百分比(%),无功功率与额定值的偏差百分比(%)				
−10, +10	−5, +10	0, +10	+5	+10, +10
−10, +5	−5, +5	0, +5	+5, +5	+10, +5
−10,0	−5,0		+5,0	+10,0
−10, −5	−5, −5	0, −5	+5, −5	+10, −5
−10, −10	−5, −10	0, −10	+5, −10	+10, −10

表 11-8　试验条件 B 和试验条件 C 情况下的负载不匹配状况

试验中负载消耗的有功功率与额定值的偏差百分比(%),无功功率与额定值的偏差百分比(%)	
0,	−5
0,	−4
0,	−3
0,	−2
0,	−1
0,	+1
0,	+2
0,	+3
0,	+4
0,	+5

以上步骤中记录的时间都应符合技术要求中的规定，否则即判定试验不通过。

3）恢复并网试验。由于超限状态导致逆变器停止向电网供电，再到电网恢复正常后，逆变器工作状态和恢复并网时间应符合技术要求中的规定。

4）过电流保护试验。使逆变器工作电流超过额定值的 50% 时，逆变器应能自动保护，且其输出电流和停止向电网供电的时间应符合规定。

5）防反放电保护试验。降低逆变器直流输入电压，使逆变器处于关机状态，电流表测量逆变器直流侧电流应为零。

6）极性反接保护试验。按图 11-34 接线，该项试验中直流输入源应采用光伏方阵或光伏方阵模拟器。在试验使用光伏方阵模拟器的情况下，应调节模拟器使其输出电压为逆变器的最大额定输入电压，且使其输出电流不超过逆变器额定输入电流的 1.5 倍。将光伏方阵或光伏方阵模拟器反接，逆变器应能自动保护；1min 后再将其正确接入，逆变器应能正常工作。

7）过载保护试验。按图 11-34 接线，调节直流输入源，使其输出功率超过逆变器允许的最大直流输入功率，逆变器的工作状态应符合技术要求中的规定。

8）通信接口试验。检查逆变器是否通信正常。

9）自动开/关机试验。通过改变逆变器输入直流电压的大小来模拟日出和日落的日照条件，逆变器应按技术要求中的规定自动开机和关机。

具体步骤如下：按图 11-34 接线，调节直流输入源，使直流侧电压从低于逆变器的允许直流电压工作范围下限的电压处开始增加，当直流侧电压高于允许范围的下限时，逆变器应能自动开机；待逆变器工作稳定后，调节直流输入源使直流侧电压下降到低于允许范围的下限时，逆变器应能自动关机。

10）软起动试验。逆变器起动运行时工作状态应符合技术要求中的规定。

11）绝缘耐压试验。绝缘电阻和绝缘强度试验之前，应将所有不能承受高压的元器件从电路中予以排除。

① 绝缘电阻测定试验。用绝缘电阻表以 1000V 试验电压分别测量逆变器的输入电路对地、输出电路对地以及输入电路与输出电路间的绝缘电阻值，其值应符合本标准技术要求中的规定。测量绝缘电阻合格后，才能进行绝缘强度试验。

② 绝缘强度测定试验。用耐压测试仪分别对逆变器的输入电路对地、输出电路对地以及输入电路对输出电路按技术要求规定进行试验，并符合技术要求中的要求。

12）环境试验。

1）低温工作试验。试验方法按 GB/T 2423.1—2008 中“试验 A”进行。产品无包装，在试验温度为（-20±3）℃（户内型）或（-25±3）℃（户外型）的条件下，通电加额定负载保持 2h，在标准大气条件下恢复 2h 后，逆变器应能正常工作。

2）高温工作试验。试验方法按 GB/T 2423.2—2008 中“试验 B”进行。产品无包装，在试验温度为（40±2）℃（户内型）或（60±2）℃（户外型）条件下，通电加额定负载保持 2h，在标准大气条件下恢复 2h 后，逆变器应能正常工作。

3）恒定湿热试验。试验方法按 GB/T 2423.3—2006 进行。产品在试验温度为（40±2）℃（户内型）或（60±2）℃（户外型），相对湿度（90±3）%恒定湿热条件下，无包装，不通电，经受 48h 试验后，取出样品，在正常环境条件下恢复 2h 后，逆变器应能正常工作。

13）检验规则。

① 检验分类。产品检验分出厂检验和型式检验，检验项目见表 11-9。

② 出厂检验。每台逆变器都应进行出厂检验。一台中有一项性能不符合要求，即为不合格，应返工后复试，复试仍不合格，则为检验不合格。检验合格后，填写检验记录并且发给合格证方能出厂。

表 11-9 出厂检验和型式检验的项目

序号	检 验 项 目	型式检验	出厂检验	试验方法
1	机体和结构质量	√	√	
2	逆变效率试验	√	√	
3	并网电流谐波试验	√	√	
4	功率因数测定试验	√	√	
5	直流分量试验	√		
6	噪声试验	√		
7	电压波动和闪烁试验	√		
8	发射试验	√		
9	静电放电抗扰度试验	√		
10	射频电磁场辐射抗扰度试验	√		
11	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	√		
12	浪涌(冲击)辐射抗扰度试验	√		
13	射频场感应的传导骚扰抗扰度试验	√		
14	电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验	√		
15	过/欠电压试验	√	√	
16	过/欠频试验	√		
17	防孤岛效应保护试验	√	√	
18	恢复并网试验	√		
19	过电流保护试验	√		
20	防反放电保护试验	√	√	
21	极性反接保护试验	√	√	
22	过载保护试验	√	√	
23	通信接口	√	√	
24	自动开关机	√	√	
25	软启动	√	√	
26	绝缘电阻测定	√		
27	绝缘强度测定	√	√	
28	低温工作试验	√		
29	高温工作试验	√		
30	恒定湿热试验	√		
31	温升试验	√		GB/T 3859. 1—1993
32	振动试验	√		GB/T 2423. 10—2008
33	防护等级试验	√		GB 4208—2008

③ 型式检验。当有下列情况之一时，应进行型式检验：

a）新产品鉴定。

b）正式生产后，结构、材料、工艺有较大改变，足以影响产品性能时。

c）批量生产的产品，每隔5年进行一次型式检验。

d）产品停产2年后恢复生产时。

e）国家质量监督机构提出进行型式检验的要求时。

抽样方法及判定规则如下：

进行型式检验的样品，应在经过出厂检验合格的产品中随机抽取，其数量为2台，按GB/T 2829—2002标准规定进行。抽样采用判别水平为Ⅰ的一次抽样方案，产品质量以不合格数表示，不合格质量水平取120。

四、光伏并网逆变器的标志、包装、运输、贮存

1. 标志

（1）产品标志

逆变器的适当位置应有铭牌。铭牌内容如下：

1）产品名称。

2）产品型号。

3）技术参数：额定交流输出功率（kW）；最大逆变效率（%）；直流输入电压范围（V）；标称交流电压范围（V）；防护等级。

4）出厂编号。

5）制造日期。

6）制造厂名。

（2）包装标志

逆变器的外包装上有收发货标志、包装贮运标志和警示标志，按GB/T 191—2008的有关规定执行。

2. 包装

（1）随同产品供应的技术文件

随同产品供应的技术文件包括：安装说明书；产品使用说明书；技术指标及参数；产品质量合格证；保修卡；用户意见调查表。

注：产品技术参数表参见附录D。

（2）产品包装

产品包装应符合GB/T 3873—1983的有关规定。

3. 运输

逆变器在运输过程中不应有剧烈振动、冲击和倒放。

4. 贮存

产品使用前应放在原包装箱内，存放在空气流通、周围环境不低于-40℃、相对湿度不大于90%、无有害气体和易燃易爆物品及有腐蚀性物品的仓库里，并且不应受到强烈机械振动、冲击和强磁场作用。

以上参照CGC/GF 001：2009标准《400V以下低压并网光伏发电专用逆变器技术要求和试验方法》。

第六节　国外光伏并网逆变器状况

光伏并网500kW逆变器的国外主要生产厂家有艾斯玛（SMA、德国）、艾默生

（SMART、美国）、施耐德（SCHNEIDER、德国）、卡拉罗圣诺电气（SOLAR、意大利）、伏能士（Fronius、奥地利）等。SMA 是全球最早也是最大的光伏逆变器生产企业，以 SMA 为代表的国外光伏逆变器厂商起步早、技术成熟，产品品种多、系列全，稳定性、可靠性及变换效率均比较高。国外产品的特点是智能化程度高，并配合配电系统、监控系统等，构成一个功能完善的光伏发电系统。

一、艾默生光伏逆变器

艾默生公司创建于 1890 年，是全球最悠久的跨国公司之一，名列世界 500 强，2009 年销售额 209 亿美元，2009《财富》全球企业电子行业排名第二。艾默生光伏并网逆变器产品具有如下特点：

1. 研发技术平台

艾默生公司是全球最大的电力电子开发制造企业之一，拥有北美、欧洲和中国三个全球研发中心，全球研发人员 7700 人，2009 年研发总投入 6.86 亿美元，新申请专利数 730 件，在电力电子领域拥有众多世界顶尖品牌，拥有世界电力电子行业最先进最完整的实验室，实验室报告可以直接被 UL、CSA、TUV、CNAL 等机构认可。

2. 逆变器技术

艾默生 SmartShine™ 系列光伏并网逆变器采用模块化设计和智能休眠技术，并选用业界高效率功率开关器件——COOLMOS，配合两级变换、三电平控制技术、DSP 控制技术、模块冗余备份和热插拔等，采用了高功率密度和系统集成设计。图 11-36 为艾默生光伏并网逆变器。产品具有高效率、宽范围电压输入、高质量电能输出、高可靠性和快速便捷维护等诸多优点。

1）宽电压输入范围为 300～850V，能在 300～450V 低压部分继续发电，也就是早晚及阴天时能比普通逆变器多发电。

2）智能休眠技术，适应光照变化，始终保持动态高效率运行。

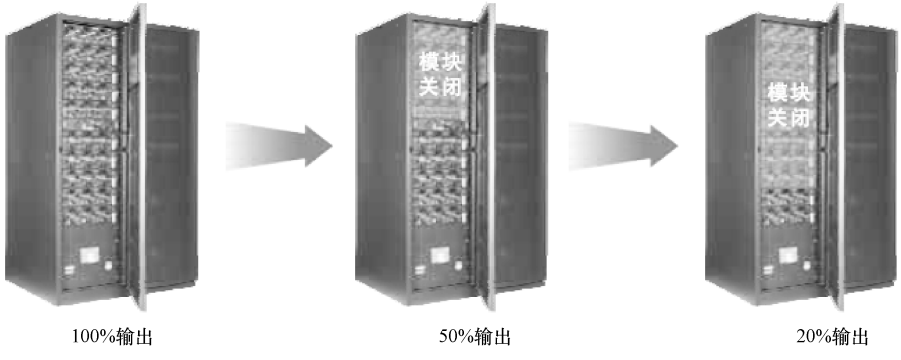


图 11-36　艾默生光伏并网逆变器

3）两级变换、三电平控制和 DSP 控制技术。

系统根据功率器件的最新进展，选用 COOLMOS 器件，并采用先进拓扑设计，确保更宽输入电压和标准电压输出、高质量电能输出以及系统精确控制。图 11-37 为艾默生光伏并网逆变器电路框图。

4）模块化结构，可靠性高。一个甚至多个模块出现故障，系统仍可继续向电网提供

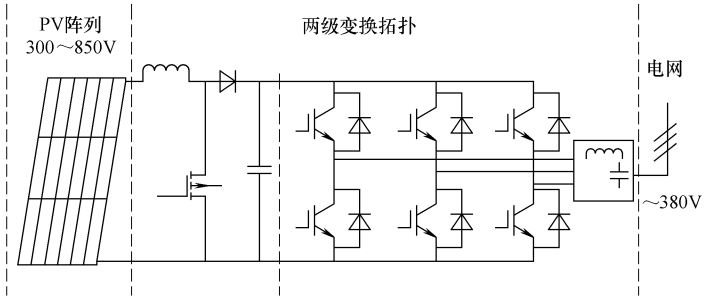


图 11-37　艾默生光伏并网逆变器电路框图

电能。

5）模块化维护及在线热插拔。模块更换时间小于 10min，无需专业技术人员。

6）输出电压为交流 380/400/415V，50Hz，无需隔离变压器，即可直接与 380V 交流电网匹配。逆变器内部集成交流配电单元，无需额外配置交流配电柜，直接接入普通双绕组变压器即可（无需双分裂变压器），降低系统造价。

7）高功率密度和一体化系统设计，提高效率，尺寸为 1200mm×2120mm×1000mm，与同容量逆变器相比，可节省 50% 的占地空间。

3. 全方位的专业监控解决方案

国内监控应用（中国移动、中国联通、中国电信等）超过 30 万个场所，为中国用户提升管理效率，降低管理成本。

4. 中国本土化生产和贴近客户的本地化服务

艾默生逆变器完全在国内生产，年生产能力达 500MW。

5. 西藏桑日光伏电站 2010 年 2 月发电量情况

装机 0.95MW×5 = 4.75MW，多晶硅电池，2010 年 2 月份累计 80.2 万 kW·h 的电，2010 年 2 月发电量情况见表 11-10。

表 11-10　2010 年 2 月发电量情况

日期	最大负荷/kW	最小负荷/kW	平均负荷/kW	逆变器电量/kW·h	上网电量/kW·h	日运行小时数/h	有效利用小时数/h	天气状况
2 月 1 日	4526.9	48.9	2197.78	19780	19180	9	3.956	晴
2 月 2 日	4583	51.8	3003.7	33040.7	32410	11	6.608	晴
2 月 3 日	4557.6	51.7	2950.12	32451.3	31990	11	6.49	晴
2 月 4 日	4589	51.7	2988.22	32870.5	32480	11	6.5741	晴
2 月 5 日	4630	51.7	2915.3	32068.31	31430	11	6.41	晴
2 月 6 日	4549	51.7	2921.13	32132.51	31500	11	6.4265	晴
2 月 7 日	4580.5	51.7	2982.54	32807.99	32200	11	6.56	晴
2 月 8 日	4552	50.1	2923.23	32155.58	31570	11	6.43	晴
2 月 9 日	4468.7	51.7	2886.96	31756.52	31220	11	6.35	晴间多云
2 月 10 日	4603	51.7	2954.66	32501.27	31850	11	6.5	晴

（续）

日期	最大负荷/kW	最小负荷/kW	平均负荷/kW	逆变器电量/kW·h	上网电量/kW·h	日运行小时数/h	有效利用小时数/h	天气状况
2月11日	4599	51.7	3011.07	33121.77	32550	11	6.624	晴
2月12日	4590	52.3	2722.25	29944.78	29330	11	5.99	多云
2月13日	4470.1	51.2	2969.92	32669.12	32270	11	6.533	晴
2月14日	4600	50.3	2625.25	28877.78	28350	11	5.776	晴有风沙
2月15日	4593	50.3	2723.73	29961.04	29400	11	5.99	晴间多云
2月16日	4466.66	47.32	2036.39	22400.32	21770	11	4.48	阴
2月17日	2380	47.32	668.61	4011.65	3990	6	0.8	阴
2月18日	4580	47.32	3002.11	31522.2	30940	10.5	6.3	晴间多云
2月19日	4613.9		3084.81	33932.87	33250	11	6.78	晴
2月20日	4600	46.32	3058.76	33646.34	33040	11	6.72	晴
2月21日	4588.8	45.7	2139.38	23533.2	23030	11	4.7	阴
2月22日	4628.3	45.68	2812.65	30939.11	30380	11	6.187	晴间多云
2月23日	4602	41.8	3030	33330	32690	11	6.66	晴
2月24日	4631	48.9	2545.09	27996	27440	11	5.6	多云
2月25日	3509	45	1840	20238	19950	11	4.0478	阴有风沙
2月26日	4606	130	2516	27672	27090	11	5.5344	晴间多云
2月27日	4596	298	2532	27862	27510	11	5.5724	晴转多云
2月28日	4613	562	3052	34285	33600	11.24	6.857	晴
合计				814752	802410		5.834	

二、施耐德光伏逆变器

施耐德电气成立于1983年，2010年有183亿马克销售收入，32%来自于新经济体和可再生能源，有114000名员工，分支机构遍布100多个国家。太阳能行业著名品牌Xantrex公司于2008年加入施耐德电气，从事逆变器生产，Xantrex公司总部位于加拿大温哥华，在美国、德国和西班牙有分公司，员工大约800名。

1）其三相并网逆变器特性如下：

① 自动启动、关断和故障自检功能。用户可自定义功率追踪和调整延时时间，能够使逆变器投入运行数量和光伏阵列输出功率达到最佳的匹配，即用户可以根据实际天气情况设置整个逆变器系统的启动和关断顺序。此外，在需要大功率的场合，如大型光伏电站，多台逆变器可以方便地实现并联运行。

② 电流源根据外电网的波形同步输出。

③ 外电网故障，逆变器停止工作。

④ 全世界范围内超过300MW安装容量。

⑤ 单体重量轻，紧凑、易于安装。

⑥ 5年的质量保证，保证期内可更换模块。

⑦ 符合欧盟标准并取得相关认证。

⑧ 高效的高频隔离设计。

⑨ 可应用于单晶、多晶及薄膜电池。

⑩ 较高的效率，能提供较高的峰值效率和平均效率，从而使太阳电池板产生的宝贵能量都能够转化为可用的电能。

⑪ 采用了最大功率点跟踪（MPPT）技术，使逆变器可从光伏阵列捕获更多的能量，同时，为了减少变换过程中的功率损耗，逆变器的开关管使用了 IGBT，使光伏发电系统收益最大化。最大功率点跟踪（MPPT）算法对光照强度的快速响应能力，使与光伏阵列相连的逆变器能够最大限度地输出能量。单相逆变器从直流 195～600V 宽泛的电压输入范围，确保了逆变器可以白天早些时候开启，傍晚晚些时候关闭。同时，允许更加灵活地安排光伏阵列的尺寸大小。

⑫ 图形化的用户界面软件可用于实时地通信、监控，GT 系列逆变器均带有 LCD 显示，可以提供各种信息，其中包括逆变器发电功率、每日的发电功率、光伏阵列电压和电流、公用电网电压和频率、向电网输送的功率实时值、故障信息等，该软件的图形用户界面提供选择，以便用户可以直接通过计算机或通过调制调解器连接，与逆变器实时通信。此外，还有诊断和存档功能。具有标准的通信接口，提供了一个独立的 RS232 接口和 2 个 XanbusRJ45 通信接口，与计算机相连时，无需另外的通信接口或通信卡。

⑬ 自带保护特性，包括过电压和欠电压保护、频率保护。且它的抗孤岛效应保护功能可以在公用电网发生故障时，使逆变器自动停止向电网输电；带有一个逆变器关闭及重启切换开关。

⑭ 快速响应的本地化售后服务。

⑮ 500kW 三相并网逆变器主要参数见表 11-11。

表 11-11　500kW 三相并网逆变器主要参数

	GT500E	GT500E/DPG	GT500E/MVX
交流额定功率/kW	500	500	500
交流电压/V	315	315	208
欧洲效率(%)	97.6	97.9	97
最大效率(%)	98.1	98.3	98
直流输入/V	450～940	495～940	450～930
最大功率点跟踪范围(MPPT)	450～800	495～800	310～480
待机功耗/W	<100		
功率因数	>0.99(20%以上功率时) 功率因数可调±0.93		
温度范围/℃	-10～45	-10～45	-35～45
海拔/m	1500	1500	4500
尺寸/(cm)	211.2×240.6×60.5	211.2×240.6×60.5	211.2×240.6×60.5
外壳防护等级	IP21	IP21	
冷却方式	强制对流冷却		
重量/kg	1770	1770	1587

注：GT500 MVX——专为高海拔应用设计。

2）高海拔对设备产生影响的因素有两个：

① 散热能力。随着海拔的升高，空气密度减小，气压降低，不利于设备散热；随着海拔的升高，温度降低，有利于设备散热。

② 绝缘水平。空气密度随海拔增高而减小，空气的介电强度下降，电气间隙和爬电距离相应增大，放电电压明显降低，导致电器的外部绝缘强度下降，造成开关在空气中灭弧困难。应对措施是采用高质量的关键部件，如接触器和断路器，海拔高于1500m，可应用相关的降容系数来设计，如对于接触器而言，额定运行电压取0.8，额定运行电流取0.9；在1500m以下无需降容。

3）特殊设计方案在海拔4500m以下无需降容，常规的标准设计在1500m以下无需降容，可选件加热器确保GT500 MVX的最低环境温度为－35℃，最大开路电压为直流600V，在安全运行模式下即可满足高海拔对绝缘等级的要求。

4）针对某类光伏组件可进行特殊设计，可升高电压最小值到直流360V，从而使电流减小，散热减少36%。

5）进行热计算仿真，确保可靠运行。

第七节　国内光伏并网逆变器状况

国内生产逆变器的厂商众多，但专门从事光伏发电系统，进行大功率逆变器生产的厂商并不多，不少厂商以原来的车载逆变器、通信逆变器、电力逆变器、UPS等电源技术为基础，在逆变器行业拥有多年经验，从事光伏逆变器的生产和研发后，已经具备一定的规模和竞争力。国内生产光伏逆变器的厂商主要包括：合肥阳光、北京科诺伟业、北京索英、南京冠亚、志诚冠军、上海英伟力新能源等。

2010年上海广电电气与美国AE公司合作生产500kW太阳能并网逆变器，取得了CE认证，2010年四季度实现了12台的销售量。这种逆变器采用水冷系统，适合用于沙漠酷热地区。

国内产品体积大、噪声大、冷却效果差，监控系统不够完善。

一、合肥阳光电源光伏逆变器

1、技术参数

合肥阳光电源光伏逆变器技术参数见表11-12。

表11-12　合肥阳光电源光伏逆变器技术参数

类　　型	SG500K3	SG500KTL
性能及技术参数	满足德国要求的有功功率降额功能（100%、60%、30%、0%）	
	无功功率可调，±0.95	
	低频隔离变压器	无变压器设计
	最高转换效率达97.3%	最高转换效率达98.7%
	模块化设计	
	精确的输出电能计量	

（续）

类　　型	SG500K3	SG500KTL
性能及技术参数	多语种触摸屏监控界面	
	适应严酷的电网环境	
	辅助电加热(可选)	
	超过 3000m 降额使用	
	德国威图机柜	
	低电压穿越功能	
	欧盟 CE 认证、金太阳认证	意大利 DK5940 认证、欧盟 CE 认证、金太阳认证
直流侧参数		
最大直流电压/V	900	
启动电压/V	470	
满载 MPPT 范围/V	450～820	
最低电压/V	450	
最大直流功率/kWp	550	
最大输入电流/A	1200	
推荐光伏阵列开路电压/V	700	
交流侧参数		
额定输出功率/kW	500	
最大交流输出电流/A	793	1176
额定电网电压/V	400	315
允许电网电压/V	310～450	250～362
额定电网频率/Hz	50/60	50/60
允许电网频率/Hz	47～51.5/57～61.5	
总电流波形畸变率	<3%(额定功率)	
直流电流分量	<0.5%(额定输出电流)	
功率因数	0.95(超前)～0.95(滞后)	
最大效率(%)	97.3(含变压器)	98.7
欧洲效率(%)	96.7(含变压器)	98.5
防护等级	IP20(室内)	
夜间自耗电/W	<100	
允许环境温度/℃	-25～55	
冷却方式	风冷	
允许相对湿度	0～95%,无冷凝	
允许最高海拔	6000m(超过 3000m 降额使用)	
显示与通信		
显示	触摸屏	
标准通信方式	RS485	
可选通信方式	以太网	
外形尺寸(宽×高×深)/(mm)	2800×2180×850+1800×2180×1200	2800×2180×850
重量/kg	3300	2280

2. SG500K3

（1）外形图　图 11-38 为合肥阳光 SG500K3 光伏逆变器。

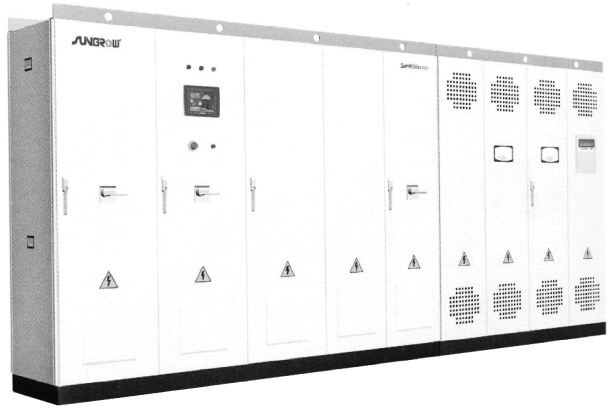


图 11-38　合肥阳光 SG500K3 光伏逆变器

（2）电路框图　图 11-39 为合肥阳光 SG500K3 光伏逆变器电路框图。

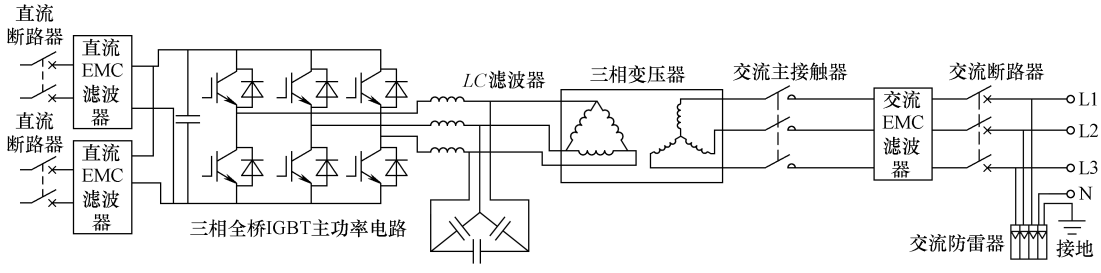


图 11-39　合肥阳光 SG500K3 光伏逆变器电路框图

3. SG500KTL

（1）外形图　图 11-40 为合肥阳光 SG500KTL 光伏逆变器。



图 11-40　合肥阳光 SG500KTL 光伏逆变器

（2）电路框图　图 11-41 为合肥阳光 SG500KTL 光伏逆变器电路框图。

（3）SG500KTL 兆瓦级方案　图 11-42 为合肥阳光 SG500KTL 兆瓦级方案。

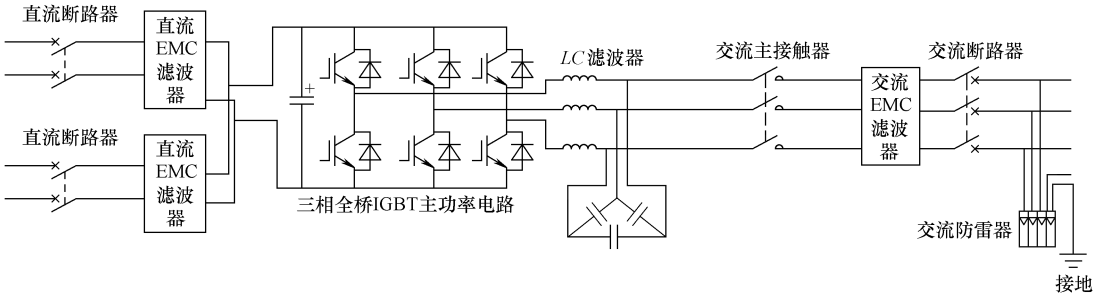


图 11-41　合肥阳光 SG500KTL 光伏逆变器电路框图

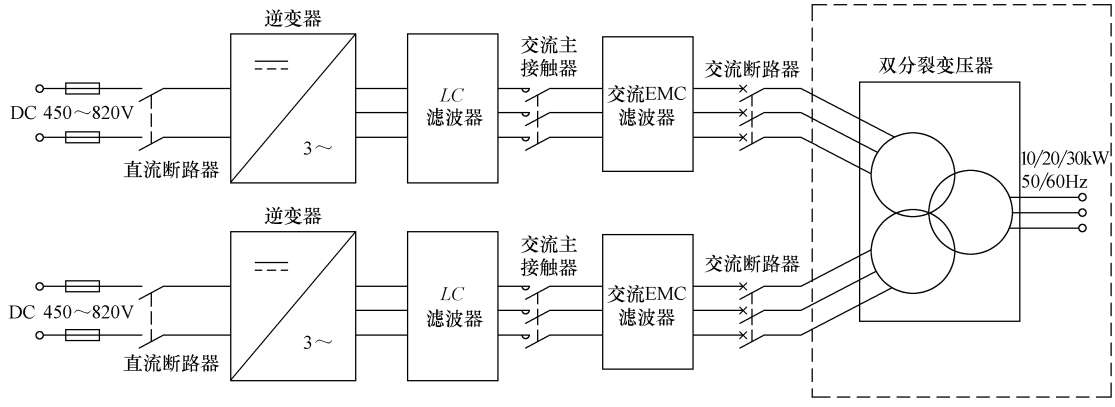


图 11-42　合肥阳光 SG500KTL 兆瓦级方案

光伏并网逆变器主要分为集中式和分布式两大类，阳光电源的光伏并网逆变器属于集中式并网逆变器，是将多个光伏组件串并联组合，形成足够高的电压或功率，再经逆变器统一并网。国内冠亚、志成冠军企业等是集中式并网逆变器的生产厂商，但从规模、品种系列等方面均不及合肥阳光电源。

二、英伟力新能源光伏逆变器

英伟力新能源科技（上海）有限公司（英伟力新能源）创立于 2008 年，采取了与传统集中式并网逆变器完全不同的发展思路，是国内首家研制分布式光伏并网微型逆变器的公司。微逆变器技术通过为每块光伏组件，单独匹配一个具有独立的直/交流转化功能和 MPPT 功能的逆变器，能够实现单块光伏组件发电效率的最大化。

1. 英伟力微逆变器产品的主要性能特点

1）功率等级：与单块光伏组件匹配，180～300W。

2）输入电压等级：与单块光伏组件匹配，20～40V。

3）输出电压：交流 220V。

4）最大变换效率：95%。

5）最大功率点跟踪（MPPT）效率：99.9%。

6）完善的通信及保护功能。

集中式光伏并网逆变器起步早、产品系列齐全，是目前光伏逆变器市场的主流产品，占据着主导地位，但随着技术日趋成熟和商业化应用的不断发展，集中式光伏并网发电系统存

在的问题也逐渐引起了关注，这些问题包括：

1）可靠性。集中式光伏并网发电系统中，逆变器是整个系统中的关键环节，也是薄弱环节，单台逆变器的失效会导致整个系统的瘫痪。

2）MPPT 跟踪效率。虽然大多数集中光伏逆变器生产厂商宣称跟踪效率可以达到 99.9%，事实上，由于其 MPPT 跟踪针对的是整个光伏阵列，无法兼顾到每块光伏组件，因此由组件匹配、局部遮挡等因素引起的功率损失非常大。

3）系统可扩展性。集中式系统的特点决定了其系统可扩展性较差。

2. 微逆变器的优点

分布式微逆变器技术是为集中式光伏并网逆变器存在的诸多问题而提出并发展起来的，其起步晚、产品系列尚不齐全，目前仍处于起步阶段，但从目前的产品技术性能来看，微逆变器丝毫不逊色于传统集中式逆变器产品，甚至优于集中式逆变器产品。微逆变器通过与单块光伏组件直接相连，可以实现单块光伏组件真正的 MPPT，使光伏组件的发电效率最大化，其安装、扩展灵活，即插即用，可以实现模块化生产，微逆变器生产厂商可以与光伏组件生产厂家联合，为光伏组件量身定制逆变器，从而加快其商业化和市场化进程。分布式微逆变器技术应用前景广阔，特别适合城市、光伏建筑等应用领域，微逆变器技术若与光伏组件生产厂家联合，将加快微逆变器技术的进一步发展。

3. 微逆变器的缺点

1）可靠性和寿命不能与电池组件等同，一旦损坏，更换比较麻烦。

2）与集中式逆变器相比，效率尚低。

3）成本较高。

4）集中控制困难。

第十二章　太阳电池的支架及支架基础

我国西部是广袤的沙漠，日照条件好，是建设大型沙漠电站的好场所，但是沙漠地基松软，有流沙，有沙尘暴，盐渍土，缺水。再者，冬季昼夜温差大，西北地区冬季来得早，11月至第二年4月，长达半年室外不可施工。这些恶劣的条件对薄膜太阳电池光伏电站的建设和营运是有严重影响的。薄膜太阳电池是用玻璃作衬底的，没有铝合金边框，玻璃是易碎品，装夹力过大，或装夹不在一个平面，受到扭力，都会造成破损。另外要考虑装夹材料受昼夜温差产生的热胀冷缩交变应力而丧失功能；要能承受沙尘暴的肆虐；沙尘暴过后，电池板上就积上厚厚的一层沙尘，要考虑除尘。这些问题的解决电站设计时都要加以妥善考虑。

第一节　工 程 地 质

一、地形地貌

这里介绍的地形地貌是笔者主持建设的一座10MW的薄膜光伏电站工程，具有代表性。该工程在格尔木市东约30km的荒漠沙地区域内，南侧距东西向展布的昆仑山脉布尔汉布达山北坡坡角约9km，场地区处于山前冲洪积平原，地貌类型为荒漠沙地。场址位于柴达木盆地西南侧边缘地带，工程区域南侧为基岩形成的低山区，即昆仑山脉布尔汉布达山，范围内地势总体上南高北低，地面高程自南部2875m向北部降至2867m，低8m，地形开阔平坦，场区内冲沟不发育。

二、地层岩性

场址区地层自上而下分为两层：第四系全新统风积（Q_4^{eol}）粉细砂层、砾砂层透镜体。

上层上部是粉细砂层，灰黄色～黄色，广泛分布于场址区地表，属季节性冻土，一般分布厚度0.6～1.5m，最大厚度2.3m，松散～稍密、稍湿，主要成分为长石、石英粉细砂，少量粉砂，质地纯净，颗粒均匀。

第二层：第四系全新统风积（Q_4^{eol}）粉细砂层，灰黄色，广泛分布于场址区下部，分布厚度大于15m（勘探时未穿透），中密～密实、稍湿～湿，主要成分为长石、石英粉细砂，质地纯净，颗粒均匀。第二层上部，灰黄色～杂色，厚度一般为0.3～1.1m。砾石平均含量为15%～20%，一般粒径为2～15mm，砾石岩性以泥岩、凝灰岩、石英岩、花岗岩为主，磨圆度差，呈次圆状，分选较好；砾砂含量为40%，成分为长石、石英砂。该层中密～密实、稍湿～湿，在第二层局部分布，呈夹层或透镜体状。

三、水文地质

距场址区最近的地表水为西部的格尔木河，距场址区最近约35km，为场内地下水聚集地及排泄区。场址内地下水径流方向由南向北，含水地层为风积粉细砂层，地下水类型为孔隙潜水，场址区地下水埋深大于30m，地下水补给来源主要来自大气降雨和盆地南侧山区基岩裂隙水径流补给。

四、冻土深度

工程区气候干旱少雨，场址西南部地下水深埋，东北部地下水埋深较浅，场址区存在季节性冻土，根据《中国季节性冻土标准冻深线图》及当地工程经验，场地区标准季节性冻土深度为100cm。

五、不良物理地质现象

场址区地势平坦、开阔，不存在滑坡、不稳定体、泥石流、移动沙丘等不良物理地质现象，适宜修建光伏发电工程，但场址区西侧及北侧均有移动性沙丘分布，风季沙尘会对电站运行有一定影响。

六、地基土物理力学性质建议值

根据勘探资料、原位测试、室内试验及工程类比，提出青海××格尔木10MWp光伏电站工程地基土物理力学性质建议值，见表12-1。

表12-1 地基土物理力学性质建议值

土层编号	岩土名称	密度 ρ /(g/cm^3)	干密度 ρ_d/(g/cm^3)	压缩系数 a_{1-2} /MPa^{-1}	压缩模量 E_s /MPa	凝聚力 C /kPa	内摩擦角 ϕ /(°)	承载力 /kPa
①层	粉细砂层	1.90	1.87	0.4	14	0	28~30	160
②层	粉细砂层	2.00	1.92	0.1	17	0	30~33	180~220
②1层	砾砂夹层	2.10	2.00	0.08	20	0	38	250

粉细砂层开挖坡比建议值为1:1.5，并做好支护处理工作。

七、场址区接地电阻率

光伏电站接地系统是发电机组安全运行的基本保证之一，它主要供电气设备的工作接地、保护接地与建筑物的防雷使用。接地系统的接地电阻大小是该系统的重要指标之一，而地电阻率的高低又是直接影响接地电阻大小的重要因素，对光伏电站场址区接地电阻率进行测试，可为电站场址提供各岩土层的地电阻率资料，为接地设计与接地阻抗计算提供依据。

根据《水力发电厂接地设计技术导则》（DL/T 5091—1999）第14.3.3条，青海××格尔木光伏电站地电阻率采用对称四极（A-M-N-B）方法中的温纳尔装置（Wenner四极法）：选取$\frac{AB}{MN}=3$（$MN=a$）。最小$\frac{AB}{2}=0.90$m，$\frac{MN}{2}=0.3$m（$a=0.6$m）；最大$\frac{AB}{2}=60$m，$\frac{MN}{2}=20$m（$a=40$m）。该装置的特点是供电电极A、B和测量电极M、N以测点为中心向两侧同时移动。青海××格尔木光伏电站地电阻率采用对称四极（A-M-N-B）方法中的温纳尔装置，共布置了6组测点，共60个电阻率数据点，包括1组地电阻率质量检查点，电阻率测试结果见表12-2，图12-1为典型电阻率曲线。

表12-2 电阻率测试结果

岩性	层深	电阻率 ρ/(Ω·m)			标准差 ρ/(Ω·m)	变异系数 δ	统计样本个数 n
		最大值 ρ_{max}	最小值 ρ_{min}	平均值 $\bar{\rho}_m$			
粉细砂层	0~1m	215	39.3	105	44.5	0.42	18
	1~5m	118	41.5	77.9	25.4	0.33	24
	5m以下	129	62.9	86.8	19.0	0.22	18

测试区域内电性层的电阻率变化范围为 39.3～215.0Ω·m，可按大值选取。

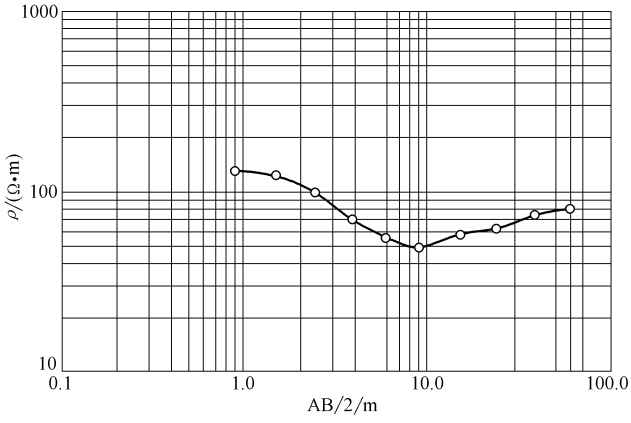


图 12-1　典型电阻率曲线

八、场址区的主要工程地质问题评价

1. 岩土工程勘察分级

依据《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001），场址区岩土工程勘察分级如下：

1）根据工程的规模和特征，以及因岩土工程问题造成工程破坏或影响正常使用的后果，工程重要性等级为二级，即后果严重的一般工程。

2）场址区地震设防烈度为Ⅶ度区，场地复杂程度为二级，即中等复杂程度场地。

3）根据地基复杂程度，地基土存在季节性冻土等特殊性土，地基复杂程度为二级，即中等复杂地基。

4）根据工程重要性等级、场地复杂程度等级和地基复杂程度等级，该工程岩土工程勘探等级为乙级。

2. 抗震安全性评价

（1）地震基本烈度　工程区地震分区为青藏高原中部地震区（$Ⅰ_7$）、托素湖地震亚区（$Ⅲ_{17}$）。根据 1:400 万《中华人民共和国地震构造图》，近时期地震主要分布在盆地东部的塔塔稜河以南、诺木洪镇以北、达布逊湖以东、托素湖以西地区，多为 6 级以下地震，表 12-3 为场址区附近发生地震情况。

表 12-3　场址区附近发生地震情况

地　　点	时　　间	震　　级
柴达木盆地南部乌图美仁	1952 年 10 月 6 日	6.0 级
北霍鲁逊湖以北	1962 年 5 月 24 日	6.8 级
大柴旦以东的绿草山煤矿、新生煤矿附近	1977 年 1 月 19 日	6.3 级
柴达木盆地西部红柳泉一带	1977 年 1 月 2 日	6.4 级
柴达木盆地西北大柴旦	2003 年 6 月 1 日	6.6 级
	2008 年 11 月 10 日	6.3 级
	2009 年 8 月 29 日	6.4 级
	2009 年 11 月 5 日	5.1 级

可见，震区距工程均较远。

根据国家地震局 2001 年 1:400 万《中国地震动峰值加速度区划图》及《中国地震动反应谱特征周期区划图》（GB 18306—2001）资料，工程区地震动峰值加速度为 0.1g，地震动反应谱特征周期为 0.45s，相对应的地震基本烈度为Ⅶ度。场址区属构造基本稳定区。

（2）地基土类型及建筑场地类别　场址区地势平坦、开阔，地基土以稍密～中密的粉细砂为主，地基土类型为中软土。土层等效剪切波速为 120～160m/s，覆盖层厚度为 3～50m，工程区属可进行建设的抗震较有利地段，建筑的场地类别为Ⅱ类。场址区及附近无活动性断裂通过，不存在发震断裂。

（3）地基土的液化评价　场址区地震烈度为Ⅶ度，地基土岩性为粉细砂层，为强透水地层，根据周边民井调查资料，场址区地下水埋深一般大于 30m，雨季最高水位时地下水埋深约 20m，即地面以下 0～20m 范围内，不存在饱和砂层，故粉细砂层不存在振动液化问题。

3. 地基土腐蚀性

本次勘察对钻孔内 0～5m 范围内土样进行了易溶盐分析，分析结果见表 12-4。地基土对砌体结构及钢结构腐蚀性评价见表 12-5。判定地基土对混凝土及砌体结构无腐蚀性，对钢结构及钢筋砌体结构中的钢筋具中等腐蚀性，应采取必要的防腐措施。

表 12-4　易溶盐分析结果

土样编号	取土深度/m	阳离子			阴离子					易溶盐总量		pH 值
		钾＋钠 $K^+ + Na^+$ /(mg/kg)	钙 Ca^{2+} /(mg/kg)	镁 Mg^{2+} /(mg/kg)	氯根 Cl^- /(mg/kg)	硫酸根 SO_4^{2-} /(mg/kg)	重碳酸根 HCO_3^- /(mg/kg)	碳酸根 CO_3^{2-} /(mg/kg)	氢氧根 OH^- /(mg/kg)	/(mg/kg)	(%)	
Zk7-1	1.0～1.3	2010.0	246.4	54.2	2669.3	1133.8	94.6	15.6	0.0	6314.8	0.63	8.9
Zk7-2	2.0～2.3	2739.8	75.2	54.2	3566.0	663.4	125.7	46.2	0.0	7270.4	0.72	9.4
Zk7-3	3.0～3.3	1089.3	241.2	42.2	1116.1	1230.7	94.6	15.6	0.0	3829.7	0.39	8.9
Zk7-4	4.0～4.3	1801.3	50.4	63.4	2376.3	433.9	141.5	46.2	0.0	4913.4	0.49	9.5
Zk7-5	5.0～5.3	1395.0	286.4	60.2	1701.2	1170.2	141.5	15.6	0.0	4770.2	0.48	8.9
Zk11-1	1.0～1.3	1104.0	85.6	24.2	1262.4	542.4	125.7	46.2	0.0	3190.5	0.32	9.4
Zk11-2	2.0～2.3	640.3	643.2	30.2	1067.8	1350.7	94.6	15.6	0.0	3842.4	0.38	8.9
Zk11-3	3.0～3.3	913.3	266.4	45.1	999.0	1098.2	94.6	31.2	0.0	3447.7	0.34	8.9
Zk11-4	4.0～4.3	945.0	191.2	48.2	1089.5	868.8	94.6	31.2	0.0	3268.5	0.33	9.0
Zk16-1	1.0～1.3	392.0	278	0.0	512.0	485.0	312.0	38.0	0.0	1863.0	0.19	8.8
Zk16-2	2.0～2.3	395.0	228	0.0	427.0	485.0	312.0	38.0	0.0	1751.0	0.16	8.8
最大值		2739.8	643.2	63.4	3566.0	1350.7	312.0	46.2	0.0	7270.4	0.72	9.5
最小值		392	50.4	0.0	427.0	433.9	94.6	16.6	0.0	1751.0	0.16	8.8
平均值		1228.7	235.6	38.4	1526.1	772.0	148.3	24.0	0.0	4042.0	0.4	9.0

4. 环境水的腐蚀性

场址范围内及周边地表水不发育，地下水埋藏较深，地下水的补给主要来源于红柳沟河渗入，由北向南径流。经对场址区附近河东农场七连、八连民井地下水采样分析结果见表 12-6。环境水对混凝土的腐蚀性评价见表 12-7。

表 12-5　地基土对砌体结构及钢结构腐蚀性评价

评价类型	腐蚀介质	界限指标	腐蚀	试验指标	腐蚀程度	备注
按环境类型土对混凝土结构的腐蚀性评价	硫酸盐含量 SO_4^{2-} /(mg/kg)	<2250	无腐蚀	772.02 (433.92~1350.72)	无腐蚀	按照规范,高寒区、干旱区含水量 $\omega<20\%$ 的弱透水层或含水量 $\omega<10\%$ 的弱强水层,环境类型应划分为Ⅲ级
		2250~4500	弱腐蚀			
		4500~9000	中等腐蚀			
		>9000	强腐蚀			
	镁盐含量 Mg^{2+} /(mg/kg)	<4500	无腐蚀	38.38 (0.00~63.36)	无腐蚀	
		4500~6000	弱腐蚀			
		6000~7500	中等腐蚀			
		>7500	强腐蚀			
	苛性碱含量 OH^- /(mg/L)	<85500	无腐蚀	0.000	无腐蚀	
		85500~105000	弱腐蚀			
		105000~150000	中等腐蚀			
		>150000	强腐蚀			
按地层渗透性土对混凝土结构的腐蚀性评价	pH 值	>6.5	无腐蚀	9.03 (8.78~9.49)	无腐蚀	按照规范,该区为强透水地层
		5.0~6.5	弱腐蚀			
		4.0~5.0	中等腐蚀			
		<4.0	强腐蚀			
土对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性评价	$Cl^- + 0.25\ SO_4^{2-}$ /(mg/kg)	<400	无腐蚀	1532.04 (431.15~3577.53)	中等腐蚀	$\omega<20\%$ 的土层
		400~750	弱腐蚀			
		750~7500	中等腐蚀			
		>7500	强腐蚀			
土对钢结构腐蚀性评价	pH 值	>5.5	无腐蚀	9.03 (8.78~9.49)	无腐蚀	
		5.5~4.5	弱腐蚀			
		4.5~3.5	中等腐蚀			
		<3.5	强腐蚀			

表 12-6　水质分析结果

样品编号			S1	S2
环境水类型			地下水	地下水
取样深度		m	18.00	21.00
阳离子	钾+钠 $K^+ + Na^+$	mg/L	93.25	166.25
		mmol/L	3.73	6.65
	钙 Ca^{2+}	mg/L	61.60	68.40
		mmol/L	1.54	1.71
	镁 Mg^{2+}	mg/L	65.04	57.36
		mmol/L	2.71	2.39
	NH_4^+	mg/L	0.10	0.20
		mmol/L	0.006	0.011

（续）

样品编号			S1	S2
环境水类型			地下水	地下水
取样深度		m	18.00	21.00
阴离子	氯根 Cl^-	mg/L	119.28	185.67
		mmol/L	3.36	5.23
	硫酸根 SO_4^{2-}	mg/L	140.16	144.96
		mmol/L	1.46	1.51
	重碳酸根 HCO_3^-	mg/L	362.95	402.60
		mmol/L	5.95	6.60
	碳酸根 CO_3^{2-}	mg/L	0.00	0.00
		mmol/L	0.00	0.00
	氢氧根 OH^-	mg/L	0.00	0.00
		mmol/L	0.00	0.00
$CaCO_3$	总硬度	mg/L	425.00	410.00
	暂时硬度	mg/L	297.50	330.00
	永久硬度	mg/L	127.50	80.00
	负硬度	mg/L	0.00	0.00
游离二氧化碳		mg/L	29.70	25.30
侵蚀性二氧化碳		mg/L	0.00	0.00
总碱度		mmol/L	5.95	6.60
总酸度		mmol/L	0.68	0.58
总矿化度		mg/L	842.38	1025.44
pH			7.66	7.83
按矿化度分类			淡水	低矿化水（微咸水）
按 pH 值分类			弱碱性水	弱碱性水
按硬度分类			极硬水	极硬水

表 12-7　环境水对混凝土的腐蚀性评价

评价类型	腐蚀介质	界限指标	腐蚀等级	试验指标	腐蚀程度评价	备注
按环境类型对混凝土结构腐蚀性评价	硫酸盐含量 SO_4^{2-} /（mg/L）	<1500	无腐蚀	142.56（140.16～144.96）	无腐蚀	高寒区、干旱区含水量 ω < 20% 的弱透水层或含水量 ω < 10% 的弱强水层，环境类型应划分为Ⅲ级
		1500～3000	弱腐蚀			
		3000～6000	中等腐蚀			
		>6000	强腐蚀			
	镁盐含量 Mg^{2+} /（mg/L）	<3000	无腐蚀	61.20（57.36～65.04）	无腐蚀	
		3000～4000	弱腐蚀			
		4000～5000	中等腐蚀			
		>5000	强腐蚀			

（续）

评价类型	腐蚀介质	界限指标	腐蚀等级	试验指标	腐蚀程度评价	备注
按环境类型对混凝土结构腐蚀性评价	铵盐含量 NH_4^+ /(mg/L)	<800	无腐蚀	0.15（0.10～0.20）	无腐蚀	高寒区、干旱区含水量 ω <20% 的弱透水层或含水量 ω <10% 的弱强水层，环境类型应划分为Ⅲ级
		800～1000	弱腐蚀			
		1000～1500	中等腐蚀			
		>1500	强腐蚀			
	苛性碱含量 OH^- /(mg/L)	<57000	无腐蚀	0.000	无腐蚀	
		57000～70000	弱腐蚀			
		70000～100000	中等腐蚀			
		>100000	强腐蚀			
	总矿化度 /(mg/L)	<50000	无腐蚀	933.91（842.38～1025.44）	无腐蚀	
		50000～60000	弱腐蚀			
		60000～70000	中等腐蚀			
		>70000	强腐蚀			
按地层渗透性对混凝土结构腐蚀性评价	pH 值	>6.5	无腐蚀	7.75（7.66～7.83）	无腐蚀	该区为强透水地层
		5.0～6.5	弱腐蚀			
		4.0～5.0	中等腐蚀			
		<4.0	强腐蚀			
	侵蚀性 CO_2 /(mg/L)	<15	无腐蚀	0.000	无腐蚀	
		15～30	弱腐蚀			
		30～60	中等腐蚀			
		>60	强腐蚀			
	HCO_3^- /(mmol/L)	>1.0	无腐蚀	6.275（5.95～6.60）	无腐蚀	
		0.5～1.0	弱腐蚀			
		<0.5	中等腐蚀			
		—	强腐蚀			
对钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀性评价	$Cl^- + 0.25SO_4^{2-}$ /(mg/L)	<100	无腐蚀	188.12（154.32～221.91）	弱腐蚀	干湿交替
		100～500	弱腐蚀			
		500～5000	中等腐蚀			
		>5000	强腐蚀			
对钢结构腐蚀性评价	$Cl^- + SO_4^{2-}$ /(mg/L)	<500	弱腐蚀	295.04（259.44～330.63）	弱腐蚀	pH 值 3～11
		≥500	中等腐蚀			
		任何浓度	强腐蚀			pH <3

水质分析表明，场址区地下水总矿化度为 842.38～1025.44mg/L，属淡水～微咸水（低矿化水），pH 值为 7.66～7.83，属弱碱性水，总硬度为 410.0～425.0mg/L，属极硬水。地下水对混凝土及砌体结构无腐蚀性，对钢筋混凝土中钢筋及钢结构具弱腐蚀性，需做好防腐措施。

5. 盐渍类土工程地质评价

《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）中对盐渍土的定义为：当岩土中易溶盐的含量大于0.3%，并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特性时，应判定为盐渍土。

经对钻孔内0～5m范围内土样进行溶盐分析实验，总易溶盐含量为0.16%～0.72%，平均值为0.40%，仅部分土样易溶盐总量小于0.3%，判定地基土5.0m以上为盐渍类土。

盐渍土按含盐化学成分分类，表12-8为土壤盐渍土分类。

表12-8 土壤盐渍土分类

土样编号	取样深度	Cl^-	SO_4^{2-}	$c(Cl^-)/2c(SO_4^{2-})$	易溶盐百分含量（%）	pH	盐渍土分类
	m	mmol/100g					
Zk7-1	1.00～1.30	751.9	118.1	3.18	0.63	8.93	氯盐渍土
Zk7-2	2.00～2.30	1004.5	69.1	7.27	0.72	9.40	氯盐渍土
Zk7-3	3.00～3.30	314.4	128.2	1.23	0.39	8.93	亚氯盐渍土
Zk7-4	4.00～4.30	669.5	45.2	7.41	0.49	9.49	氯盐渍土
Zk7-5	5.00～5.30	479.2	121.9	1.97	0.48	8.86	亚氯盐渍土
Zk11-1	1.00～1.30	355.6	56.5	3.15	0.32	9.38	氯盐渍土
Zk11-2	2.00～2.30	300.8	140.7	1.07	0.38	8.87	亚氯盐渍土
Zk11-3	3.00～3.30	281.4	114.4	1.23	0.34	8.87	亚氯盐渍土
Zk11-4	4.00～4.30	306.9	90.5	1.70	0.33	9.04	亚氯盐渍土

亚氯盐渍土占土样总量的56%，其次为氯盐渍土，占44%。按含盐量分类，氯及亚氯盐平均含盐量0.45%，属弱盐渍土。

场址区位于干旱半干旱地区，因蒸发量大，降雨量小，毛细作用强，极利于盐分在地表聚集。盐渍类土中盐分的分布随季节气候和水文地质条件而变化，旱季时盐分向地面聚集，这时上部土层含盐量较大，局部土层内形成盐晶粒，随深度增加含盐量逐渐减少。雨季时地表盐分被地面水冲洗溶解，并随水渗入地下，表层含盐量减少，地表白色盐霜甚至消失。因此，在盐渍类土地区，经常发生盐类被淋溶和盐类聚集的周期性过程。

盐渍类土对地基土的力学强度影响较大，即土的力学强度随盐渍类土的总含盐量的增加而减少，其原因是由于盐渍类土具有盐胀性和溶陷性。根据盐渍类土的工程性质，结合光伏电场盐渍类土的特征，经分析有关盐渍类土的试验成果，工程中应注意采用防水、排水措施，防止由于水的作用而导致溶陷引起的地基变形破坏。

6. 季节性冻土评价

根据《中国季节性冻土标准冻深线图》，工程区标准季节性冻土深度为1.0m。根据勘探资料，场址区季节性冻土为粉细砂层，地下水埋深较大，季节性冻土带内土层含水量低，一般呈干燥或稍湿，冻土构造类别为整体构造，仅于孔隙中见少量晶粒状冰，冰晶融化后原土结构不发生改变，冻土类型为少冰冻土。虽冻土层粒径<0.075mm，含量>15%，但冻土层含水量<10%，冻结期间地下水位埋深>15m，故冻胀等级为Ⅰ级，冻胀类别为不冻胀，季节性冻土对建筑物基础影响不大。

7. 地基土工程地质评价

场址区地层自上而下分为两层：第四系全新统风积（Q_4^{eol}）粉细砂层（①层、②层）、砾砂层透镜体（②1 层）。

场址区地基土上部粉细砂层（第①层）1.0m 位于季节性冻土带内，含水量较低，冻土类型为少冰冻土，冻胀等级为Ⅰ级，冻胀类别为不冻胀，季节性冻土对建筑物基础影响不大，该层厚度为 2.0m 左右，结构松散～稍密，承载力低，具压缩变形特征，不建议作为天然地基使用。冻土带以下粉细砂层及砾砂透镜体（第②层、②1 层），结构中密～密实，承载力相对较高，工程性能较好，可作为持力层或基础下卧层，地基承载力建议值为 180～220kPa。

场址区地势较平坦、开阔，不存在滑坡、不稳定体、泥石流、移动沙丘等不良物理地质现象，适宜修建光伏发电工程。

九、集控中心工程地质条件

集控中心工程地质条件和场址区基本一致，冻土带以下的②粉细砂层中密～密实状，承载力相对较高，可作为基础持力层和下卧层。

十、施工水源及生活用水水源

建议施工水源和生活用水水源采用自备水井解决，井深 150m，取水地层为 100～130m。单井出水量为 15m^3/h，基本可以解决工程施工、生活用水需求。

十一、天然建筑材料

经过对混凝土骨料进行地质调查，109 国道东出口以东公路南北两侧一宽浅冲沟（或小型季节性河流），上覆冲洪积砂、卵、砾石，距场址西南侧约 5.5km，质量、储量满足要求。格尔木周边分布有多处正在使用的砂砾料场，亦可分散收购。

十二、中控室

中控室的框架地基要建在 2m 以下，因场址地势由南向北倾斜，中控室地面要垫高，与 109 国道平齐。

第二节　支架基础

在沙漠安装支架，要求稳固，不下沉，不变形，支架是坐落在基础上的，基础的稳固是至关重要的。目前沙漠电站采用的基础有多种：条桩基础、圆柱基础、墩子基础、螺旋桩基础。这里着重介绍条桩基础，其他基础作简单介绍。

一、条桩基础

沙漠地势不是平坦的，有斜坡，斜度较大时，阵列依地势而建，不要求在一个平面上。六根条桩组成一个阵列，这六根条桩要统一在一个水平面上。条桩要求埋进沙里 200mm 深，高出地面 300mm，高出地面有利于降低风速。建设条桩基础时要挖坑，因是依地势而建，条桩有的会建在平地上，有的就会建在斜坡上，建在斜坡上有的坑就挖得深，有的就挖得浅，挖得深会导致整个条桩被沙淹没，至沙石吹到玻璃板上，造成破坏；挖得浅的，会导致风把条桩基础的根部吹空。具体下挖多少，这要根据具体情况来定。平地时，下挖 200mm，洒水夯实两遍，再支模，放猪笼。对已造成空隙的，要在四周浇水、浸透、补土、捣实。基

础大多是现场制作，与地面结合紧密，并可减少土方量。条桩基础采用的是表面摆放形式，要确保在风速为 27m/s 的作用下不会被带起，要靠基础的自身重量来保证。图 12-2 为条桩基础。



图 12-2　条桩基础

条桩基础预埋螺栓的位置很重要，六条有 24 根螺栓，位置精度不大于 2mm。与支架固定的螺栓位置精度至关重要，能保证玻璃板安装的平面度，从而决定使用的安全性。因此，对基础预埋螺栓的要求如下：

1）位置精度要控制在 2mm 内。

2）螺栓高出水泥面 80mm。

3）螺栓不可偏斜。

4）螺栓配两个螺母、一个垫圈。一个螺母用作调整支架安装的高度，另一个螺母及垫圈用作固定支架。

下面用槽钢做了一条长定位模具，这是一个整体的定位工装，钢性好，搬动不会变形，易于安装，上面钻了孔，对螺栓的位置、高度、水泥基础的高度都定了位，不妨碍浇灌水泥。摆放好后，精心调整基础模具的位置，然后进行浇铸。定位工装与混凝土模具之间有定位销，便于快速准确地安装混凝土基础模具。图 12-3 为地脚螺栓定位工装。图 12-4 为地脚螺栓定位工装放大。

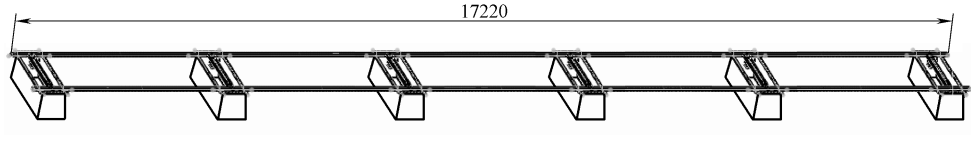


图 12-3　地脚螺栓定位工装

地脚螺栓安装不能偏斜，螺栓露出水泥平面的高度要一致，因此要做一个定位套，图 12-5 为地脚螺栓组件。安装时，在横梁上装上定位套，再从定位套下方插入地脚螺栓，拧

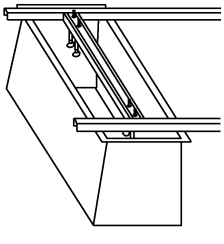


图 12-4　地脚螺栓定位工装放大

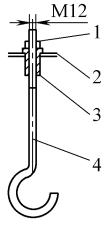


图 12-5　地脚螺栓组件

1—螺母　2—定位工装横梁　3—定位套　4—地脚螺栓

上螺栓，测量露出的螺纹高度，这样可保证所有螺栓安装高度一致。定位套的作用有两个：一是保证地脚螺栓安装不偏斜；二是混凝土浇铸完后，先拧下螺母，再拔出定位套，保证横梁上孔与地脚螺栓之间有较大间隙，可方便地抬起定位工装。

条桩基础的特点是靠条桩本身的重量起到固定支架的作用，因此对沙地要作处理，要浇水打夯，使其具有一定的压缩比。条桩基础的优点是制造方便，支架固定可靠，拆除方便。

二、圆柱基础

在沙漠地上挖孔，直径 230mm，深 1500mm，然后插一根直径 200mm 的塑料管，往塑料管灌混凝土，端部插四条螺栓。塑料管四周捣实。特点是制造安装快，适应性强，地桩拔除方便。缺点是螺栓位置精度难以保证，抗拉拔力略低，因面积小，承载力较小。图 12-6 为圆柱基础。

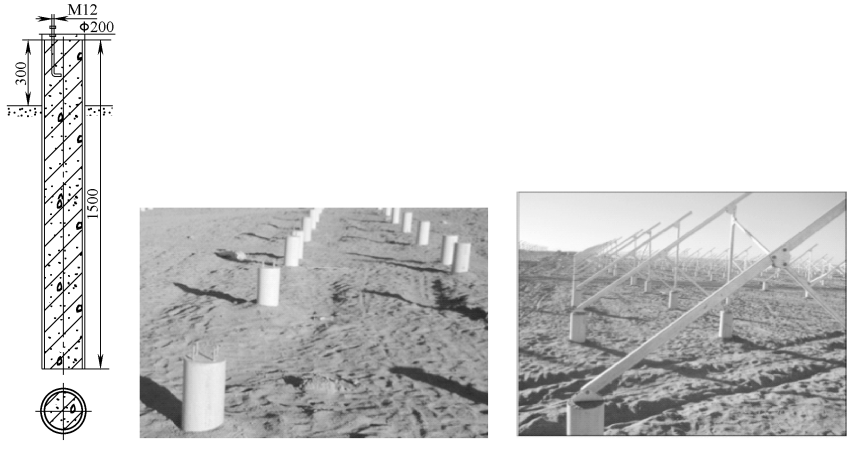


图 12-6　圆柱基础

三、墩子基础

分别为两个支脚的着力点。下挖 1200，先作 1m 见方、厚 100mm 的混凝土垫层，作工艺平面，再做一 500mm 见方、高 100mm 的基础，然后做 1000mm、200mm 见方混凝土的柱子，最后用定位模具配浇铸四根螺栓。图 12-7 为墩子基础。

特点是稳定性好，承载力大；缺点是制造工艺长，成本高，不便于今后移动或拆除。

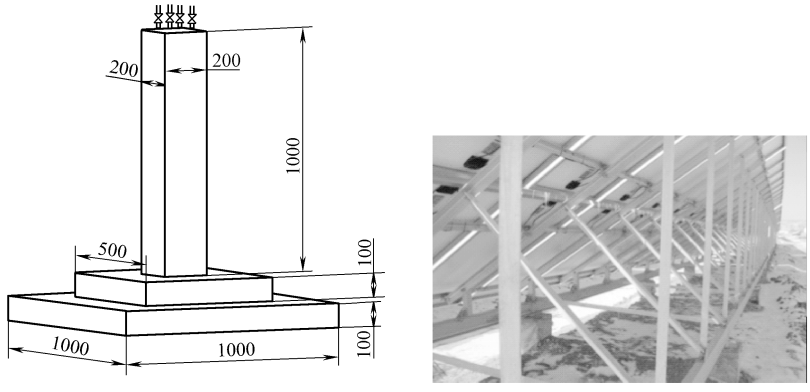


图 12-7　墩子基础

四、螺旋桩基础

支架与螺旋桩端部固定，螺旋桩端部可做成法兰式、销孔式等。螺旋桩基础如图 12-8 所示。

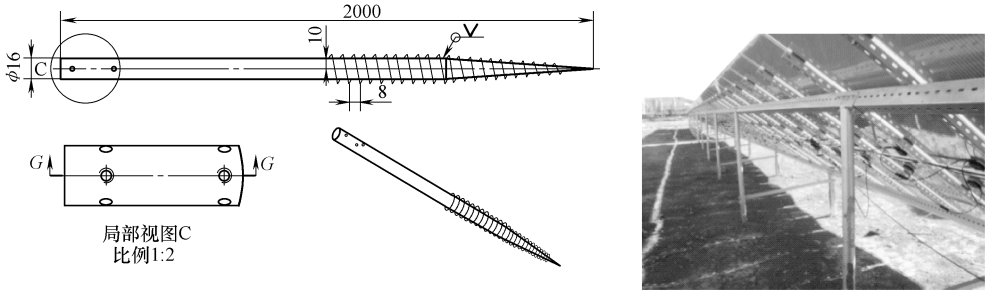


图 12-8　螺旋桩基础

螺旋桩基础的优点是安装位置能精确控制，现场安装快捷；缺点是制造成本较高，不适合盐碱地及潮湿地区使用，安装拆除均需要专用设备。

第三节　支　　架

不同的电池板、不同的安装环境，对支架的要求是不一样的。多晶硅与非晶硅是不同的，流动电站与固定电站是不同的，平地和高楼是不同的，城市和沙漠是不同的。

一、沙漠电站对支架的要求

1）支架阵列要符合电气性能的要求：

① 单元阵列总瓦数与逆变器匹配。

② 有固定导线装置，防止导线接头在风力下松动。

2）抗风速可达 27m/s，换算为压力，确定为 0.45kN/m^2。

3）等寿命设计。支架关键是电池组件的装夹，电池组件是由玻璃制成的，玻璃是易碎品，压力过大，压紧点不在一个平面上，都会造成破碎，支架的刚度、强度再好，基础再稳固，支架与基础的连接再牢，也都徒劳。因此，支架、基础的设计不可盲目追求高钢度、高强度，使加强筋过多，耗费钢材，但也不能柔弱无力，因此压力的大小以玻璃的抗拉强度为准，装夹牢固可靠，玻璃抗拉强度为 55MPa，计算在风速 27m/s 情况下，电池板所受的剪切力。

4）连接点尽可能少，便于现场组装，减少现场组装工作量。

5）抗震性能好。

6）使用寿命 25 年。

7）热镀锌防腐，现场装配时刮伤、碰伤需要补漆，可采用富锌漆作为底漆（可实现阳极保护的作用），再加防锈漆，两道面漆。

8）前后支架之间的间隔距离，以冬至节气，9：00 ~ 17：00 时间段，电池板不被遮挡为准。

9）电池板竖放。

10）电池板的装夹，确定为左右各装一块压板，下端装两块挡板，这种形式安全可靠，在橡胶衬垫老化失效的情况下，电池板仍不会脱落，装夹板不可盖住电池，以免影响发电量。

11）支架与基础的连接采用螺栓连接。

12）压板螺栓头不可高出压板，妨碍机械清洁电池板。

13）支架安装整齐牢固，刚度、强度达到图样要求，装玻璃电池的平面度 <2mm。

14）电池板安装要求：

① 四块压板在一个平面上，不可使玻璃板产生瓢曲现象，不能产生局部破碎，排布整齐，牢固，经得起 27m/s 速度的风力。

② 功率相近的安装在一起。

二、支架设计

1. 支架

力争采用最简捷的设计：前后支柱、两条横梁、27 根纵梁、两根斜支撑。一根横梁连接所有的前支柱，一根横梁连接所有的后支柱，两根横梁之间的纵梁用纵梁连接，如图 12-9a 所示。



a)　　b)　　c)

图 12-9　支架

横梁长 3300mm，用 U 型钢连接，横梁与支柱也用 U 型钢连接，固定用不锈钢或热镀锌螺栓连接。横梁与纵梁都采用 C 型钢，横梁为 80mm × 40mm × 2mm，纵梁为 40mm × 40mm × 2mm，开口为 20mm，底部冲有连串的腰形孔，以便于调整距离，方便安装。后排支柱首尾加一斜支撑，以增加其刚性。支架与基础的连接用底板与地脚螺栓连接。横梁与纵梁直接用螺栓连接。电池板装在纵梁上，一个阵列有上、下两排，每排 26 块电池板，共装 52 块。

2. 热镀锌

热镀锌也叫热浸锌和热浸镀锌，是一种有效的金属防腐方式，主要用于各行业的金属结构设施上，是将除锈后的钢件浸入 500℃左右融化的锌液中，使钢构件表面附着锌层，从而达到防腐的目的。

热镀锌的优点如下：

1）处理费用低：热镀锌防锈的费用要比其他漆料涂层的费用低。

2）热镀锌的防腐年限久远，持久耐用：在郊区环境下，标准的热镀锌防锈厚度可保持 50 年以上而不必修补；在市区或近海区域，标准的热镀锌防锈层则可保持 20 年而不必修补。

3）可靠性好：镀锌层与钢材间是冶金结合，成为钢表面的一部分，因此镀层的持久性较为可靠。

4）镀层的韧性强：镀锌层形成一种特别的冶金结构，这种结构能承受在运送及使用时受到的机械损伤。

5）全面性保护：镀件的每一部分都能镀上锌，即使在凹陷处、尖角及隐藏处都能受到全面保护。

6）省时省力：镀锌过程要比其他的涂层施工法更快捷，并且可避免安装后在工地上涂刷所需的时间。

热镀锌适应环境广泛，一直是很受欢迎的防腐处理方法，被广泛运用于电力铁塔、通信铁塔、铁路、公路防护、路灯杆、船用构件、建筑钢结构构件、变电站附属设施、轻工业等。

3. 装夹板

装夹板由上压板、胶垫、下压板组成，螺栓头与压板平面基本平齐，胶垫将电池板包裹住，保护电池组件表面损伤及减少振动，上、下压板的尺寸保证了电池板的压力不会过大，压力过大时，上下压板就会顶住，力传不到电池板上，如图 12-9b、c 所示。

三、支架的制造

1. 金属构件的制造

沙漠电站规模大，工程周期短，需要的支架量大，因此，金属构件要批量化生产，并要易于快速装配。C 型钢采用 2mm 厚的钢板，剪裁成条形，冲出腰形孔，轧制成形后取长短；立柱采用型钢；压板采用铝材轧制成条形，再剪长短；胶垫开模，用橡胶机械热制；底板与立柱采用自动化焊接。2000t 的支架，三个月完工。

2. 热镀锌

（1）热镀锌原理将结构件清洗干净，然后助镀剂处理，烘干后浸入锌液中，铁与熔融锌反应生成一合金化的锌层，其流程为：上挂→除油→清洗→酸洗→清洗→浸助剂→烘干→挂热镀锌→水冷却→钝化→清洗→修整→成品打包。热镀锌的合金层的厚度主要取决于钢材的硅含量等化学成分、钢材的横截面积大小、钢材表面的粗糙程度、锌锅温度、浸锌时间、冷却快慢、冷轧变形等。

（2）热镀锌工艺　我国现有热镀锌生产企业中大多数采用干法热镀锌，助镀剂一般采用复盐配制：氯化铵与氯化锌。氯化锌主要起热镀时防止铁件表面被二次氧化的作用，同时熔化时增加锌液对铁件表面的润湿性，但对铁件表面的锈蚀去除能力较差，因此，使用时一般与氯化铵配制成复盐使用。氯化铵在接触锌液时分解，释放出氯化氢气体，对铁件表面进行活化，而且活化效果非常好。氯化铵的另一个作用是可降低复合助剂的熔点，提高复合助剂对铁件表面的润湿性。在生产中为了防止高温锌液表面与空气接触氧化，一般在锌液中加入铝合金，在锌液表面形成致密的 Al_2O_3 氧化膜，减少锌液的氧化损耗。有些厂家为提高热镀锌件表面的亮度，加入大量的铝合金，这样在使用复合助剂的同时又使用锌铝合金热镀，势必造成热镀时产生大量有害烟雾。热镀时产生大量有害烟雾，主要成分为氨气、氯化氢、氯化铝。为消除热镀时产生的烟雾，改善工作环境，减少环境污染，工厂采取了一些措施，如：在锌锅上设立吸尘罩、开发无烟助剂等。

为了进行环保热镀锌，本书介绍一种不用氯化铵、镀液不含铝的无烟热镀锌工艺，而且

不增加费用，产品质量有大幅度提高。

1）除油工艺：

NaOH：30g/L；

Na_2CO_3：50g/L；

Na_3PO_4：70g/L；

OP-10：2～5g/L；

时间：5～20min；

温度：30～80℃。

2）酸洗工艺：

H_2SO_4：200g/L；

六次甲基四胺：2～5g/L；

温度：25～40℃；

时间：15～40min。

3）清洗：流动水 <30m^3/天。

4）助镀剂：

$ZnCl_2 \cdot 7H_2O$：250～300g/L；

OP-10：0.5～1g/L；

pH：3；

温度：60～80℃；

时间：1～3min。

5）热镀锌参数：

锌液组成见表12-9。

表12-9　锌液组成

材料名称	材料成分	锌液中各合金质量百分比
0#锌锭	锌99.995%	98%
锌镍合金	锌98%，镍2%	1%
锌铋合金	锌98%，铋2%	1%

热镀参数如下：

热镀时间：2～6min；

热镀温度：435～440℃。

6）钝化参数：

CrO_3：1～2g/L；

温度：室温；

时间：1～3min；

免水洗。

7）月生产量：1000～1500t；

8）污水排放量：小于30m^3/天。

污水中成分：

氯化亚铁≥3%；

铬酸≥0.05%；

硫酸≥0.03‰。

9）电加热锌锅。

10）温度控制：热电偶。

（3）操作要点　此工艺中助镀剂不含氯化铵，锌液不含铝，可从根源解决烟雾问题。锌液表面的氧化以及镀件外观色泽是通过加锌镍合金来解决的，锌液中含万分之二的镍就能在锌液表面产生致密的氧化膜，隔绝锌液与空气的接触，同时镀件锌层表面色泽均匀、呈青亮色。锌液中含万分之二镍的作用是增加锌温在435℃时锌液的流动性，与锌铝合金型锌液锌温在465℃时相同，这就降低了热镀锌的能耗，而且镀层均匀致密，锌层厚度易于控制。

此工艺采用单盐助镀，缺点是助镀效果较差，易漏镀，因此一直以来未被运用于生产。为弥补以上不足，本工艺加入了醚类活化剂（俗称防爆剂），使助镀剂能在铁件表面均匀渗透，获得均匀的助镀剂膜。助镀液采用蒸汽或电加热，通过铁件本身的余温烫干，使助镀液快速干燥结晶，形成致密的防锈助镀剂膜。一些工件浸助镀剂后，由于壁薄，热容量小，不易烫干或空气湿度大，助镀剂膜干不透，水分含量过高，进入锌锅时，炸锌严重，引起漏镀。为解决此问题，镀件热镀前停留在锌锅上方，利用锅面上升的热空气烘10～15min，使其表面助镀剂膜完全干燥结晶，热镀时能有效地减少炸锌。单盐助镀锌液对铁件表面的润湿性没有复盐助镀好，而镍合金改善不了锌液对铁件表面的润湿性，为保证镀件百分之百地不漏镀，引进第二种合金，即锌铋合金。锌液中铋的含量为万分之二，其优点是：锌液对铁件有优异的润湿性，铁件在锌液中烫热时间短，镀件表面不粘锌灰、颗粒、无流痕。

在使用该工艺热镀时，镀件刚出锌液面，要使用风冷冷却，镀件全部吊出锌液后要快速吊入冷却池彻底水冷。冷却水温不能过低，否则会使锌层急剧收缩，轻者表面会留下川形收缩纹，重者会影响锌层附着力。冷却水温也不能过高，否则镀层冷却时会产生大量蒸汽，镀层外观易灰，钝化后镀层表面有黄斑。冷却水温控制在40～60℃较好。要强调的是，铁件在前处理中一定要把表面的油污、锈蚀彻底清除干净。

该热镀锌工艺去除了助镀剂中的氯化铵，避免了热镀时产生大量的氨气与氯化氢气体，锌液中淘汰了铝合金，避免了热镀时产生大量的氯化铝烟尘，同时，通过加强前处理，采用镍合金、铋合金调整锌液的性能，弥补了工艺中的不足之处，不仅解决了热镀时产生的大量有害烟雾问题，还提高了产品的外观质量，降低了生产成本，实现了绿色热镀锌。

四、支架的安装

安装工序，立柱→C型连接块→横C型钢→纵C型钢→下压块→挡块→电池板组件。

1. 立柱高低的调整

立柱底板用螺母调节高低，即在基础的地脚螺栓上拧一螺母，立柱底板装在螺母上，转动该螺母即可调节立柱高低，合适后，再将底板上部的垫圈和螺母拧紧。用这种方式调节，立柱底板与水泥基础之间有一定的间隙，当安装完电池板后，要进行二次混凝土浇灌，将该间隙填实。

2. 纵C型钢找平

电池板是玻璃的，玻璃是易碎品，其安装对纵C型钢的平面度要求较高，为满足这一要求，支架设计时就考虑了一些技术措施，除立柱可调外，横C型与纵C型底部都冲了一

排腰形孔，用以安装螺栓及调整距离，另外，用光学准直仪加上拉线来找平。因此，尽管整个阵列有17m长，其平面度也能得到保证。

3. 安装装夹板

玻璃电池板安装在纵C型钢上，用四个压板压住，四个压板要在一个平面上，如果不平，强行压下，会使玻璃电池板受有扭曲应力，时间一长，玻璃板就会破损。沙漠上有沙尘暴，风速达25~27m/s，玻璃板受有应力，或装夹不牢，都会给玻璃板带来损坏。先将下压板套进纵C型钢的槽子里，将胶垫套在玻璃电池板上，四人小心抬起，安放到纵C型钢，找准位置，拧紧螺栓。压板就是有限压设计的，只要正确安装，玻璃板就是安全的，不会被压坏。

第四节　沙漠电站用水

电站建设及运营都需要水，沙漠电站离城镇较远，都有几十公里距离，城镇的自来水送到沙漠电站成本较高，不可能为此敷设水管，因此，沙漠电站的用水一般采取就地打井的办法。

一、沙漠电站用水量

沙漠电站用水有生活用水、绿化用水、浇洒道路用水、冲洗电池板用水。

1. 生活用水

按运营人数15人计，用水量为150L/(人·d)，最大日用水量为2.25m^3/d。

2. 绿化用水

10MW防护林面积约为127200m^2，绿化用水标准采用2.0L/(m^2·次)，按10天浇一次计算，则最大日用水量为25.4m^3/d；管理区绿化面积约4010 m^2，绿化用水标准采用2.0L/(m^2·次)，按5天浇一次计算，则最大日用水量为1.6m^3/d。绿化最大日用水量为27m^3/d。

3. 浇洒道路、广场用水

10MW工程道路面积约为35150m^2，广场面积约为2133m^2，浇洒用水标准采用2.0L/(m^2·次)，分别按10天和5天浇洒一次，则最大日用水量为8m^3/d。

4. 冲洗电池板用水

10MW工程电池板有25万块，每年用水冲洗6次，每次用水量为395m^3，则年用水量为2370 m^3。

年用水量约为1.8万t，生活用水与生产用水分开，生活用水采用一台8m^3的水箱，生产用水采用150m^3的水池。

二、打井

1. 井参数

水井最低要保证45 m^3/d水量，能稳定地连续供水15h不断流。

2. 打井

打井的步骤有钻孔、下井管、填滤料、洗井、安装潜水泵及抽水管、试验、做井台、整理资料、交付验收。本部分可参考CJJ 13—1987《供水水文地质钻探与凿井操作规程》。

(1) 钻井

1）钻井机。采用冲击式工程桩钻井机，一次成井。钻井机的主要结构是由 30kW 的电动机带动偏心轮，偏心轮反复压下钢索及放开钢索，实现钻头的提起与下落。钻头自由下落的距离是恒定的，由偏心轮的直径确定。钻头是由钢索吊起的，在机架顶装有定滑轮，钢索装在定滑轮上，钢索另一端是绕在卷扬机上的，卷扬机有制动装置，钻头吊起不动悬挂时，制动装置动作，制动弹簧有时力不够，可再加一重锤。工作时，是在制动状态下的。随着深度加深，要松开制动装置调整钢索长度。钻井机有三条可独立起吊系统，可分别用来挂钻头、挂捞沙筒，钻井完工后，可用来吊井头、吊管子，起吊系统的转换由人工操作的拨爪控制。图 12-10为钻井机。



图 12-10　钻井机

2）钻井步骤。钻井步骤有挖导向孔、装护壁筒、做护壁泥浆、凿井、反复放钢索进深、反复捞泥沙、反复检查泥沙样、反复检查垂直度。

导向孔直径 1m，深近 2m，套上一个直径 1m、高 1.2m 的护壁筒。在沙漠打井要防止坍塌，用当地特有的红土作泥浆护壁。井壁斜度 <1°，从最底部提起钻头到地面来回操作三遍，钢丝绳无偏摆，钻头仅有轻微摩擦感觉。

钻头是最重要的设备之一。钻头长 5m，直径 600mm，做成扁锥形式，有排泥孔，有倒锥角，两侧磨损较大，用上一段时间就补焊一块锰钢。尾部有稳定器，采用钢丝绳吊在管子正中，以保证钻头不偏斜，从而保证井壁不偏斜。图 12-11 为冲击钻头。

当盐层硬时，400mm 盐层需打 8h 才能打穿，不小心就会打偏。因此对冲击钻头可作点儿改进，在开口处焊一圆圈即可。

3）捞泥沙。凿了一段深度后，要及时将凿下的泥沙捞出。将钻头吊起，放在一边，用另一起吊系统，钩挂一专用吊桶。吊桶直径为 400mm，长为 2000mm，底部有两扇活动门，活动门有顶杆件机构，顶杆上铰接活动拉杆，活动拉杆与活动门铰接。吊桶往井底落下时，顶杆碰到井底，顶杆相对吊桶向上运动，带动活动拉杆，活动拉杆带动活动门，活动门以固定铰链为圆心，向上方转动，使活动门打开，水及泥沙涌入，满后提起，泥沙重力将活动门压闭。到地面后，往地面一放，顶杆碰到地面，地面顶力使顶杆又将活动门顶开，泥浆流出。图 12-12 为排泥筒。

水位埋深 65.74m，岩性主要为卵石、含泥的卵砾石，孔隙大且通性好，透水性强，水量中等。打到 145m 时，水量足够，停止凿井。

4）出水判断。钻井是要带水的，以减少钻头的磨损，但是，如何分辨井中是加入的工艺水，还是井已出水，是有技巧的，这个技巧就是根据捞出的小石子来判断，在捞出的碎石发现有圆角光滑的石子，即是出水了，因为水的冲刷将石子的棱角打磨光滑了。圆角光滑的石子越来越多，涌水量也逐渐加大。

（2）下井管　井管由三段组成，即沉砂管、滤水管、井壁管，最下面是沉砂管，中间是滤水管，上部是井壁管。所有管子外径为 380mm，内径为 300mm，长为 4m，两端都有外露钢箍，供连接时焊接用。滤水管周边分布有 108 个腰形孔，腰形孔尺寸为 40mm × 10mm。滤水管是钢筋砌体结构。滤水管下井前要用不锈钢丝网包住管外，不锈钢丝网外再缠绕 120

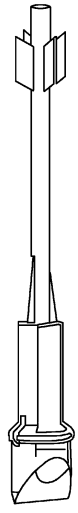


图 12-11　冲击钻头

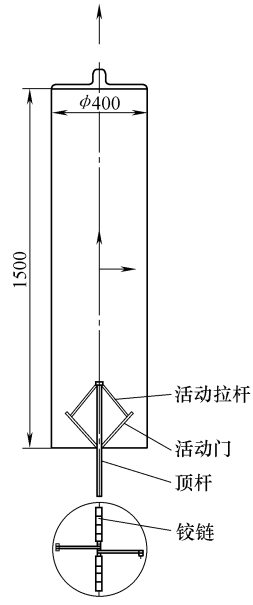


图 12-12　排泥筒

目的尼龙网，再用竹条 6 根加固。井水通过砂石滤料，再经过两层尼龙网、不锈钢丝网、腰形孔，进入井内。下管时要十分小心，因为一旦掉落入井，就无法取出，使打好的井报废。先下井头，再下沉砂管，再下滤水管，然后又是井壁管。下管工艺：将钢丝绳穿进井头周边的三个孔，三根钢丝绳端均有孔，孔中插一个销，绊住井头，提起钢丝绳，即可将井头吊起，放入井内。图 12-13 为井头。

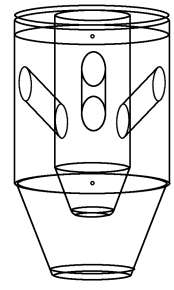


图 12-13　井头

吊装完全部井管后，为了能将钢丝绳抽出，销的尾部开一孔，孔上穿一细钢丝，全部吊装完井管后，拉出钢丝，即可把销拉出，销拉出后，钢丝绳没有固定点，从而可将其抽出。钢丝绳端孔在现场制作时，要包扎结实，因为要承受 35 根水泥管及井头的重量，一旦松开，水泥管及井头落入井内，亦无法取出，将会使打好的井报废。钻井机有三条独立起吊系统，不能同时起吊。其中一条用来吊住井头，一条用来吊沉砂管，还有一条待用。井头起吊准备工作完成后，即将其吊到井边，放下，吊起一根沉砂管，对准井头，将其与井头焊在一起，每根管子都预制有焊接部位。焊好后，起吊井头的三根钢丝绳，将井头与管子一起吊起，缓缓放入井内，还有 0.3m 在井外时，停止下放，再焊接第二根管子，焊好后，仍缓缓放入，依次循环，直至放完全部 35 根管子。留有 0.5m 左右高出地面，作井台用。井管共 35 根，沉砂管装 16 根，然后滤水管 15 根，再装井壁管 4 根。

（3）填滤料　井壁管与井壁之间要填滤料，滤料是用来过滤地下水的。滤料分两种，滤管以下是用水洗沙加粒度为 6～10mm 的石子，滤管以上是粒度为 6～10mm 的石子。

（4）洗井　洗井的目的是洗去井中的污物，使井水清澈。洗井的工具是活塞式洗井桶，其结构与捞沙筒相似。图 12-14 为洗井筒。

洗井筒外径为 200mm，长为 1500mm，敞口，上部有一把，便于起吊，底部装有活动

门，下落时，在水力的冲击下，门打开，水涌入，提起时，水的重力将门压闭。活动门上 50mm 处周边开有小孔，水从小孔中流出，清洗管壁，洗井筒底部外面固有羊毛毡，当提起洗井筒时，羊毛毡擦洗井壁，洗井筒提出井口，将水倒掉，反复几十次。然后再抽水，直至排出的水不再浑浊，没有细沙为止（含砂量≤1/20000）。

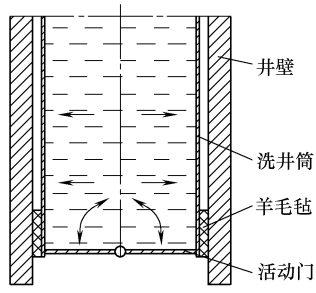


图 12-14　洗井筒

（5）安装潜水泵及抽水管　取水不能在近井底处取，沉淀物多，且要在动水位（抽水一定时间后，水位不再下降时的水位）下 1m 处，即水泵安装在动水位下 1m 处，是悬空安装的。潜水泵流量为 2.5m^3/h，扬程为 122m，功率为 9.2kW，外径为 150mm，安装在离井底 10m 处。抽水管用镀锌管，ϕ63 ×3，6m 一根，法兰连接，法兰之间装胶垫密封。

（6）抽水试验　全部安装好后，进行抽水试验，查看水质、水量、连续出水时间等参数。

（7）作井台　砌一圆形或方形井台，固定住悬空的抽水系统，抽水管周边密封，防止物件落入井中。

（8）整理资料　作柱状图。柱状图是表面井地质状况、水井结构的示意图。图 12-15 为柱状图。

钻井连续作业，打一眼井，如顺利，从准备到交付使用实际时间要 2 ~ 3 个月，7 ~ 8 人，造价 30 万左右。

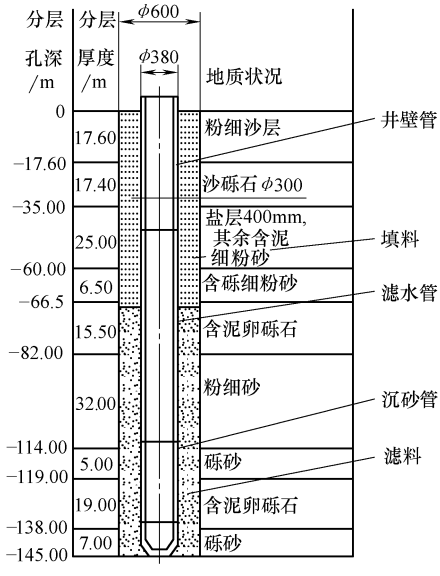


图 12-15　柱状图

第五节　恶劣气候的应对

格尔木属高原内陆盆地干旱气候，少雨多风、日照时间长，平均气温为 4.7℃，6 ~ 8 月气温较高，平均为 16.5℃，极端最低气温为 - 33.6℃，多年平均气压为 724mb（1mb =

100Pa），多年平均降雨量为 39.60mm，多年平均蒸发度为 2709mm，相对湿度为 34%。

一、施工时间

格尔木室外工程施工时间在 5 月～10 月底，11 月～4 月白天气温在 -1～5℃，夜里零下十几度，温差有二十几度，在这种交变应力下，混凝土会变得酥散，失去作用，加防冻剂、覆盖、灯泡照射效果不大。除非在室内加温制造，但会增加成本，不到万不得已不会这么做。

二、除尘

风会使尘土沾在电池板上，又会将电池板上的灰尘刮去，但是玻璃板有静电作用，总会牢牢地吸住一部分灰尘，久而久之积到一定程度，就不会再增加，但这层厚度会挡住电池对阳光的吸收。现在常用的是人工用水清洗，数量多，工作量大，而且晾干后，表面总是有泥土痕迹。另一种方法是机械清洗，机械手用多种方法，如太阳能除尘器。工作臂分三道工序：吸尘、水刷、干刷，缓缓走过一遍可完成这三道工序，工作臂的角度可调节、可升降，按电池板的角度，始终与电池板贴合。人坐在机器上，一天一台机器可清洁 2000 块电池板，38 个阵列。机器采用太阳能，自带水箱，水箱可更换，不中断工作，节能环保。

三、体力

格尔木海拔 2800m，位于昆仑山下，夏天气候凉爽，含氧量是陆地的 80%，空气干燥，不同的人会有不同的反应。

1）肺活量小的、心脏不好的、心律不齐的、得过冠心病的会因为吸氧量少、心脏氧气供应不足，觉得胸闷，呼吸不过来，长期下去，会使肺功能萎缩。

2）南方人呼吸的都是湿润的空气，若到了此地，空气干燥，早晨起来鼻子会带血丝，而且长期不会好转。

3）气管不好的，早晚受冷空气的侵袭，会喉咙沙哑，刺痒、咳嗽。

4）水质很硬，肠胃不好的会拉肚子，吃药不管用。

解决的办法是多喝水，屋内喷雾化汽，行走起立不要急迫，要缓慢，水质不适于直接使用，要经过软化处理。即使是这样也要 30 天左右去海拔 1000m 以下的地方换换空气，工作 1～2 年回内地休养三个月。

第十三章　储　　能

储能是指将电能通过一定的技术转化为势能、动能、化学能、电磁能等形态，使转化后的能量具有空间上可转移（不依赖电网的传输），或时间上可转移，或质量可控制的特点，可以在适当的时间、地点、以适合用电需求的方式（功率、电压、交流或直流）释放，为电力系统、用电设施及设备长期或临时供电。间歇、随机、低密度的太阳能，要从补充能源逐步转变为替代能源，最终成为主导能源，大规模储能技术是必不可少的。在实施峰谷上网电价和实行严格的电网接入规范的条件下，大规模储能可减少电力系统投资、降低能源成本、提高能源利用效率、提高电能质量、获得套利收入、储能设施占地少、无排放；在实施用户侧峰谷电价、电网允许反向输电的条件下，用户应用储能设备可实现削峰填谷，其节地、节能、减排的效果是其他调峰措施无法比拟的。储能技术的发展和应用，将有助于打破光伏发电的接入和消纳瓶颈问题，能够降低配套输电线路容量需求，缓解电网调峰压力。

第一节　储 能 概 况

储能技术能够使间歇的、随机的、低密度的清洁能源发电，得以广泛和有效地利用，促进我国新能源的大规模应用。

一、储能运用领域

储能主要运用在以下几个方面：

1）太阳能发电。太阳能发电装机占装机总量的比例在合理范围内，依靠传统电网技术以及增加水电、燃气机组等手段基本可以保证电网安全，但若超出这一范围，电网的调峰能力和安全运行将面临巨大挑战，为应对电网尖峰负荷，电力系统每年都要新增大量投资用于电网和电源后备容量建设，但利用率却非常低。以上海为例，2004～2006 年，为解决全市每年只有 183h 左右的尖峰负荷，电网需要大量投资，而为此形成的配电能力的年平均利用率不到 2%。而同样是为了应对尖峰负荷需要可采用储能技术。储能技术在很大程度上可以解决太阳能发电的随时性、波动性问题，可以实现太阳能发电的平滑过渡，能有效调节太阳能发电引起的电网电压、频率及相位的变化。

2）风电。消除风电的波动，改善电力质量，降低离网电力系统的运行成本和碳排放。

3）智能电网的重要组成部分。

二、储能在国外应用效果

（1）调节电网峰谷矛盾　美国实施的全钒液流电池全面测试显示，在电网末端储能节点能达到增强电网的目的。该电池长时间多次循环基本无衰减，不仅解决了电网尖峰扩容问题，而且有效提升了能源系统效率。

（2）平滑风能发电输出　日本 4MW 钒电池储能系统，能在每天充放电循环高达 600 次的场景下正常工作，用于平滑 32MW 风电场的输出。

（3）改善风电富集区的电网频率　在加利福尼亚州进行了储能研究，在含高比例风电

的电网中，安装750MW新型大规模电池存储系统。研究结果证明，这些电池极大地改善了电网系统的频率质量。

（4）提高风能上网比例　普林斯顿大学的研究表明，储能技术可提高风能在电网中的局部供电比例，通过储能可以大幅度增加传统电网，受传输线容量限制的风场容量，让发出的风电能够使用得更经济。

（5）提高风电场电力输出能力　为稳定风场的电力供给并提供均匀的功率输出，需要配备大约风电场标称容量20%的并有6～8h存储时间的电池储能系统，该系统可以提高风电场电力输出能力。例如，对一个有20MW输电线限额的并网11MW风电场进行扩容，与仅增加9MW风力发电机的扩容方案相比，使用钒电池进行储能，可以为风场增加12MW容量。

三、国外储能现状

世界各国近年来纷纷加强了对储能产业的计划和扶持。目前世界上支持力度最大和产业化商业化走在前面的国家是美国和日本。

美国政府在金融危机之后，已将大规模储能技术定位为振兴经济，支撑新能源发展的战略性技术，根据2009年通过的《储能法案》，美国对大规模储能投资将提供20%的投资税收抵扣，对家庭、工厂、商业中心的分布式可再生能源应用中的储能部分也提供20%的投资抵扣，加州还对符合技术要求、与风电或燃料电池配套建设的储能系统提供2美元/W的额外补贴。根据《美国复苏与再投资法案》，美国政府在2009年上半年，拨款20亿美元用于支持包括大规模储能在内的电池技术研发。在美国能源部制订的关于智能电网资助计划中，安排的储能技术项目超过了其他所有项目，达到了19个，资金支持力度最大。2010年，美国投资6.2亿美元资助先进智能电网技术示范项目和综合系统。2011年第一季度，美国风险投资（VC）对清洁技术公司的投资额度比去年同期增加了54%，总额达到11.4亿美元。其中太阳能和储能领域的投资额度最大，储能领域成为美国一季度清洁技术投资的第二大热点方向，该领域的投资总额较去年同期猛增671%，投资增长额达262.4百万美元，成为增长速度最快的投资方向。美国电力研究院指出，储能拥有极其广泛的潜在应用价值，这些价值可以证明在很多地方安装储能设施的成本可行性，储能技术成本的降低至关重要，如果储能成本可以降低到业主和运营商都可以盈利的700～750美元/kW·h的合理价格预期内，到2020年，美国总的储能市场规模将猛增至14GW。如果其成本未能降低至这一范围，比如说花费成本为1400美元/kW·h或者更多，那么整体的储能市场规模将萎缩至5GW。

日本早在1986年就成立了超导储能研究会，致力于实现超导储能的实际应用。日本自20世纪90年代以来，投入大量资金进行大规模储能技术的研发，包括对全钒流电池技术和钠硫电池技术的支持，尤其对钠硫电池，不仅在前期研发上给予无偿资金支持，扶持大量示范项目，还在其投入商业化运作后，继续进行补贴，其钠硫电池应用技术居于世界垄断地位。日本政府除直接支持前期研发外，近年扶持了大量示范性项目，以鼓励大规模储能技术的推广应用。日本已经成为世界储能领域的领先国家。

四、国内储能现状

目前我国电网侧、发电端、用户端等各方越来越认识到储能技术的独特作用，以及发展储能技术和产品的迫切性，我国光资源富集区远离负荷中心，当地电网无法全部消纳，需大

规模、远距离输送至负荷地，我国用电结构已经并将继续发生根本性的变化，电网峰谷差日益增大，也使电网面临的调峰压力日趋严峻。为此，2010 年国务院发展研究中心对储能技术的发展现状和应用前景进行了深入调研，并将调研结果汇编成《储能技术发展及规模应用研究》，该研究指出，抽水蓄能是最成熟和应用最广泛的储能技术，化学是发展最快和最具发展前景的储能技术。近年来我国在大规模储能技术成果和人才上有相当的积累，并且在液流钒电池和锂离子电池等储能技术上处于世界领先地位，甚至相关企业的产品已在国外市场得到认可。

制约我国储能技术规模化应用的因素是：

1）我国国内已形成多种技术路线竞争性并存的格局，但都缺乏应用实践，能很快交付产品的公司不多。大规模储能技术在全球仍处于发展初期，还没有形成主导性的技术路线。

2）与国外相比，在关键材料生产、锂资源的提纯等方面还有较大的差距；单体电池的稳定性、可靠性和耐久性方面有待进一步验证。

3）储能关键材料和核心部件要进口，从单体到大规模应用，由于控制管理复杂、容量大量超配等原因，增加了控制成本，由于成本过高，短期内难以实现储能的商业化运用。

4）“储能电价”和“峰谷电价”方面政策的缺失和不到位，导致国内储能产业还缺乏相应的投资回报机制。价格政策和回报机制的缺失，使得国内众多的储能技术和设备企业，面对国内庞大的潜在市场却非常无奈。

5）我国有关支持新能源发展的政策中，还没有体现出对储能产业的支持，特别是政府对大规模储能技术的应用研发、示范推广方面投入非常少，更谈不上对应用的财政补贴，而储能作为新兴产业，在其起步阶段，国家的资金支持和优惠政策激励无疑是至关重要的。如初期政府可以提供相应补贴，或在电价上有保证其投资回报的机制。

在发展机制和产业政策配套完善的条件下，储能技术可能存在电力供给侧、用户侧、第三方运营商、电网和应急备用等多种商业模式：

① 在实施用户侧峰谷电价、允许向电网售电或直供电并按售电价结算的条件下，独立第三方运营商可应用储能设备自主经营或对外租赁来获利。

② 电网公司应用储能设备可以保障系统安全、降低电网投资成本以及利用峰谷差价套利。

总之，大规模储能技术的应用，使电力有可能像其他产品一样，具有市场经济中商品的一般特性，也使储能可以借鉴一切其他成熟的仓储业模式来选择自己的商业模式。因此，政府应当加紧安排多个储能应用示范项目，早期的示范项目可先与太阳能发电、风电相结合，探索光风储一体化模式，促进技术进步，尽快降低大规模应用的成本。在重点扶持液流电池、锂离子电池等关键技术的同时，规范新能源发电技术要求与并网管理，尽快出台有关新能源并网的强制性技术标准，建立并网认证和检测制度，实施新能源发电出力短期预测报告制度，完善全额收购政策，并应配套制定相应的储能发展规划，支持新能源大规模发展。

比亚迪储能电站位于广东省深圳市龙岗区境内，地理位置处于珠三角地区，用于配网侧的削峰填谷，同时将系统备用、独立供电、无功补偿等应用模式作为辅助功能。该项目接入深圳市电网络，其主要功能定位为移峰填谷，即在主变负荷高峰期放电，在主变负荷低谷期充电，以达到提高主变负荷率、降低峰谷差的目的。储能站充放电功率大小随主变负荷变化而波动，以实现主变负载智能控制为目标。

一直以来，电池使用寿命、充放电功率的稳定性以及环境适应性是制约储能电站发展的重要因素。在能量储存载体这个核心技术领域，比亚迪开发出了世界铁电池技术，将电池的能量密度提高到密封铅酸电池的4倍以上，同时循环使用寿命高达7000次，每天充放电一次，可以满足近20年的使用期限。同时铁电池也具备优异的环境适应度，在高低温等恶劣环境下均能保证稳定的放电性能。

该公司兆瓦级电池储能站成功并网，这标志着中国大容量电池储能集成应用技术取得重大技术突破。南方电网兆瓦级电池储能站位于深圳市龙岗区，总容量10MW，第一期为5MW，预计今年内投产。该项目是中国第一个兆瓦级电池储能站，集科研和商用于一体。工程全部投产后，将成为世界上最大的锂电子电池储能站。据估算，一个兆瓦级“储能电站”，可满足若干个居民小区或多幢商务楼宇一天的非动力用电之需。据介绍，电池储能站具有工况转换快、运行灵活、高效、安全环保、运行维护费低、建设周期短、可扩展性强等特点，具有广阔发展前景。该项目建成后，可令电站所覆盖区域电网负荷峰谷差缩小，供电可靠性进一步提高，区域内居民和企业用户将使用到更高质量的电能，尤其是对电能质量要求很高的高新技术企业，受益最为明显。届时，高新技术企业因电能质量导致的产品次品率将进一步降低。

目前，大容量电池储能技术在世界上尚缺乏建设和运行经验，该项目为今后大规模应用电池储能技术，支持风电、光伏发电等可再生能源的大规模接入并网，成功积累经验和技术储备。

第二节　各种储能技术

全球电力储能技术主要有机械储能、化学储能和电磁储能三大类。机械储能的代表技术有抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能等，采用这种储能方式储能媒介不发生化学变化，其能量转换效率为70%～75%。抽水储能是目前最具应用性的储能技术，是能量储能的首选技术，截止2009年世界范围内抽水储能电站总装机容量达90GW，约占全球发电装机容量的3%。压缩空气技术早在1978年就实现了应用，但由于受地形、地质条件制约，没有大规模推广。飞轮储能的特点是寿命长、无污染，但能量密度较低，一直是作为蓄电池系统的补充。

化学储能的代表技术为铅酸电池、锂电池、钒电池、钠硫电池等，此种方式的充放电过程伴随储能介质的化学反应。目前技术进步最快的是化学储能，其中钠硫、液流及锂离子电池技术在安全性、能量转换效率和经济性等方面取得重大突破，产业化应用的条件日趋成熟。钠硫电池的充电效率已可达到80%，能量密度是铅酸蓄电池的3倍，循环寿命更长。日本在此项技术上处于国际领先地位，2004年日本在本国Hitachi自动化工厂安装了当时世界上最大的钠硫电池系统，容量是9．6MW/57．6MW，截止2007年底，日本NGK公司已有超过100座钠硫电池储能站在全球运行中，电池量已超过100MW。钠硫电池具备发展条件，但由于技术长期被日本NGK公司垄断，在应用上受到限制，其成本结构和未来走势难以判断，但随着其他电池价格下降，会降低报价；目前被认为最适于发展的大规模储能的化学电池是液流钒电池，它的基础材料是资源丰富的钒，该电池具有能量效率高、蓄电容量大、能够100%深度放电、寿命长等优点，全球已有超过20个大型全钒液流电池储能系统在

运行。液流电池是目前最适合发展的用于能量管理的化学电池。锂离子的基础材料是锂，近年来由于磷酸亚铁锂、纳米磷酸铁锂等新材料的开发与应用，大大改善了锂离子电池的安全性能和循环寿命，锂离子电池价格在迅速下降，大规模锂电池储能电站正逐渐兴起，预期应用的速度和规模会加速。超能电容器历经三代及数十年的发展，已经形成可商业化的系列产品，在用于短时间、大功率的负载平滑和高峰值功率、低容量的场合，越来越多地发挥着提升电能质量的作用。铅酸电池如果在深度放电、循环寿命方面能显著提高，在大规模应用方面将具有成本优势。

在提高电能质量领域，超级电容、超导磁储能、飞轮以及化学电池均具有一定的适用性，在国际上已有数个示范应用项目。从经济性来看，抽水储能具有很好的经济性，明显优于化学储能，是最具商业化应用条件的储能技术。化学储能大规模应用还不经济，若推动化学储能应用，在实施峰谷电价政策的同时，还必须通过政策补贴或者允许储能设备获得一定的辅助服务收入。电磁技术现在仍很昂贵，还没有商业化。储能技术分类及特征见表 13-1。

表 13-1　储能技术分类及特征

储能类型		优　　点	缺　　点
机械储能	抽水储能	规模大,能量转换效率高(70% ~85%)	需要合适的场地,一次投入的费用高
	压缩空气	规模大,运行成本低	需要合适的场地,一次投入的费用高
	飞轮储能	摩擦损耗小、效率高、寿命长、对环境没有影响、几乎不需要维护	能量密度较低、系统复杂、对转子和轴承要求比较高
化学储能	钠硫电池	能量密度大、充电效率高(可达 80%),可大电流、高功率放电	需要在高温环境下工作,金属钠和硫黄均为易燃易爆物质,具有一定的安全隐患,生产工艺复杂,对电池材料要求十分苛刻
	液流电池	能量转换效率高、储电容量大、能够 100% 深度放电、可实现快速充放电、寿命长	正负极电解液容易交叉污染,需用价格较贵的离子交换膜
	锂离子电池	高比能量、高比功率、高能量转换效率、循环寿命长	过充控制的特殊封装要求高,价格成本、安全性、循环寿命及产品的一致性等在满足大规模储能应用方面还有待突破
	铅酸电池	成本低、技术成熟、储能容量大	储能能量密度低,可充放电次数少,制造过程中存在污染
	镍镉电池	循环寿命长,可快速充电,经济耐用,内阻小,放电电压变化小	记忆效应,材料资源短缺,价格昂贵
	超级电容	比功率高、循环寿命长、内阻低、充放电速度快	比容量小、单位能量投资高
电磁储能	超导磁储能	响应速度快、转换效率高、比容量大、比功率大	系统昂贵、维护费用昂贵

一、抽水储能

抽水蓄能电站利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库，在电力负荷高峰期再放水至下水库发电的水电站，又称蓄能式水电站。它可将电网负荷低时的多余电能，转变为电网高峰时期的高价值电能，还适于调频、调相，稳定电力系统的周波和电压，且宜为事故备用，还可提高系统中火电站和核电站的效率。抽水储能技术最为成熟，而且应用也较为广泛。这种储能技术具有功率较大、储存时间较长等特点。

1. 工作原理

抽水蓄能电站的蓄水系统由两个位于不同海拔的大型水库构成，两个水库之间通过管道

相连，其工作原理是将水的势能转换成动能，然后再转换成电能。抽水蓄能电站由四部分组成：上水库、下水库、水轮机和水轮发电机、泵和电动机。水轮机为可逆式，正转发电，反转抽水。上水库与下水库之间的垂直距离称为“水头”。抽水蓄能电站的基本参数有：

1）容量：可以储存的能量的数量，用式子可表示为

$$E=\rho VgH$$

式中　ρ——水的密度；

V——水库容积；

g——重力加速度；

H——水头。

2）抽水功率：电站从电网汲取的最大功率。

3）发电功率：电站能够输出的最大功率。

调峰用抽水蓄能电站的总效率在70%～80%。

2. 动态特性

动态特性取决于三点：

1）从等待状态到起动发电所需要的转换时间。

2）从抽水到发电所需要的转换时间。

3）从发电到抽水所需要的转换时间。

一般抽水蓄能电站具有良好的动态特性，从静止到额定功率，仅需要1～2min。

3. 抽水蓄能电站类型

建造一个抽水蓄能电站的基本要求是，适当的水头及足够的上水库容积。抽水蓄能电站类型可分为三种：

1）利用两水库之间的天然高度差，连接水库的管道被埋设在山内部。

2）利用两水库之间的人工高度差，连接水库的管道敷设在山表面。

3）电站建造在一条河上，用两个大坝构筑起上、下水库。

抽水蓄能电站受制于周围环境，需要具有落差的水源，不是哪里都可以应用的。2011年5月1日起，由国网新源控股有限公司编制的国家标准《可逆式抽水蓄能机组启动试运行规程》GB/T 18482—2010开始实施。据悉，这是国家电网公司系统第一个抽水蓄能国家标准。此规程充分吸收了抽水蓄能电站启动试运行的经验，形成了完整的抽水蓄能电站启动试运行技术规程和规范，规范了机组启动试运行的组织及管理工作。这一标准对于提高抽水蓄能机组调试质量、缩短调试周期、理顺调试管理关系具有指导性意义。2010年全球抽水蓄能装机容量见表13-2。

表13-2　2010年全球抽水蓄能装机容量

国别	2010年	2015年(预测)
欧盟	41 GW	50 GW
日本	25 GW	26 GW
美国	22 GW	22 GW
中国	17 GW	30 GW
世界其他地区	30 GW	60 GW
总计	135GW	188GW

二、飞轮储能

飞轮储能是通过高速旋转的飞轮，储存能量，在需要时再旋转释放，但能量释放只能维持较短时间，一般只有几十秒钟。根据这种特性，目前飞轮储能主要应用于 UPS，在市电断电后利用飞轮惯性能量带动发电机发电，维持的时间足以使柴油发电机起动，从而实现不间断供电。

美国 Active Power 专营飞轮 UPS，即用飞轮储能的方式为数据中心提供应急备用电源(UPS)。2010 年 8 月，Active Power 正式进入中国，短短半年之内，Active Power 公司已有几十家用户，虽然 Active Power 不是大公司，但其用户却包括微软、雅虎、VISA、3M、国家电网公司、南方电网公司等企业，产品已经在上海世博会、国庆庆典、亚运会、博鳌论坛等高规格活动中应用。Active Power 中国公司在 2011 年，即进入中国市场的第二年实现盈利。除了 Active Power，其他飞轮储能公司也纷纷在中国设立分公司或销售代理。在国内对飞轮储能这个名词尚且陌生之时，国外公司已开始抢占中国市场。全球有六、七家能够提供成熟飞轮储能产品的企业，全部来自欧美。从 2000 年至今，世界财富 10 强中的 6 家，前几大零售商以及 30 家道琼斯工业指数中的 15 家企业在其数据中心中都使用了 Active Power 的飞轮 UPS 产品。在 UPS 应用中，飞轮储能正在逐步取代铅酸蓄电池，成为主流技术，之所以有这样的发展势头，在于飞轮储能有三大优势：

1）可靠性高。作为一种机械储能的方式，飞轮储能的可靠性高，而这正是数据中心对 UPS 提出的首要要求，以传统化学蓄电池的故障率为 1% 计算，飞轮储能的故障率是传统化学蓄电池的 1/7。

2）效率高、节电潜力大。传统化学蓄电池的效率在 90% 左右，而飞轮储能 UPS 满载效率为 98%。Active Power 飞轮 UPS 的效率是 97%，在 40% 带载率时是 96%；而传统蓄电池这两项数据分别是 85% ~87% 和 82% ~83%。一般情况下，大型数据中心的负载在 50% 以下。跟传统 UPS 相比，飞轮 UPS 节省了 25% 的能耗。以一个 10MW 的数据中心为例，飞轮 UPS 一年可以节约 1000 万 kW · h 电，何况中国现在出现很多大型数据中心，有些高达 60MW，因此节电潜力巨大。

3）成本低。能耗成本占 IT 行业运营成本的 30% ~50%，这其中，UPS、空调等周边设备的耗电量大大高于主机电量。而飞轮 UPS 不需要空调降温，节约了空调的成本和耗电量。同时寿命长达 20 年，节省了更换蓄电池的费用。以 10 年计算，可以帮助客户节省 60% 的成本。飞轮储能应用于 UPS 主要的技术在于，飞轮的质量和速度上实现了平衡。Active Power 的飞轮 UPS 是这类技术的代表，它在飞轮的质量和速度上实现了平衡，质量为 600lb(1lb = 0.453kg)，速度为 7700r/min，质量和速度都在可维护的范围内，噪声小于 70dB，符合国家机房标准。另外，Active Power 把传统暴露在空气中的飞轮做成了集成结构，系统在真空密闭环境下运行，可以不间断地运行 20 年。这种系统的可靠性高，维护量少，只需每 3 年更换一次轴承。Active Power 的维护人员比例较低，70 个 250kW 的系统只需一个维护人员，这在传统飞轮储能系统中是不可想象的。同时，Active Power 实现了模块化系统，可以快速部署，一两个月就能交付使用。

伴随着云计算的到来，企业能耗成本的增加显得更加突出，使用云计算的公司会更快采用飞轮 UPS。国外先进的云计算技术已经能够实现节点间切换时间达到 10s 左右。未来云计算的前景是飞轮储能已经足够，甚至不需要柴油发电机组。

按照物理学原理，要储存大容量的能量，必须有很大的质量或者很高的速度，但质量太大则很难搬运、维护，速度太快则有安全性问题。传统的飞轮储能产品正是受这两个因素的制约。

飞轮储能同蓄电池相比的缺点是储能时间只有几十秒，利用现在的技术，从市电断电到后备电源启动只需要10s的时间，欧洲国家甚至将这个时间标准定为8s，因此飞轮储能完全够用。虽然飞轮储能的初始成本较高，但使用几年之后其价格优势就能显现出来。另外，回收铅酸蓄电池在欧美国家都需要交费，一旦我国开始重视这方面问题，使用铅酸电池的成本将会越来越高。

三、锂电池储能

锂离子电池是目前世界上最为理想也是技术最高的可充电化学电池，与其他电池相比，具有能量密度高、循环寿命长、自放电率小、无记忆效应和绿色环保等突出优势。锂电池是20世纪90年代开发成功的新型绿色二次电池，近十几年来发展迅猛，在小型二次电池市场中占据了最大的市场份额，已成为化学电源应用领域中最具竞争力的电池。锂离子电池应用广泛。随着21世纪微电子技术的发展，小型化设备日益增多，对电源提出了很高的要求。化学电源随之进入了大规模应用阶段。目前主要用于手机、便携式计算机、电动工具、电子产品等方面，未来将运用于电动汽车、电动自行车、航天航空、军事移动通信工具和设备等领域，其需求量将越来越大，并有望在电动汽车领域呈现爆发式增长。

锂离子电池的主要组成部分包括外壳、内部。电池外壳一般为不锈钢或镀镍钢壳，有方形和圆柱形等不同的型号；电池的内部为卷式结构或叠片结构，由正极、电解液、隔膜、负极组成。

锰系及三元系是正极材料的首选，锰酸锂研究时间较长，是目前最成熟、最可靠的动力电池正极材料，并且没有专利的制约。从目前世界主流汽车厂商的选择也可以看出，锂离子电池是目前电动汽车的首选，但较大比例的锂离子充电电池，都采用磷酸铁锂 $LiFePO_4$ 作为正极材料。磷酸铁锂电极材料有不足之处，即电子离子传导率相对较低，在电流较大的充电-放电操作下会影响寿命。磷酸铁锂的难点主要集中在产品一致性、低温性能、高倍率放电、能量密度、电池制作成本等；另外，磷酸铁锂两大核心技术专利包敷碳、碳热还原分别归加拿大、美国公司所有。2011年4月26日，日本电气化学工业株式会社宣布在磷酸铁锂 $LiFePO_4$（Lithium Iron Phosphate）材料基础上开发出新型正极复合材料，该材料具有较高的晶格稳定性，晶格很少受到锂离子的嵌入和脱出的影响，可逆性良好，在100% DOD条件下，可以充放电2000次以上。该材料具有多方面的优势，首先是能量密度较高，理论比容量达到170mA·h/g，实际比容量也可达到140mA·h/g（0.2C，25℃条件下）以上；其次是安全性，磷酸铁锂不含对人体有害的重金属元素，是目前安全性最高的锂离子电池正极材料；第三是无记忆效应，避免像镍电池一样产生结晶；第四是充电速度较快。该复合材料为磷酸铁锂添加乙炔炭黑（Acetylene Black）和碳纳米纤维（Carbon Nanofiber）作为导电改性成分，乙炔炭黑主要由乙炔电石（Acetylene）通过热分解（Pyrolytically Decomposing）方式制成，三种材料混合后固化，导电路径可以根据既定目标设置安排，从而降低了电阻特性，和现有的正极材料相比，新材料的电阻率下降约30%。新磷酸铁锂电极材料的制造工艺由该公司独家开发，对比现有的铁基正极材料，新材料在加工过程中无需进行粉碎处理，此外，处理工序也并未要求增添特殊设备，故此成本涨幅并不明显。

从电导率、热稳定性和耐氧化性等性能来说，六氟磷酸锂是最优秀的电解质材料，六氟磷酸锂毛利率高达60%以上，目前国内有些公司在向六氟磷酸锂进军，六氟磷酸锂国产化有望来临。

其他添加剂关注PVDF、NMP、DOP。目前，工业上普遍采用聚偏氟乙烯（PVDF）作锂离子电池的粘结剂，N-甲基吡咯烷酮（NMP）作分散剂，邻苯二甲酸二辛酯（DOP）作增塑剂。

隔膜材料看起来就像一块普通的白色塑料布，被称为锂电之“芯”，这张薄膜，是锂离子电池中最核心、最关键、最基础的材料，直接决定了电池的容量、循环性能以及安全性能等。目前国内中高档隔膜主要靠进口。新乡一家公司做出了较好的产品。

固态动力型聚合物锂离子电池是继液态、胶态锂电池之后的第三代锂电池产品，具有瞬间高倍放电、体积小、高容量、安全性能好的特点，可广泛应用于通信、公交、电动汽车、电动自行车及储能等领域。河北神州巨电新能源科技有限公司与北京神州远望公司，合作承担了国家科技部863火炬计划动力锂电池产业化项目，他们在引进国外先进技术设备的基础上，多采用国产设备，并进行技术改造与创新，研发出了30A·h至500A·h系列大动力固态锂电池产品，产品应用于北京、石家庄、扬州等地的汽车、电动车、公交汽车。500A·h的锂电池为公交车专用电池，经过与大连一家客车公司合作试验，时速达到60km以上，续航里程达300km，循环寿命可达到2000次，为批量生产奠定了基础。

锂电池作为动力电池是未来的发展方向，但锂电池动力电池的技术含量高，国内锂电池动力电池产业化的进程才刚刚开始，还处于技术和产品实验期间，缺乏市场的考验，大容量锂电池动力电池真正商业化，至少还需要3~5年。

四、超级电容储能

超级电容器也称为电双层电容器。为了储存能量，电双层电容器充电要使用离子，这些离子从本体溶液迁移到电极，在那里它们被吸附。在到达电极表面之前，这些离子必须穿过狭窄的纳米孔，而且要尽可能快速高效，基本上可以说，离子穿过这些路径越快，电容器充电就越快，就会带来高速度性能，此外，电极吸附离子密度越大，电容器可以存储的电荷量就越大，就会带来高容量电容。最近，科学家们一直在测试材料，他们使这些孔具有各种不同的大小和结构，努力实现既有快速的离子传输，又有很高的吸附离子密度，但是这两个要求是有点矛盾的，因为离子穿过较大的纳米孔会更迅速，但大纳米孔会使电极密度低，从而降低吸附离子密度。科学家们已经考察了可能使用的一种材料——沸石矿模板碳（zeolite-templated carbon），可作为电极，用于这种类型的电容器，他们发现，这种材料独特的孔状结构大大提高了电容器的整体性能。这种沸石矿模板碳包含的纳米孔直径是1.2nm，小于大多数电极材料，而且有一种非常有序的结构，而其他的孔可能就是无序的和随机的。这种纳米孔的小尺寸就使得吸附离子密度很高，而这种有序的结构被描述为钻石般的框架，就使离子可以快速穿过纳米孔。在先前的研究中，研究人员发现，沸石矿模板碳上面的纳米孔小于1.2nm，就无法实现快速离子传输，这表明这一尺度可提供最佳平衡，就是平衡高速性能与高容量电容。在测试中，沸石矿模板碳的性能超过了其他材料，表明它可被用作一种电极，用于高性能电双层电容器。现在正进一步提高沸石矿模板碳的能量密度，充电时间就可缩短到只有几分钟。

美国俄亥俄州代顿市Nanotek Instruments公司新研制的石墨烯超级电容器，单位质量可

储存的能量相当于镍氢电池，打破了世界纪录，而且充电或放电只需要短短几分钟、甚至几秒钟，有望取代电池。该超级电容器电极的制备采用了石墨烯、混合5%的超级P（一种乙炔黑（acetylene black），作用相当于导电添加剂）和10%的聚四氟乙烯（PTFE）结合剂，研究人员把产生的悬浮液涂在集电器表面，把硬币大小的电容器安装在隔离箱里，电解质-电极界面的制备，采用“Celguard隔膜-3501”，而电解液是一种化学品，叫做EMIMBF4。该公司对硬币大小超级电容器的测试表明，石墨烯电极的超级电容器的能量密度为85.6 W·h/kg，而镍氢电池和锂离子电池分别为40～100W·h/kg和120W·h/kg，这是有史以来基于碳纳米材料的双电层超级电容器所达到的最高值。

双层电极与锂离子插入式电极的第四代超级电容器正在开发中。

五、液流电池

中科院大连化学物理研究所在全钒液流电池关键材料——非氟离子交换膜材料研究中取得重要突破。最新研究成果从钒电池基本原理出发，首次创新性地将多孔分离膜的概念用于全钒液流储能电池隔膜，利用多孔膜对不同价态和大小的离子的筛分效应，成功实现了多孔膜对氢离子（质子）的选择性透过而钒离子不透过。最新研究成果降低了全钒液流储能电池隔膜对离子交换基团的依赖，扩大了膜材料的选择范围，为高性能、低成本的全钒液流储能电池离子交换膜的开发开辟了一条全新的途径。这项最新研究将有望推进全钒液流储能电池的实用化进程。全钒液流钒电池示范应用工程部分统计见表13-3。

表13-3　全钒液流钒电池示范应用工程部分统计

应用场地	规模	作用	安装企业	时间
爱尔兰风电场	2MW×6h	风/储发电并网	加拿大VRB power Systems	2006年8月
美国犹他州	250kW×8h	削峰填谷		2004年2月
澳大利亚金岛风场	200kW×8h	风/储/柴联合		2003年11月
丹麦	15kW×8h	风力/储能发电		2006年6月
南非	250kW/520kW·h	应急备用		2002年
美国南卡罗来纳州	30/60kW×2h	备用电源		2005年10月
美国佛罗里达州	2×5kW×4h	光伏/储能发电		2007年7月
意大利	5kW×4h	电信备用电源		2006年4月
丹麦	5kW×4h	风力/光伏发电		2006年4月
加拿大	10kW·h	偏远地区供电		2006年3月
德国	10kW·h	光/储并网		2005年9月
泰国	1kW/12kW·h	光伏/储能应用	V-Fuel Pty Ltd	1993年
日本	200kW/800kW	平稳负载波动	住友电工	1997年
关西电力	450kW/1MW·h	电站调峰		1999年
日本	1.5kW/3MW·h	电站调峰		2001年
日本北海道	170kW/1MW·h	风/储并用系统		2001年

六、钠硫电池储能

该项技术拥有传统铅酸电池六倍的储能能力和大约八倍的使用寿命。钠硫电池储能技术的研发主要是为满足大规模新能源发电储能的需要。美国一家公司投入2500万美元用于该项目的研发，其中美国政府部门给予200万美元的支持。

七、超导磁储能

超导磁储能系统（Superconductive Magnetic Energy Storage，SMES）是利用超导装置将电磁能直接储存起来，需要时再将电磁能返回电网或其他负载的电力装置。由于装置采用超导结构，储能状态下装置损耗很小，因而效率比常规装置高。同时超导磁储能系统释能速度快，能实现快速的有功、无功功率补偿，对于提高电力系统稳定性、抑制低频振荡、改善供电品质都有良好的应用前景，能应用于太阳能发电、风力发电等功率输出不稳定的系统以提高其并网性能。超导磁储能装置具有高达95%的转换效率，不仅可用于调节电力系统，而且可用于降低甚至消除电网的低频功率振荡从而改善电网的电压和频率特性。

美国能源部下属的先进研究计划署——能源办公室（ARPA-E）给予420万美元资金，支持来自瑞士的ABB和少数几个合作伙伴一起建立一个3.3kW·h的概念性超导磁项目，以期有一天实现兆瓦级的应用。ABB、Brookhaven国家实验室、休斯敦大学和超导导线制造商SuperPower正通力合作，以期最终制造出一个1~2MW的电网规模的储能设施，使其在新能源发电大规模储能应用上，可以和压缩空气储能以及抽水蓄能等储能方式竞争。

超导目前已经进入产业化阶段。高温超导材料和低温超导材料应用领域并不一致。高温超导中超导储能、超导限流器、超导滤波应用如下：

超导储能主要用于解决光伏系统的并网问题。超导储能响应速度快，可以快速根据电源放电状况收/放电能。在美国和日本，超导储能已经有10例以上的应用。目前国家电网资助的中国电科院“第Ⅱ代高温超导储能单元构成关键技术研究”项目验收已经获得通过。由于超导储能主要用于调节电能质量，与抽水蓄能等大规模的能量储存手段并不矛盾。

超导限流器能在电网短路时，限制短路电流，保护电网，保守预计广东电网在2015年会有60个变电站短路电流超过设计的安全标准。华东等负荷大的地区也有同样的问题。与其他限制短路电流的方式相比，超导限流器具有不改动原有设计和设备，运行能耗大幅降低等优点。与500kV空心电抗器对比，超导限流器年节省电费200万元，节省原有设备改造投入500万以上。估计超导限流器的市场在600亿。

超导滤波器是移动通信基站静态扩容的重要手段。它提高移动通信基站覆盖面积一倍，同时降低掉话率50%以上。超导滤波属于成熟技术，美国目前已经装备了6000台超导滤波器。国内目前生产的超导滤波器主要应用于军事雷达、军事通信方面。民用方面，联通公司已经在北京和唐山的试点基站安装了超导滤波器，成功运行4年以上。随着移动通信数据传输量的大幅度增加，超导滤波必将进入移动通信基站。保守估计超导滤波器的市场在375亿。

低温超导主要用于核磁共振和可控核聚变磁场线圈，技术成熟，市场较小。

各种储能技术比较见表13-4。

表 13-4　各种储能技术比较

储能类别	容量	功率	起动时间	储能期限
抽水蓄能	10^3MW · h	10^3MW	2 ~ 5min	数月
压缩空气	10^2MW · h	10^2MW	12min	数月
飞轮	kW · h	10^2MW	秒级	小时级
锂电池	kW · h	kW	毫秒级	数月
超导磁	1MW · h	0. 5MW	秒级	分钟级
超级电容	10^3F		毫秒级	分钟级

第十四章　太空光伏电站

太空没有大气层的阻隔、没有气象的影响、没有四季的变化、没有昼夜的区别、没有灰尘，可以24h持续不断地接收阳光，不用考虑能量储存。太空中，接收到的太阳光日辐射能量是地球上的8～10倍，接收到的太阳辐射能量密度是地面上的1.4倍（太空的辐射能量密度是1367W/m^2，即太阳常数），太空的土地是免费的，且很大很大。因此，进行太空光伏电站的建设是人类能源发展计划的必然。

1. 太空技术优势

太空的独特天然条件，带来一系列的技术优势：

1）可在太空制造电池。太空真空条件可进行大面积的薄膜电池制造，可方便地使用蒸发法、喷镀法。在35800km同步轨道，真空度可达10^{-13}Torr，用卷到卷工艺，10～20km^2的巨型太阳电池可以一次制造出来。

2）可采用无线通信和光通信。

3）超导母线连接，不再采用地面上的YJV_{22}电缆线。

4）无人管理。

5）不需考虑电池支架机械强度的影响。

6）无氧化引起的材料性能衰退。

2. 太空发电原理

在地面上将太空所需材料及设备备齐，材料包括电池基体（电池衬底）、电池材料（塑料瓶装气体）、电池喷射设备、电池支架、电池板展开机械手、磁控管系统、测控系统及微调装置、防治太空垃圾装置、工作站等，由这些材料及设备组建成太空电站卫星，巨型电池板在太空中制造（地面无法造就大面积高真空的空间），电池比功率在2500W/kg以上。用大型太空飞船将这些材料及设备源源不断地运往35800km同步轨道上。由宇航工人在太空制造、安装电池板，安装组成一组组5kW独立的小阵列，各独立的小阵列通过各自独立的高频磁控管组件（2450MHz）及发射天线，将直流电转换成微波，转换效率在85%左右，发射天线将微波发射到建在沙漠地区的地面接收站，尽管路途遥远，但太空是真空状态，所以微波传送过程中能量损失很小，损失率在8%左右。因我国不在赤道线上，因此，地面接收站不可能建在赤道线上。地面接收站要与太空发射点对齐，经过测控系统检测，保证接收率在98%以上，正确无误后才可发射微波。到达地面的微波能量密度为230W/m^2，电波法规定能量密度最高为850W/m^2，对人畜没有危害。地面整流接收天线直接将接收到的微波转换成直流电，经汇流箱、直流柜、逆变器，转为交流电，升压后送到电网，由电网送到广大用户。该电源24h不停顿、不衰减、质量稳定。太空电站卫星配有微调装置，用来调整其他天体的引力造成该电站卫星的漂移。太空电站卫星配有防治太空垃圾装置，驱除及捕获太空垃圾。太空垃圾由地面监控。太空系统的要求：重量轻、可靠性极高、体积小、寿命长、效率高、有经济价值。

太空电站卫星由四大部分构成：太空发电传送系统、地面接收系统、测控系统、地面输

送。作为一个工程时，还要加上运输工具和发射、安装、调试步骤。

因太空发电是我国终将进入的领域，因此对太空发电作一个包括基础知识在内的、全面的介绍。

第一节　太空光伏电站基础知识

本节介绍无线电源技术、微波、天线及磁控管。

一、无线电源技术

利用无线电源技术可将数百千瓦的电源，进行远距离传输。长久以来，百万瓦级（MW，太阳能发电）或毫瓦级的传输，受到无线电源技术的关注。

1. 应用实例

1）以色列 Powermat 公司开发“电源垫”的无线电源。通过电磁波实现电力传输，无需连接电源线和电源插座。这种无线电源相当于“阅读器”的基座和一个将电磁波转换为电流的“标签”，基座是一块几毫米厚的垫子，可以放在桌子上，也可以镶嵌在厨房工作台表面或墙上，它通过电磁场向携带“标签”的电器输电，只要将带有“标签”的电器放到垫子上或垫子附近，即可获得电力。这种无线电源基座中的发射器，能传输 100W 电力，可为 4～5 个中型电器和一些小电器供电。该电源还具有自我调节功能，可根据电器的工作状态调整供电，使电磁辐射降到最小。

2）电子标签：由阅读器和标签构成。阅读器利用天线在“标签”周围形成磁场，阅读器发射频率调谐“标签”；“标签”从磁场中获得能量，转换为电信号发送给阅读器。

3）1987 年 10 月 7 日，一架小型飞机通过 RF（无线射频）波束提供的动力，在空中飞行。

4）英特尔的研究人员采用一种由麻省理工学院研发的磁共振技术，在其 2008 年 8 月召开的年会上，采用相对大的线圈在 3ft 的距离内，以 10MHz 频率输送出 60W 的交流电，接通了一只白炽灯。同年 12 月，英特尔在其实验室内，以 3ft 的距离输送出 12W 的直流电，为一款小型便携式计算机供电。

5）美国一家公司的无线电源技术，在匹兹堡一家动物园，对企鹅笼舍中温湿度传感器的充电电池，进行远程充电。

6）日本手机厂商间，“使电源线消失”的技术在稳步发展。利用该技术，只需把手机放到专用台上，就可以进行充电。此外，无线耳机、数码相机等多种便携产品，也可以进行类似的充电。

7）美国航空暨太空总署（NASA）建立了一个集研究、技术与投资于一身的 250MW 太阳能动力系统（SPS）。

8）荷兰飞利浦电子（Royal Philips Electronics）上市了无线电源技术的照明器具。

9）防止无线电源错误充电的 ID 认证方法，以及在充电的同时进行高速数据传输的方法已问世。

10）激光能量传输。激光传输和微波类似，将太空中收集的太阳能转换成激光束，高效的激光能将 80% 的能量送到地面。激光与微波传输的主要区别在频率，微波是 2.45GHz 或 5.8GHz 频段，激光在可见光或红外光频段，大气对该频段的吸收很少，频率还决定了发

射器和接收器的尺寸及传输能量密度。同光缆可传递更多数据类似，激光可以以更窄的波束、更小的发射和接收面积传递能量。欧洲航天公司 Astrium 在德国用红外激光传输能量的方法进行了测试。

早在二次世界大战期间，就有用磁控管将电能转换成微波的技术，但是将微波转回电流的方法却一直到 1964 年才被发现，William C. Brown 成功地研发出一款矽整流二极体天线，才将微波转回为电流。1968 年，Peter Glaser 提出了在电源能量远低于国际安全标准的条件下，利用微波从太阳能动力卫星向地面传输电源的想法。

2. 微波束电源传输原理

1）定向天线发射 RF 电源，其效率在 85% 左右。两个天线之间的能量传输效率由天线的尺寸、RF 波的波长以及两天线间的距离来决定（这里为了简化问题假定无传输损耗，因此方程式中不包含波束强度）。如果假设发射天线直径为 DT，接收天线直径为 DR，RF 波长为 λ（$\lambda = 1/f$，f 为 RF 频率），天线距离为 H，而 k 为一比例常数（通常选择 1.2），可以得到

$$DT \cdot DR = 2k\lambda H$$

2）电源密度的问题。美国食品暨药物管理局（FDA）强制规定在距微波炉表面 2in（1in = 0.0254m）处，每平方厘米的微波辐射不超过 5mW。

3）收集周围环境中的杂散电源之后，要进行波束电源传输。从产业角度来看，电源收集本身虽然是一个新概念，将“收集”形容为“净化”也许更为恰当，因为这个概念主要是指对飘浮在空气中的杂散能量进行搜索和收集。能量收集应该将能量收集的模式从“能量在你所能发现之处”转变为“能量始于无线建置之处”。

二、微波

微波是波长从 1mm ~ 1m 的一种电磁波，包括分米波、厘米波和毫米波等波段，从现代微波技术的发展来看，一般认为短于 1mm 的电磁波（亚毫米波）也属于微波范围。相应的频率从 300MHz ~ 300GHz，比一般的无线电波频率高，通常也称为“超高频电磁波”。微波作为一种电磁波具有波粒二象性，微波量子的能量为 $199 \times 10^{-25} \sim 1.99 \times 10^{-22}$J。微波的基本性质通常呈现为穿透、反射、吸收三个特性。对于玻璃、塑料和瓷器，微波几乎是穿越而不被吸收。对于水和食物等就会吸收微波而使自身发热。而对金属类东西，则会反射微波。

1. 微波特性

1）电子学方面，微波在电子学方面的表现是，它的波长比地球上很多物体和实验室中常用器件的尺寸相对要小很多，或在同一量级。当波长远小于物体（如飞机、船只、火箭、建筑物等）的尺寸时，微波的特点和几何光学的相似。利用这个特点，在微波波段能制成高方向性的系统（如抛物面反射器）。当波长和物体（如实验室中的无线电设备）的尺寸有相同量级时，微波的特点又与声波相近，例如微波波导类似于声学中的传声筒、喇叭天线和缝隙天线；谐振腔类似于共鸣箱等。波长和物体尺寸在同一量级的特点，提供了一系列典型的电磁场边值问题。

2）物理学方面，微波物理学方面的表现是分子、原子与核系统许多共振现象都发生在微波的范围，因而微波为探索物质的基本特性提供了有效的研究手段，微波的产生、放大、发射、接收、传输、控制和测量等一系列技术都不同于其他波段。

3）微波的量子能量还不够大，不足以改变物质分子的内部结构或破坏分子之间的键。

4）信息性。由于微波频率很高，所以在不大的相对带宽下，其可用的频带很宽，可达数百甚至上千 MHz。这是低频无线电波无法比拟的。这意味着微波的信息容量大，所以现代多路通信系统，包括卫星通信系统，几乎无一例外都是工作在微波波段。另外，微波信号还可以提供相位信息、极化信息、多普勒频率信息。这在目标检测、遥感目标特征分析等应用中十分重要。

5）微波的热效应。微波对生物体的热效应是指由微波引起的生物组织或系统受热，而对生物体产生的生理影响。热效应主要是生物体内，有极分子在微波高频电场的作用下，反复快速取向转动而摩擦生热；体内离子在微波作用下振动，也会将振动能量转化为热量；一般分子也会吸收微波能量后使热运动能量增加。如果生物体组织吸收的微波能量较少，它可借助自身的热调节系统，通过血液循环将吸收的微波能量（热量）散发至全身或体外，如果微波功率很强，生物组织吸收的微波能量多于生物体所能散发的能量，则引起该部位体温升高。局部组织温度升高将产生一系列生理反应，如使局部血管扩张，并通过热调节系统使血液循环加速，组织代谢增强，白细胞吞噬作用增强，促进病理产物的吸收和消散等。

6）微波的非热效应。微波的非热效应是指除热效应以外的其他效应，如电效应、磁效应及化学效应等。在微波电磁场的作用下，生物体内的一些分子将会产生变形和振动，使细胞膜功能受到影响，使细胞膜内外液体的电状况发生变化，引起生物作用的改变，进而可影响中枢神经系统等。微波干扰生物电（如心电、脑电、肌电、神经传导电位、细胞活动膜电位等）的节律，会导致心脏活动、脑神经活动及内分泌活动等一系列障碍。对微波的非热效应，人们还了解的不很多。当生物体受强功率微波照射时，热效应是主要的（一般认为，功率密度在 $10mW/cm^2$ 者多产生微热效应，且频率越高产生热效应的阈强度越低）；长期的低功率密度（$1mW/cm^2$ 以下）微波辐射主要引起非热效应。

7）微波加热原理。被加热介质物料中的水分子是极性分子，它在快速变化的高频磁场作用下，其极性取向将随着外电场的变化而变化，造成分子间相互摩擦运动，此时微波场的场能转化为介质内的热能，使物料温度升高，产生热化和膨化等一系列物化过程，达到微波加热的目的。

8）微波杀菌的机理。微波杀菌是利用了电磁场的热效应和生物效应共同作用的结果。微波对细菌的热效应是使蛋白质变化，使细菌失去营养、繁殖和生存的条件而死亡。

微波振荡源的固体化以及微波系统的集成化是现代微波技术发展的两个重要方向。固态微波器件在功率和频率方面的进展，使得很多微波系统中常规的微波电子管已为或将为固体源所取代。固态微波源的发展促进了微波集成电路的研究。

2. 微波的应用

1）雷达和通信。雷达不仅用于国防，同时也用于导航、气象测量、大地测量、工业检测和交通管理等方面。通信应用主要是现代的卫星通信和常规的中继通信。射电望远镜、微波加速器等对于物理学、天文学等的研究具有重要意义。毫米波微波技术对控制热核反应的等离子体测量，提供了有效的方法。微波遥感已成为研究天体、气象和大地测量、资源勘探等的重要手段。微波在工业生产、农业科学等方面的研究，以及微波在生物学、医学等方面的研究和发展已越来越受到重视。

2）与其他学科互相渗透而形成若干重要的边缘学科。微波天文学、微波气象学、微波波谱学、量子电动力学、微波半导体电子学、微波超导电子学等，已经比较成熟。微波声学

的研究和应用已经成为一个活跃的领域。微波光学的发展，特别是20世纪70年代以来光纤技术的发展，具有技术变革的意义。

3）传送电能。微波传输电能的实例有微波动力飞机。微波动力飞机不带燃料，只有一台直流电动机和微波接收整流装置。起飞时由蓄电池为电动机供电，待升高到100m后，电池关闭，地面上的微波发生器通过锅形天线发射微波；飞机上的特殊天线，把接收到的微波变成直流电，驱动电动机，带动飞机螺旋桨。飞行使用的波长为10cm和3.8cm微波，功率为几百千瓦，足够飞机在9000多米高度使用，如果将两个或多个这样的发生器合并起来，可供飞机在1.5万米以上的高空飞行使用。发射微波的天线很大，直径达60多米。微波动力飞机的接收天线不仅要接收微波，还要把微波转换成电动机可用的直流电。现在在加拿大、美国都已试制出较大型的微波动力飞机，但地面发射天线太大，不容易转动，一般还只能用于直升机。

3. 微波天线

工作于米波、分米波、厘米波、毫米波等波段的发射或接收天线，统称为微波天线。微波主要靠空间波传播，为增大通信距离，天线架设较高。在微波天线中，应用较广的有抛物面天线、喇叭抛物面天线、喇叭天线、透镜天线、开槽天线、介质天线、潜望镜天线等。图14-1为微波天线。微波天线技术是制约雷达、测量控制技术发展的瓶颈。与其他电子产品不同的是，微波天线的电气性和整机功能，主要靠馈源网络的结构保证，因此，馈源网络的设计及工艺制造是天线产品制造的关键技术。中国电子科技集团公司第三十九研究所，解决了高精度微波天线设备的配套能力，以大中型天线系统为对象，设计制造出天线馈源、精密传动箱、天线成形模具三个系列四种类型关键零件系统。



图14-1 微波天线

4. 微波传播

微波主要是由空间波来传播的，空间波是在空间范围内沿直线方向传播的波。由于地球的曲率使空间波传播存在一个极限直视距离 R_{max}。在最远直视距离之内的区域，习惯上称为照明区；极限直视距离 R_{max} 以外的区域，则称为阴影区。利用微波进行通信时，接收点应落在发射天线极限直视距离 R_{max} 内。由发射天线直接射到接收点的电波称为直射波；发射天线发出的指向地面的电波，被地面反射而到达接收点的电波称为反射波。显然，接收点的信号应该是直射波和反射波的合成。电波的合成不会像1+1=2那样简单地代数相加，合成结果会随着直射波和反射波间的波程差的不同而不同。波程差为半个波长的奇数倍时，直射波和反射波信号相加，合成为最大；波程差为一个波长的倍数时，直射波和反射波信号相减，合成为最小。可见，地面反射的存在，使得信号强度的空间分布变得相当复杂。在地面进行直射波通信，其接收点的场强由两路组成：一路由发射天线直达接收天线，另一路由地面反射后到达接收天线，如果天线高度和方向架设不当，容易造成相互干扰（例如电视的重影）。限制直射波通信距离的因素主要是地球表面弧度和山地、楼房等障碍物，因此超短波和微波天线要求尽量高架。从太空向地面传播不存在阴影区问题。

5. 微波与环境

微波能量传输系统采用了国际电信联盟分配的2.45GHz和5.8GHz，微波能量传输功率密度比通信系统的高几个数量级，必须考虑微波能量传输对环境的影响。

1）对无线通信系统的影响。日本对2.45GHz的太空电站微波能量传输与无线通信系统间的干涉做了计算。如果要使微波传输频率的谐波在国际通信联盟规定的能量辐射密度范围内，需要对信号进行调制。载波噪声、谐波及乱真发射必须足够小以避免对广播的影响。栅瓣及旁瓣应尽量低以减小影响区域。降低栅瓣还可减小传输功率的损失。

2）对人的影响。由于微波能量传输的功率密度比无线通信强，需要考虑信号对人的影响。关于微波安全的考虑由来已久，目前射频和微波的标准是基于相关科学文献的临界状况制定的，该标准不考虑微波与人体相互作用的机理，而把在最敏感情况下可能对人体造成伤害的吸收率作为指标。有研究认为微波对人健康的影响仅在于热效应，辐射防护委员会（ICNIRP）制定的标准是：无论何种频率，工作中应在50W/m^{2}下，公共场合在10W/m^{2}下。IEEE对人体暴露在微波辐射的最大量标准，在2.45GHz和5.8GHz下分别是以平均81.6W/m^{2}以及100W/m^{2}的强度超过6min，或以平均16.3W/m^{2}以及38.7W/m^{2}的强度超过30min，前者是在可控的环境下，后者是在不可控的环境下，也可理解为职业环境和公共场合。对于今后的微波功率传输系统，天线外区域辐射需控制在安全标准内，天线内的辐射标准还有待讨论。

3）微波与大气的相互作用。大气对微波的影响主要由空气和雨对微波的吸收和散射以及不规则的空气折射率造成。总的来说这些影响很小。对于2.45GHz和5.8GHz的微波，水汽和氧气的吸收占主要部分。特殊情况下只需考虑氧气对微波的吸收。该值约为0.007dB/km。就太空电站而言，总吸收量约为0.035dB。对于日本，吸收量约为0.05dB。50mm/h及150mm/h的雨量对于2.45GHz微波造成的衰减系数分别为0.01dB/km和0.03dB/km，对5.8GHz微波造成的衰减系数分别为0.3dB/km和1.2dB/km。不规则的空气折射率造成的微波损失更小。2.45GHz情况下的太空电站可以忽略空气和雨对其的衰减，而5.8GHz在雨天的损失需要考虑。

4）微波与太空等离子区的相互作用。当太空电站的微波穿过电离层的等离子区时两者会相互作用。像卫星的弱微波通信信号在等离子区会发生折射、法拉第旋转、闪光或火花以及被吸收等现象。因此等离子区对微波功率传输系统的影响是不可忽略的。例如，根据斯奈尔定律及电离层的总电子束计算，2.45GHz和5.8GHz通过电离层的反射理论上仅0.67m和0.12m。然而天线的直径超过千米这一因素却没有考虑。虽然2.45GHz在法拉第旋转作用下偏振面会旋转7°，由于太空电站的微波使用的是圆偏振波，故也不考虑。

微波和电离层间的非线性作用需要仔细考虑。理论上可以预测如等离子的欧姆热效应、通过等离子的有质动力产生的霍尔效应、微波束的热自聚焦效应、三波互作用以及在MHz频段对静电波的激励等作用。它们在卫星通信系统由于微波能量小而不会发生。

Perkins和Roble于1978年从理论上计算了太空电站微波束的欧姆热效应。根据电子的密度及电子中子的碰撞频率可估算微波的吸收量。该效应在低电离层最为明显，因为碰撞频率最高。对三波互作用以及在MHz频段对静电波的激励等作用，Matsumoto在1982年预测微波会衰减为向前的等离子波（拉曼散射Raman Scattering）或离子声波（布里渊散射Brillouin Scattering）以及向后的次微波。1983年，Matsumoto团队利用火箭做了微波能量传输试

验。通过试验对理论进行修正后认为，小于0.01%的微波能量会转化为静电波。

三、天线

天线是一种变换器，用金属导线、金属面或其他介质材料构成一定形状，架设在一定空间，将从发射机馈给的射频电能转换为向空间辐射的电磁波能，或者把空间传播的电磁波能转化为射频电能并输送到接收机的装置。图14-2为天线。它把传输线上传播的导行波，变换成在无界媒介（通常是自由空间）中传播的电磁波，或者进行相反的变换。无线电通信、广播、电视、雷达、导航、电子对抗、遥感、射电天文等工程系统，凡是利用电磁波来传递信息的，都依靠天线来进行工作。此外，在用电磁波传送能量方面，非信号的能量辐射也需要天线。一般天线都具有可逆性，即同一副天线既可用作发射天线，也可用作接收天线。同一天线作为发射或接收的基本特性参数是相同的。这就是天线的互易定理。



图14-2　天线

1. 天线的原理

（1）半波对称振子天线　当导体上通以高频电流时，在其周围空间会产生电场与磁场。按电磁场在空间的分布特性，可分为近区、中间区、远区。设 R 为空间一点距导体的距离，在 $R \ll \lambda/(2\pi)$ 时的区域称为近区，在该区内的电磁场与导体中电流、电压有紧密的联系。

在 $R \gg \lambda/(2\pi)$ 的区域称为远区，在该区域内电磁场能离开导体向空间传播，它的变化相对于导体上的电流、电压就要滞后一段时间，此时传播出去的电磁波已不与导线上的电流、电压有直接的联系了，这区域的电磁场称为辐射场。

发射天线正是利用辐射场的这种性质，使传送的信号经过发射天线后能够充分地向空间辐射。要使导体成为一个有效辐射体导系统，在平行双线的传输线上为了使只有能量的传输而没有辐射，必须保证两线结构对称，线上对应点电流大小和方向相反，且两线间的距离 $\ll \pi$。要使电磁场能有效地辐射出去，就必须破坏传输线的这种对称性，如采用把两导体成一定的角度分开，或是将其中一边去掉等方法，都能使导体对称性破坏而产生辐射。将开路传输或距离终端 $\pi/4$ 处的导体成直状分开，此时终端导体上的电流已不是反相而是同相了，从而使该段导体在空间点的辐射场同相叠加，构成一个有效的辐射系统。这就是最简单、最基本的单元天线，称为半波对称振子天线，其特性阻抗为75Ω。电磁波从发射天线辐射出来以后，向四面传播出去，若电磁波传播的方向上放一对称振子，则在电磁波的作用下，天线振子上就会产生感应电动势。如此时天线与接收设备相连，则在接收设备输入端就会产生高频电流。这样天线就起着接收作用并将电磁波转化为高频电流，也就是说此时天线起着接收天线的作用，接收效果的好坏除了电波的强弱外还取决于天线的方向性和半边对称振子与接收设备的匹配。

（2）环形天线　环形天线和人体非常相似，有普通的单极或多极天线功能。再加上小型环形天线的体积小、高可靠性和低成本，使其成为微小型通信产品的理想天线。典型的环形天线由电路板上的铜导线组成的电回路构成，也可能是一段制作成环形的导线，其等效电路相当于两个串联电阻与一个电感的串联。R_{rad} 是环形天线实际发射能量的电阻模型，它消耗

的功率就是电路的发射功率。假设流过天线回路的电流为 I，那么 R_{rad} 的消耗功率，即 RF 功率为 $P_{radiate}=I_2\cdot R_{rad}$。电阻 R_{loss} 是环形天线因发热而消耗能量的电阻模型，它消耗的功率是一种不可避免的能量损耗，其大小为 $P_{loss}=I_2\cdot R_{loss}$。如果 $R_{loss}>R_{rad}$，那么损耗的功率比实际发射的功率大，因此这个天线是低效的。天线消耗的功率就是发射功率和损耗功率之和。实际上，环形天线的设计几乎无法控制 R_{loss} 和 R_{rad}，因为 R_{loss} 是由制作天线的导体的导电能力和导线的大小决定的，而 R_{rad} 是由天线所围成的面积大小决定的。

2. 天线的分类

天线按工作性质可分为发射天线和接收天线；按用途可分为通信天线、广播天线、电视天线、雷达天线等；按工作波长可分为超长波天线、长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线、微波天线等；按结构形式和工作原理可分为线天线和面天线等。图 14-3 为抛物面天线。



图 14-3　抛物面天线

天线按维数来分可以分成两种类型：一维天线和二维天线。一维天线由许多电线组成，这些电线或者像手机上用到的直线，或者是一些灵巧的形状，就像出现电缆之前在电视机上使用的老兔子耳朵。单极和双极天线是两种最基本的一维天线。二维天线变化多样，有片状（一块正方形金属）、阵列状（组织好的二维模式的一束片），还有喇叭状、碟状。

天线根据使用场合的不同可以分为：手持台天线、车载天线、基地台天线三大类。手持台天线就是个人使用手持对讲机的天线，常见的有橡胶天线和拉杆天线两大类。车载天线是指原设计安装在车辆上的通信天线，最常见、应用最普遍的是吸盘天线。车载天线结构上也有缩短型、四分之一波长、中部加感型、八分之五波长、双二分之一波长等形式的天线。基地台天线在整个通信系统中具有非常关键的作用，尤其是作为通信枢纽的通信台站。常用的基地台天线有玻璃钢高增益天线、四环阵天线（八环阵天线）、定向天线。

3. 天线的基本概念及参数

本部分依次介绍电磁波的辐射、对称振子、天线方向性、馈线、天线方向性增强、抛物反射面、增益、波瓣宽度、前后比、上旁瓣抑制、天线的背射、驻波场、双极化天线、极化损失、极化隔离、天线的输入阻抗、天线的工作频率范围。

（1）电磁波的辐射　导线上有交变电流流动时，就可以发生电磁波的辐射，辐射的能力与导线的长度和形状有关。若两导线的距离很近，电场被束缚在两导线之间，因而辐射很微弱；将两导线张开，电场就散播在周围空间，因而辐射增强。必须指出，当导线的长度 L 远小于波长 λ 时，辐射很微弱；导线的长度 L 增大到可与波长相比拟时，导线上的电流将大大增加，因而就能形成较强的辐射。

（2）对称振子　对称振子是一种经典的、迄今为止使用最广泛的天线，单个半波对称振子可简单地独立地使用或作为抛物面天线的馈源，也可采用多个半波对称振子组成天线阵。两臂长度相等的振子叫做对称振子。每臂长度为四分之一波长、全长为二分之一波长的振子，称为半波对称振子。另外，还有一种异型半波对称振子，可看成是将全波对称振子折合成一个窄长的矩形框，并把全波对称振子的两个端点相叠，这个窄长的矩形框称为折合振子，注意，折合振子的长度也是二分之一波长，故称为半波折合振子。

（3）天线方向性　天线方向性指天线向各个方向辐射或接收电磁波相对强度的特性。对发射天线来说，天线向某一方向辐射电磁波的强度是由天线上各点电流元产生于该方向的电磁场强度相干合成的结果。

如果把天线各个方向辐射电磁波的强度用从原点出发的矢量长短来表示，则将全部矢量终点连在一起所构成的封闭面称为天线的立体方向图，它表示天线向不同方向辐射的强弱。任何通过原点的平面与立体方向图相截的轮廓线称为天线在该平面内的平面方向图。工程上一般采用主平面上的方向图来表示天线的方向性，而主平面一般是指包含最大辐射方向和电场矢量或磁场矢量的平面。

不同天线有不同的方向图。有些天线的方向图呈现许多花瓣形状，图 14-4 为花瓣状天线方向图。花瓣状天线一般由一个主瓣和若干个旁瓣（或称副瓣）组成。

用电场或磁场强度来表示辐射强度的方向图称为场强方向图；用功率密度的大小来表示的方向图称为功率方向图。在功率方向图的主瓣中，功率降到主瓣最大值一半的两点所张的夹角称为主瓣的半功率点宽度（简称主瓣宽度），用它可以表示天线集中辐射的程度。主瓣宽度越小，表示天线的辐射能量越集中在天线的最大辐射方向。

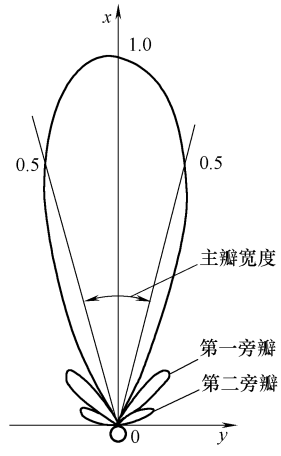


图 14-4　花瓣状天线方向图

方向图中的最大旁瓣（通常是邻近主瓣的第一旁瓣）与主瓣最大值的比值称为旁瓣电平，通常用分贝（dB）来表示。例如，在功率方向图中有

$$\text{旁瓣电平} = 10\lg \frac{\text{旁瓣最大值}}{\text{主瓣最大值}}$$

另外一个表示天线集中辐射程度的参量是天线的方向性系数或天线增益。向各方向均匀辐射的理想点源天线称为均匀辐射器，并用作比较基准。天线方向性系数的定义是：在总辐射功率相同的情况下，天线在最大辐射方向的辐射功率密度 P 与均匀辐射器在该方向的辐射功率密度 P_0 的比值，通常以 D（单位为 dB）来表示，即

$$D = 10\lg \frac{P}{P_0}$$

天线增益的定义是：在总输入功率相同的情况下，天线在最大辐射方向的辐射功率密度 P 与均匀辐射器在该方向的辐射功率密度 P_0 的比值，通常以 G（单位为 dB）来表示，即

$$G = 10\lg \frac{P}{P_0}$$

天线的辐射效率 η 是总辐射功率与总输入功率之比，所以如果理想均匀辐射器的辐射效率为 100%，则天线的增益与其方向性系数的关系为 $G = \eta D$。

以上是对发射天线来说的，但根据互易定理，同一天线如作为接收天线，将具有相同的方向图和方向性系数。

（4）馈线　发射天线的基本功能之一是把从馈线取得的能量向周围空间辐射出去，基本功能之二是把大部分能量朝所需的方向辐射。垂直放置的半波对称振子具有平放的“面包圈”形的立体方向图。立体方向图虽然立体感强，但绘制困难，平面方向图描述天线在某指

定平面上的方向性。在振子的轴线方向上辐射为零，最大辐射方向在水平面上，在水平面上各个方向上的辐射一样大。

（5）天线方向性增强　若干个对称振子组阵，能够控制辐射，产生“扁平的面包圈”，把信号进一步集中到在水平面方向上；也可以利用反射板把辐射能控制到单侧方向，平面反射板放在阵列的一边构成扇形区覆盖天线，反射面的作用就是把功率反射到单侧方向，提高增益。

（6）抛物反射面　抛物反射面的使用，更能使天线的辐射像光学中的探照灯那样，把能量集中到一个小立体角内，从而获得很高的增益。不言而喻，抛物面天线的构成包括两个基本要素：抛物反射面和放置在抛物面焦点上的辐射源。

（7）增益　增益是指在输入功率相等的条件下，实际天线与理想的辐射单元在空间同一点处所产生的信号功率密度之比。它定量地描述一个天线把输入功率集中辐射的程度。增益显然与天线方向图有密切的关系，方向图主瓣越窄，副瓣越小，增益越高。可以这样来理解增益的物理含义，即在一定距离上的某点处产生一定大小的信号，如果用理想的无方向性点源作为发射天线，需要 100W 的输入功率，而用增益为 $G=13\text{dB}=20$ 的某定向天线作为发射天线时，输入功率只需 $100\text{W}/20=5\text{W}$。换言之，某天线的增益就是从其最大辐射方向上的辐射效果来说，与无方向性的理想点源相比，把输入功率放大的倍数。半波对称振子的增益为 $G=2.15\text{dBi}$。4 个半波对称振子沿垂线上下排列，构成一个垂直四元阵，其增益约为 $G=8.15\text{dBi}$（dBi 这个单位表示比较对象是各向均匀辐射的理想点源）。如果以半波对称振子作比较对象，其增益的单位是 dBd。半波对称振子的增益为 $G=0\text{dBd}$（因为是自己跟自己比，比值为 1，取对数得零值）。垂直四元阵，其增益约为 $G=8.15\text{dBi}-2.15\text{dBi}=6\text{dBi}$。

天线增益的若干近似计算式如下：

1）天线主瓣宽度越窄，增益越高。对于一般天线，估算其增益为

$$G(\text{dBi})=10\lg[32000/(2\theta 3\text{dB},E\times 2\theta 3\text{dB},H)]$$

式中　$2\theta 3\text{dB}$、E、$2\theta 3\text{dB}$、H——天线在两个主平面上的波瓣宽度；

32000——统计出来的经验数据。

2）对于抛物面天线，近似计算其增益为

$$G(\text{dBi})=10\lg[4.5\times(D/\lambda_0)\times 2]$$

式中　D——抛物面直径；

λ_0——中心工作波长；

4.5——统计出来的经验数据。

3）对于直立全向天线，增益的近似计算式为

$$G(\text{dBi})=10\lg(2L/\lambda_0)$$

式中　L——天线长度；

λ_0——中心工作波长。

（8）波瓣宽度　方向图通常都有两个或多个瓣，其中辐射强度最大的瓣称为主瓣，其余的瓣称为副瓣或旁瓣。在主瓣最大辐射方向两侧，辐射强度降低 3dB（功率密度降低一半）的两点间的夹角定义为波瓣宽度（又称为波束宽度或主瓣宽度或半功率角）。波瓣宽度越窄，方向性越好，作用距离越远，抗干扰能力越强。还有一种波瓣宽度，即 10dB 波瓣宽度，顾名思义它是方向图中辐射强度降低 10dB（功率密度降至 1/10）的两个点间的夹角。

（9）前后比　方向图中，前后瓣最大值之比称为前后比，记为 F/B。前后比越大，天线的后向辐射（或接收）越小。

$$F/B = 10\lg(\text{前向功率密度}/\text{后向功率密度})$$

对天线的前后比 F/B 有要求时，其典型值为 18 ~ 30dB，特殊情况下则要求达 35 ~ 40dB。

（10）上旁瓣抑制　对于基站天线，人们常常要求它的垂直面（俯仰面）方向图中，主瓣上方第一旁瓣尽可能弱一些。这就是所谓的上旁瓣抑制。基站的服务对象是地面上的移动电话用户，指向天空的辐射是毫无意义的。为使主波瓣指向地面，安装时需要将天线适度下倾。

（11）天线的背射　天线的背射是基于谐振腔波相干涉、叠加的原理。谐振腔由主反射器、副反射器及馈源构成。由慢波结构的馈源辐射线射向主反射器，再由主反射器反射回来，到副反射器又再次被反射，于是在谐振腔内沿其轴向形成背射。

（12）驻波场　形成驻波场的条件是主、副反射器的间距是半波长的整数倍。因背射天线形成的谐振腔是开口的，适当选择天线各部分尺寸，即可使开口谐振腔的能量辐射到自由空间，形成锐波束，其最大辐射方向沿其轴向。因这种天线的辐射方向与馈源的辐射方向相反，因此这种天线被看成“天线背射”。

（13）双极化天线　两种单极化的情况为 45°极化与 -45°极化，它们仅仅在特殊场合下使用。把垂直极化和水平极化两种极化的天线组合在一起，或者把 45°极化和 -45°极化两种极化的天线组合在一起，就构成了一种新的天线——双极化天线。双极化天线辐射（或接收）两个极化在空间相互正交（垂直）的波。

（14）极化损失　垂直极化波要用具有垂直极化特性的天线来接收，水平极化波要用具有水平极化特性的天线来接收。右旋圆极化波要用具有右旋圆极化特性的天线来接收，而左旋圆极化波要用具有左旋圆极化特性的天线来接收。当来波的极化方向与接收天线的极化方向不一致时，接收到的信号就会变小，也就是说，发生极化损失。例如：当用 45°极化天线接收垂直极化或水平极化波时，或者，当用垂直极化天线接收 45°极化或 -45°极化波时，都要产生极化损失。用圆极化天线接收任一线极化波，或者，用线极化天线接收任一圆极化波，等等情况下，也必然发生极化损失——只能接收到来波的一半能量。当接收天线的极化方向与来波的极化方向完全正交时，例如用水平极化的接收天线接收垂直极化的来波，或用右旋圆极化的接收天线接收左旋圆极化的来波时，天线就完全接收不到来波的能量，这种情况下极化损失最大，称极化完全隔离。

（15）极化隔离　理想的极化完全隔离是没有的。馈送到一种极化的天线中去的信号多少总会有那么一点点在另外一种极化的天线中出现。

（16）天线的输入阻抗 Z_{in}　天线输入端信号电压与信号电流之比，称为天线的输入阻抗。输入阻抗具有电阻分量 R_{in} 和电抗分量 X_{in}，即 $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$。电抗分量的存在会减少天线从馈线对信号功率的提取，因此，必须使电抗分量尽可能为零，也就是应尽可能使天线的输入阻抗为纯电阻。事实上，即使是设计、调试得很好的天线，其输入阻抗中总还含有一个小的电抗分量值。输入阻抗与天线的结构、尺寸以及工作波长有关，半波对称振子是最重要的基本天线，其输入阻抗为 $Z_{in} = (73.1 + j42.5)\Omega$。当把其长度缩短（3 ~ 5）% 时，就可以消除其中的电抗分量，使天线的输入阻抗为纯电阻，此时的输入阻抗为 $Z_{in} = 73.1\Omega$（标

称 75Ω）。注意，严格地说，纯电阻性的天线输入阻抗只是对点频而言的。顺便指出，半波折合振子的输入阻抗为半波对称振子的四倍，即 $Z_{in}=280$（Ω）（标称 300Ω）。对于任一天线，人们总可通过天线阻抗调试，在要求的工作频率范围内，使输入阻抗的虚部很小且实部相当接近 50Ω，从而使得天线的输入阻抗为 $Z_{in}=R_{in}=50\Omega$，这是天线能与馈线处于良好的阻抗匹配所必需的。

（17）天线的工作频率范围（频带宽度）　无论是发射天线还是接收天线，它们总是在一定的频率范围（频带宽度）内工作的，天线的频带宽度有两种不同的定义：一种是指在驻波比 $SWR\leqslant 1.5$ 条件下，天线的工作频带宽度；另一种是指天线增益下降 3dB 范围内的频带宽度。在移动通信系统中，通常是按前一种定义的，具体地说，天线的频带宽度就是天线的驻波比 $SWR\leqslant 1.5$ 时天线的工作频率范围。

一般来说，在工作频带宽度内的各个频率点上，天线性能是有差异的，但这种差异造成的性能下降是可以接受的。

4. 移动通信常用的天线

移动通信常用的天线包括基站天线、直放站天线与室内天线。

（1）基站天线—板状天线　无论是 GSM 还是 CDMA，板状天线是用得最为普遍的一类极为重要的基站天线。这种天线的优点是：增益高、扇形区方向图好、后瓣小、垂直面方向图俯角控制方便、密封性能可靠以及使用寿命长。板状天线也常常被用作直放站的用户天线，根据作用扇形区的范围大小，应选择相应的天线型号。

1）基本技术指标示例如下：

频率范围：824～960MHz；

频带宽度：70MHz；

增益：14～17dBi；

极化：垂直；

标称阻抗：50Ω；

电压驻波比≤1.4；

前后比 >25dB；

下倾角（可调）：3°～8°；

半功率波束宽度：水平面 60°～120°，垂直面 16°～8°；

垂直面上旁瓣抑制 < －12dB；

互调≤110dBm。

2）板状天线高增益的形成过程：

① 采用多个半波振子排成一个垂直放置的直线阵。

② 在直线阵的一侧加一块反射板（以带反射板的二半波振子垂直阵为例）。

增益为 $G=11\sim 14$dBi。

③ 为提高板状天线的增益，还可以进一步采用八个半波振子排阵。

前面已指出，四个半波振子排成一个垂直放置的直线阵的增益约为 8dBi；一侧加有一个反射板的四元式直线阵，即常规板状天线，其增益为 14～17dBi。

一侧加有一个反射板的八元式直线阵，即加长型板状天线，其增益为 16～19dBi。由此可见，加长型板状天线的长度为常规板状天线的一倍，达 2.4m 左右。

（2）直放站天线——高增益栅状抛物面天线　从性能价格比出发，人们常常选用栅状抛物面天线作为直放站施主天线。由于抛物面具有良好的聚焦作用，所以抛物面天线集射能力强。直径为 1.5m 的栅状抛物面天线，在 900MHz 频段，其增益即可达 $G=20$dBi。它特别适用于点对点的通信，例如它常常被选用为直放站的施主天线。抛物面采用栅状结构，一是为了减轻天线的重量，二是为了减少风的阻力。抛物面天线一般都能给出不低于 30dB 的前后比，这也正是直放站系统防自激而对接收天线所提出的必须满足的技术指标。

（3）室内天线——八木定向天线　八木定向天线，具有增益较高、结构轻巧、架设方便、价格便宜等优点。因此，它特别适用于点对点的通信，例如它是室内分布系统的室外接收天线的首选天线类型。八木定向天线的单元数越多，其增益越高，通常采用 6～12 单元的八木定向天线，其增益可达 10～15dBi。

5. 移动通信

（1）目前 GSM 和 CDMA 移动通信使用的频段为：

GSM：890～960MHz，1710～1880MHz；

CDMA：806～896MHz。

806～960MHz 频率范围属超短波范围；1710～1880MHz 频率范围属微波范围。电波的频率不同，或者说波长不同，其传播特点也不完全相同，甚至很不相同。

（2）自由空间通信距离方程　设发射功率为 P_T，发射天线增益为 G_T，工作频率为 f，接收功率为 P_R，接收天线增益为 G_R，收、发天线间距离为 R。那么电波在无环境干扰时，传播途中的电波损耗 L_0 有以下表达式：

$$\begin{aligned}L_0(\mathrm{dB}) &= 10\lg(P_T/P_R)\\ &= 32.45+20\lg f(\mathrm{MHz})+20\lg R(\mathrm{km})-G_T(\mathrm{dB})-G_R(\mathrm{dB})\end{aligned}$$

［**举例**］　设：$P_T=10$W；$G_R=G_T=7$(dBi)；$f=1910$MHz。

问：$R=500$m 时，$P_R=?$

解：1）L_0（dB）的计算

$$\begin{aligned}L_0(\mathrm{dB}) &= 32.45+20\lg 1910(\mathrm{MHz})+20\lg 0.5(\mathrm{km})-G_R(\mathrm{dB})-G_T(\mathrm{dB})\\ &= 32.45+65.62-6-7-7=78.07(\mathrm{dB})\end{aligned}$$

2）P_R 的计算

$$\begin{aligned}P_R &= P_T/10^{7.807}=10\mathrm{W}/10^{7.807}=1\mu\mathrm{W}/10^{0.807}\\ &= 1\mu\mathrm{W}/6.412=0.156\mu\mathrm{W}=156\mathrm{m}\mu\mathrm{W}\end{aligned}$$

1.9GHz 电波在穿透一层砖墙时，损失 10～15dB。

（3）电波的多径传播　在超短波、微波波段，电波在传播过程中还会遇到障碍物（例如楼房、高大建筑物或山丘等）对电波产生反射。因此，到达接收天线的还有多种反射波（广义地说，地面反射波也应包括在内），这种现象叫做多径传播。由于多径传输，使得信号场强的空间分布变得相当复杂，波动很大，有的地方信号场强增强，有的地方信号场强减弱；也由于多径传输的影响，还会使电波的极化方向发生变化。另外，不同的障碍物对电波的反射能力也不同。例如：钢筋水泥建筑物对超短波、微波的反射能力比砖墙强。我们应尽量克服多径传输效应的负面影响，这也正是在通信质量要求较高的通信网中，人们常常采用空间分集技术或极化分集技术的缘由。

（4）电波的绕射传播　在传播途径中遇到大障碍物时，电波会绕过障碍物向前传播，

这种现象叫做电波的绕射。超短波、微波的频率较高，波长短，绕射能力弱，在高大建筑物后面信号强度小，形成所谓的“阴影区”。信号质量受到影响的程度不仅和建筑物的高度以及接收天线与建筑物之间的距离有关，还和频率有关。例如有一个建筑物，其高度为10m，在建筑物后面距离200m处，接收的信号质量几乎不受影响，但在100m处，接收信号场强比无建筑物时明显减弱。注意，诚如上面所说过的那样，减弱程度还与信号频率有关，对于216～223MHz的射频信号，接收信号场强比无建筑物时低16dB，对于670MHz的射频信号，接收信号场强比无建筑物时低20dB。如果建筑物高度增加到50m，则在距建筑物1000m以内，接收信号的场强都将受到影响而减弱。也就是说，频率越高、建筑物越高、接收天线与建筑物越近，信号强度与通信质量受影响程度越大；相反，频率越低、建筑物越矮、接收天线与建筑物越远，信号强度与通信质量受影响程度越小。因此，选择基站场地以及架设天线时，一定要考虑到绕射传播可能产生的各种不利影响，注意到对绕射传播起影响的各种因素。

6. 传输线

连接天线和发射机输出端（或接收机输入端）的电缆称为传输线或馈线。传输线的主要任务是有效地传输信号能量，因此，它应能将发射机发出的信号功率以最小的损耗传送到发射天线的输入端，或将天线接收到的信号以最小的损耗传送到接收机输入端，同时它本身不应拾取或产生杂散干扰信号，这样，就要求传输线必须具有屏蔽功能。当传输线的物理长度等于或大于所传送信号的波长时，传输线又叫做长线。

（1）传输线的种类　超短波段的传输线一般有两种：平行双线传输线和同轴电缆传输线；微波波段的传输线有同轴电缆传输线、波导和微带。平行双线传输线由两根平行的导线组成，它是对称式或平衡式的传输线，这种馈线损耗大，不能用于UHF频段（超高频）。同轴电缆传输线的两根导线分别为芯线和屏蔽铜网，因铜网接地，两根导体对地不对称，因此叫做不对称式或不平衡式传输线。同轴电缆工作频率范围宽，损耗小，对静电耦合有一定的屏蔽作用，但对磁场的干扰却无能为力。使用时切忌与有强电流的线路并行走向，也不能靠近低频信号线路。

（2）传输线的特性阻抗　无限长传输线上各处的电压与电流的比值定义为传输线的特性阻抗，用Z_0（单位为Ω）表示。同轴电缆的特性阻抗的计算公式为

$$Z_0 = (60/\sqrt{\varepsilon_r})\lg(D/d)$$

式中　D——同轴电缆外导体铜网内径；

d——同轴电缆芯线外径；

ε_r——导体间绝缘介质的相对介电常数。

通常$Z_0 = 50\Omega$，也有$Z_0 = 75\Omega$的。

由上式不难看出，馈线特性阻抗只与导体直径D和d以及导体间介质的介电常数ε_r有关，而与馈线长短、工作频率以及馈线终端所接负载阻抗无关。

（3）馈线的衰减系数　信号在馈线里传输，除有导体的电阻性损耗外，还有绝缘材料的介质损耗。这两种损耗随馈线长度的增加和工作频率的提高而增加。因此，应合理布局尽量缩短馈线长度。

单位长度产生的损耗大小用衰减系数β表示，其单位为dB/m（分贝/米），电缆技术说明书上的单位大都用dB/100m（分贝/百米）。

设输入到馈线的功率为 P_1，从长度为 L（m）的馈线输出的功率为 P_2，传输损耗 T_L（单位为 dB）可表示为

$$T_L = 10\lg(P_1/P_2)$$

衰减系数为

$$\beta = T_L/L$$

例如，NOKIA7/8 英寸低耗电缆，900MHz 时衰减系数为 $\beta = 4.1$dB/100m，也可写成 $\beta =$ 3dB/73m，也就是说，频率为 900MHz 的信号功率，每经过 73m 长的这种电缆时，功率要少一半。

而普通的非低耗电缆，例如 SYV-9-50-1，900MHz 时衰减系数为 $\beta = 20.1$dB/100m，也可写成 $\beta = 3$dB/15m，也就是说，频率为 900MHz 的信号功率，每经过 15m 长的这种电缆时，功率就要少一半！

（4）匹配概念　馈线终端所接负载阻抗 Z_L 等于馈线特性阻抗 Z_0 时，称为馈线终端是匹配连接的。匹配时，馈线上只存在传向终端负载的入射波，而没有由终端负载产生的反射波，因此，当天线作为终端负载时，匹配能保证天线取得全部信号功率。如当天线阻抗为 50Ω 时，与 50Ω 的电缆是匹配的，而当天线阻抗为 80Ω 时，与 50Ω 的电缆是不匹配的。如果天线振子直径较粗，天线输入阻抗随频率的变化较小，容易和馈线保持匹配，这时天线的工作频率范围就较宽。反之，则较窄。在实际工作中，天线的输入阻抗还会受到周围物体的影响。为了使馈线与天线良好匹配，在架设天线时还需要通过测量，适当地调整天线的局部结构，或加装匹配装置。

（5）反射损耗　当馈线和天线匹配时，馈线上没有反射波，只有入射波，即馈线上传输的只是向天线方向行进的波。这时，馈线上各处的电压幅度与电流幅度都相等，馈线上任意一点的阻抗都等于它的特性阻抗。而当天线和馈线不匹配时，也就是天线阻抗不等于馈线特性阻抗时，负载就只能吸收馈线上传输的部分高频能量，而不能全部吸收，未被吸收的那部分能量将反射回去形成反射波。

（6）电压驻波比　在不匹配的情况下，馈线上同时存在入射波和反射波。在入射波和反射波相位相同的地方，电压振幅相加，为最大电压振幅 V_{max}，形成波腹；而在入射波和反射波相位相反的地方，电压振幅相减，为最小电压振幅 V_{min}，形成波节。其他各点的振幅值则介于波腹与波节之间。这种合成波称为行驻波。

反射波电压和入射波电压幅度之比叫做反射系数，记为 R。

反射波幅度为（$Z_L - Z_0$），入射波幅度为（$Z_L + Z_0$）。

波腹电压与波节电压幅度之比称为驻波系数，也叫电压驻波比，记为 V_{SWR}。

终端负载阻抗 Z_L 和特性阻抗 Z_0 越接近，反射系数 R 越小，驻波比 V_{SWR} 越接近于 1，匹配也就越好。

（7）平衡装置　信号源、负载或传输线，根据它们对地的关系，都可以分成平衡和不平衡两类。若信号源两端与地之间的电压大小相等、极性相反，就称为平衡信号源，否则称为不平衡信号源；若负载两端与地之间的电压大小相等、极性相反，就称为平衡负载，否则称为不平衡负载；若传输线两导体与地之间阻抗相同，则称为平衡传输线，否则为不平衡传输线。在不平衡信号源与不平衡负载之间应当用同轴电缆连接，在平衡信号源与平衡负载之间应当用平行双线传输线连接，这样才能有效地传输信号功率，否则它们的平衡性或不平衡

性将遭到破坏而不能正常工作。如果要用不平衡传输线与平衡负载相连接，通常的办法是在两者之间加装“平衡—不平衡”的转换装置，一般称为平衡变换器。

1）二分之一波长平衡变换器。它又称为“U”形管平衡变换器，用于不平衡馈线同轴电缆与平衡负载半波对称振子之间的连接。“U”形管平衡变换器还有1∶4的阻抗变换作用。移动通信系统采用的同轴电缆特性阻抗通常为50Ω，所以在YAGI天线中，采用了折合半波振子，使其阻抗调整到200Ω左右，实现最终与主馈线50Ω同轴电缆的阻抗匹配。

2）四分之一波长平衡变换器。利用四分之一波长短路传输线终端为高频开路的性质实现天线平衡输入端口与同轴馈线不平衡输出端口之间的平衡—不平衡变换。

7. 太空电站的天线

太空电站的天线必须使用相控阵天线，通过精确且快速地控制微波束方向来补偿发射器和接收器的位置变化。相控阵天线是通过控制阵列天线中各辐射单元的馈电相位来改变方向图形状的天线。它的关键部件是电调相移器和天线辐射单元。相移器有连接式和数字式，它们的相移值分别在360°范围内连续和步进变化，前者采用铁氧体相移器，后者采用半导体PIN二极管相移器；辐射单元常采用扬声器、开口波导或波导裂缝。

典型的无线能量传输是点对点的。已经证明传输效率可接近100%。对传输天线的能量分布采用锥形法可抑制信号的副瓣从而提高效率。比较著名的有高斯锥形、泰勒分布、切比雪夫分布。

未来的太空电站建在地球同步轨道上，将大规模应用以微波为载体的无线能量传输。太空电站主要由太阳电池、直流电-微波转化器、大型天线组成。太空电站天线的一些主要参数见表14-1。为提高波束的收集率、抑制副瓣，普遍采用振幅锥度。振幅锥度可使天线中心功率密度大于边缘的10倍。

表14-1　太空电站天线的一些主要参数

模　　型	早期JAXA模型	JAXA1模型	JAXA2模型	NASA/DOE模型
频率/GHz	5.8	5.8	5.8	5.8
发射天线直径/km	2.6	1	1.93	1
发射功率/GW	1.3	1.3	1.3	6.72
中心最大功率密度/(mW/cm^2)	63	420	114	2.2
边缘最小功率密度/(mW/cm^2)	6.3	42	11.4	0.22
天线间隔	0.75λ	0.75λ	0.75λ	0.75λ
天线单位功率(天线数量)	最大0.95W(35.4亿)	最大6.1W (5.4亿)	最大1.7W (195万)	最大185W (970万)
接收区域直径/km	2	3.4	2.45	1
最大功率密度/(mW/cm^2)	180	26	100	23
收集效率	96.5%	86%	87%	89%

注：JAXA——日本太空开发署；NASA——美国航空航天局；DOE——美国能源部。

对于微波能量传输，微波辐射的产生极为重要，需要高效的微波发生器及放大器，要使相控阵天线高效地接受微波束能量，微波的相位及振幅需高度精确和稳定。

四、磁控管

磁控管是一种用来产生微波能的电真空器件，实质上是一个置于恒定磁场中的二极管，管内电子在相互垂直的恒定磁场和恒定电场的控制下，与高频电磁场发生相互作用，把从恒

定电场中获得的能量转变成微波能量，从而达到产生微波能的目的。

1. 结构

磁控管由管芯和磁钢（或电磁铁）组成。管子内部保持高真空状态。管芯的结构包括阳极、阴极、能量输出器和磁路系统四部分。

（1）阳极　阳极是磁控管的主要组成之一，它与阴极一起构成电子与高频电磁场相互作用的空间。在恒定磁场和恒定电场的作用下，电子在此空间内完成能量转换的任务。磁控管的阳极除收集电子外，还对高频电磁场的振荡频率起着决定性的作用，阳极由导电良好的金属材料（如无氧铜）制成，并设有多个谐振腔，谐振腔的数目必须是偶数，管子的工作频率越高，腔数越多。阳极谐振腔的形式常为孔槽形、扇形和槽扇形，阳极上的每一个小谐振腔相当于一个并联的 *LC* 振荡回路。以槽扇形腔为例，可以认为腔的槽部分主要构成振荡回路的电容，而其扇形部分主要构成振荡回路的电感。磁控管的阳极由沿着圆周排列的一组闭合谐振腔构成，许多谐振腔耦合在一起，形成一个复杂的谐振系统。这个系统的谐振腔频率主要决定于每个小谐振腔的谐振频率，也可以根据小谐振腔的大小来估计磁控管的工作频段。磁控管作为振荡器需有一定的储能，以维持微波振荡，因而要求阳极谐振系统有较高的品质因数，同时，在磁控管中，振荡的能量又需要通过输出装置输出才能使用。因此，阳极谐振系统上的能量耦合元件的设计十分重要。它既要耦合出一定能量保证使用，又要使阳极谐振系统具有较高的品质因数，保持足够高的储能，维持磁控管稳定工作。磁控管工作于 π 模。为保证 π 模工作稳定，邻模与 π 模之间应有良好的模式分割，因此，常常采用带有隔膜带的或旭日异腔型的阳极谐振系统。

磁控管的阳极谐振系统除能产生所需要的电磁振荡外，还能产生不同特性的多种电磁振荡。为使磁控管稳定地工作在所需的模式上，常用隔型带来隔离干扰模式。隔型带把阳极翼片一个间隔一个地连接起来，以增加工作模式与相邻干扰模式之间的频率间隔。

另外，由于经能量交换后的电子还具有一定的能量，这些电子打上阳极使阳极温度升高，阳极收集的电子越多（电流越大），或电子的能量越大（能量转换率越低），阳极温度越高，因此，阳极需有良好的散热能力。一般情况下功率管采用强迫风冷，阳极带有散热片。大功率管则多用水冷，阳极上有冷却水套。

（2）阴极及其引线　磁控管的阴极即电子的发射体，又是相互作用空间的一个组成部分。阴极的性能对管子的工作特性和寿命影响极大，因此阴极被视为整个管子的心脏。

阴极的种类很多，性能各异。连续波磁控管中常用直热式阴极，它由钨丝或纯钨丝绕成螺旋形状，通电流加热到规定温度后就具有发射电子的能力。这种阴极具有加热时间短和抗电子轰击能力强等优点，在连续波磁控管中得到广泛的应用。

此种阴极加热电流大，要求阴极引线短而粗，连接部分要接触良好。大功率管的阴极引线工作时温度很高，常用强迫风冷散热。磁控管工作时阴极接负高压，因此引线部分应有良好的绝缘性能并能满足真空密封的要求。为防止因电子回轰而使阴极过热，磁控管工作稳定后应按规定降低阴极电流以延长使用寿命。

（3）能量输出器　能量输出器是把相互作用空间中所产生的微波能，输送到负载去的装置。能量输出器的作用是无损耗、无击穿地通过微波，保证管子的真空密封，同时还要做到便于与外部系统相连接。小功率连续波磁控管大多采用同轴输出，在阳极谐振腔高频磁场最强的地方，放置一个耦合环，当穿过环面的磁通量变化时，将在环上产生高频感应电流，

从而将高频功率引到环外。耦合环面积越大，耦合越强。大功率连续波磁控管常用轴向能量输出器，输出天线通过极靴孔洞连接到阳极翼片上。天线一般做成条状或圆棒，也可为锥体。整个天线被输出窗密封。输出窗常用低损耗特性的玻璃或陶瓷制成。它必须保证微波能量能无损耗通过和具有良好的真空气密性。大功率管的输出窗常用强迫风冷来降低由于介质损耗所产生的热量。

（4）磁路系统　磁控管正常工作时要求有很强的恒定磁场，其磁场感应强度一般为数千高斯。工作频率越高，所加磁场越强。磁控管的磁路系统就是产生恒定磁场的装置。磁路系统分为永磁和电磁两大类。永磁系统一般用于小功率管，磁钢与管芯牢固合为一体构成所谓包装式。大功率管多用电磁铁产生磁场，管芯和电磁铁配合使用，管芯内有上、下极靴，以固定磁隙的距离。磁控管工作时，可以很方便地靠改变磁场强度的大小，来调整输出功率和工作频率。另外，还可以将阳极电流馈入电磁线包以提高管子工作的稳定性。

2. 工作原理

磁控管通常工作在 π 模，相邻两个谐振腔腔口所处微波、电场相位正好相差 180°，即微波、电场方向正好相反。虽然这种微波场为驻波场，但在 π 模的情况下，相当于两个相同的微波场在圆周上沿相反的方向运动，两个场的相速值相等。图 14-5 为磁控管。

1）从阴极发射出的电子在正交电磁场作用下作轮摆线运动。调节直流电压和恒定磁场，使电子在圆周方向的平均漂移速度 $v = E/B$ 正好等于在其方向上运动的一个微波场的相速（式中 E 是直流电压在互作用空间产生的直流电场平均值，B 为轴向恒定磁感应强度），电子就可以与微波场作同步运动。

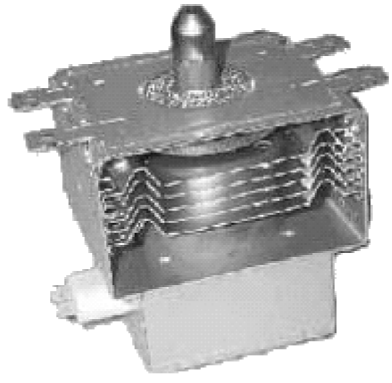


图 14-5　磁控管

2）在同步运动过程中，处在微波减速场中的那部分电子将自己的直流位能逐渐交给微波场，并向阳极靠拢，最后为阳极所收集。这部分电子向微波场转移能量，有利于在磁控管中建立稳定的微波振荡，故称为有利电子。处在微波加速场的那部分电子从微波场获得能量并向阴极运动，最后打在阴极上。这部分电子称为不利电子。不利电子在回轰阴极时打出大量的次级电子，使互作用空间电子的数量因之增加。

3）最大减速场区是电子的群聚中心。在它两旁的电子都受到向这个群聚中心靠拢的力而向群聚中心运动。最大加速场区是电子的散聚中心，附近的电子都受到背离散聚中心的力，分别向左右两边运动，转化为有利电子。这样，在振荡建立过程中不利电子越来越少，有利电子越来越多，并向群聚中心集中，逐步在互作用空间形成轮辐状电子云。这种处于不同相位下的电子在互作用空间自动群聚成轮辐状电子云的现象，称为自动相位聚焦。

4）在互作用空间的微波场，随着远离阳极表面而指数衰减。因此，在阴极表面的微波场极弱，对电子的群聚作用极小，在阴极附近不会形成明显的电子轮辐，而是形成几乎均匀分布的电子轮毂。在互作用空间的电子中有利电子占绝大多数，而且均在向阳极运动过程中，有利电子回旋的时间又较长，它们能够充分地将直流位能转换成微波能量；回轰阴极的电子比较少，而且它们从阴极发射后不久就打在阴极上，因而从微波场吸收能量也较少。这

样，互作用空间全部电子与微波场相互作用的总效果是，电子将直流位能交给微波场，在磁控管中建立起稳定的微波振荡。

3. 分类

磁控管按工作状态可分为脉冲磁控管和连续波磁控管；按结构特点可分为普通磁控管、同轴磁控管和反同轴磁控管；按频率可调与否，可分为固定频率磁控管和频率可调磁控管。

（1）脉冲磁控管　脉冲磁控管的工作脉冲宽度可在 0.004 ~ 60μs 范围内变化，工作频率范围在 250MHz ~ 120GHz 之间，脉冲功率从几十瓦到几十兆瓦，效率可达 70%，寿命可达几万小时。脉冲磁控管广泛用于引导、火控、测高、机载、舰载、气象等各种雷达中。

（2）连续波磁控管　连续波磁控管用于电子对抗、工业加热和微波理疗。功率在 400 ~ 1000W 之间的廉价的连续波磁控管还广泛用于家用微波炉。为了不干扰雷达和通信设备的正常工作，医用、工业加热和烹调用磁控管的工作频率通常为（915 ± 25）MHz 及（2450 ± 50）MHz。

（3）频率可调磁控管　频率可调磁控管特别是频率捷变磁控管能提高雷达的抗干扰能力。电压调谐磁控管通常作为电子对抗设备的功率源，可提供几瓦到几百瓦的连续波功率。它具有调谐速度快、调谐线性好等优点。小功率电压调谐磁控管的调谐范围可达 2∶1、4∶1，甚至 20∶1，能大大提高各种雷达的电子对抗能力。它的主要缺点是输出功率不够大，不能用于雷达的电子反对抗措施。

（4）同轴磁控管　同轴磁控管是在普通磁控管翼片腔体（称为内腔）外面加一只具有高品质因数的同轴腔（称为外腔）而构成，靠内腔背壁上的相间耦合隙缝将内外腔的场耦合起来。同轴磁控管具有模式分割好、工作效率高和频率稳定性好的优点，常用于动目标显示、精密跟踪和测距雷达。反同轴磁控管由内阳极和与之同轴的外阴极组成，因而可增大阴极面积。同轴磁控管的工作波长可短至毫米波段。这种磁控管的特点是功率高、效率高、频率稳定性好。

（5）国外研制的太空磁控管　东京大学研制的轻型可控相位磁电管（COMET）的重量功率比在 25g/W 以下，包括一个直流-直流转换器、一个对 5.8GHz 磁电管的控制电路、散热回路、微波导向器及天线。行波管放大器（TWTA）可达更轻的重量功率比。COMET 2.45GHz，220W，重 2.65kg，而 TWTA 重 1.5kg，电源重 1.15kg；COMET 5.8GHz，1300W，重 2.15kg，而 TWTA 重 0.8kg，电源重 1.35kg。TWTA 可分别达到 12g/W 及 16.5g/W，它们没有散热回路、微波导向器及天线。

第二节　太空环境及空间碎片防治

一、太空环境

以人造卫星离地面的最低高度 100 ~ 110km 为外层空间的最低界限，即为太空。太空环境有如下特征：

（1）辐射　太空环境有宇宙大爆炸时留下的辐射，如各种天体辐射的电磁波、天体辐射的高能粒子等。

（2）磁场　天体有各自的磁场，磁场俘获高能粒子，形成辐射性很强的辐射带，在地球的上空，有内、外两个辐射带。

（3）高真空　在200～500km的低轨道空间真空度为4～10Pa，而在35800km的地球同步轨道上则为10～11Pa的高真空度。太空高真空使电磁波、宇宙射线和可见光等高能粒子畅通无阻。

（4）太空垃圾　高速运动的尘埃、微流星体、流动星体及太空垃圾，在对使用中的航天器造成撞击威胁。太空中废弃的人造地球卫星等航天器逐渐增多，它们有的被人为遥控炸毁，有的自行分裂成碎片。这些碎片将在一定的时间内继续绕地球飞行，在太空形成新的环境特点，即“太空垃圾”，太空垃圾的运行速度较高，它们具有极大的动能，1mg的微流星体可以穿透3mm厚的铝板。

（5）极端温度环境　太空为高寒的环境，平均温度为零下270.3℃。航天器在太空真空中飞行，由于没有空气传热和散热，受阳光直接照射的一面可产生高达100℃以上的高温。而背阴的一面，温度则可低至－200～－100℃，并且很稳定。

（6）黑暗　由于没有反射物，太空中的背景是一片黑暗。

（7）高温、强振动和超重环境　航天器重返大气层时，高速在稠密大气层中穿行，与空气分子剧烈摩擦，使航天器表面温度高达1000℃左右；航天器在起飞和返回时，运载火箭和反推火箭等点火和熄火时，会产生剧烈的振动；航天器加速上升和减速返回时，正、负加速度会使航天器上的一切物体产生巨大的超重。超重以地球重力平均加速度（其符号为g，g约为9.8m/s^2）的倍数来表示，载人航天器上升时的最大超重达8g，返回时达10g，卫星返回时的超重更大些。

（8）失重和微重力环境　重力仅为（1/10^5～1/100）g（g为重力加速度），而人在地面上感受到的重力是1g。航天器在太空轨道上作惯性运动时，地球或其他天体对它的引力（重力）正好被它的离心力所抵消，在它的质心处重力为零，即零重力，质心处为失重环境。而质心以外的航天器上的环境，则是微重力环境，那里的重力非常低微。失重和微重力环境是航天器上最为宝贵的独特环境。在失重和微重力环境中，气体和液体中的对流现象消失，浮力消失，不同密度引起的组分分离和沉浮现象消失，流体的静压力消失，液体仅由表面张力约束，润湿和毛细现象加剧等。总之，它造成了物质一系列物理特性变化，提供了一种极端的物理条件。利用这些地面上难得的环境条件，可进行许多地面上难以进行的科学实验，生产地面上难以生产的特殊材料、昂贵药品和工业产品等。

（9）太空分为两部分　太空分为小宇宙和小宇宙之间的真空地带，小宇宙是以引力场相联系的系统区域，小宇宙内部由于引力场的关系（也许是一种磁力场），导引电磁波和宇宙射线的散布相对集中，能量的扩散也降为最低，这也许是太空环境中温度低、光速快、电磁波传输距离远的主要原因。

（10）太阳活动时期　在太阳活动时期太阳有大的能量释放与爆发，每隔11年太阳会从活动频繁到相对平静的状态相互转换，在太阳活动频繁的时期，会突然发生空间环境灾害性事件。

（11）空间旅行损害　空间旅行会损害人的身体，宇航员在外太空会表现出肌肉萎缩、骨质疏松和心率过慢等症状。

二、空间碎片与防治

1. 碎片的物质组成

“空间碎片”或称轨道碎片，指的是滞留在外层空间的非功能性的航天器、火箭的脱落

部分、航天活动所产生的各种生成物、卫星和火箭爆炸或相撞所形成的残片等。

自从 1957 年前苏联第一颗人造地球卫星发射升空以来，已有 20 多个国家和国际组织先后进行航天发射与飞行，已经发射了 6600 余个各类航天器，总重 20000t。俄罗斯的发射次数和发射数量最多，达 3494 个各类航天器（包括前苏联发射的数量）；美国居第二位，发射了 1767 个航天器；日本居第三位，发射了 114 个航天器；中国居第四位，发射了 112 个航天器。

航天事业 50 多年的发展和改进，形成了一批技术成熟的运载火箭系列，包括俄罗斯的“联盟”系列、“质子”系列、“宇宙”系列，美国的“德尔塔”系列、“大力神”系列、“宇宙神”系列，欧洲的“阿丽亚娜”系列以及中国的“长征”系列等。发射数量最多、种类最齐全的是俄罗斯的“联盟”系列火箭，共计发射了 1675 次。国际宇航科学院的资料显示，当前在近地轨道上已经注册的空间物体有 8600 个，其中处于有效工作状态的有 500 个左右，还有可以观测到的非注册性的空间飞行物体近 1000 个。在轨航天器的重量多在 1kg～20t 不等，俄罗斯和平号空间站的重量超过 115t。这些在轨航天器有 75% 已完成了自己的使命并被放弃。50 多年来，人类在外层空间留下了数千个大型物体、数万个中小型碎片和数千亿的微粒物质。在目前可被地面观测并测定轨道的 9600 多个空间物体中，只有 6% 是仍在工作的航天器，其余均为空间碎片。无法被地面观测到的、直径大于 1cm 的空间碎片数量超过 11 万个，大于 1mm 的超过 4000 万个。这些碎片的总重量约 3000t，且数量以每年 2% ～5% 的速度递增。

空间碎片平均飞行速度为 10km/s，大部分集中在非常重要的自然资源——近地轨道和静止轨道上。近地轨道是航天活动集中的地方，地球观测、科研、通信卫星以及空间站一类的永久性载人空间结构等都运行在近地轨道上，近地轨道上已经拥挤不堪，以至于两个空间物体相距不到 50km。静止轨道是一个南北宽 50km、高 30km 的三维带或环。按照空间碎片的增长速度，到 2300 年，任何东西都将无法进入太空轨道。

空间碎片大体由四种类型的物质组成：失效的有效载荷、航天器发射和飞行过程中的废弃物（以下简称运营碎片）、碎裂物和微粒物质等。

（1）失效的有效载荷　失效的有效载荷曾经是使用中的有效载荷，但后来用户对之失去控制。在外层空间可跟踪物体的数量大约有 7000 多个，其中已失效的有效载荷占可跟踪物体总数的 20% 左右，运营碎片占 26% 左右，碎裂物占 49% 。

（2）运营碎片　运营碎片是指那些在发射和飞行过程中使用过的物品。在太空时代最初的 25 年里，航天器设计者们基本上都不考虑他们的工作会对太空环境带来的影响。发射设备和载人飞行运载火箭，除了把航天器送入轨道外，每次还会在轨道上留下一个或更多个用完的火箭级段。1984 年日本发射一颗气象卫星时，就在低轨道（高 170～535km）、大椭圆轨道（高 175～36720km）和地球同步圆轨道（高 35785km）各抛下了一级火箭，其中两个分别于 1984 和 1994 年落回地面。到 1998 年，仍有一些无用的上面级在轨道上“兜圈子”。另外，还经常有一些小型零部件被抛入空间，如星箭分离所用的爆炸螺栓、卫星包带和弹簧等。俄罗斯的一些航天任务一次就在各个轨道上抛下 60 多个不同的物体。1965 年，在美国首次太空行走过程中，双子星座 4 号飞船的宇航员爱德华·怀特失手丢掉了一只手套。该手套随即以 28000km 的时速“入轨”。和平号空间站在其在轨运行的前 10 年里，向太空丢弃了 200 多个物体。在更高的轨道上运行的碎片，有火箭壳体、远地点发动机、火箭

头锥体、有效载荷分离设备、防热层、窗户和镜头盖、未使用完的推进剂和凝固的污水等。在所抛弃的设备中，最大的可能当属欧洲太空局（简称欧空局）阿里安火箭所用的一种一箭多星发射支架。这种称为“阿里安双星发射外部支撑结构”的装置直径达4m，重300kg。还有一种特殊的威胁来自50颗使用了放射性材料的卫星。这些卫星装有核反应器，1978年，前苏联的宇宙954号核动力卫星带着30kg浓缩铀坠落到加拿大北部。

在低轨道上（高250～500km），抛下的碎片会很快落入大气层中烧毁，但高轨道上的碎片带来的麻烦难以解决。

（3）碎裂物　碎裂物是空间物体遇到爆炸、碰撞产生的空间碎片。目前已发现大约有100多颗卫星破碎后，产生的碎片滞留在2000km以下的轨道上。有相当一部分碎片的尺寸在1mm～1cm之间，无法跟踪。有关国家或组织之所以进行爆炸，一是为了防止一些卫星整体返回地面，二是进行武器试验。有些爆炸是由于推进系统出了故障引起的，而有些爆炸的原因还有待进一步查明。到目前为止，大于0.1mm的空间碎片的最大来源是卫星和火箭的解体。自1961年以来，已有150多颗卫星（这里的“卫星”概念是广义的，指所有被送入轨道的物体）在轨道上爆炸或解体，撒下了10000多个可以跟踪到的碎片。

1994年美国发射的一枚飞马座火箭的上面级，于1996年6月3日发生了爆炸，在250～2500km的高度范围内产生了“创纪录的”一大片“碎片云”，其中有700多个可跟踪到的碎片。仅此一个事件就使在“爆炸现场”25km以下的轨道上运行的哈勃太空望远镜受到撞击的概率陡增了一倍。1997年2月在对哈勃望远镜进行第二次在轨维修时，宇航员们注意到哈勃的观测设备上有许多麻坑，一根天线上还有一个洞，这显然是由空间碎片撞击造成的。

碰撞产生的空间碎片比爆炸产生的空间碎片对使用中的有效载荷的威胁要大，因为碰撞产生的空间碎片数量比爆炸产生得多，而且太小无法跟踪。

（4）微粒物质　微粒物质是航天器载人飞行过程中排放出的微粒物质，包括各舱室的泄漏物、重分子排放气体、废水、加热液化器系统和反作用控制系统发动机工作过程中的排放物。微粒物质的大小不同，在1～100μm之间，是由许多微粒和气体等物质组成的。这类物质中大部分是固体氧化铝微粒。估计目前在外层空间有100亿到数千亿微粒。

轨道上微小颗粒的另一来源是航天器材料的长期自然降解。在近地空间有数以百万计的微小漆粒。专家们发现，微小的漆片与许多旧航天器和火箭箭体相伴而行。由于存在相对轨道运动，这些漆片位于航天器的前方，而不是跟在后面（碎片在落向地面时速度会加快）。这些碎屑绝大多数不能为探测器所发现。但偶尔也有一些是从防热毡和碳基部件上掉下来的，这类碎片因尺寸较大而可以被探测到。例如，美国航宇局的宇宙背景探测卫星，莫名其妙丢下的至少80个可跟踪到的物体，就是些较大的漆屑。

2. 碎片的危害

空间碎片速度可达10km/s甚至更高，其破坏威力是非常巨大的。以下是碎片造成的危害案例。

1）美国航天飞机“挑战者”号与一块直径0.2mm的涂料剥离物相撞，导致舷窗被损，前舱被撞出一个豆大的洞，只好停止飞行。

2）1991年9月15日，美国发射的“发现者”号航天飞机差一点与前苏联的火箭残骸相撞，当时“发现者”号与这个“不速之客”仅仅相距2.74km，幸亏地球上的指挥系统及

时发来警告信号，才避免了一场灾难事故。

3）1992 年 11 月 8 日，一颗半吨重的失效卫星“宇宙”1508 号，以 3km/s 的速度，在与俄罗斯“和平号”空间站距离仅 300m 处擦肩而过。1997 年 9 月 15 日，“和平号”再次遇险，与废弃的美国军用卫星 MSTI—2 在相距 470m 的地方交错飞过。

4）1996 年 11 月 24 日，正在太空中执行任务的美国航天飞机“哥伦比亚”号也遭到太空垃圾的袭击，给航天器的窗口留下几处伤痕。

5）1986 年，“阿丽亚娜”号火箭进入轨道后不久爆炸，形成了 564 块 $10cm^2$ 大小的残骸和 2300 块小碎片，这些残骸使两颗日本通信卫星丧失功能。

6）俄罗斯的“宇宙”1275 卫星在与太空垃圾相撞后发生爆炸。

7）NASA 的官员和专家公布了航天飞机 66 次飞行任务后，发生在表面的撞击损伤数量的统计。每次航天飞机任务产生撞击坑的数量并不均衡，最多 600 多次，最少几十次。另外还给出了 STS—91 任务过后航天飞机表面的撞击坑分布，其中大于 1in（约 2.54cm）的撞击坑达 45 个。截至 2001 年，由于受空间碎片撞击出现破损，航天飞机共更换了 80 次舷窗。航天飞机上发现的最大损伤是亚特兰蒂斯号在执行 STS—45 飞行任务后其右翼迎风边上缘的两处损伤，尺寸分别为 4.8cm×4.1cm 和 1.0cm×2.54cm。航天飞机在执行 STS—86 飞行任务后，曾遭受了两次严重的空间碎片撞击，被撞击的部位是辐射器前端辐射板附近的外部管路。发生在辐射板管路上的撞击穿透了管路外部的隔热层，划出一条 6.4mm 的缝隙，在管壁上留下一个半径为 0.8mm、深为 0.47mm 的撞击坑。撞击部位管壁厚度为 0.9mm。如果这次撞击再严重一点，辐射器管路将被击穿。

8）早期哈勃望远镜的整个太阳翼上遭受到 5000～6000 次碎片的撞击，撞击坑（孔）直径从 3μm～7mm 不等，其中太阳翼完全穿透的数量达 150 个。美国的长期暴露装置（LDEF）在轨运行 5.75 年，被航天飞机回收后通过地面检测发现的撞击坑达 34000 个，其中直径大于 0.5mm 的达 5000 个。

9）1996 年 7 月 24 日，法国的樱桃卫星被阿里安 1 火箭的上面级碎片击中，一度导致卫星失控。这是得到国际公认的由空间碎片撞中航天器的案例。

10）2005 年 1 月 17 日，在南极上空 885km 的高度，美国雷神火箭的废弃物与长征四号火箭的碎片相撞，撞击后前者被一分为四，后者的近地点轨道下降了 14km。

11）1981 年 7 月 24 日，前苏联的宇宙 1275 卫星在 977km 的高度破碎成 200 多块可跟踪碎片。据推测，这次事故很有可能是由于卫星遭到了碎片的超高速撞击。

12）地球周围卫星数量增长会带来各式各样的后果。美国航天飞机在轨道上时不时地要通过规避机动来躲避已被遗弃的大型卫星，其 8 个窗口常常被高速碎片撞得麻麻点点，所以每次飞行后平均都要更换其中的一个。任务策划人员在选定航天飞机飞行中的取向时越来越多地要考虑撞击威胁问题。

碎片最有可能的来袭路线是航天飞机飞行方向左右侧 30°～45°的轨道面。所以，如对取向无特别需要，宇航员总是让航天飞机最怕撞的表面不对着这些撞击威胁最大的方向。

13）1996 年 7 月发生了首例有记录的两个在册空间物体间的意外撞击事件。相撞双方一方是法国的一颗军用卫星，另一方是欧洲一火箭箭体 10 年前发生爆炸时产生的一块碎片。这块碎片以近 15km/s 的速度撞到了卫星的姿控吊杆上，地面控制人员通过艰苦努力，才使受伤的卫星得以继续坚持工作。

3. 各国对碎片的研究

1993 年由美国、俄罗斯、欧盟发起成立了机构间空间碎片协调委员会（IADC），中国政府于 1995 年加入。IADC 目前已举行了 23 次国际会议，并定期向联合国和平利用外层空间委员会汇报。

（1）研究领域　国际上开展的空间碎片研究主要集中在四个领域：空间碎片观测、空间碎片环境与数据库、空间碎片防护和空间碎片减缓。

1）空间碎片观测。这一领域的研究是指利用地基观测手段（如相控阵雷达和光学望远镜）得到空间碎片的轨道数据，并对其进行编目。美国检测和管理的空间碎片数量最多，达 9000 多个；俄罗斯次之，达 5000 多个；欧空局正在制订庞大的观测计划，有望在不久的将来在空间碎片观测上扮演重要角色。

2）空间碎片环境与数据库。这一领域的研究主要是指利用地基的观测数据和天基的探测数据获得空间碎片的分布，并建立工程环境模型和相应的数据库。地基观测手段只能观测到较大尺寸的碎片（如 10cm 以上），而小的空间碎片只能通过天基探测和对返回航天器表面进行检测得到相关的数据。美国、欧空局和俄罗斯相继开展了天基探测活动，取得了大量关于小空间碎片分布的数据，并分别开发了 ORDEM 系列、MAS—TER 系列和 SDPA 等空间碎片环境工程模型。

3）空间碎片防护。这一领域的研究是指通过在航天器上开展防护结构设计来抵御空间碎片的撞击，利用较少的质量代价获得尽可能高的防护能力，从而提高航天器的可靠性和生存能力。国际空间站的多个舱段都实施了以 WHIPPLE 防护结构为代表的结构防护，最大可抵御 1cm 以上空间碎片的撞击，整体防护能力得到大大加强。国际空间站上数百种的防护结构设计基本上都是基于传统的 WHIPPLE 防护结构的变体，集成了国际上在防护领域取得的最新研究成果。以防护结构的设计为牵引，许多国家和组织在空间碎片风险评估、超高速撞击地面试验和数值仿真等方面也取得了长足的进展。

4）空间碎片减缓。这一领域的研究是指通过在航天器的全寿命周期内采取一定的措施，减少空间碎片的产生，并降低对太空及地面的危害，遏制空间碎片增长的态势，净化空间环境，保障人类航天活动的可持续发展。如运载火箭在执行任务后对剩余推进剂进行排空处理，解除爆炸的隐患；同步轨道卫星在执行任务后进行离轨操作，为后续的发射任务提供宝贵的轨道资源；减少航天器发射和在轨运行中操作性碎片的产生等。美国、欧空局和俄罗斯已在相关方面开展了空间碎片减缓工作，并初显成效。

（2）观察空间碎片系统　观察空间碎片系统采用先进的空间目标跟踪网络和相应的传感器系统。目前的空间目标跟踪网络主要有美国的空间监视网络（SSN）和俄罗斯的空间监视系统（SSS）。这些网络所使用的先进传感器包括大范围成像雷达（LRIR）、德国应用科学研究所（FGAN）的跟踪成像雷达（TIRA）、“干草堆”（Haystack）辅助雷达（HAX）以及美国航宇局的“金石”（Goldstone）雷达、CCD 碎片望远镜（CDT）和液镜望远镜（LMT）等。利用以上监测系统和设备可以获得低地轨道上尺寸大于 1cm 的空间碎片的分布特征。例如在 1999 年利用美国的“干草堆”雷达和德国的跟踪成像雷达所进行的 24h 束场（Beam-Park）实验中，通过探测穿过一定直径雷达波束的空间碎片获得了低地轨道上厘米尺寸碎片的空间密度随轨道高度的分布特征。

美国的空间监视网和前苏联的空间监视系统保持着对约 10000 个“居留天体”的正式

记录。两大系统中共有 50 部雷达及光学和光电探测器，每天平均进行 15 万次观测，以保持对这些物体的跟踪。它们能探测到低轨道上 10cm 大小和地球同步轨道上 1m 尺度的碎片。

不同高度处，被跟踪物体的空间密度是不同的，其中以 850km、1000km 和 1500km 高度附近的密度为最大。在这些高度上，每一亿立方公里平均有一个人造天体。而在 1500km 以上，密度会随高度的增加而下降，但在半同步轨道（20000km）和地球同步轨道（36000km）这两个高度附近有两个尖峰。特定轨道上人造天体密度的增高反映出各类卫星和火箭的特点。

美俄两大空间监视系统目前不能探测小于 10cm 的碎片，原因在于它们对于空间监视系统所用的望远镜和雷达波长来说太暗弱、太微小，或者说太不起眼了。1984 年以前对这些小碎片从来都不做探测。但在此之后，科学家们开始每年用几百个小时对天空进行统计抽样，以估计这类小碎片的数目。研究人员利用科学雷达（如金石、德国的一台射电望远镜和波多黎各境内的一台巨型望远镜）以双基地方式（由一部天线发射信号，而由附近的另一部天线接收卫星的反射信号）来探测只有 2mm 大小的碎片。作为美国航宇局和国防部一个联合项目的一部分，干草堆及辅助干草堆雷达也能探测到几乎同样大小的物体。美国航天飞机还在 1994 年和 1995 年部署了球形和针形的专用目标，以对探测小碎片用的探测器进行校准。

为了研究更小的碎片，研究人员可以对由宇航员放入航天飞机货舱并带回地面的航天器的表面受撞情况进行检查。1984 ~ 1990 年，美国航宇局通过长期暴露装置给空间碎片，专门收集空间碎片撞击数据，结果有数以万计的人造碎片和来自彗星和小行星的天然流星体在它的表面上“登记”。用于采集碎片撞击数据的航天器有欧洲可回收载带装置、日本的空间飞行装置、哈勃望远镜和太阳峰年卫星的部件以及用于接送这些航天器的美国航天飞机本身。由于航天飞机飞行高度的限制，所有这些“靶子”的部署高度都在 620km 以下。对于更高处的碎片，研究人员只能依赖理论模型。由于低高度上的小碎片轨道寿命较短，所以，小碎片多积留在更高的轨道上。

（3）规避及失效等级　航天飞机在执行任务时，需要进行预警和及时规避以避免与编目大空间碎片目标相撞。国际空间站于 1999 年 10 月 26 日实施了首次规避机动。美国航天飞机平均每 10 次飞行任务需要执行一次规避机动。欧空局的欧洲遥感卫星 1 和法国的斯波特 2 卫星也分别于 1996 和 1997 年实施过规避机动。

目前，空间碎片被认为是引起航天器灾难性事故中概率最大的单一风险。虽然大多情况下，碎片的撞击不会造成航天器灾难性事故，但会给航天器带来一定损伤；航天器失效的等级一般可分为三大类：功能性失效、严重失效和灾难性失效。例如，碎片击穿空间站外面的一个小的低压气瓶，可被认为是功能性失效；但如果该气瓶是剩下的最后一个或者气瓶压力非常高以至穿孔后喷射的气体足以改变空间站的方向，则成为严重失效；如果这种方向的改变非常严重，造成姿态无法恢复，就成为灾难性失效。

（4）空间碎片模型　地基监测系统无法监测尺寸在 1mm ~ 1cm 的“危险碎片”，并且不能对空间碎片的演化过程进行理论描述和预测。因此，为了给航天器的设计者和经营者提供一套可靠而实用的空间碎片环境动态数据，还需要在空间碎片观察数据的基础上建立适当的工程模型。利用这些模型可以推算出小尺寸空间碎片的分布特征，并对不同轨道高度空间碎片环境的演化进行中长期预测。目前具有代表性的空间碎片模型有欧空局/欧洲空间运行中

心（ESOC）开发的 MASTER 模型、意大利国家大学计算中心（CNUCE）开发的 CODR 模型、英国国防评估研究局（DERA）开发的 IDES 模型、美国航宇局约翰逊航天中心（JSC）开发的 EVOLVE 模型和欧空局开发的 DELTA 模型。将模型的计算结果与实际监测数据进行对比，可以评估模型的有效性，并改善模型的实用性。

通过与 1999 年 1 月和 4 月德国应用科学研究所两次 24h 束场实验结果的比较可以发现，MASTER、CODR、EVOLVE 和 IDES 四种模型对碎片空间密度分布的计算结果在大致趋势上与实验结果是一致的，即在低地轨道上，尺寸大于 1cm 的空间碎片的密度峰值都出现在 900km 左右的轨道高度。然而以上模型对尺寸大于 1cm 空间碎片数量的计算结果都位于甚至低于束场实验置信区间的下限，这意味着这些模型都低估了低地轨道上实际空间碎片的总数。由于各模型采用了不同的编码技术，并且在进行标定时所选用的初始参数也不相同，所以不同模型对不同尺寸空间碎片空间密度分布的计算结果存在着明显的差异。对于尺寸大于 1cm 的空间碎片，CODR 模型的峰值碎片数目是另三种模型计算结果的 1/3。对于尺寸大于 10cm 的空间碎片，各模型计算结果之间的差异明显增大。在某些高度上，EVOLVE 模型给出的碎片空间密度是另三种模型计算值的 1/2。因此，为了使空间碎片模型的计算结果更为准确合理，还需要利用天基碎片监测系统或者航天器表面的复原数据来分析小尺寸碎片的空间密度，并以此作为输入参数来重新标定现有模型。

DELTA 模型是欧空局所使用的新一代尖端模拟分析工具，能够对低地轨道上尺寸大于 1mm 的碎片环境演化过程以及航天器在任务周期内的碰撞风险进行长期预测。DELTA 模型还能够研究现实的碎片缓减措施以及未来卫星星座的推广应用对空间碎片环境演化的长期效应。

根据 DELTA 模型的计算结果，在低地轨道上尺寸大于 1cm 的空间碎片数量将按指数增长，从 2000 年的 11 万个达到 2100 年的 55 万个。从碎片的来源看，NaK 液滴和固体火箭发动机微粒的数量很少，在低地轨道上都少于 2.5 万个。由于在模型中考虑到了现有 NaK 液滴来源于前苏联雷达海洋侦察卫星（RORSAT）的 NaK 冷却液泄漏事件，同时还假设在今后可以避免中尺寸固体火箭发动机微粒的生成，因此在 DELTA 模型中这两种碎片源的强度将随时间而衰减。另外，由于只有高强度的爆炸事件才会影响尺寸大于 1cm 碎片的积聚数目，而这类爆炸事件在今后发生的概率很小，爆炸发生的轨道高度很低，导致新生碎片数目迅速衰减，因此在 DELTA 模型的计算结果中，爆炸碎片的数目在 100 年期间内不会有明显的增长，即从 2000 年的 7.5 万个增加到 2100 年的 10 万个。DELTA 模型的计算结果显示，碎片总数的指数增长主要是由于碰撞碎片源的指数增长；如果今后不采取有效的碎片缓减措施，预计碰撞碎片的数目将会在 2035 年超过目前占主导地位的爆炸碎片数目，达到 8.5 万个。

实际上，在航天器的设计和运行过程中，超出航天器承受能力的灾难性碰撞概率是比碎片空间密度更为重要的参数。DELTA 模型把灾难性碰撞分为背景型碰撞、反馈型碰撞和星座型碰撞。模拟计算的结果显示，低地轨道上总的碰撞频率（年碰撞次数）在今后 100 年内将呈指数增长。由于背景型碰撞次数的迅速增长（占总数的 50%），到 2100 年，灾难性碰撞次数将急剧增加到每年 60 次，同时在 900km 和 1400km 两个轨道高度附近将各自出现一个灾难性碰撞的高峰。另外，2030 年以后，星座型碰撞和反馈型碰撞将有明显的增加，2035 年灾难性碰撞的总数将达到 10 次。预计到 2085 年，反馈型碰撞的次数将会超过星座

型碰撞的次数，两种类型的碰撞次数之和将超过 20 次。因此，在下一个百年中如果不采取及时有效的碎片缓减措施，反馈型碰撞将在所有碰撞事件中占主导地位，并最终导致空间环境的失控。

（5）空间碎片的控制　为了使人类能够长期有效地利用空间资源，必须对目前的空间环境进行治理，并对今后空间碎片的生成进行控制。然而由于人类探索太空的必然性和持久性，无论在近期还是在远期内都难以使空间碎片的总数下降，更不用说最终清除。因此，现在空间碎片环境控制的主要目标是尽量减缓空间碎片总数的增加速度，并逐步使得某一轨道区域（如低地轨道）内的碎片总数不增加，甚至下降。为达到这一目标而需采取的控制措施可以分为预防和治理两大类。预防就是在航天器的发射和运行过程中，尽可能减少空间碎片的生成；而治理则是设法清除轨道上已经存在的空间碎片。从目前的技术难度和经费需求角度而言，预防措施比治理措施更为切实可行。根据目前的研究进展，有可能采用的预防措施主要有消能、系留、垃圾轨道和重复使用等几种。

1）预防措施：

① 消能。消能就是消除会使运载火箭末级或在轨航天器发生爆炸的能源。消能措施包括将工作完毕的运载火箭末级中的剩余推进剂和高压气体耗尽或排空，将火箭末级或航天器的内部电源永久性切断，从而消除一切可能引起爆炸的根源。目前这种方法已在实际中得到普遍应用。

② 系留。系留是指将航天器在发射和运行中产生的抛弃物系留在航天器上。

③ 垃圾轨道。垃圾轨道是在航天器工作寿命结束之后，利用预留的能源进行变轨机动，最后将完成任务的航天器推升到一条规定高度的轨道，因此也可称为变轨法。对于地球静止轨道上的航天器，相应的垃圾轨道通常是一条比静地轨道高 300 ~ 400km 的圆形轨道；对于低地轨道上的航天器，相应的垃圾轨道高度通常为 1800km 左右；而对于位于低地轨道和静地轨道之间的航天器，其垃圾轨道高度约为 2500km。采用垃圾轨道措施能够有效地缓减大尺寸空间碎片的增加，但会导致航天器任务成本的上升。变轨措施已在 2010 年后应用于火箭，在 2015 年后将应用于有效载荷。

④ 重复使用。重复使用主要是利用单级入轨火箭或新型空天飞机等来代替目前所使用的一次性多级运载火箭，也可以利用能够进行在轨维修、补给和回收的空间操作平台来代替目前一次性使用的卫星。尽管目前可重复使用航天器的研发需要巨额经费，但这却是未来发展先进航天运输体系的唯一出路。

2）空间碎片的治理措施包括回收、脱轨、烧毁和收集四种。

① 回收是指利用能够返回地面的航天器将轨道上的碎片回收起来并带回地面。这种方法只适用于清除低轨道上的空间碎片，并且成本太高，通常只适用于回收可重复使用的航天器。

② 脱轨就是让废弃的火箭或完成任务的卫星等空间碎片脱离原来的运行轨道，转移到一条具有短衰减寿命（10 ~ 50 年）的轨道上，或者直接降入大气层烧毁。通常可以利用火箭末级的燃料、卫星的推进系统、大气阻力、太阳光压或者系绳装置等手段来实现空间碎片的脱轨飞行。考虑到在 1300km 的高度上大气对航天器的作用已经消失，因此脱轨措施主要适用于治理近地点低于 1300km 的空间碎片，而对于近地点高度不低于 1300km 的废弃航天器，则可采用变轨措施将它们的轨道提高到 1800km 以上的高度。这一措施已在 2010 年后

应用于火箭，在2015年后将应用于有效载荷。

③ 烧毁是利用大功率地基激光器照射空间碎片，使其融化、粉碎或汽化后从轨道上迅速衰减。由于烧毁效果受激光器模式和功率、碎片材质和尺寸以及轨道高度和倾角等多种因素的影响，因此这种方法主要适用于小尺寸低轨道空间碎片的治理，特别适用于清理某些特定轨道上的特定碎片。

④ 收集是通过在需要清理的轨道上放置直径达数公里的球形收集器来治理碎片。收集器表面布满泡沫状小孔。微小空间碎片与收集器相碰时，会被吸进收集器的小孔内。能量大到足以穿过收集器的碎片并被减速，因此迅速衰落到更低的短寿命轨道上。收集措施只适用于治理某一特定轨道上的微小空间碎片。

DELTA模型对上述预防与治理措施进行计算的结果显示，采用适当的碎片缓减措施后，碎片数量和碰撞次数的增长都将得到很好的控制。如果只采用消能措施，那么到2100年，低地轨道上尺寸大于1cm的空间碎片总数将由55万个下降到38万个，灾难性碰撞频率将由每年60次下降到40多次。显然，只采用消能措施并不能很好地控制未来大尺寸空间碎片的总数以及灾难性碰撞次数的增长，因此还需要对今后的航天器采取一些后任务处置措施，如脱轨和变轨等碎片缓减措施。根据DELTA模型的计算，如果将消能和脱轨措施结合起来，就可以明显控制低地轨道上的空间碎片环境。在这种情形下，2100年的碎片总数可以下降到20万个以下，灾难性碰撞次数可以限制在20次以内。进一步的模拟计算表明，不论是选用10年、25年还是50年衰减寿命的弃星轨道来实施脱轨措施，它们在稳定低地轨道上的空间碎片环境方面都具有相近的效果。当然，在执行载人飞行任务的轨道高度（350～550km）上，以上三种弃星轨道方案对碎片空间密度的影响存在着明显的差异。当弃星轨道的寿命极限从10年增加到50年时，350～550km高度范围内的碎片空间密度将增加4倍，并且密度峰将从400km漂移到500km高度。

尽管采用垃圾轨道的治理措施并不能减少低地轨道上空间碎片的总质量，然而该方法却能够有效地控制大尺寸碎片数量的增加，并且还能够降低某些轨道高度区域内发生灾难性碰撞的次数。计算结果表明，利用1800km高度的垃圾轨道来处置轨道高度大于1300km的后任务航天器，不仅能够很好地控制1300～2000km高度区域内的大尺寸空间碎片数量的增长，而且还可以明显降低1400km高度附近的灾难性碰撞的峰值。然而，随着1800km垃圾轨道上碎片数量的增加，到2100年以后，反馈型碰撞将导致垃圾轨道环境的恶化和失稳，甚至引发下层空间的级联碰撞。

（6）卫星的清除　卫星的清除有三条途径：一是由卫星经营者有意将卫星推入大气层中；二是用航天飞机把卫星拖离轨道；三是任由卫星轨道螺旋式地自然下降。前两条途径尽管确能清理空间碎片，但实际效果却微乎其微，因为它们只适用于低轨道上的物体，而这些物体不用清理也会自然消亡。除了上述方法，还有以下几种方法。

1）自然轨道衰减。这是空间碎片消亡的一条基本途径，也是一条被动途径。通常认为外层空间是没有空气的，但地球的大气层实际上延伸得很远，在低地轨道上仍有足够大的空气阻力，从而会在快速运动的卫星上产生摩擦力。这一阻力是自我增强型的：随着卫星因阻力而损失能量，它们便会下落并加速；而速度加快后阻力会更大，能量损失也就随之加快。这最终会导致卫星进入大气层中的稠密部分，并在急速飞行过程中部分或完全烧掉。自然衰减现象在600km以下比较明显，但在1500km的高度上也有效果。高度较低时，除非动用火

箭补偿阻力，卫星在轨道上只能坚持几年时间。在每 11 年出现一次的太阳活动高峰期，地球大气层因接受太阳辐射的热量较多会向外膨胀，从而会增大大气阻力。在 1989—1990 年上一个太阳峰年前后，落向地面的在册空间碎片数量创了纪录，达到每天 3 个，是平时的 3 倍。这一年共有 560t 碎片从轨道上消失。和平号的前身——礼炮 7 号空间站也成了这次太阳活动高峰的牺牲品，于 1991 年初载入。此前，1979—1980 年的太阳峰年还曾造成美国天空实验室空间站提早离轨。尽管自然轨道衰减对消除轨道垃圾有利，但却并未阻止住空间物体数量上升的势头。

2）新发射的低轨卫星和火箭箭体设计成能在完成任务后不超过 25 年内离轨，即进入大气层焚毁。

3）跨机构空间碎片协调委员会向国际电信联盟提出建议，低地轨道卫星在寿命即将结束之际，利用星上剩余推进剂，将卫星变轨推至远地点高于同步高度的轨道上，考虑到太阳光压等干扰因素，必须将卫星推至高于同步高度 200km 的坟墓轨道（安置报废卫星的轨道），并给出了具体的最小机动高度的计算公式。

（7）其他防治措施

1）防护屏。正在建造中的国际空间站将在有人居住舱段、燃料管路、控制陀螺和其他敏感部位周围装设高级防护屏。站上的其他组件（如太阳能帆板），由于无法实施保护，所以进行规划时必须做好它们在长期运行中因遭受小碎片撞击而慢慢退化的准备。

2）巨型气泡。用巨型气泡来清除颗粒型碎片。撞到气泡上的颗粒会因能量损失而很快落向地面。

3）加强探测工作，制订拦截策略。在穿越地球轨道的近地天体中，直径大于 1km 的小行星估计有 2000 颗，大于 100m 的约有 30 万颗。到 20 世纪 90 年代中期，只有 10% 的大型近地天体已被探测到并确定了它们的轨道。这些公里级天体碰撞时释放的能量相当于百万吨水平的核爆炸。彗星的威胁更大，它们的飞行速度是小行星的 3 倍，单位重量能量大概是小行星的 10 倍。地球上一些大的环形坑实际上是由近地天体撞击造成的。这些坑很多都是彗星（而不是小行星）所为。比如，墨西哥尤卡坦半岛上一座 160km 直径的大坑似乎就是 6500 万年前由一个 10km 大小的天体撞击出来的。那次撞击据说造成了恐龙和当时世界上 70% 物种的灭绝。美亚利桑那州有一座 1km 直径的陨石坑。它是由一个直径不足 15m 的天体留下的。“核冬天”模型预测表明，因彗星或大型小行星撞击而被抛射到高空中的尘埃和不透光的颗粒将使阳光在数年内无法到达地球表面。对这些天体要加强探测工作，制订拦截策略，利用远程和天基雷达来增强地球上的无源探测器系统，开发研制（但不部署）拦截系统，包括详细的系统工程、设计优化和样机制造工作以及长线产品的采购工作。在探测到近地天体威胁来临的情况下再开始拦截系统的生产。

4）防止爆炸产生碎裂物。造成卫星在轨爆炸的原因很多。星上电池组是引发多次卫星爆炸解体的原因，因而应在卫星上的电池管理系统中增加一个环节，保证在卫星使用寿命期结束后，将电池组处于安全放电状态，然后将其短路以防止再充电。这一环节就是对任务期结束后的留轨卫星采取钝化措施。

5）减少微粒物质生成。空间碎片中的微粒物质主要来自固体火箭发动机，在其工作期间和关机后会排放出各种微粒物质，其中大部分是固体氧化铝微粒。可以通过改变固体装药的配方等技术措施来防止这类微粒物的产生。

4. 我国对碎片采取的措施

2004 年 11 月，中国科学院空间目标与碎片观测研究中心在中科院紫金山天文台成立。为配合中心工作，紫金山天文台在江苏盱眙建立了 1.2m 近地天体探测望远镜，从中国上空经过的大部分太空碎片都能被监控。2003 年，我国制订了《2006 年至 2020 年空间碎片行动计划发展纲要》。

（1）几年来，我国空间碎片研究取得的进展

1）空间碎片观测研究：完成了一台 25cm 口径车载小型光学观测望远镜；完成了一台 60cm 口径地基光学观测望远镜；完成了空间碎片天基探测雷达可行性方案论证，开展了天基直接探测可行性研究；参加了两次机构间空间碎片协调委员会空间危险物体再入国际联合观测，观测结果国际对比精度一次位居第 3，一次位居第 4。

2）空间碎片环境与数据库研究：完成了空间碎片环境演化模式研究框架及相关模块的代码编制；完成了风险评估软件框架；完成了可跟踪空间碎片动态数据库建设，并投入使用，收录了目前已编目的近 9000 个目标的数据，基本实现动态更新；完成了微小空间碎片数据库建设框架，录入了“尤里卡”计划和“长期暴露设施”（LDEF）等获取的部分数据；开展了机构间空间碎片协调委员会提供的几种空间碎片环境模型的比对分析工作。

3）防护研究：完成了机构间空间碎片协调委员会空间碎片防护手册的翻译出版；完成了空间碎片被动防护研究总体方案和需求分析；完成了超高速碰撞实验需求和方案研究；完成了主动规避算法研究和预警软件框架；完成了微小空间碎片激光模拟实验技术方案论证；完成了空间材料手册编制方案综合论证报告；完成了国内超高速碰撞实验设备条件的调研；进行了空间碎片防护设计软件包的研究。

4）减缓研究：完成了长征四号乙运载火箭末级剩余推进剂排放研究，并成功地应用于工程；完成了长征三号甲系列运载火箭低温末级排放系统方案研究和部分地面试验；完成了地球静止轨道卫星死亡轨道的理论计算等；完成了机构间空间碎片协调委员会《空间碎片减缓指南》的国内协调、征求意见和组织研究工作，并且编辑出版了《机构间空间碎片协调委员会空间碎片减缓指南文件集》。

（2）具体工程　从 1970 年我国长征一号火箭将东方红卫星送入太空，到 1998 年 4 月为止，我国长征系列火箭已经进行了 50 次发射，将 52 颗卫星或模拟星送入太空，其中返回式卫星 17 颗。

1）长征二号丙三级状态上面级减少碎片设计。长征二号丙三级状态运载火箭为两级火箭加上面级，主要用来发射低轨道卫星。上面级由固体变轨发动机、上面级结构、姿控系统、控制系统及遥测系统等构成。上面级的主要功能为在长征二号丙火箭第二级飞行结束，上面级加卫星进入停泊轨道后，完成无动力滑行控制；完成变轨，将卫星送入预定轨道，并在飞行任务结束后，进行离轨操作等。长征二号丙三级状态运载火箭在方案设计时，就将空间碎片问题作为软硬件设计的出发点，这在我国运载火箭设计尚属首次。在软件设计上，将长征二号丙三级状态运载火箭二级箭体分离后的轨道近地点高度设置为小于 190km。长征二号丙三级状态运载火箭在星箭分离后，上面级的质量约为 550kg，直径为 2.9m，有效阻尼面积为 4.92m，其标准轨道为 630km 圆轨道，轨道倾角为 86.4°，飞行任务结束后，上面级轨道高度为 630km。若不进行离轨操作，则上面级的轨道寿命长达 53 年。在离轨方案设计时，考虑了两种方案，即被动离轨和主动离轨。

① 被动离轨。被动离轨就是采用技术措施，迫使飞行体离轨。阻尼面积大的飞行体，其弹道系数大，轨道寿命较短。因此，若想利用大气自然阻尼来减小运载火箭上面级的轨道寿命，就应增大其弹道系数。上面级的轨道寿命决定于它的弹道系数 δ，即

$$\delta = XC \cdot CD/m$$

式中 XC——飞行体的最大阻尼面积；

CD——阻力系数；

m——质量。

达到这一目的的方法之一便是在运载火箭上面级上连接一个气球式降落伞，当上面级释放其有效载荷后，这种气球式降落伞能够被展开并充分膨胀，这样其弹道系数相应增大，轨道寿命就会减小。

被动离轨的优点是：

在被动离轨过程中不需对飞行体姿态进行控制，因而实际操作过程简单；在被动离轨过程中不消耗飞行器上所携带的推进剂，这一点在推进剂量紧张时更具有现实意义；离轨设备可以折叠起来放在特定储存容器内，在火箭或卫星完成工作程序后打开，可以使系统的体积减小。

被动离轨的缺点是：

被动离轨措施对碰撞概率的改变很小甚至不变；被动离轨需要一套专门离轨设备以及相应的控制器件，系统质量增加较大。气球或阻尼伞的质量与其半径成正比，而辅助结构的质量一般会很大，这样在运载能力一定的情况下，就减少了入轨有效载荷的质量。离轨质量的代价是由轨道高度和离轨时间共同决定的，对于具有机动能力的飞行器来说，更是一种以大质量为代价的做法；由于使用专门离轨设备，需要相应的控制器件和控制指令，增加了系统的复杂性，降低了系统的可靠性；对被动离轨方案进行地面试验是非常困难的，尤其是在气球阻尼面积较大时更是如此。

② 主动离轨。主动离轨，就是利用飞行器本身的动力系统，在恰当的时机对飞行器施加与其飞行速度方向相反的作用力，使飞行器的轨道高度，尤其是近地点高度降低，然后再靠大气阻尼作用，使飞行器高度快速衰减并再入大气层。

主动离轨系统，一般由反推发动机和相应的控制器件构成，对于原来具有机动能力的飞行器来说，可利用原有的姿控系统作为离轨发动机进行离轨。

根据轨道机动优化原理，主动离轨操作应在飞行器运行至轨道远地点时实施，此时进行轨道机动，在与飞行速度方向相反的方向施加制动力，可有效降低轨道近地点高度。如质阻比为 0.5 的飞行体 600km 圆轨道的轨道寿命约为 242 天；当近地点高度降至 400km 时，轨道寿命约为 35 天；当近地点高度降至 200km 时，轨道寿命约为 2 天。

通过主动离轨减小近地点高度，进而减少轨道寿命，可以有效减小碰撞概率。对具有大质量、有效面积大的废弃飞行体进行离轨操作，减少其在轨飞行寿命，对改善空间碎片环境是很有意义的。

主动离轨的优点为：主动离轨方式对各种轨道均适用。由于被动离轨需借助于大气阻尼，当轨道高度小于 700km 时，主动离轨和被动离轨都是有效的；当轨道高度大于 700km 时，由于大气密度太小，只有采用主动离轨方式；主动离轨可以有效减小碰撞概率；对于具有机动能力的飞行器而言，可以利用原有的控制系统进行离轨操作，不必重新设计离轨控制

系统，系统简单可靠。

主动离轨的缺点为：在离轨过程中需要调姿定向，进行姿态控制；主动离轨要消耗飞行器自身推进剂，损失运载能力。

2）长征二号丙离轨方案设计与实践。通过比较被动离轨和主动离轨的优缺点，长征二号丙离轨设计采用主动离轨。在星箭分离后，利用箭上控制系统和姿控系统，将上面级调整到离轨姿态，最后姿控发动机工作，一方面将姿控推进剂排空，另一方面为上面级离轨操作提供制动力。

离轨操作结束后，上面级的轨道为近地点224km，远地点630km，上面级的轨道寿命约为两个月。

上面级轨道寿命由53年降至两个月，付出的代价是运载能力损失约为30kg，随着长征二号丙最终轨道高度的提高，运载能力的损失也逐渐增加，即付出的代价越高。但离轨操作可以减少空间碎片的积累，防止上面级与航天器碰撞，改善空间环境，这点损失是值得的。

长征二号丙三级状态于1997年9月1日首飞成功。经观测，入轨物体共有8个，即2个模拟星、1个上面级、1个二级箭体和4个二级反推火箭整流罩封头。模拟星大小为4m×1.2m×1.2m，轨道为近地点623km，远地点633km，倾角为86.3°；上面级大小为2.9m×0.9m，轨道为近地点234km，远地点626km，倾角为86.2°；二级箭体大小为3.35m×23m，轨道为近地点184km，远地点626km，经观测，其轨道寿命约为90天；反推火箭整流罩封头大小为0.214m×0.196m，轨道为近地点184km，远地点641km，其轨道寿命小于18天。上面级实测的轨道近地点高度略高于理论值，这使得上面级的轨道寿命增加至3个月。

3）长征三号系列减少碎片措施。长征三号系列包括长三、长三甲、长三乙、长三丙等型号运载火箭，其第三级（或称上面级）箱体结构为共底结构，推进剂为低温液氢液氧。在飞行任务结束后，共底结构易受低温冲击、压差变化等因素影响，造成共底破坏，两种推进剂混合而发生爆炸。为防止共底破坏，液氢箱和液氧箱均装有保险活门，当箱体气体压力增大到保险活门开启压力时，保险活门打开泄压，以保证箱体压力及压差在设计范围内。这种措施在很大程度上避免了爆炸事件的发生。事实上，在长征三号系列的17次飞行任务中，从未发生过爆炸现象。

长三甲、长三乙和长三丙等型号运载火箭在设计时，在星箭分离后，还进行增压系统泄压操作，将增压系统冷氦气瓶的气体通过反向排气管放掉。这一方面给箭体提供反向推力，增大箭体与卫星的距离，避免碰撞；另一方面也作为火箭箭体的钝化措施。

长征三号系列火箭虽然采取了一些钝化措施，但由于剩余推进剂未排空，仍存在箭体爆炸的可能性。阿里安第三级火箭在未考虑剩余推进剂排空之前，在设计上也考虑了箱体保险活门，但发生了若干次箭体爆炸事件。从阿里安第36次飞行开始，剩余推进剂排空操作被应用到阿里安所有的发射任务上，从此，阿里安火箭再也未发生过三级箭体爆炸事件。因此，从飞行安全和减少空间碎片问题的角度出发，长征三号系列火箭也应积极考虑剩余推进剂排空操作的可能性，并积极进行这方面的研究。

4）长征四号减少碎片措施。长征四号运载火箭第三级（或称上面级）箱体结构也为共底结构，推进剂为常温推进剂。1990年10月4日，长征四号运载火箭在星箭分离32天后，其上面级发生爆炸事件，产生了约86个空间碎片。据分析，爆炸很可能是由于低温冲击、压差变化等因素造成共底破坏，两种推进剂混合而发生爆炸。为避免爆炸事件的再次发生，

长征四号运载火箭第三级增加了剩余推进剂排空设计。在飞行任务结束后，通过新设计的剩余推进剂排空系统，将剩余推进剂全部放掉。

中国有关技术人员正在研究把任务即将结束的地球静止轨道卫星向上推离原来的轨道，使其进入更高轨道的方案的可行性，从而减少地球静止轨道上新的空间碎片的生成。

5. 碎片防治需求分析

（1）应用卫星防护的需求　在空间运行的应用卫星日益增多。特别是在太阳同步轨道、地球同步轨道以及一些卫星星座所在的轨道区域，空间碎片的密度将会有较大的增加，所以应用卫星的防护依然重要。而且随着对空间碎片认识的不断深入，应用卫星的防护需求也会更为强劲。应用卫星也包括太空电站。

（2）载人航天的需求　载人航天始终是空间碎片研究的主要服务对象。我国的载人航天计划已经拉开序幕，空间碎片行动计划的研究成果已经在神舟计划中得到了应用。今后应该从空间碎片的防护设计和规避（包括在轨飞行期间的规避和发射窗口的选择）两个方面为载人航天活动提供服务。

（3）陨落期预报的需求　迄今为止，因大型航天器陨落造成重大损失的事例还不多，但威胁始终存在。只要有大型航天器陨落，就必然需要预报其陨落时间和地点。这仍然是人们关注的焦点之一。

（4）军事需求　空间碎片和军事的关系千丝万缕。现代战争中的空间目标识别、空间监视、反导、动能武器和反卫星武器等一系列军事任务和装备都和空间碎片有关，是空间碎片研究非常重要的推动力。从长远来看，我国建立独立自主的空间物体监视系统尽管难度很大，投资规模也很大，但是势在必行，只是建设的早晚与时机问题。

（5）空间交通管理的需求　由于在空间工作的航天器数量越来越多，使空间变得越来越拥挤，正在工作中的航天器之间发生碰撞的可能性也越来越大，因此空间交通管理也变得越来越重要。

6. 国际空间法规

太空，在自然科学上的概念是空气空间以外的整个空间，在法律上的概念是国家主权范围以外的整个空间。空间法属于国际法的范畴，是现代国际法的一个重要分支。世界第一颗人造卫星上天后，联合国大会就通过决议，提出共同研究制定一套监督制度，随后成立了“和平利用外层空间委员会”（简称“外空委员会”或“外空委”），其任务之一就是研究和平利用外层空间可能产生的法律问题。外空委是制定空间法的主要机构。

（1）法律文件　1962 年，外空委成立了法律小组委员会，负责拟订有关外空活动的条约、协定和其他法律文书草案。目前已制定五个有关外空活动的国际公约：

1）1967 年生效的《关于各国探索和利用包括月球和其他天体在内外层空间活动的原则条约》（简称《外空条约》）。

2）1968 年生效的《营救宇航员、送回宇航员和归还射入外层空间的物体的协定》（简称《营救协定》）。

3）1972 年生效的《空间物体所造成损害的国际责任公约》（简称《责任公约》）。

4）1976 年生效的《关于登记射入外层空间物体的公约》（简称《登记公约》）。

5）1984 年生效的《指导各国在月球和其他天体上活动的协定》（简称《月球协定》）。

（2）法律文件的主要内容

1）《外空条约》规定，各国在外层空间的活动应该遵循以下原则：

① 太空对所有国家都是敞开的，到太空进行科研、旅行等活动机会也是均等的，但目的必须是为全人类谋福利和利益。

② 任何国家都不能在太空划出一块说“是自己的”，任何国家不得通过占领使用或任何其他方式提出主权要求。

③ 不能把太空变成军事竞技场，探索利用外层空间要坚持非军事化原则。

2）确立的法律制度。这些公约确立了人类外空活动的基本法律原则，初步建立起了四项基本的空间法律制度，即空间营救制度、损害赔偿制度、空间物体登记制度以及国际合作制度。

① 登记制度。发射国对空间物体有管辖和控制权，并对该物体所造成的损害承担国际责任。发射国应将其发射的空间物体情况向联合国秘书长报告以便登记入册，主要包括发射国或几个发射国的国名，空间物体的适当标志或其登记号码，发射的日期和地域或地点、基本的轨道参数、空间物体的一般功能等。

② 责任制度。发射国应对其空间物体所造成的损害承担国际责任：《责任公约》的第2～4条规定了有关损害的两个含义：一是空间物体对地球表面，或给飞行中的飞机造成的损害；二是任一发射国的空间物体在地球表面以外的其他地方，对另一发射国的空间物体，或其所载人员或财产造成损害。根据一些法学家的意见，这个内容应当包括由空间碎片所造成的损害赔偿责任。现代空间开发中一个极为现实的问题就是在空间利用核能源的问题。1992年12月通过了《在外层空间使用核动力源的原则》，现在准备修订。

③ 援救制度。宇航员应得到一切可能的援助：当宇航员发生意外、遇难或在他国境内或公海紧急降落时，发现国应提供一切可能的援助；在外层空间进行活动时，一国的宇航员应向他国宇航员提供援助；各国应把其在外层空间发现的对宇航员有危险的现象通知其他国家或联合国秘书长；各国在获悉或发现空间物体或实体的组成部分返回地球并落在其所管辖的区域内，落在公海或不属于任何国家管辖的地方时，应通知发射当局和联合国秘书长。

④ 国际合作制度。各国在外层空间所进行的一切活动必须妥善照顾其他国家的同等利益；避免使外层空间遭受有害的污染；将活动的性质、方法、地点及结果公开；将其在月球和天体上的驻地、设施、设备和宇宙飞行器对各国开放。

1995年联合国外空委科技小组开始起草有关空间碎片问题的全面技术报告，该工作已于1999年完成。这个文件成为由几十个国家的有关专家共同起草的最全面、最权威和高度一致的文件。

联合国成立了国际碎片协委会，由指导小组和四个工作组组成。四个工作组分别是空间碎片观察与测量组、环境与建模组、安全与防护组及空间碎片缓减组。

美国空间跟踪与控制中心坐落在美国科罗拉多州斯普林斯市市郊夏延山地下的深处——北美防空司令部和美国航天司令部。在洞中建立了一座高约24m的大楼，楼体结构全部由钢板焊接而成，楼底由数十枚弹簧支承以抗震。楼内各种监测、控制、通信、计量及水电、生活等设施一应俱全。这里昼夜灯火通明，通过设在美国阿拉斯加和加拿大境内的相控阵雷达，每天24h连续地、密切监视着外层空间的和可能来自北方大气层内的各种飞行器的活动。大楼的上面和四周有厚达百米的山岩保护，进出通道用多道2m厚的混凝土门与外界隔绝，足以保证在核袭击的情况下，大楼安全无恙，跟踪与控制中心可照常运行。

（3）我国参与空间法情况　1980 年 11 月 3 日，联合国正式接纳中国为联合国外空委员会成员国。此后，中国参加了历届联合国外空委员会及其下属的科技和法律小组委员会届会。1983 年和 1988 年，我国先后加入了联合国制定的《外空条约》、《营救协定》、《责任公约》和《登记公约》，并严格履行有关责任和义务。

目前国内还没有太空开发方面的相关法律，只有一些规定，如国防科工委和外交部发布实施的《空间物体登记管理办法》、国防科工委发布实施的《民用航天发射项目许可证管理暂行办法》等。

第三节　卫星轨道及太空行走

一、卫星轨道及发射

1. 地球同步轨道

地球同步轨道又称 24h 轨道，要实现地球同步轨道，须满足下列条件：

1）卫星运行方向与地球自转方向相同。

2）轨道偏心率为 0，即轨道是圆形的；运行轨道为位于地球赤道平面上的圆形轨道。

3）运行周期与地球自转一周的时间相等，即 24h，卫星在轨道上的绕行速度约为 3.1km/s，等于地球自转的角速度。

地球同步轨道卫星是运行在地球同步轨道上的人造卫星，同步轨道卫星的轨道周期等于地球在惯性空间中的自转周期（23 小时 56 分 4 秒），且方向亦与之一致，同步轨道卫星在每天同一时间的星下点轨迹相同。

地球同步轨道与地球静止轨道不是一回事，它们之间有共同点，也有较大区别。地球同步轨道与地球静止轨道都是运行周期（23 小时 56 分 4 秒）相同的人造地球卫星轨道。两种轨道有三点不同：

① 轨道倾角不同。地球静止轨道是轨道倾角（轨道平面和赤道平面的夹角）为零的圆形地球同步轨道。地球静止轨道一定在赤道平面上；而地球同步轨道平面可与赤道平面成一不为零的夹角。

② 卫星位置不同。在地球同步轨道上运行的卫星每天在相同时间经过相同地方的天空，对地面上的观察者来说，每天相同时刻卫星会出现在相同的方向上，在一段连续的时间内，卫星相对于观察者可以是运动的；而处于地球静止轨道上运行的卫星每天任何时刻都处于相同地方的上空，地面观察者看到卫星始终位于某一位置，保持静止不动。

③ 星下点不同。人造地球卫星在地面的投影点（或卫星和地心连线与地面的交点）称为星下点。卫星运动和地球自转使星下点在地球表面移动，形成星下点轨迹。地球同步卫星的星下点轨迹是一条 8 字形的封闭曲线，而地球静止卫星的星下点轨迹是一个点。

2. 卫星分类

地球同步卫星分为同步轨道静止卫星、倾斜轨道同步卫星和极地轨道同步卫星。

（1）同步轨道静止卫星　当同步轨道卫星轨道面的倾角为 0°，即卫星在地球赤道上空运行时，由于运行方向与地球自转方向相同，运行周期又与地球同步，因此，人们从地球上仰望卫星，仿佛其悬挂在太空静止不动，所以，当轨道与赤道平面重合，即把零倾角的同步轨道称为静止轨道，在静止轨道上运行的卫星称为静止卫星。地球静止轨道卫星的高度为

35786km，它的覆盖范围很广，利用均布在地球赤道上的三颗地球静止轨道卫星，就可以实现除南北极很小一部分地区外的全球通信。静止卫星上的天线所辐射的电波，对地球的覆盖区域基本是稳定的，在这个覆盖区内，任何地球站之间可以实现24h不间断通信。因此，同步轨道静止卫星主要用于陆地固定通信，如电话通信、电视节目的转播等，但也用于海上移动通信，不过，它不像陆上蜂窝移动通信那样有那么多的基站，只有卫星是一座大的基站，移动业务交换中心依然设在岸上（称为岸站），海上移动终端之间（船舶与船舶之间）的通信，需经卫星两跳后才能实现，例如，如果甲船需同乙船联系，那么，甲船将信号发至卫星，经卫星一跳到达岸站上的移动业务交换中心，然后，岸站又将信号发至卫星，再经卫星一跳到达乙船。倾斜轨道和极地轨道同步卫星从地球上看是移动的，但却每天可以经过特定的地区，因此，通常用于科研、气象或军事情报的搜集，以及两极地区和高纬度地区的通信。

（2）倾斜轨道同步卫星　地球同步卫星常用于通信、气象、广播电视、导弹预警、数据中继等方面，以实现对同一地区的连续工作。在遥感应用中，除了气象卫星外，一个突出的应用就是，通过地球同步轨道上的四颗跟踪和数据中继卫星系统，高速率地传送中低轨道地球观测卫星或航天飞机所获取的地球资源与环境遥感数据。世界上第一颗地球同步卫星是1964年8月19日美国发射的“辛康”（syncom）3号。中国于1984年4月8日、1986年2月1日和1988年3月7日分别发射三颗用于通信广播的地球同步卫星。

（3）极地轨道同步卫星　倾角为90°的人造地球卫星轨道，又称极地轨道。在极地轨道上运行的卫星，每一圈内都可以经过任何纬度和南北两极的上空。由于卫星在任何位置上都可以覆盖一定的区域，因此，为覆盖南北极，轨道倾角并不需要严格的90°，只需在90°附近就行。在工程上常把倾角在90°左右，但仍能覆盖全球的轨道也称为极地轨道。近地卫星导航系统（如美国海军导航卫星系统）为提供全球的导航服务多采用极地轨道。许多地球资源卫星、气象卫星以及一些军事侦察卫星采用太阳同步轨道，它们的倾角与90°只相差几度，所以也可以称其为极地轨道。还有一些研究极区物理的科学卫星也采用极地轨道。

3. 卫星发射

要将同步卫星发射到同步轨道上，是相当困难和复杂的。但如果一个国家的卫星发射场建在地球的赤道上，那这种卫星的发射就简单多了。在赤道上可以由西向东发射，达到要求的轨道高度，在适当的位置定点，问题就解决了。可惜的是，许多发射卫星的国家不在赤道上，也不可能在赤道上建立卫星发射场。这样就给卫星的发射带来了许多困难，要经过几次轨道变换才能成功。因为受火箭运载能力的限制和发射场一般不处于赤道上的影响，多数运载火箭不能将卫星直接送到同步轨道上，必须分为三步才能入轨。图14-6为入轨步骤。

第一步，运载火箭将卫星送到距地面200～300km的停泊轨道（椭圆形轨道）；

第二步，以停泊轨道的环绕速度将卫星加速送到转移轨道与同步轨道相切处，即转移轨道的远地点；

第三步，在远地点上点燃发动机，使卫星进入地球同步轨道，并用卫星上的小发动机调整卫星的姿态，使卫星完全进入同步轨道。

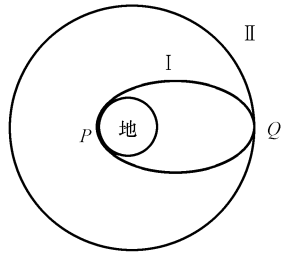


图14-6　入轨步骤

为了便于说明和理解，首先假设从赤道面发射卫星，图

14-7 为卫星发射程序。火箭起飞后达到一定的高度时，一级火箭熄火并自动分离，火箭携带卫星爬升一段时间，即图中的惯性飞行，然后末级火箭点火工作，当达到一定的轨道高度时，火箭熄火。图 14-8 为卫星的轨道转移，这时卫星进入一个距离地球很近的轨道，即初始轨道。当卫星到达初始轨道的远地点时，发动机再次点火工作，把卫星加速到一个大椭圆轨道（转移轨道）上，这时大椭圆轨道的近地点就是初始轨道的远地点，而大椭圆轨道的远地点则正好是 36000km 的高度，这时火箭的末级与卫星分离。当卫星再次转到大椭圆轨道的远地点时，卫星上的远地点发动机点火工作，把卫星推入 36000km 的圆轨道，这就进入了地球同步轨道。

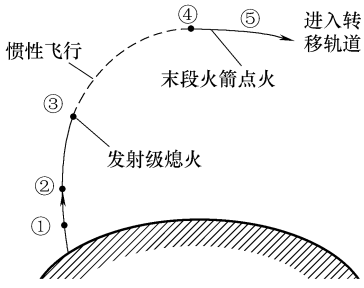


图 14-7　卫星发射程序

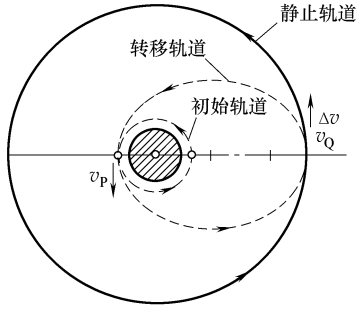


图 14-8　卫星的轨道转移

图 14-9 为进入地球同步轨道，由于大多数国家的发射场不在赤道上，所以实际上卫星发射时的轨道面和地球的赤道面总是有一个夹角，即轨道倾角。

从图 14-9 上可看出，卫星的轨道面和地球的赤道面不重合，因此首要任务就是使卫星进入赤道平面，即要改变它的运动方向。因此在卫星的远地点发动机点火之前，首先要调整卫星的姿态，使发动机的轴线和轨道面成一定的角度。这时，当卫星飞经赤道上空时，恰好远地点发动机点火工作，给卫星一个沿发动机轴线方向的附加速度，如图 14-9 中的 v_1，而卫星在原来轨道上飞行时有一个轨道速度，如图 14-9 中的 v_0，这两个速度就按照力学的速度合成原理，合成一个新速度。这个新速度的方向是两个速度组成的平行四边形的对角线方向，如图 14-9 中的 v_2。这个 v_2 是非常关键的，它的速度方向一定要刚好沿着地球的赤道方向，这时卫星才能在赤道上空飞行。此后，卫星还有一个定点任务，需经过姿态的调整和精确的姿态修正。这是因为当卫星的远地点发动机熄火后，产生各种误差的原因往往使卫星的实际位置与要求的定点位置不一致。卫星定点实际上是卫星的轨道微调。卫星上除了装有远地点发动机外，在它的各个特定方向还装有成对的小发动机，按不同的误差，起动不同的小发动机来进行轨道控制，精确修正轨道，使它慢慢贴近静止轨道，并且停止漂移，这时卫星就完全定点于预定的地点上空了。但即使卫星已经定点很准了，当工作时间一长，由于地球形状（地球不是正圆）、地磁场的影响，以及太阳甚至月亮的引力都使得卫星的位置发

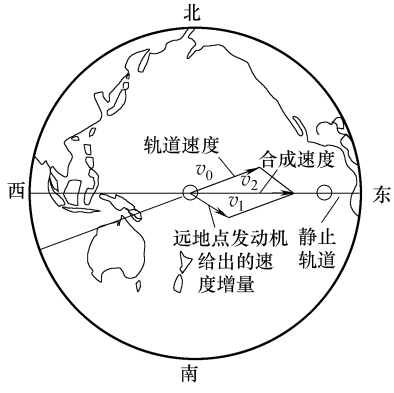


图 14-9　进入地球同步轨道

生变化，所以还要经常进行轨道修正，要随时控制它的状态和位置，这种修正称为卫星的轨迹保持。

我国的同步卫星技术已处于世界领先水平。

4. 航天飞机飞行过程

1）发射前6s，航天飞机主发动机和助推器点火。

2）发射后8s，速度升至160km/h。

3）不到1min内，飞行速度骤升至1600km/h。

4）2min后，火箭助推器处同航天飞机分离。

5）8分40秒入轨，主发动机关闭，航天飞机将以8km/s（28800km/h）速度飞行。

二、太空行走与工作

太空光伏电站面积很大，安装时宇航工人太空行走是常事。

1. 太空生活

（1）住　宇航员居住、生活和工作的密闭舱是宇宙飞船上的一个主要部分，是保证宇航员身体健康的环境控制与生命保障系统。生命保障系统最为重要的是供水系统。它的主要任务是供给宇航员生活用水和饮食用水。密闭舱是一个狭小的环境，必须对不断产生的污染物加以净化，以维持舱内空气新鲜，保证宇航员的身体健康。

（2）睡眠

1）睡袋。科学家为宇航员设计了多种样式的睡袋，有长方形的，也有椭圆形的，有水平放置的，也有垂直放置的。因为在失重条件下，无上下之分，躺着睡和站着睡感觉一个样。在太空睡觉，会有一种掉进万丈深渊的感觉，主要因为身体下面没有任何支撑的东西。这种危险感大约要持续两三天才能消除。有的人喜欢将睡袋紧贴着舱壁睡觉，这样就会使人感觉像睡在床上一样。使用这种方式睡觉，后背可以伸直，有利于预防腰背痛。

2）卧铺。装了专门用于宇航员休息的卧铺，类似火车上的卧铺床。卧铺分上下两层，在失重状态下，完全放松时，身体会自然形成一种弓形姿势。卧铺可以消除一种飘飘然式的自由下落感。由于失重飘浮，宇航员行动起来不像在地面上那样自如，坐立不稳、摇摇晃晃，稍一抬头仰身就有可能来个大翻身，弯腰时又有可能翻筋斗，所以一切动作都得小心翼翼。为了防止无意中触及开关，他们睡觉时必须把双手束在胸前。

3）卧室和床。在空间轨道站上，宇航员有分隔式卧室和床，但他们在睡觉时必须把自己捆在床上，以免翻身时因失重而飘离。

（3）吃喝　宇航员的营养需求、食品制备、供给和他们的进食方式等都有一定的特殊性，航天食品从本质上讲与地面普通食品是一样的，都是为人体提供能量和营养。如营养好的干化饼干和干化香肠，吃时用水泡一下，即可恢复到与新鲜食品相近的味道；食品或半湿食品的带汁火鸡、牛肉等，它们的水分含量和地面吃的正常食品相同。航天食品除了要能经受住航天特殊环境因素的影响，如冲击、振动、加速度等的考验而不失效外，还必须针对宇航员在失重条件下生理改变的指数，对膳食的营养素作适当调整，如肌肉萎缩就要求食品必须提供充足的优质蛋白质；骨质疏松则要求食品提供充足的钙以及适宜的钙磷比例和维生素等。在太空舱里可以使用微波加热器来烘烤食物，这种微波加热器与地面上使用的加热器有所不同，上面有一些特制的凹进去的小格，需要加热的食物都必须固定在这些小格内，防止加热时食物飘浮起来。

宇航员进餐需站着吃，靠鞋子上的吸盘把身体吸在地板上，如果没有特殊的座椅，不能坐着吃，如果坐下来，上半身就会自然地朝后仰，吃饭就很别扭。吃饭时要做到轻手轻脚，不可以冲撞碗、碟、匙、叉，否则，饭菜就会从嘴边飞走。在一般情况下，宇宙食品要做成一口大小的方块、长方块或小球状的“一口吃”情况，吃时不必再切开，进食时就比较安全方便，避免碎屑飘浮。食物失重以后不容易滑入食道，所以，饭要一口一口地吞，水要一口一口地喝，菜要细嚼慢咽，切忌狼吞虎咽，否则的话，食物残渣和汤菜撒掉后就会到处乱飞，有可能被宇航员吸进肺里，从而酿成事故。一杯盛满水的杯子朝下朝上放都一样，杯子里的水不会自动飘浮或洒落出来，各种食物、零件、用具等都是固定好了的。宇航员从食品柜里拿出食品后，要把装食品的复合塑料膜袋剪开一个小口，把叉子和筷子伸进口袋里叉着往嘴里送。当宇航员要喝水，吃汤、羹、汁、果酱时，直接从塑料口袋或牙膏状的软铝管里，一点一点往嘴里挤就可以了。

（4）刷牙　前苏联宇航员是用湿毛巾刷牙，在手指头上缠上一段湿毛巾，沾点清洁剂，伸进嘴里，反复地摩擦牙齿，这一方面可以起到清理牙齿的作用，另一方面，对牙齿也起到了按摩作用。美国宇航员除了采用上述方法刷牙外，不少人还采用嘴嚼特制口香糖以代替刷牙。

（5）洗脸　洗脸的方法是用一块浸泡着护肤液的湿毛巾来擦擦脸，或者用浸过润肤液的卫生巾来“洗脸”。

（6）梳头　梳头是用一块卫生巾铺在特制的电动梳头器上，用以梳理头发，头皮屑都沾在了卫生巾上。

（7）剃胡须　在失重的太空需要特制的剃须刀。美国和前苏联宇航员使用的电动剃须刀上，带有专门用来吸胡须渣的匣子，以免在刮脸时胡须渣在舱内到处飘浮而影响生活。

（8）洗澡　短期飞行时，宇航员一般用浸有特制清洁液的毛巾擦身以代替洗澡。长期逗留在太空的宇航员一般每十天入浴一次，进入浴室，只需要用手指轻轻按一下开关，水就会自然地附在身上，如果稍稍多用了一点水，就会产生很多大小不一的闪闪发光的水珠，像星星一样绕着身体不停地旋转。在身上浸透了清洁液后按下旁边的开关，就有一股向下的气流，把清水淋向全身，大约5s后，向上的气流就会把身体吹干。

（9）“方便”问题　航天飞机或空间站上，都设有专门的厕所，一般它设在废物管理舱的房间里，厕所内有一个呈漏斗状的收尿器，往收尿器内通气流，可把排出的尿吸收进内部的收集袋里。收集袋每天要换一次。航天飞机马桶直径20cm，配有易于装卸的粪便贮存罐，安有高功率尿液风动分离器。

2. 太空行走

太空行走又称为出舱活动，即航天员在载人航天器之外或在月球和行星等其他天体上完成各种任务的过程。太空光伏电站建设对“太空建筑工”的依赖，使每次太空行走的任务变得更加关键。由于太空处于真空状态，没有大气层的保护，温度变化也很大，太阳照射时温度可高于100℃，无阳光时温度可低于－200℃，同时还存在着能伤害人体的各种辐射和微流星体，因此在太空行走时，必须身穿特制航天服。同时，由于宇宙飞船、空间站、航天飞机这些载人航天器密闭舱内的人造气压、空气组成基本与地面相同，故人体内吸有一定量的氮气，而航天服内的气压较低，仅为大气压的27.5%，宇航员如果猛然出舱，遇到低的气压后血液供应会较差，溶解在脂肪组织中的氮气游离出来，却不能通过血液带到肺部排出

而形成气泡，因此可能造成气栓堵塞血管，引发严重疾病。所以宇航员出舱前需要吸取纯氧将体内氮气排出，以免产生隐患。在太空行走的宇航员围绕地球高速运行时，在广袤的空间中没有参照物，无法分清物体的远近大小、速度快慢，如无保险措施，就可能会丢失在茫茫太空中而成为人体卫星。再加上载人航天器和自己都在运动，宇航员有时会被搞得晕头转向，亦有可能出现危险，所以太空行走需要采取保险措施——身系安全带。安全带犹如婴儿的脐带将宇航员与航天器连接起来，万一宇航员不能自己走回航天飞机，可以用牵引缆索把他拉回来。在一次太空行走中在太空停留时间最长的是两名航天员赫尔姆斯和沃斯，他俩于2001 年 3 月 11 日从国际空间站出舱，在太空停留 8 小时 56 分钟，将近 9 个小时。而美国航宇局的要求是 6h，一般航天员在太空停留的时间是 7h 左右，因此在太空停留 8 小时 56 分已到了太空行走时间的极限。

（1）气闸舱、航天服、喷气背包　气闸舱、航天服和喷气背包是太空行走的三大法宝。

1）气闸舱。气闸舱与长江大坝的船闸有些类似。不同的是，船闸作用是水位过渡，而气闸舱是气体压力过渡。国外的载人航天器有专门的气闸舱。要进行太空行走首先要使用的重要设备是气闸舱，它不但防止在打开舱门时舱内的气体泄漏，还能在航天员出舱前进行大气压力调节。航天员离开航天器前先要在舱内进行吸氧排氮。这是因为舱内外气压差别极大，航天员出舱后人体组织内的气体会因外界压力低而往外逸出。人体的各组织都需要氧气，所以氧气逸到哪里都可以。但氮气逸出人体组织外就会使人体出现皮肤发痒、关节与肌肉疼痛、咳嗽和胸闷等症状。因此，航天员在穿低压航天服之前，必须把体内多余的氮气排出，用氧气来代替，其方法就是吸入纯氧。我国运七将航天员的生活舱“一舱两用”改成气闸舱。

2）航天服。

① 美国航天服。美国航天服重 130 多千克，由 14 层组成，也用于“国际空间站”。该航天服是按上半身、下半身和手臂分开裁剪缝制的，其工作压力为 29. 647kPa，较低的工作压力使手部活动比较灵活。航天服关节部位保持恒定的容积，允许身体能在航天服内很容易地活动。舱外航天服的航天手套的触觉敏感性极好，可以很容易地拾起 1 枚硬币。航天服可以适合任何人，每半年就要送回地面维修。航天服的靴子底是硬橡胶的。航天服由软材料制造而成，航天员需要在别人帮助下才能穿得上。

② 俄罗斯航天服。俄罗斯航天服在“国际空间站”上使用的是奥兰 M 航天服，重 110 多千克，工作压力为 39. 989kPa。尽管有较高的工作压力，但还是能容易或比较容易地完成一些操作的。较高的工作压力可以减少航天员出舱前用于吸氧排氮的时间。俄罗斯航天服适用的身材范围比美国的小，航天员需要选择适合自己的航天服，现有适应身高在 165 ~ 190cm 的几种型号，且袖长和裤长可加以调整，但手套却要按人定制。奥兰 M 航天服设计简单，非常耐用，使用期为 4 年，并可在太空中维修和更换零部件。俄制航天服呈半软半硬状态，除了胳膊和腿部为软材料制造外，其余部分全部为金属材料。俄罗斯航天服是“自穿”式的，即航天员一个人就可穿上航天服。其铝制上衣的背后有 1 个门，航天员从后门钻进去，关上门后开始加压。穿衣的过程比较简单，几分钟内就能完成。由于手伸不到脸部，舱外航天服中还有搔痒工具。宇航员身穿用金属链连接的两截充有冷却液的贴身内衣，外罩铠甲、手套、长筒靴和盔帽，都通过金属链与躯体部分连在一起，靴子底是软皮革的，宇航服的关节部分是可折皱的软结构，使宇航员也能自由地弯腰拾起地上的钱币。出舱活动

中很重要的装备是舱外航天服，与舱内航天服相比，它多了3层：一是真空隔热层，用于保护航天员不受舱外环境过热、过冷的侵袭。二是液冷层，把航天员身体产生的热量散掉。三是防护层，能防太阳辐射并装有连接其他设备的接口。茫茫的太空中，盔帽及喷气背包上面发出白光，给太空行走指明了“道路”。俄罗斯航天服比较粗笨，但设计比较简单。

③ 国产“飞天”航天服。国产“飞天”航天服有90多个关键部件，首先是躯干结构。这是一个跟人体附形的铝合金结构，设计厚度为1.5mm。航天服内的氧气瓶利用复合压力等综合技术，使氧气瓶的体积仅有一个小开水瓶大小，内部压力高达400atm（1atm = 101325Pa），单瓶供氧量可持续六七个小时，双瓶在十个小时以上，并且能够保证在地球及太空环境的变化中足够安全。在两本《辞海》大小的气体液体控制台里，集成了20余种精巧阀门。服装最外层的防护材料，可以在±100℃的温差范围内保持很好强度。“飞天”一套重120kg，从外观上看，“飞天”呈白色，人从背部进入，先入两腿，再入胳膊，戴上头盔，然后关上背包门。身高160～180cm的人，都能通过调节服装大小穿着。与俄制“海英”相比，“飞天”的关节和手套都更灵活，更便于操作。此外，“飞天”的电控系统实现了全数字化，控制台的OLED彩色显示屏图像清晰色彩鲜艳。地面一个标准大气压约为101kPa，而“飞天”航天服工作时内部的压力为40kPa，相当于海拔7000多米高山上的气压水平，可把氮气排出体外。经过医学研究和试验，30～50kPa的气压不会威胁人的健康。

3）喷气背包。现在有两种出舱方式可供选择：一种是身系“安全脐带”走出载人航天器到舱外。“安全脐带”主要是提供生命保障功能及起保险绳的作用，航天员在舱外所需要的氧气、压力、冷却工质、电源和通信等都是通过这根“安全脐带”由“母”载人航天器提供；保险绳的作用，就是以免航天员飘走。此法简单，但存在明显的缺陷。例如，“脐带”不能过长，活动范围小，航天员只能在离“母”航天器几米范围内活动，如果走远了则容易使“脐带”缠绕，像婴儿那样“窒息”而死。在早期出舱活动中常采用这种方式。另一种是不系安全带，而采用载人机动装置——喷气背包，它又称太空摩托艇。简单地说就是航天员身背一个可以控制的小火箭在太空自由飞行。这是最先进的一种方式，航天员活动范围可达近百米，目前的太空行走大多采用这种方式等。喷气背包造价700万美元，是一种有推力的小型喷气装置，结构小巧简单。喷气背包安放在宇航员的背上，背包里充满了压缩的氮气。喷气背包重38.25kg，装有1.36kg氮气，有24个喷气装置，每个推力为3.63N，可作6个自由度的机动控制，工作时间为13min。喷气时能产生15cm/s的移动速度，最大移动速度为3m/s。航天员可通过绑在航天服前面的开关控制喷气，形成各个方向大小不同的反推力，实现各个方向不同的运动，能在茫茫的太空中翻筋斗、旋转、左右摇摆或定着不动，也能上、下、左、右自由移动。做完这些动作，宇航员心不跳，气不喘，毫无受累之感，因为在太空中既没有风也没有摩擦阻力。1984年2月3日，美国“挑战者号”上面的两名宇航员进行了使用喷气背包的试验，这是世界上第一次不系安全带的太空行走，历时5h。它多次用于“国际空间站”的组装、维修和求援，不使用的时候可以折叠起来保存。

（2）太空工作机器人　美国计划向空间站运送首个类人太空机器人，它能代替宇航员进行太空行走。这名空间站“永久居民”将作为人类同伴，展示人机搭伴的新前景。机器人名为“太空机器人2号”，由美国航天局和汽车制造业巨头通用汽车公司联合研制，机器人重大约136kg，有一个头、一副躯干、两个手臂和两只手，着“白衣”、戴金色头盔，机

器人进入空间站后活动范围起初局限在“命运”号实验舱内。随着技术进步，它在空间站内外活动的自由度可能增加，能像人一样使用工具。机器人升空后，地面工程师将监测它如何在失重状态下工作。按设计，这一机器人能和空间站工作人员使用同样工具，内部运作会产生它与宇航员共事的有关性能数据。随着地面研发活动的开展，空间站工作人员可获得硬件和软件为机器人升级，以完成新任务。另外，机器人将在空间站内接受包括微重力测试在内的多种测试，承受站内辐射和电磁干扰环境。在空间站利用“太空机器人 2 号”是人类利用机器人探索太空的新开端，人与机器人搭伴对探索太阳系至关重要。这个项目展现一个前景，即今后一代机器人无论在太空还是在地面，能作为人类同伴而非取代人类发挥关键、辅助作用，人与机器人联合的潜力完美示范出整体如何大于部分总和，取得的成果比我们今天所能想象到的要多，可代宇航员“出生入死”。按设计，“太空机器人 2 号”升空前 10 年内，空间站将成为人机合作，完成建造、维修和科学任务的试验场。太空机器人今后最大的益处可能在于，它能成为宇航员太空行走期间的助手或替身，或帮助完成对人类而言过于困难或危险的任务。“太空机器人 2 号”现阶段正在接受振动、真空和辐射等多方面测试。在向国际空间站进发准备期间，它将经历种种测试，其严格水平与车辆及零部件在制造过程中经受的验证相当。

3. 训练

地面训练无法完全模拟太空环境，只能对太空环境进行分解训练。例如，在真空罐中模拟真空，在中性浮力水槽中模拟失重感觉。航天飞机航天员大都在美国航空航天局“中性浮力实验室”中进行航天飞机在轨维修的实际操作训练。这个“中性浮力实验室”是目前世界上最大的室内游泳池，能容纳整个“国际空间站”模型和一个航天飞机的货舱模型。在该实验室的水池中，身处其中的航天员有在太空中工作的感觉，因而可以熟悉在失重状态下身体如何运动和双手如何操作，让航天员学会运用粘合剂、维修材料及多种工具。除供航天员作失重训练外，该水池也是美国航空航天局设计、研制和试验“国际空间站”的主要设备之一。

美国还有一种供航天员失重训练用的水池，叫“失重环境训练设备”，其附属设备包括净水系统、环境控制系统、电视监控系统和 1 台 5t 的起重机。该设备主要用于评定航天员太空行走装备、航天员身体限制系统、发展太空行走程序和提高航天员的太空行走能力。

我国神七比神六增加的操作多达 1000 多次。飞船入轨后，航天员就要开始进行出舱准备，从服装的解包、组装、气密性检查到出舱前的训练，总时长超过 15h，这对航天员的身体条件和体能负荷提出了很高的要求。神七的诸多新技术，衍生出了航天员的新操作和新要求：一是对于舱外航天服的熟悉与操作；二是新增的飞行程序、与飞船的接口、气闸舱与服装的连接、舱门的开启等程序；三是要求航天员具备更加快速准确的反应能力和应急处置能力。

第四节　太 空 运 输

把卫星、载人飞船、空间站、空间探测器等航天器，从地球送到太空预定轨道需要太空运输工具。太空运输工具可分为运载火箭和航天飞机两类。本节介绍太空运输工具、运载火箭简介、未来的运输工具、空间环境预报及太空运输费用。

一、太空运输工具

1. 国外运载火箭

（1）美国　美国的运载火箭发射器系列较多，有一些已停止使用，现在常用的有“大力神”、“宇宙神”、“德尔塔”、“土星”等系列，

1）大力神（Titan）系列运载火箭。美国大力神运载火箭系列由大力神-2 洲际导弹发展而来，1964 年首次发射。该系列由大力神-1、大力神-3、大力神-34、大力神-4 和商用大力神-3 等型号和子系列组成。它的最大近地轨道运载能力为 21.9t，地球同步转移轨道运载能力为 5.3t。最早用于发射航天器的大力神系列是大力神-1 双子星座运载火箭。而后又研制生产大力神-4 的 A、1 王、C、I、E 型。大力神-4 主要用户是宇航局和商用，但也有军方应用，其中大力神-4、大力神-4C、大力神-4l 发射了用于通信的“林肯”试验卫星、“大鸟”照相侦察卫星、战术通信卫星、国防卫星、通信系统卫星和用于核爆炸探测器等。

1984 年，国防部要求发展一种发射系统，旨在弥补航天飞机之不足和确保某些美国的秘密有效载荷进入空间，从而开始了研制大力神 W 的计划。大力神 W 于 1989 年 6 月 14 日首次成功发射，并成为国防部发射许多重型卫星的主要运载火箭。大力神 W 长 62.2m，总重量 860t，可运送航天器到极地轨道、低地球轨道或地球同步轨道，最大有效载荷低地球轨道为 64t、地球同步轨道 576t。先后发射了用于照相侦察的“锁眼”卫星 KH—11、用于雷达成像侦察的“长曲棍球”卫星、导弹预警卫星“国防支援计划”、通信卫星“军事星”等军用卫星。

2）宇宙神（Atlas）系列运载火箭。美国宇宙神系列运载火箭于 1958 年 12 月 18 日首次发射，曾经发射过世界上第一颗通信卫星、美国第一艘载人飞船等。该系列主要有宇宙神-2A、宇宙神-2AS、宇宙神-3 和宇宙神-5。宇宙神-5 的第一级采用了通用模块化设计，其中的重型火箭使用了 3 个通用模块，其地球同步转移轨道运载能力达到 13t。宇宙神运载火箭是从获得成功的宇宙神洲际导弹演变而来的。它在许多重要计划中都有应用，为空军发射数量占其总发射数的 75% 以上，其第一项任务是 1958 年发射世界第一个通信卫星“斯科尔”。当时使用的是宇宙神 LV—3A 型运载火箭。1962 年 2 月 20 日，“水星”载人发射，宇宙神 V—3B 型运载火箭发射成功。从宇宙神 SI. V—3 型开始的宇宙神运载火箭是标准运载火箭系列。宇宙神 SI. V—3 共发射 51 次，成功 49 次，其中 5 次“月球轨道器”发射全部成功。“宇宙神”SI. V—3D 还多次用于发射舰队通信卫星。

1967 年后，通用动力公司将洲际导弹改装成宇宙神 E、宇宙神 F 运载火箭，先后多次发射海军海洋监视卫星、导航卫星全球定位系统、“诺阿”气象卫星、国防气象卫星等多种卫星。“挑战者”号航天飞机失事后，美国决定航天飞机不再承担卫星发射任务，并确定要更多地使用一次性运载火箭，故 1988 年 5 月空军选择宇宙神运载火箭，发射国防卫星通信系统（DSCS）以及超高频后继型军用通信卫星。宇宙神满足了这一需求。

3）德尔塔（Delta）系列运载火箭。美国德尔塔系列运载火箭系列于 1960 年 5 月 13 日首次发射，迄今为止已发展了 19 种型号，目前正在使用的是德尔塔-2 和德尔塔-3 两种型号。美国空军的全部 GPS 卫星都是由德尔塔-2 发射的。德尔塔-3 是在德尔塔-2 的基础上研制的大型运载火箭，可以把 3.8t 的有效载荷送入地球同步转移轨道。德尔塔-3 于 2000 年 8 月发射成功。美国还正在研制具有多种配置的德尔塔-4 子系列，其中的重型德尔塔-4 的地球同步转移轨道运载能力在 13t 以上。

4）土星-V（Saturn）系列运载火箭。土星-V 运载火箭是美国专为阿波罗登月计划而研制的、迄今为止最大的巨型运载火箭。它的起飞重量为 3000t，直径为 10m，高为 110m，近地轨道运载能力达 139t，它能把重达 50t 的阿波罗飞船送入登月轨道。土星-V 曾先后将 12 名宇航员送上月球。

5）航天飞机。美国的航天飞机本身像一架大型喷气式客机，它的驾驶员舱可以乘坐 3～7 名宇航员，货舱可以装载约 30t 的货物。

航天飞机虽然可以多次往返于天地之间，但具有较高的维护和发射成本，在发射和返回时也面临许多风险，包括美国在内的一些国家正在考虑研发更新型的太空运输工具。

美国主要的航天器发射基地位于佛罗里达州卡纳维拉尔角空军站的东部靶场和位于加利福尼亚州范登堡空军基地的西部靶场。

（2）俄罗斯

1）东方号（Vostok）系列运载火箭。俄罗斯东方号系列运载火箭是世界上第一种载人航天运载工具，它创造了多个世界第一：发射了第一颗人造卫星，第一颗月球探测器，第一颗金星探测器，第一颗火星探测器，第一艘载人飞船，第一艘无人载货飞船进步号等。它也是世界上发射次数最多的运载火箭系列。其中联盟号是东方号的一个子系列，主要发射联盟号载人飞船、进步号载货飞船。

2）质子号（Proton）系列运载火箭。俄罗斯质子号系列运载火箭分为二级型、三级型和四级型三种型号。目前正在使用的有质子号三级型和四级型两种。三级型质子号于 1968 年 11 月 16 日首次发射，其低地轨道运载能力达到 20t，它是世界上第一种用于发射空间站的运载火箭，曾发射过礼炮 1～7 号空间站、和平号空间站各舱段和其他大型低地轨道有效载荷。1998 年 11 月 20 日，质子号发射了国际空间站的第一个舱段。

3）天顶号（Zenit）系列运载火箭。天顶号系列运载火箭是前苏联（后为乌克兰）研制的运载火箭，分为两级的天顶-2、三级的天顶-3 和用于海上发射的天顶-3SL。天顶-2 的低地轨道运载能力约为 14t，太阳同步轨道运载能力约为 11t。可在海上发射的天顶-3SL 是美国、乌克兰、俄罗斯、挪威联合研制的运载火箭，其地球同步轨道运载能力为 2t，1999 年 3 月首次发射成功。

4）能源号（Energia）运载火箭。能源号运载火箭是前苏联研制的目前世界上起飞质量和推力最大的火箭，其近地轨道运载能力为 105t，既可发射大型无人载荷，也可用于发射载人航天飞机。能源号于 1987 年首次发射成功，曾将前苏联的暴风雪号航天飞机成功地送上天。目前由于俄罗斯经济状态不佳就再也没有发射过。

俄罗斯这些飞船虽不能重复发射，但简单、实用、生产周期短，是经久耐用、性能良好的运输工具。“联盟”系列飞船至今已使用 40 余年，它可容纳 3 名宇航员，也可被改造为货运飞船。“进步”货运飞船一次可运送 2t 左右的货物。2003 年美国“哥伦比亚”号航天飞机失事后，美国连续几年未发射航天飞机，“进步”系列飞船在此期间成为国际空间站唯一的货物运输工具。

（3）欧空局　阿里安（Ariane）系列运载火箭是由欧洲 11 个国家组成的欧空局研制的系列运载火箭，该系列已有阿里安 1～5 共 5 个子系列，目前正在使用的是阿里安-4 和阿里安-5。阿里安-4 于 1988 年 6 月 15 日进行了首次发射，其近地轨道运载能力为 9.4t，地球同步转移轨道运载能力为 4.2t。阿里安-5 于 1997 年进行了首次发射，近地轨道运载能力为

22t，地球同步转移轨道运载能力为 11 ~ 12t。

欧洲航天局制造的 ATV 自动货运飞船运货能力接近 8t，大于俄罗斯的“进步”货运飞船。ATV 飞船除了向国际空间站运送货物外，还可用作太空拖船，在必要时帮助国际空间站提升轨道。ATV 飞船的一大特点是具有先进的高精度导航能力，可在较少地面控制的情况下自动与国际空间站对接。

（4）日本　H 系列运载火箭由 H-1、H-2、H-2A 等火箭组成，目前正在使用的 H 系列火箭只有 H-2A，2001 年 8 月首次发射成功。

（5）印度　极轨卫星火箭（PSLV）是由印度自行研制的，极轨道 4 级运载火箭的太阳同步轨道运载能力为 1t，近地轨道运载能力为 3t。1993 年 9 月首次发射，但由于火箭出现故障，卫星未能入轨。此后，该火箭连续三次发射成功。1999 年 5 月，一箭三星技术取得成功。

2. 我国运载火箭的发展

到目前为止我国共研制了 12 种不同类型的长征系列火箭，能发射近地轨道、地球静止轨道和太阳同步轨道的卫星。

（1）长征一号（LM-1）系列运载火箭　1970 年 4 月 24 日，中国使用长征一号（LM-1）运载火箭发射了第一颗人造卫星东方红一号。长征一号是在两级中远程导弹上再加一个第三级固体火箭所组成的，火箭全长 29. 86m，起飞总重 81. 57t，起飞推力为 104t。

（2）长征二号（LM-2）系列运载火箭　长征二号（LM-2）运载火箭是从洲际导弹的基础上发展而来的，并于 1975 年发射了 1t 多重的近地轨道返回式卫星，成功地回收了返回舱。此后，又根据发射卫星的需要，陆续衍生出长征二号丙（LM-2C）、长征二号丙改进型（LM-2C/SD）和发射极轨卫星的长征二号丁（LM-2D）运载火箭。在长征火箭大家族中，长征二号系列主要用于发射各类近地轨道卫星，LM-2C/SD 曾以一箭三星方式发射了 12 颗美国的铱星移动通信卫星。

长征二号 E（又称长二捆，LM-E）运载火箭可以发射商用卫星。长征二号 E 火箭以长征二号为芯级，周围捆绑了 4 个液体助推器，它的近地轨道运载能力高达 9. 2t。长征二号 E 于 1990 年试射成功，1992—1995 年曾发射多颗外国卫星。

在长征二号 E 的基础上改进了可靠性并增设了故障检测系统和逃逸救生系统，从而发展出了长征二号 F（LM-F）运载火箭，专门用来发射神舟号载人飞船。

长征二号火箭的质量和可靠性高，1975—1996 年连续成功地把 17 颗返回式卫星送上天。

（3）长征三号（LM-3）系列运载火箭　长征三号运载火箭是在长征二号二级火箭上面加了一个以液氢、液氧为推进剂的第三级，所用的液氢液氧发动机可以二次起动，在技术上是当时国际先进水平，是我国火箭技术发展的一个重要里程碑。1984 年长征三号成功地发射了我国第一颗地球同步试验通信广播卫星东方红二号。1985 年我国宣布进入国际商业卫星发射市场。1990 年我国首次用长征三号运载火箭将美国休斯公司制造的亚洲一号卫星送入地球同步轨道。

此后，长征三号系列不断增加新成员，如长征三号甲（LM-3A）、长征三号乙（LM-3B），主要用于发射地球静止轨道卫星。

长征三号甲运载火箭是在长征三号的基础上研制的大型火箭，它的氢氧发动机具有更大

的推力，性能也得到很大的提高，地球同步转移轨道运载能力也从长征三号的1.6t提高到2.6t。

长征三号乙运载火箭是在长征三号甲和长二捆的基础上研制的，即以长征三号甲为芯级，再捆绑4个与长二捆类似的液体助推器。长征三号乙主要用于发射地球同步轨道的大型卫星，也可进行轻型卫星的一箭多星发射，其地球同步转移轨道运载能力达到5.1t，跃入了世界大型火箭行列。

（4）长征四号（LM-4）系列运载火箭　目前投入使用的是长征四号乙运载火箭，它是长征火箭家族中用于发射各种太阳同步轨道和极地轨道应用卫星的主要运载工具。

我国本着“开发空间，和平利用，服务经济”的宗旨，发展了运载火箭、应用卫星和卫星应用技术。已拥有卫星及运载火箭的研究、设计、试制、生产、试验等配套设计和一大批经验丰富、技术精湛的专门人才，拥有酒泉、太原、西昌三个卫星发射基地和西安卫星测控中心，可以发射近地轨道、太阳同步轨道、地球静止轨道卫星。我国已经掌握了运载火箭的高能低温燃料技术、火箭捆绑技术和一箭多星技术，已具备研制通信卫星、气象卫星、返回式遥感卫星、资源卫星以及其他各类对地观测卫星和科学试验卫星的能力，卫星回收技术以及遥感、遥测、遥控技术已日臻成熟。1984年试验通信卫星发射成功，标志着我国成为世界上第五个能够发射地球静止轨道卫星的国家。我国的国土普查卫星、摄影定位卫星、通信广播卫星、气象卫星都得到迅速发展，并已投入应用。我国政府于1985年宣布长征系列运载火箭投放国际市场以来，先后成功地发射了亚洲一号通信卫星、巴基斯坦卫星、瑞典卫星、澳大利亚通信卫星。

二、运载火箭简介

运载火箭是由多级火箭组成的航天运输工具。它的用途是把人造地球卫星、载人飞船、空间站、空间探测器等有效载荷送入预定轨道。它是在导弹的基础上发展起来的，一般由2~4级组成。每一级都包括箭体结构、推进系统和飞行控制系统。末级有仪器舱，内装制导与控制系统、遥测系统和发射场安全系统。级与级之间靠级间段连接。有效载荷装在仪器舱的上面，外面套有整流罩。

许多运载火箭的第一级外围捆绑有助推火箭，又称零级火箭。助推火箭可以是固体或液体火箭，其数量根据运载能力的需要来选择。推进剂大都采用液体双组元推进剂。第一、二级多用液氧和煤油或四氧化二氮和混肼为推进剂，末级火箭采用高能的液氧和液氢推进剂。制导系统大都用自主式全惯性制导系统。运载火箭在专门的发射中心——航天器发射场发射。技术指标包括运载能力、入轨精度、火箭对不同重量有效载荷的适应能力和可靠性。

运载火箭需专门的发射场发射。火箭从地面垂直起飞，十几秒钟后开始程序拐弯，第一级火箭工作完毕后脱落，第二级接替工作，如此直至本级火箭工作完毕，火箭进入预定轨道，调整姿态，本级火箭与航天器脱离，完成其使命。运载火箭进入预定轨道的部分称为轨道器，能在太空短期运行。运载火箭的轨道器是一次性使用的，轨道器分为带主发动机和不带主发动机两种。前者具有在助推器脱落后继续加速、上升的功能，后者完全靠助推器送入预定轨道。运载火箭轨道器具有改变运行轨道和调整姿态的能力。

1. 运载火箭的发展

运载火箭是第二次世界大战后在导弹的基础上开始发展的。第一枚成功发射卫星的运载火箭是前苏联用洲际导弹改装的卫星号运载火箭。到20世纪80年代，前苏联、美国、法

国、日本、中国、英国、印度和欧洲空间局已研制成功 20 多种大、中、小运载能力的火箭。最小的仅重 10. 2t，推力 12. 7t，只能将 1. 48kg 重的人造卫星送入近地轨道；最大的重 2900 多吨，推力 3400t，能将 120 多吨重的载荷送入近地轨道。主要的运载火箭有“大力神”号运载火箭、“德尔塔”号运载火箭、“土星”号运载火箭、“东方”号运载火箭、“宇宙”号运载火箭、“阿里安”号运载火箭、N 号运载火箭、“长征”号运载火箭等。

2. 运载火箭的分类

目前常用的运载火箭按其所用的推进剂，可分为固体火箭、液体火箭和固液混合型火箭三种类型。如我国的长征三号运载火箭是一种三级液体火箭；长征一号运载火箭则是一种固液混合型的三级火箭，其第一级、第二级是液体火箭，第三级是固体火箭；美国的“飞马座”运载火箭则是一种三级固体火箭。

如按级数来分，运载火箭又可分为单级火箭、多级火箭。其中多级火箭按级与级之间的连接型式来分，又可分为串联型、并联型（俗称捆绑式）、串并联混合型三种类型。串联型多级火箭级与级之间的连接分离机构简单，但串联后火箭总长较长、火箭的长细比（长度与直径之比）大，给设计带来一定的困难；发射时，这种火箭竖起来后太高，给发射操作带来不便；同时，其上面级的火箭发动机要在高空点火，点火的可靠性差。并联型多级火箭采用横向捆绑连接，连接分离机构稍复杂，但其中间芯级第一级火箭采用横向捆绑的火箭可在地面同时点火，避免了高空点火，点火的可靠性高。前苏联发射世界上第一颗人造地球卫星的卫星号运载火箭，就是在中间芯级火箭的周围又捆绑了 4 枚火箭。这 4 枚捆上去的火箭习惯上又称助推器。助推器与芯级火箭在地面一起点火，但工作一定时间后先关机，关机后与芯级火箭分离并被抛掉。助推器因在第一级火箭飞行的半路上关机，所以只能算它是半级火箭。发射世界第一颗人造地球卫星的卫星号运载火箭为一级半火箭，而不称它为两级火箭。我国的长征二号 E 运载火箭则是一枚串并联混合型的两级半火箭，其第一级火箭周围捆绑了 4 枚助推器，在第一级火箭上面又串联了一枚第二级火箭。

3. 运载火箭的结构组成

不管是固体运载火箭还是液体运载火箭，不管是单级运载火箭还是多级运载火箭，其主要的组成部分有结构系统、动力装置系统和控制系统。这三大系统称为运载火箭的主系统，主系统工作的可靠与否，将直接影响运载火箭飞行的成败。此外，运载火箭上还有一些不直接影响飞行成败并由箭上设备与地面设备共同组成的系统，例如，遥测系统、外弹道测量系统、安全系统和瞄准系统等。

（1）箭体结构　箭体结构是运载火箭的基体，它用来维持火箭的外形，承受火箭在地面运输、发射操作和在飞行中作用在火箭上的各种载荷，安装连接火箭各系统的所有仪器、设备，把箭上所有系统、组件连接组合成一个整体。

（2）动力装置系统　动力装置系统是推动运载火箭飞行并获得一定速度的装置。对液体火箭来说，动力装置系统由推进剂输送、增压系统和液体火箭发动机两大部分组成。固体火箭的动力装置系统较简单，它的主要部分就是固体火箭发动机推进剂直接装在发动机的燃烧室壳体内。

（3）控制系统　控制系统是用来控制运载火箭沿预定轨道正常可靠飞行的部分。控制系统由制导和导航系统、姿态控制系统、电源供配电和时序控制系统三大部分组成。制导和导航系统的功用是控制运载火箭按预定的轨道运动，把有效载荷送到预定的空间位置并使之

准确进入轨道。姿态控制系统（又称姿态稳定系统）的功用是纠正运载火箭飞行中的俯仰、偏航、滚动误差，使之保持正确的飞行姿态。电源供配电和时序控制系统则按预定飞行时序，实施供配电控制。

（4）遥测系统　遥测系统是把运载火箭飞行中各系统的工作参数及环境参数测量下来，通过运载火箭上的无线电发射机将这些参数送回地面，由地面接收机接收；亦可将测量所得的参数记录在运载火箭上的磁记录器上，在地面回收磁记录器。这些测量参数既可用来预报航天器入轨时的轨道参数，又可用来鉴定和改进运载火箭的性能。一旦运载火箭在飞行中出现故障，这些参数就是故障分析的依据。

（5）外弹道测量系统　外弹道测量系统是利用地面的光学和无线电设备与装在运载火箭上的对应装置一起对飞行中的运载火箭进行跟踪，并测量其飞行参数，用来预报航天器入轨时的轨道参数，也可用来作为鉴定制导系统的精度和故障分析依据。

（6）安全系统　安全系统是当运载火箭在飞行中一旦出现故障不能继续飞行时，将其在空中炸毁，避免运载火箭坠落时给地面造成灾难性的危害。安全系统包括运载火箭上的自毁系统和地面的无线电安全系统两部分。自毁系统由测量装置、计算机和爆炸装置组成。当运载火箭的飞行姿态、飞行速度超出允许的范围，计算机发出引爆爆炸装置的指令，使运载火箭在空中自毁。无线电安全系统则是由地面雷达测量运载火箭的飞行轨道，当运载火箭的飞行超出预先规定的安全范围时，由地面发出引爆箭上爆炸装置的指令，由箭上的接收机接收后将火箭在空中炸毁。

（7）瞄准系统　瞄准系统是给运载火箭在发射前进行初始方位定向。瞄准系统由地面瞄准设备和运载火箭上的瞄准设备共同组成。

4. 运载火箭的指标

运载火箭的技术指标包括运载能力、入轨精度、火箭对不同重量的有效载荷的适应能力和可靠性。运载能力指火箭能送入预定轨道的有效载荷重量。有效载荷的轨道种类较多，所需的能量也不同，因此在标明运载能力时要区别低轨道、太阳同步轨道、地球同步卫星过渡轨道、行星探测器轨道等几种情况。表示运载能力的另一种方法是给出火箭达到某一特征速度时的有效载荷重量。各种轨道与特征速度之间有一定的对应关系。例如把卫星送入185km高度圆轨道所需要的特征速度为7.8km/s，1000km高度圆轨道需8.3km/s，地球同步卫星过渡轨道需10.25km/s，探测太阳系需12～20km/s。

5. 飞行程序

运载火箭在专门的航天发射中心发射。火箭从地面起飞直到进入最终轨道要经过以下几个飞行阶段：

1）大气层内飞行段：火箭从发射台垂直起飞，在离开地面后的十几秒钟内一直保持垂直飞行。在垂直飞行期间，火箭要进行自动方位瞄准，以保证火箭按规定的方位飞行。然后转入零攻角飞行段。火箭要在大气层内跨过声速，为减小空气动力和减轻结构重量，必须使火箭的攻角接近于零。

2）等角速度程序飞行段：第二级火箭的飞行已经在稠密的大气层以外，整流罩在第二级火箭飞行段后期被抛掉。火箭按照最小能量的飞行程序，即以等角速度飞行。达到停泊轨道高度和相应的轨道速度时，火箭即进入停泊轨道滑行。对于低轨道的航天器，火箭这时就已完成运送任务，航天器便与火箭分离。

3）过渡轨道：对于高轨道或行星际任务，末级火箭在进入停泊轨道以后还要再次工作，使航天器加速到过渡轨道速度或逃逸速度，然后与火箭分离。

6. 设计特点

运载火箭的设计特点是通用性、经济性和不断进行小的改进。这和大型导弹不同。大型导弹是为满足军事需要而研制的，起支配作用的因素是保持技术性能和数量上的优势。因此导弹的更新换代较快，几乎每 5 年出一种新型号。运载火箭则要在商业竞争的环境中求发展。作为商品，它必须具有通用性，能适应各种卫星重量和尺寸的要求，能将有效载荷送入多种轨道；经济性也要好。也就是既要性能好，又要发射耗费少。订购运载火箭的用户通常要支付两笔费用。一笔是付给火箭制造商的发射费，另一笔是付给保险公司的保险费。发射费代表火箭的生产成本和研制费用，保险费则反映火箭的可靠性。火箭制造者一般都尽量采用成熟可靠的技术，并不断通过小风险的改进来提高火箭的性能。运载火箭不像导弹那样要定型和批生产。而是每发射一枚都可能引进一点新技术，作一点小改进，这种小改进不影响可靠性，也不必进行专门的飞行试验。这些小改进积累起来就有可能导致大的方案性变化，使运载能力能有成倍的增长。

20 世纪 80 年代以来，一次使用的运载火箭已经面临与航天飞机的竞争。这两种运载工具各有特长，在今后一段时间内都将获得发展。航天飞机是按照运送重型航天器进入低轨道的要求设计的，运送低轨道航天器比较有利。对于同步轨道航天器，航天飞机还要携带一枚一次使用的运载器，用以把航天器从低轨道发射出去，使之进入过渡轨道。这样有可能导致入轨精度和发射可靠性的下降。

一次使用的运载火箭在发射同步轨道卫星时可以一次送入过渡轨道，比航天飞机稍为有利。这两种运载工具之间的竞争将促进可靠性的提高和成本的降低。

三、未来的运输工具

1. 太空飞机 Skylon

英国航天公司 Reaction Engines 利用一款革命性喷气火箭发动机新技术，研制太空飞机 Skylon，使它可在现行飞机跑道上升降，更可运载逾 12t 货物到地球轨道，预料 10 年内投入使用。欧洲太空总署证实已向该公司注资 90 万英镑（约 998 万港元），Sabre 喷气火箭发动机由英国布里斯托尔大学工程师研发，是一种独一无二的混合发动机，能让太空飞机在大气层内如现时的飞机一样喷气，进入太空后又可转换成火箭推动。当发动机进入喷气模式时，空气会受到冷却和压缩，然后随氢燃料一并用作驱动发动机；当进入火箭模式时，氢气会与液态氧一并燃烧。

2. 空天飞机

空天飞机就是既能航空又能航天的新型飞行器。它能像飞机一样起飞，以高超音速在大气层内飞行，在 30 ~ 100km 高空的飞行速度为 12 ~ 25 倍音速，并直接加速进入地球轨道，成为航天器，返回大气层后，像飞机一样在机场着陆。在此之前，航空和航天是两个不同的技术领域，由飞机和航天飞行器分别在大气层内、外活动，航空运输系统是重复使用的，航天运载系统一般是不能重复使用的。而空天飞机能够达到完全重复使用和大幅度降低航天运输费用的目的。

3. 太空电梯

太空电梯就是连接地球表面和 36000km 高空的电梯。建造太空电梯显然将是人类最大

的工程项目，需要数万公里长的缆绳，还需要强大的支撑物来将它的底部固定在地球上。由于必须保证太空电梯本身的刚性，不能让它随着地球的转动被拉得到处乱绕圈子，甚至因为拉扯而损坏，它的重心必须位于地球同步轨道上（距地面35800km左右），以使它与地面上的对应点随时保持相同的角速度，而这个对应点，当然也只能在赤道上，至于经度是否也必须正对，倒不见得，只要太空电梯的设计制造者能够容忍它斜着向高空伸展出去。缆绳材料很重要，科学家们准备用一种新型纳米材料。图14-10为太空电梯。

目前，空天飞机和太空电梯技术还不成熟，但是几十年后，人们会实现梦想。

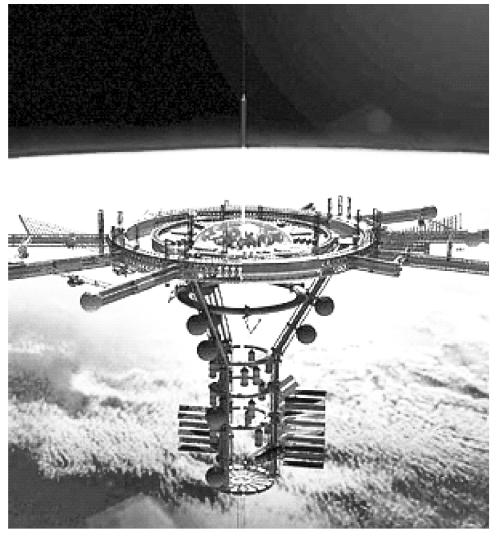


图14-10　太空电梯

4. 太阳帆船

美国、日本和法国的一些科学家，受帆船的启迪，设计了一种太阳帆船作为火星货运飞行器。所不同的是，它并非凭借地面上的风力，而是太空中的太阳风。太阳风就是太阳光辐射，是光子流，是电磁波。因为太阳风也是一种物质流动，一阵风似的向地球直“吹”过来，所以人们形象地称它为太阳风。太阳帆船就是靠光子在帆的发光表面反弹产生的力推动的。在地球表面，这种推力作用很小，但在太空中，在一个巨型面积的帆上便能产生足够的前进推力。太阳帆船在恒定的光压下，不断地得到匀加速，日积月累下去，太阳帆船的速度，一定能够达到惊人的程度。太阳帆设计成正方形，重150kg，太空帆船每边长2km左右，帆的桅杆选用最轻的合金制成，帆本身由2.5μm厚的聚酯树脂材料制作，表面涂覆了一层镀铝薄膜。帆的正中央有一货舱，用来存放货物。起飞前太阳帆呈折叠状，收藏在航天飞机货舱内，在绕地球轨道运行的空间站上装满货物，由上面一级火箭将它送到10000km高度的轨道上。然后展开帆，面向太阳，依靠太阳光的压力，逐渐加速到第二宇宙速度，自行携带货物飞往火星。途中通过调整帆面上太阳光压力的中心位置，就能达到调整飞行姿态和方向的目的，最终停泊在绕火星运行的轨道上。在航天员动身飞往火星之前的4年里，先在空间站上组建一个由14艘太阳帆船构成的强大阵容，把飞向火星所需的全部物资和火星轨道站、火星着陆舱陆陆续续送入3000km的火星圆轨道中，以备后用。

太空帆船和通常的宇宙飞船相比，造价低廉，很适于普通乘客使用。但航行速度比飞船要慢得多，由地球乘飞船去月球，5天时间就够了，而乘太空帆船则需在茫茫太空中航行半年以上。为此，一种高速航行的太空帆船正在设计之中，预计到21世纪末，乘高性能太空帆船到月球的航期在一个月以内。

5. “月球磁力加速器”

美国的航天专家提出“电磁轨道”方案，来解决月球与地球之间的定期往返和移居月球的交通工具问题。在月球表面建立一个叫做“月球磁力加速器”的运输工具，利用强大的电磁力控制载人的月球车，在月球与地球之间来回穿梭航行。

6. 巡天飞船

科学家们将设计一种载人火星巡天飞船，作为飞往火星的载人飞行器，用它在地球轨道

和火星轨道之间长期环行。像定期远洋客轮一样，载人火星巡天飞船备足了长期旅行用的各种必需品。飞船舱设计得宽敞而明亮，乘员居室也很舒适，在太空长期旅行犹如在地面生活一样。飞船上还配备了大量的研究设备，能进行作物生长研究，能进行水和空气的再利用，还有人造生物圈一类的密闭生态环境，确保航天员在数年的巡天飞行中万无一失。

7. “代达罗斯”飞船

1973—1977 年期间，英国星际协会的一个技术小组，对飞往距地球 6 光年（1 光年 = 9.46×10^{15}m）的巴纳德星进行了工程研究。结果表明，这是一项极其艰巨的任务，需要一艘特大的飞船，他们设想了一种名为“代达罗斯”飞船，属于无人驾驶的自动飞船，重约 54000t，船上携带 500t 左右的全自动有效载荷，飞船总高度为 230m，最宽处直径为 130m。飞船采用核脉冲火箭发动机作动力，氦-3 为燃料。由于飞船和地球之间的无线电通信时延非常厉害，所以必须使用一台智能计算机来控制整个飞船，以便对其在探测期间的一切功能进行控制。在与巴纳德星相遇的前几年里，飞船将释放出 20 个或更多的探测器，每个探测器均以一颗行星或它的卫星，或者以恒星本身为探测目标。它们直接向飞船上的中央计算机发送探测结果。

四、空间环境预报

影响航天活动的环境因素有：太阳电磁辐射、地球大气、地球电离层、地球磁场以及空间粒子辐射等。空间环境是指航天器环绕地球作轨道运动的空间范围。空间环境因素随时间和空间不断地变化，且这种变化主要与日面上的活动相关联。因此，预报空间环境时，首先要预报太阳的活动，可将它分为长期、中期和短期预报。长期预报是指提前一年、数年、数十年乃至更长时间的预报，主要预报 11 年前后太阳黑子周围的情况。中期预报是提前数天到数月的预报，其重点是未来 27 天太阳活动的情况。短期预报是提前数天或更短时间的预报，其核心是预报太阳耀斑及空间物理效应。其次，监测和预报的参数有：高能粒子辐射环境、高能电磁辐射环境、等离子体环境、电磁波环境、微流星和空间垃圾环境、中性大气环境、磁场环境及电场环境等。

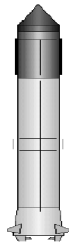
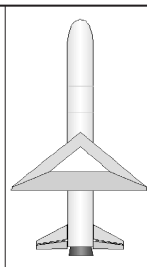
地球周围的大气是人类从事社会、生产活动不可缺少的保护层，但它对于天文学家来说，却是一种严重妨碍观测的屏障。天体在不断地发射着电磁波，这些电磁波按其波长由短到长排列，大致可分为 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、射电波等波段。地球大气吸收从超长波到 γ 射线的全部电磁辐射，能测到可见光区附近和无线电波区两个区域。因此，包含有丰富天体物理信息的绝大部分天体辐射，被地球大气阻挡和吸收。地球大气在地表面附近，由于温差形成气体的强烈对流和湍流，严重地引起光线无规则随机偏析，破坏了光线波阵面的平面性，从而歪曲了天体的星象，同时也严重削弱了天体的光度。利用空间的低压、真空、微重力、高远位置等特点，在地球外层空间开展空间天文观测研究可克服上述种种不利因素，在空间上设立空间天文观测站与地面相比，有以下一些优点：没有大气折射，可消除因折射带来的观测误差；不存在大气对某些波段的选择吸收，能用可见光和其他所有波段进行天体测量；没有大气漫射，天空总是黑的，在仪器工作期间可连续进行观测；没有大气闪烁，得到的星象质量较好；没有重力，望远镜筒不会弯曲。空间天文观测站将极大地提供扩展宇宙天体电磁辐射谱探测的可能性，获得清晰的天体图像，揭开天体的真实面貌，并能以极高的精度，测定天体的方位和运动状况，能探测到被关在地球大气窗口外的各种电磁波段，也就是对 γ 射线、X 射线、远紫外线、远红外线以及短波甚至长波的射电电波

的探测。现在使用得最多的空间天文观测器是天文卫星。尽管天文卫星在空间探测中取得很大成就，但由于卫星的体积、重量、功率等方面的局限性，观测仪器不能做得很大，探测精度也不够高，因此，很多宇宙现象尚未发现。空间天文观测站配备了最现代化的天文观测设备，这些大型设备扩大了收集辐射能的面积，提高了观测仪器的灵敏度和角分辨率。在空间天文观测站上，几个方向同时分别装有大型空间望远镜，组成了观测群，可在紫外、可见光、红外谱段范围使用，其灵敏度达到“哈勃”空间望远镜的 100 倍，其角分辨率和频谱分辨率都极佳，可详细研究遥远星系和行星。

五、太空运输费用

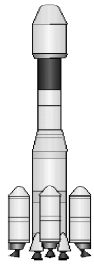
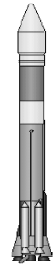
1）小型飞船［5000lbs（1lbs = 0.4536kg）以下］去近地轨道，截至 2000 年。表 14-2 为小型飞船运输费用。

表 14-2　小型飞船运输费用

飞船类型							
飞船名	Athena 2	Cosmos	Pegasus XL	Rockot	Shtil	START	Taurus
国家	美国	俄罗斯	美国	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	美国
可送至近地轨道的容量/lbs(kg)	4520(2065)	3300(1500)	976(443)	4075(1850)	947(430)	1392(632)	3036(1380)
近地轨道高度/英里(km)	115(185)	249(400)	115(185)	186(300)	124(200)	124(200)	115(185)
可送至同步轨道的容量/lbs(kg)	1301(590)	0	0	0	0	0	988(448)
发射点及倾角/(°)	卡纳维拉尔角空军基地 28.5	普列谢茨克 62.7	卡纳维拉尔角空军基地 28.5	普列谢茨克 62.7	巴伦支海 77-88	斯沃博德内 51.8	卡纳维拉尔角空军基地 28.5
发射价格/美元	24000000	13000000	13500000	13500000	200000	7500000	19000000
至近地轨道单位磅(kg)成本	$5310($11622)	$3939($8667)	$13832($30474)	$3313($7297)	$211($465)	$5388($11687)	$6258($13768)
至同步轨道单位磅(kg)成本	$18448($40678)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	$19234($42411)

2）中等飞船（5001～12000lbs）和中型飞船（12001～25000lbs）截至2000年。表14-3为中等飞船运输费用。

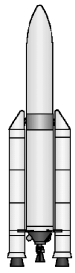
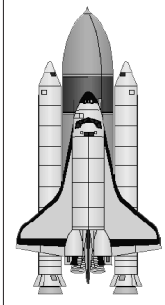
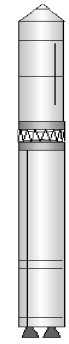
表 14-3 中等飞船运输费用

飞船类型							
飞船名	Aricane 44L	Atlas 2AS	Delta 2（7920/5）	Dneper	长征 2C	长征 2E	Soyuz
国家或地区	欧洲	美国	美国	俄罗斯	中国	中国	俄罗斯
可送至近地轨道的容量/lbs（kg）	22467（10200）	18982（8618）	11330（5144）	9692（4400）	7048（3200）	20264（9200）	15418（7000）
近地轨道高度/英里（km）	124（200）	115（185）	115（185）	124（200）	124（200）	124（200）	124（200）
可送至同步轨道的容量/lbs（kg）	10562（4790）	8200（3719）	3969（1800）	0	2205（1000）	7431（3370）	2977（1350）
发射点及倾角/（°）	法属圭亚那库鲁 5.2	卡纳维拉尔角空军基地 28.5	卡纳维拉尔角空军基地 28.5	拜科努尔 46.1	太原 37.8	太原 37.8	拜科努尔 51.8
发射价格/美元	112500000	97500000	55000000	15000000	22500000	50000000	37500000
至近地轨道单位磅（kg）成本	$5007（$11029）	$5136（$11314）	$4854（$10692）	$1548（$3409）	$3192（$7031）	$2467（$5435）	$2432（$5357）
至同步轨道单位磅（kg）成本	$10651（$23486）	$11890（$26217）	$13857（$30556）	N/A	$10204（$22500）	$6729（$14837）	$12598（$27778）

3）大型飞船截至2000年。

表14-4为大型飞船运输费用。

表 14-4　大型飞船运输费用

飞船类型						
飞船名	Ariane 5G	长征 3B	Proton	Space shuttle	Zenit 2	Zenit 3SL
国家或地区	欧洲	中国	俄罗斯	美国	乌克兰	多国合作
可送至近地轨道的容量/lbs（kg）	39648（18000）	29956（13600）	43524（19760）	63443（28803）	30264（13740）	34969（15876）
近地轨道高度/英里（km）	342（550）	124（200）	124（200）	127（204）	124（200）	124（200）
可送至同步轨道的容量/lbs（kg）	14994（6800）	11466（5200）	10209（4630）	13010（5900）	0	11576（5250）
发射点及倾角/（°）	法属圭亚那库鲁 5.2	西昌 28.5	拜科努尔 51.8	肯尼迪航天中心 28.5	拜科努尔 51.8	奥的赛发射平台 0
发射价格/美元	165000000	60000000	85000000	300000000	42500000	85000000
至近地轨道单位磅（kg）成本	$4162（$9167）	$2003（$4412）	$1953（$4302）	$4729（$10416）	$1404（$3093）	$2431（$5354）
至同步轨道单位磅（kg）成本	$11004（$24265）	$5233（$11538）	$8326（$18359）	$23060（$50847）	N/A	$7343（$16190）

说明：

1）通常飞船越大单位重量价格越低。

2）通常实际谈判价格会有较大变化，取决于供需双方。

3）轨道高度及发射角会影响飞船载重量。

第五节 测控系统

一、测控系统的功能与组成

太空电站测控系统是对太空电站进行跟踪测量、监视与控制的技术系统，是太空电站的重要组成部分，是天、地联系的唯一通道，它通过自己的测控站，建立地面与太空电站的天地无线电链路，完成对太空电站的遥测、遥控。测控系统的工作过程是将航天指控中心汇集的各测控站通过下行链路获取的信息，经处理和分析后形成控制决策，生成遥控指令，再通过上行链路发向太空电站实施。本系统由地基测控网、天基测控网组成。

（1）地基测控网 它由地面测控站、航天测控中心和通信系统构成。

1）地面测控站采用先进计算机和网络技术，为降低成本，采用现有成品软、硬件。利用大规模集成电路，地面测控站可做得很小，视频部分可利用多芯片封装技术，装到便携式计算机中，自动化程度很高，无人值守。

2）航天指控中心是综合状态监视、综合症技术分析和控制决策的中枢。在太空电站发射阶段，录取数据和监测参数，判断航天器是否入轨，入轨后继续进行运行段飞行控制。在载人飞行期间，航天指控中心向航天员中心传送航天员生理遥控信息、话音、图像及生命保障系统信息，由航天员中心配合对航天员生理状态和有关设备进行监视分析，并提出相应控制支持建议，由航天指控中心组织综合分析后决策实施。在建设工程完成后，通过航天指控中心对太空电站的运行进行监控。

3）通信系统采用毫米波和激光技术。采用 Ka 频段（23GHz、25 ~ 27GHz），可提供 3.5GHz 的总传输带宽。工作频率的提高，在相同数传速率下，可减少收、发端天线的直径，减少受干扰的概率，允许的通量密度限制值会更高。利用激光束来传递信息，可使数传速率进一步提高，抗电磁干扰能力更强。在真空的卫星-卫星链路上使用激光，近于理想自由空间，没有大气和气候等不利因素的影响。数据中继卫星传送上千兆比特/秒的数据也只要使用几十厘米直径的望远镜，不需要使用 4m 以上的大口径微波天线。卫星-地面的激光链路也已试验成功，用 40cm 望远镜、1550nm 激光的地面站可与近地卫星传递 2.5Gbit/s 的数据。

（2）天基测控网 天基测控网是利用 GPS（全球卫星定位系统）完成对中、低轨道航天器的测控。GPS 用于航天器轨道测量的优点有：定时校频、精度高、实时性好、全球可用、设备简单。在轨航天器利用 GPS 可实现星上自主定轨和测姿。与推进和控制系统相结合，可实现轨迹保持自主、姿态保持自主和操作保持自主。

太空电站是民用项目，功能单一，测控要求条件较低。

太空电站可根据星上情况自主判别，需要地面对其测控时才呼叫地面，并下发存储的历史数据，以便判明故障，采用适当的行动使其恢复工作，发现不能自主解决的异常情况时，则自动进入保安模式。具体的太空电站的测控管理取决于发电及传输的特点，但是，要以现有的测控网和地面数据系统的功能和性能为基础提出要求，并且综合考虑天、地实现的可行性和必要性。适当放宽要求往往可以大大节省费用。例如，不要安排频繁的测轨活动（占测控总工作量的 20% ~30%），不要一天几次校准星上时钟，采用国际通用标准等。采用国际通用标准可明显缩短研发周期，降低成本。1982 年在美国 NASA 和欧空局的建议下，成

立了空间数据系统咨询委员会（CCSDS），负责开发和采纳适合于航天测控和数传系统的各种通信协议和数据传输规范。至2000年，CCSDS已公布了遥控信道编码、分包遥控、无损数据压缩、时间码格式、射频和调制系统、外测和轨道数据、高级在轨系统、空间通信协议规范、互支援参考模式等近30份蓝皮书（各成员国一致同意的正式版本）。目前已有150多个航天器采用CCSDS建议。CCSDS相当一部分建议已被国际标准组织（ISO）采纳，成为国际标准。

二、我国卫星测控网

我国卫星测控网是我国跟踪测量和控制航天器的地面系统。由西安航天控制中心、9个航天测控站、若干陆上活动测控站、两艘测量船以及连接它们的测控通信网构成。主要测控装备有微波雷达、超短波多普勒测速仪和光学设备，以及双频多普勒测速仪、超高频指令遥控系统和微波统一系统等。

我国卫星测控网始建于20世纪60年代末，位于陕西省渭南地区。1970年、1971年分别完成了第一颗人造地球卫星、第二颗人造地球卫星的跟踪、测量任务以及试验通信卫星的变轨、定点的跟踪、遥测、遥控任务。20世纪80年代中迁至西安，现在，西安卫星测控中心已具有能对多个卫星同时进行实时跟踪测量和控制的能力，并且具有任务分析和软件开发的能力。测控中心由中心计算机系统、监控显示系统、综合通信网、时间统一勤务系统及相应的研究室组成。中心计算机系统是由多台高性能计算机经由星形耦合器与以太网连接而成的，具有较高的可靠性和较强的处理能力，并配有多星测控系统软件。监控显示系统是面向指挥人员和工作人员，给出航天器各种参数的各种设备组合，由大屏幕的图像显示和表格显示、X-Y记录器显示、各种台式屏幕显示器以及监控台等组成。西安卫星测控中心可以实现从“牵引”卫星返回地面到将卫星定点于36000km高空，从控制回收载人飞船到同时管理数十颗卫星。西安卫星测控中心完成6次“神舟”飞船、100余颗卫星的发射测控、回收和在轨管理任务。美国、俄罗斯等国都是在全球布网，对航天器进行全时段测控，而我国航天测控网覆盖率还不到这些国家的1/5，以远逊于发达国家的资源和设备，达到同等测控能力，这是我国航天测控事业的特色。我国集航天测控体系、固定站与移动站相结合、卫星测控网、飞船测控网和深空测控网于一体的航天测控网，实现了测控网“以航天器控制语言为基础的中心遥控透明控制模式”。这种新模式，使得只敲动几下键盘，就能在短时间内向卫星发送所需要的指令。

硬件不足靠软件。西安卫星测控中心作出了如下创新：

1）提出了测控资源最优分配策略与算法。

2）新研制了6大类数百万行测控软件。

3）具备同时支持三个发射场发射的卫星早期测控任务的能力。

4）研发的精密定轨系统，将定轨精度提高到米级、超同步转移轨道卫星四次变轨技术。

5）同步卫星双星共位技术和高精度位置保持技术，有效节省了卫星燃料、延长了卫星寿命，使轨道控制精度由数百米提高到几十米。

6）改进卫星姿态算法，将同步轨道段定姿精度提高到0.03°以内，使定姿精度达到国际先进水平。

近年来，西安卫星测控中心任务成倍增长，他们采用平台化、组件化设计方法，构建了

具有高度重组能力、适应多星并行测控的功能分布式测控软件平台，具备了同时执行两颗卫星实时任务和一颗卫星任务准备的能力，具备了 40 颗以上卫星的长期管理能力，并在探测月球方面做出了成绩。月球距离地球有 38 万 km，无线电信号存在空间衰减、时间延迟、低覆盖率等问题，因此在技术措施上需要采用大口径的接收天线，降低天线及接收机的噪声温度，并采用新的信源压缩方法和信道纠错编译码等通信技术，来改善信道传输质量。

1. 大口径的接收天线

为了能够接收从遥远的探测器上传来的数据，地面应用系统建设了两座大口径天线（射电望远镜），一座建立在北京密云水库的北岸，天线口径达到 50m，是目前我国口径最大的数据接收天线；另一座建设在云南昆明的凤凰山上，是一座口径 40m 的大天线。这两座大口径天线，把从嫦娥一号传送来的所有信息全部收集起来，通过与天线配套的接收机系统，送到一套落地存储系统中保存起来。在地面系统中，负责把数据接收下来的这两个天线及其相配套的接收和落地存储系统称为“数据接收分系统”，简称为“DAS”。

2. S 频段航天测控网

航天测控系统是对航天器飞行轨道、姿态及其各分系统工作状态进行跟踪测量、监视与控制的系统。它是用于保障航天器按预订状态飞行与工作，完成规定航天任务的大型基础设施，通常称为航天测控网。随着航天科技的进步，当代卫星测控主要是通过 S 频段微波统一测控系统实现标准化、通用化的卫星测控，简称 USB。它能够接收和发射信号，实现双向传输，具有跟踪测轨、遥测接收、遥控发令等综合功能。中国的航天测控网始建于 20 世纪 70 年代。目前我国已形成了以测控站为核心，以多种通信手段与测控中心相连接的较为完善的航天测控网，先后完成了我国历次航天发射试验和在轨卫星的测控任务，并具备了国际联网条件。中国航天测控技术已经跨入世界先进行列。在绕月探测之前，我国的大部分卫星距离地面在 4.2 万 km 以内，个别卫星离地面最远距离仅 8 万 km，属于“近程”测控范围。在绕月探测工程中，嫦娥一号卫星距离地面最远可达 40 万 km，是地球同步卫星距地面距离的 10 倍以上，属于“远程”测控范围。远程测控给我国现有的航天测控网带来了极大的挑战：

1）无线电波传输时间的延迟。无线电波以 30 万 km/s 的光速传播，测控信号需要 1.35s 才能从地球到达月球，这对于准确测控来说就显得太慢了。

2）无线电信号衰减非常大。信号强度跟距离的二次方成反比，也就是说测控距离增加一倍，信号强度就只剩下四分之一。嫦娥一号的测控距离是普通卫星的 10 倍，信号强度只剩下百分之一。如何弥补深空测控通信带来的巨大距离衰减，是测控通信面临的又一个困难。

3）巨大的无线电信号衰减带来的直接影响，就是信息传输速率受到极大的限制，为满足远距离通信误码率的要求，必须降低通信信息传输速率。

4）实现高精度导航困难。近地卫星可以使用高精度导航手段（如 GPS 导航技术），在深空测控中主要依靠传统的多普勒测量和距离测量手段。随着目标距离的增大，角度测量误差所引起的导航误差也很大。

5）测控覆盖范围受局限。目前的深空探测，都立足于地面测控站对探测器的跟踪测量，单个地面站一天之中可连续跟踪测量深空探测器弧段的时间最长只能达到 15h，为了增加对探测器的跟踪测量时间，需要在全球布站或开展国际合作。

6）轨道控制可靠性要求高。在绕月探测工程中，轨道控制次数多，条件苛刻，且由于地—月—卫星时空关系的限制，在地球飞往月球的途中只有单次机会实施轨控，因此只能成功不能失败。

面对这些问题，针对我国航天测控系统的现状，科技工作者提出了利用“USB + VLBI（甚长基线干涉测量技术的简称）”联合测轨的方法，提高定轨精度。

1）提高 USB 测控系统的能力。天线的口径和探测距离成正比，增大天线口径可以增加探测距离。因此在 USB 测控系统中的两个站新建了大天线，改善了以往用于地球卫星天线的信道余量，提高了测量精度，增强了系统可靠性，使地面站作用距离从地球范围延伸到月球范围。

2）在航天测控领域引入天文测量技术。天文测量使用的射电望远镜能够接收遥远星系的射电源发出的宽带微波辐射信号。虽然叫做望远镜，它并不是通常概念下的光学望远镜。射电望远镜是由大口径天线、低噪声接收机和宽带记录装置组成的无线电接收系统。但是，单个射电望远镜无法实现测轨、定轨，必须把两个以上的射电望远镜组合起来。射电望远镜的基本原理是，通过设在不同位置的天线，接收同一无线电信号，计算信号到达两个天线的时间差，确定射电源相对于两个天线的角度。通过三个不在一条直线上的天线，就可以确定射电源所在的方向。这种测量方法称为甚长基线干涉测量技术，简称为 VLBI。它通过无线电波干涉的方法，将间隔数百乃至数千公里的口径较小的射电望远镜合成为巨大的综合口径望远镜，提高了分辨率。两个望远镜之间的距离称为基线，基线越长，VLBI 就能获得更高的分辨率，它是目前分辨率最高的天文观测技术。

USB + VLBI 方案是以我国 S 频段航天测控网为主，辅以中国科学院的 VLBI 天文测量系统，并突破了此系统原有的“事后处理”的天文观测模式，实现了准实时处理，解决了嫦娥卫星远程测控和高精度测轨、定轨的难题。

在嫦娥卫星发射之前，测控系统利用欧空局“SMART—1”月球探测器进行了 USB + VLBI 综合测轨、定轨试验，首次验证了测控系统对环月探测器的测轨、定轨能力，取得了满意的结果。为了进一步提高测控覆盖率和可靠性，测控系统还与欧洲航天局合作，形成了“国内测控站 + 国外测控站”的全球布站方案，使嫦娥一号卫星的测控覆盖率达到 98% 以上。

3. 绕月探测工程测控系统

绕月探测工程测控系统主要由北京航天指控中心、西昌卫星发射中心，分布在全国的地面测控站，如青岛站、喀什站，分布在北京、上海、昆明和乌鲁木齐的天文观测站、VLBI 中心，以及布置在太平洋海域指定位置的远望二号、远望三号航天测量船，以及国际联网的地面测量站组成，由时统、通信和数据传输系统将所有测控站点联成一个整体。北京航天飞行控制中心是绕月探测工程的飞行控制中心。测控系统的主要功能包括五个方面：

1）测控系统的时间统一。时间统一系统按照国际统一时间，由测控系统授时、GPS 授时和当地氢原子钟进行时间标准的统一，消除系统各站点在时间上的误差，保证测控精度。

2）火箭和卫星的测轨、定轨。测控系统通过与箭载和星载测控设备合作，对长征三号甲火箭和嫦娥一号卫星的轨道进行测量，确定是否偏离标称轨道。

3）火箭和卫星的遥测。测控系统通过接收火箭和卫星下传的无线电信号，获得火箭、卫星各分系统和设备、仪器运行参数、温度、振动等环境数据，确定火箭和卫星是否处于正

常的工作状态。

4）火箭和卫星的遥控。根据飞行控制程序或当火箭和卫星出现偏差、意外时，测控系统通过测控船、站向火箭或卫星发送指令，遥控火箭或卫星执行相应的动作。

5）测控通信系统。通信系统主要负责测控数据、图像和话音的传输。

测控系统在研制过程中，针对嫦娥一号卫星的发射窗口和轨道要求，制定了详细的测控方案，并对在轨运行的探测一号卫星进行了多次全系统的测轨、定轨演练，与嫦娥一号卫星进行了 14 天模拟真实发射状态的无线联试，全面验证了测控方案的正确性。

随着嫦娥一号卫星的成功发射、运行，我国测控系统将从远地测控走向深空测控。

第六节　温 控 系 统

一、地球同步轨道卫星温控系统概况

1. 太空环境对元器件的影响

就电子器件和化学物质而言，我们生活在一个“室温技术”的世界。几乎所有的空间合格材料都是从地面应用发展过来的，不管是电子元器件、电解质、润滑油、漆料，还是黏合剂。地面上设备运行过热或过冷，可通过与空气的热交换很容易地调节到可接受的工作温度。但是在太空中，离开了地球大气层，卫星在强烈的太阳光的直接照射下，偶尔进入地球或月亮的阴影中，经常处在极端寒冷和炎热的环境中，如果不采取任何措施，无源卫星设备的温度一般为 -200 ~ 150℃，有源电子设备可达到摄氏几百度的高温。同时，由于处在近真空的环境，卫星与外部环境的热交换几乎仅以辐射的方式进行，星体内部的热交换方式也主要是辐射和传导，而在地面上经常存在的气体对流传热则可以忽略不计。这样，卫星与空间及内部各仪器设备之间的热量交换变得较为困难。

卫星是由多个系统协同工作的，包括各种电子仪器、光学组件、机械设备和材料。不同的系统对工作环境的温度条件要求不同，其中电子元器件对温度的反应较为敏感，一旦环境温度发生变化，元器件本身的温度会随之发生相应变化，若温度超出设计范围，它们的性能参数也将改变，甚至会引起元器件的损坏。卫星上某些容器或管道内充有气体或液体，温度偏离设计值不但能够引起气体压强的剧烈变化，而且还会造成液体蒸发或冻结，最终导致工作状态受到破坏。各种结构材料会因高温而引起强度变化，密封材料则会因低温而失去弹性甚至冷脆失效，复合材料在温度交变的影响下会脱开，使组件发生撕裂，一些热控涂层在紫外和空间粒子辐照下其表面辐射特性也会发生变化。

2. 星上温度变化情况

卫星在太空中运行，其热量的主要来源是太阳光、推进器点火以及星上器件的电功率耗散，而后两者电能的最终来源也是太阳光。热量的最终排放地就是深冷空间。星上温度变化有如下特点：

1）由于地球自转和围绕太阳公转，地球同步卫星上的温度会呈现季节性周期变化和日周期性变化。

温度季节性变化的主要原因有：地球赤道平面和黄道平面的夹角是 23.5°，相对地球而言，太阳以一年为周期在南北回归线内移动；地球公转轨道是椭圆轨道，不同时期地球离太阳的距离不同，因此四季变化使卫星的温度不同，但一年中温度变化趋势基本是确定的。

温度日周期性变化的主要原因有：地球自转，地球同步卫星星下点位置不变，太阳光线每天按时间顺序照射到东面板、背地板、西面板和对地板。每年春秋分各 44 天左右，卫星进入星蚀期，这时地球位于太阳和卫星之间，即卫星进入了地影，太阳光线不能照到卫星上，其间星体上一些部件的温度会有所下降。

2）卫星在轨运行期间，星上温度的季节性变化和日变化规律是可以确定的。同时，星上元器件还会由于工作状态变化、故障或者其他不确定因素引起温度变化，如星上负荷增大、转发器使用增加时，星体内部温度会升高，随着卫星寿命的延长，星上热控涂层性能下降，星体温度会升高等。这些情况在卫星测控时都需要考虑。

3）卫星在轨条件下热交换的主要方式有：

热传导：星上行波管放大器向支架与卫星外壳通过传导散热。

辐射：星体表面的光学反射器将太阳能辐射到太空。

热隔离：具有高反射率、低吸收率的热控涂层能够在一定程度上隔离星体和外界的热交换。

液体流动：星体内部敷设的热管中工作液体流动带走热量。

3. 温控分系统的作用及特点

温控分系统的作用就是保持卫星各部分工作在安全的温度范围内，以保证其正常可靠地运行。温控分系统是基于卫星的任务、环境和设备等的需要而设计的，具有以下特点：

1）星上不同元器件、不同部分对工作温度的要求不同，在设计时应采用不同的方式。

2）由于卫星特殊的工作环境，对温控分系统的可靠性要求很高，以保证其他分系统的正常工作。

3）星上温度控制器件一旦发生故障和损坏，器件本身是无法修复的，在轨测控时要充分考虑器件的备份。

二、温控的实现

为了使热量适当地转移和转换，避免温度超出正常的工作范围，温控分系统为卫星各部分进行特殊设计，称为被动式温控和主动式温控。

1. 被动式温控

在卫星温控系统的设计中，被动式温控是一种开环控制，也就是说在控制过程中被控对象的温度无反馈作用。通常采用具有一定热物理性能的结构材料、表面涂层和隔热材料等，来合理安排星体表面与空间环境之间及星体内部仪器部件之间的热传递，使卫星各部分处于期望的温度范围内。被动式温控的优点在于技术简单，运行可靠，工作寿命长及经济性能好；缺点是对于温度变化适应慢，不能根据情况及时调整，一旦发生老化和失效就失去作用，无备份。被动式温控的实现方式主要有：

1）多层隔热材料（MLI）。这种材料由双面镀铝聚酯薄膜和涤纶网相互交替叠成，且 MLI 最外层上还覆盖一层表面带导电层的单面镀铝聚酰亚胺（Kapton）膜，其镀铝层向内，导电涂层朝外，用来防止散热和隔绝其他热源。这种材料通常覆盖在太阳每天都能够照射到的东面板、西面板、对地板和背地板四个面板的表面上，以减少阳光照射引起的温度变化。

2）化学太阳反射器。将其粘贴在背地板等星体外表面，这种材料具有低吸收率和高辐射率的特点，能有效降低星体温度。

3）安装热管。在功率放大器的南北面板上安装热管，均匀传递板上不同部位的热量。

热管是一种利用工质的相变和循环流动工作的传热器件，它主要由管壳、工质及具有毛细结构的管芯所组成。热管一端为蒸发段，一端为冷凝段。热能在蒸发段从外热源经管壁传给工作液体，液体蒸发（或沸腾）后成为蒸气流向另一端冷凝段，在冷凝段蒸气凝结成液体放出热量，热量经过管壁传给冷源，而液体沿管芯在毛细力的作用下，再回流到蒸发段。如此循环不已，可不断将热量由蒸发段传递到冷凝段。

热管通过蒸发和凝结进行传热，传热热阻小，所以它就可以在小的温差下传导很大的热流。热管内的工质循环是靠毛细结构中液体产生的毛细力来驱动的，因此工质循环不消耗电源，也没有机械运动部件，它运行可靠、结构紧凑。

4）卫星上元器件的布局是否合理，对热量的均匀分布很重要，设计时要尽量减少各个元器件之间不必要的热传递。

2. 主动式温控

主动式温控是一种闭环控制。在控制过程中，被控制对象的温度可反馈到热控制机构上。下面介绍几种卫星常用的主动热控制设备：

1）热敏电阻。热敏电阻即温度传感器，分布在整个卫星的各个部分，用来获取温度的变化。它根据热敏电阻的阻值与温度成反比的特性，通过测量给定电压下的电流计算出电阻值，从而得到该位置处的温度。

温度传感器按作用不同可分为两种：一种用于星载计算机对加热器的控制，即星载计算机根据一个或多个传感器测得的温度来控制加热器；另一种传感器只用来测量温度，不直接参与加热器的控制，但它是作为第一种传感器的备份，在第一种传感器出现问题时将其替换掉。

2）自动调温器。自动调温器通常用于保持星上特定部位恒定的工作温度。例如用在帆板的机械铰链阻尼器上，在卫星的发射阶段和转移轨道期间，一直处于关闭状态，在打开帆板前打开，使铰链处的温度保持在工作范围内。操作结束后，调温器被长期关闭。

3）加热器。加热器主要由星载计算机自动控制其开关，使器件工作在要求的温度范围内。控制参数以各种形式存在星载计算机上，地面可根据卫星在轨运行情况进行修改。这些控制参数主要有加热器工作方式、传感器分布和加热器开关的温度范围等。加热器的工作方式多样，可根据预先设定好的开关温度值工作，也可以由开关脉冲控制工作，一旦开关脉冲的周期和时间常数确定后，加热器的开关时间就确定了。

在卫星上，采用主动式温控方式控制温度的器件和系统很多，尤其是姿态导航控制系统和电源等分系统对温度的要求很严格，通常采用主动式温控。主动式温控有如下特点：

1）可适时调节被控对象的传热特性，对外部变化反应灵活，温度调节精度高。

2）自动化程度高，正常情况下不需要地面干预。

3）可靠性较高，一旦出现温控器件失效或损坏，可通过修改星载计算机上的控制参数，将失效器件所控器件或区域的温度控制改到相邻温控器件上，可以在一定程度上缓解器件损坏带来的不利影响。

主动式温控的缺点是工作时卫星的能耗增加。另外，由于加热器的控制中枢在星载计算机，星载计算机对加热器的控制又要通过星上的指令控制系统来实现，这种相对复杂的控制使得各系统间联系紧密，任何环节出现问题，后果都会非常严重。

在对卫星的测控工作中，测控人员要密切监视星上各部分的温度变化情况，观察其变化

趋势是否在正常范围内，可通过给遥测数据设置适当的门限及时发现温度的异常变化；同时，在卫星的工作状态发生变化时，要根据实际情况对温度控制方式做出必要的调整，如卫星处在转移轨道和同步轨道时要使用不同的控制参数，随着卫星寿命的增长，星体温度升高时，也要根据情况修改控制参数。最后，要及时发现和处理温控分系统本身的故障，这在一定程度上可缓解温控器件故障给卫星正常运行带来的不利影响。

第七节　GPS 及北斗星导航系统

一、全球定位系统（GPS）

全球定位系统（Global Positioning System，简称 GPS）是由覆盖全球的 24 颗卫星组成的卫星系统，这个系统可以保证在任意时刻，地球上任意一点都可以同时观测到 4 颗卫星，以保证卫星可以采集到该观测点的经纬度和高度，以便实现导航、定位、授时等功能。这项技术可以用来引导飞机、船舶、车辆以及个人，安全、准确地沿着选定的路线，准时到达目的地。GPS 的主要特点有：全天候；全球覆盖；三维定速定时高精度；快速省时高效率；应用广泛多功能；⑥操作简便。

GPS 是 20 世纪 70 年代由美国陆海空三军联合研制的新一代空间卫星导航定位系统，其主要目的是为陆、海、空三大领域提供实时、全天候和全球性的导航服务，并用于情报收集、核爆监测和应急通信等一些军事目的，是美国独霸全球战略的重要组成，经过 20 余年的研究实验，耗资 300 亿美元，到 1994 年 3 月，全球覆盖率高达 98% 的 24 颗 GPS 卫星星座已布设完成。现在 GPS 的应用不仅局限在军事领域，而是发展到汽车导航、大气观测、地理勘测、海洋救援、载人航天器防护探测等各个领域。

（一）组成

GPS 由三部分组成：空间部分——GPS 星座；地面控制部分——地面监控系统；用户接收部分——GPS 信号接收机。

1. 空间部分

GPS 的空间部分由 24 颗工作卫星组成，它位于距地表 20200km 的上空，均匀分布在 6 个轨道面上（每个轨道面 4 颗），轨道倾角为 55°。卫星的分布使得在全球任何地方、任何时间都可观测到 4 颗以上的卫星，并能保持良好定位解算精度的几何图像。GPS 卫星每隔 12h 绕地球一周，使地球上任一地点能够同时接收 7 ~ 9 颗卫星的信号。这就提供了在时间上连续的全球导航能力。GPS 卫星产生两组电码，一组称为 C/A 码（Coarse/Acquisition Code，1.023MHz）；一组称为 P 码（Procise Code，10.23MHz），P 码因频率较高，不易受干扰，定位精度高，因此受美国军方管制，并设有密码，一般民间无法解读，主要为美国军方服务。C/A 码人为采取措施而刻意降低精度后，主要开放给民间使用。

2. 地面控制部分

地面控制部分由一个主控站、5 个全球监测站和 3 个地面控制站组成，负责对卫星的监视、遥测、跟踪和控制。它们负责对每颗卫星进行观测，并向主控站提供观测数据。监测站将取得的卫星观测数据，包括电离层和气象数据，经过初步处理后，传送到主控站。主控站从各监测站收集跟踪数据，计算出卫星的轨道和时钟参数，然后将结果送到 3 个地面控制站。地面控制站在每颗卫星运行至上空时，把这些导航数据及主控站指令注入卫星，对每颗

GPS 卫星每天注入一次，并在卫星离开注入站作用范围之前进行最后的注入，卫星再将这些数据通过无线电波向地面发射至用户接收端设备。监测站均配装有精密的铯钟和能够连续测量到所有可见卫星的接收机。如果某地面站发生故障，那么在卫星中预存的导航信息还可用一段时间，但导航精度会逐渐降低。

3. 用户接收部分

用户接收部分即 GPS 信号接收机，其主要功能是能够捕获到按一定卫星截止角所选择的待测卫星，并跟踪这些卫星的运行。当接收机捕获到跟踪的卫星信号后，即可测量出接收天线至卫星的伪距离和距离的变化率，解调出卫星轨道参数等数据。根据这些数据，接收机中的微处理计算机就可按定位解算方法进行定位计算，计算出用户所在地理位置的经纬度、高度、速度、时间等信息。接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件包构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收单元两部分。接收机一般采用机内和机外两种直流电源。设置机内电源的目的在于更换外电源时不中断连续观测。在用机外电源时，机内电池自动充电。关机后，机内电池为 RAM 存储器供电，以防止数据丢失。目前各种类型的接收机体积越来越小，重量越来越轻，便于野外观测使用。

（二）GPS 工作原理

GPS 的基本原理是，测量出已知位置的卫星到用户接收机之间的距离，然后综合多颗卫星的数据就可知道接收机的具体位置。

（1）不断地发射导航电文　卫星的位置可以根据星载时钟所记录的时间在卫星星历中查出。而用户到卫星的距离则通过记录卫星信号传播到用户所经历的时间，再将其乘以光速得到。由于大气层电离层的干扰，这一距离并不是用户与卫星之间的真实距离，而是伪距（PR），当 GPS 卫星正常工作时，会不断地用 1 和 0 二进制码元组成的伪随机码（简称伪码）发射导航电文。GPS 使用的伪码一共有两种，分别是民用的 C/A 码和军用的 P（Y）码。C/A 码频率为 1.023MHz，重复周期为 1ms，码间距为 1μs，相当于 300m；P 码频率为 10.23MHz，重复周期为 266.4 天，码间距为 0.1μs，相当于 30m。而 Y 码是在 P 码的基础上形成的，保密性能更佳。导航电文包括卫星星历、工作状况、时钟改正、电离层时延修正、大气折射修正等信息。它是从卫星信号中解调制出来，以 50bit/s 调制在载频上发射的。导航电文每个主帧中包含 5 个子帧，每帧长 6s。前三帧各 10 个字码，每 30s 重复一次，每小时更新一次。后两帧共 15000bit。导航电文中的内容主要有遥测码、转换码和第 1、2、3 数据块，其中最重要的则为星历数据。当用户接收到导航电文时，提取出卫星时间并将其与自己的时钟做对比便可得知卫星与用户的距离，再利用导航电文中的卫星星历数据推算出卫星发射电文时所处位置，用户在 WGS-84 大地坐标系中的位置、速度等信息便可得知。可见 GPS 卫星部分的作用就是不断地发射导航电文。

（2）接收　由于用户接收机使用的时钟与卫星星载时钟不可能总是同步，所以除了用户的三维坐标 x、y、z 外，还要引进一个 Δt 即卫星与接收机之间的时间差作为未知数，然后用 4 个方程将这 4 个未知数解出来。所以如果想知道接收机所处的位置，至少要能接收到 4 个卫星的信号。GPS 接收机可接收到：可用于授时的准确至纳秒级的时间信息、用于预报未来几个月内卫星所处概略位置的预报星历、用于计算定位时所需卫星坐标的广播星历，精度为几米至几十米（各个卫星不同，随时变化）以及 GPS 信息，如卫星状况等。

GPS 接收机对码的量测就可得到卫星到接收机的距离，由于含有接收机卫星钟的误差及

大气传播误差，故称为伪距。对0A码测得的伪距称为UA码伪距，精度约为20m左右，对P码测得的伪距称为P码伪距，精度约为2m左右。GPS接收机对收到的卫星信号进行解码或采用其他技术，将调制在载波上的信息去掉后，就可以恢复载波。严格而言，载波相位应称为载波拍频相位，它是收到的受多普勒频移影响的卫星信号载波相位与接收机本机振荡产生信号相位之差。一般在接收机钟确定的历元时刻量测，保持对卫星信号的跟踪，就可记录下相位的变化值，但开始观测时的接收机和卫星振荡器的相位初值是不知道的，起始历元的相位整数也是不知道的，即整周模糊度，只能在数据处理中作为参数解算。相位观测值的精度高至毫米，但前提是解出整周模糊度，因此只有在相对定位、并有一段连续观测值时才能使用相位观测值，而要达到优于米级的定位精度也只能采用相位观测值。

按定位方式，GPS定位分为单点定位和相对定位（差分定位）。单点定位就是根据一台接收机的观测数据来确定接收机位置的方式，它只能采用伪距观测量，可用于车船等的概略导航定位。相对定位（差分定位）是根据两台以上接收机的观测数据来确定观测点之间相对位置的方法，它既可采用伪距观测量也可采用相位观测量，大地测量或工程测量均应采用相位观测值进行相对定位。

在GPS观测量中包含了卫星和接收机的钟差、大气传播延迟、多路径效应等误差，在定位计算时还要受到卫星广播星历误差的影响，在进行相对定位时大部分公共误差被抵消或削弱，因此定位精度将大大提高，双频接收机可以根据两个频率的观测量抵消大气中电离层误差的主要部分，在精度要求高、接收机间距离较远时（大气有明显差别），应选用双频接收机。

相对论为GPS提供了所需的修正。GPS卫星的定时信号提供纬度、经度和高度的信息，精确的距离测量需要精确的时钟。因此精确的GPS接收器就要用到相对论效应。准确度在30m之内的GPS接收器意味着它已经利用了相对论效应。如果不考虑相对论效应，卫星上的时钟就和地球的时钟不同步。相对论认为快速移动物体随时间的流逝比静止的要慢。每个GPS卫星每小时跨过大约1.4万km的路程，这意味着它的星载原子钟每天要比地球上的钟慢7μs。而引力对时间施加了更大的相对论效应。大约2万km的高空，GPS卫星经受到的引力拉力大约相当于地面上的四分之一。结果就是星载时钟每天快45μs，GPS要计入共38μs的偏差。如果卫星上没有频率补偿，每天将会增大11km的误差（这种效应事实上更为复杂，因为卫星沿着一个偏心轨道运行，有时离地球较近，有时又离得较远）。

（三）GPS的应用

由于GPS技术所具有的全天候、高精度和自动测量的特点，作为先进的测量手段和新的生产力，已经融入了国民经济建设、国防建设和社会发展的各个应用领域。随着冷战结束和全球经济的蓬勃发展，美国政府宣布在保证美国国家安全不受威胁的前提下，取消SA政策，GPS民用信号精度在全球范围内得到改善，利用C/A码进行单点定位的精度由100m提高到20m，这将进一步推动GPS技术的应用，提高生产力、作业效率、科学水平以及人们的生活质量，刺激GPS市场的增长。在美国，单单是汽车GPS，2000年后的市场就已超过30亿美元，我国汽车导航的市场超过50亿元人民币。

1. 全球定位系统的主要用途

1）陆地应用，主要包括车辆导航、地面车辆跟踪和城市智能交通管理、应急反应、大

气物理观测、地球物理资源勘探、道路工程测量、地壳形变测量、大坝和大型建筑物变形监测、地壳运动监测、市政规划控制、个人通信终端、电力、邮电、通信等网络的时间同步(准确时间的授入、准确频率的授入)、精细农业等。

2）海洋应用，包括远洋船最佳航程航线测定、船只实时调度与导航、海洋救援、海洋探宝、水文地质测量以及海洋平台定位、海平面升降监测、水下地形测量等。

3）航空航天应用，包括飞机导航、航空遥感姿态控制、低轨卫星定轨、导弹制导、航空救援和载人航天器防护探测等。

2. GPS 技术在导航仪中的应用举例

（1）GPS 导航仪　简单地说，GPS 导航仪就是能够帮助用户准确定位当前位置，并且根据既定的目的地计算行程，通过地图显示和语音提示两种方式引导用户行至目的地的汽车驾驶辅助设备。一部完整的 GPS 汽车导航仪是由芯片、天线、处理器、内存、显示屏、扬声器、按键、扩展功能插槽、电子地图、导航软件 10 个主要部分组成的。但就目前情况看来，市场中的 GPS 汽车导航仪在硬件上的差距并不大，主要区别还是集中在内置的软件和地图上。所谓地图其实只是数据，而软件是搜索引擎。地图中各种地理信息综合在一起的庞大数据要被用户所应用，要反应到导航界面中，这需要借助于软件来实现。因此导航地图离不开软件的支持，同时，优秀的软件系统也需要详细的地图数据。主要参数有：坐标（Coordinate），有二维和三维两种表示；路标（Landmark or Waypoint），GPS 内存的一个坐标值；路线（Route），路线是 GPS 内存中存储的一组数据，包括一个起点和一个终点的坐标，还可以包括若干中间点的坐标，每两个坐标之间的线段叫一条腿；前进方向（Heading），GPS 没有指北针的功能，静止不动时是不知道方向的；导向（Bearing）；日出日落时间（Sun set/raise time）；足迹线（Plot trail）。

（2）GPS 在道路工程中的应用　用于建立各种道路工程控制网及测定航测外控点等。随着高等级公路的迅速发展，对勘测技术提出了更高的要求，由于线路长，已知点少，因此，用常规测量手段不仅布网困难，而且难以满足高精度的要求。目前，国内已逐步采用 GPS 技术建立线路首级高精度控制网，然后用常规方法布设导线加密。实践证明，在几十公里范围内的点位误差只有 2cm 左右，达到了常规方法难以实现的精度，同时也大大提前了工期。GPS 技术也同样应用于特大桥梁的控制测量中。由于无需通视，因此可构成较强的网形，提高点位精度，同时对检测常规测量的支点也非常有效。GPS 技术在隧道测量中也具有广泛的应用前景，GPS 测量无需通视，减少了常规方法的中间环节，因此，速度快、精度高，具有明显的经济和社会效益。

（3）GPS 在交通管理中的应用　三维导航是 GPS 的首要功能，飞机、轮船、地面车辆以及步行者都可以利用 GPS 导航器进行导航。汽车导航系统是在 GPS 基础上发展起来的一门新型技术。汽车导航系统由 GPS 导航、自律导航、微处理机、车速传感器、陀螺传感器、CD-ROM 驱动器、LCD 显示器组成。GPS 与电子地图、无线电通信网络、计算机车辆管理信息系统相结合，可以实现车辆跟踪和交通管理等许多功能。

（四）GPS 种类

GPS 卫星接收机种类很多。

1）根据型号分为测地型、授时型、全站型、定时型、手持型、集成型。

2）根据用途分为导航式、车载式、船载式、机载式、星载式、弹载式。

3）按接收机的载波频率分为单频接收机、双频接收机。

① 单频接收机。单频接收机只能接收 L1 载波信号，测定载波相位观测值进行定位。由于不能有效消除电离层延迟影响，单频接收机只适用于短基线（<15km）的精密定位。

② 双频接收机。双频接收机可以同时接收 L1、L2 载波信号。利用双频对电离层延迟的不一样，可以消除电离层对电磁波信号的延迟的影响，因此双频接收机可用于长达几千公里的精密定位。

4）按接收机通道数分为多通道接收机、序贯通道接收机、多路多用通道接收机。GPS 接收机能同时接收多颗 GPS 卫星的信号，为了分离接收到的不同卫星的信号，以实现对卫星信号的跟踪、处理和量测，具有这样功能的器件称为天线信号通道。

5）按接收机工作原理分为码相关型接收机、平方型接收机、混合型接收机、干涉型接收机。

① 码相关型接收机是利用码相关技术得到伪距观测值。

② 平方型接收机是利用载波信号的平方技术去掉调制信号，来恢复完整的载波信号，通过相位计测定接收机内产生的载波信号与接收到的载波信号之间的相位差，测定伪距观测值。

③ 混合型接收机综合了上述两种接收机的优点，既可以得到码相位伪距，也可以得到载波相位观测值。

④ 干涉型接收机是将 GPS 卫星作为射电源，采用干涉测量方法，测定两个测站间距离。

GPS 是一个高精度、全天候和全球性的无线电导航、定位和定时的多功能系统。经过 20 余年的实践，GPS 技术已经发展成为多领域、多模式、多用途、多机型的国际性高新技术产业。

（五）主要厂商

国际上较为知名的生产厂商有美国 Trimble（天宝）导航公司、Ahada（艾航达）、瑞士 Leica Geosystems（徕卡测量系统）、日本 TOPCON（拓普康）公司、美国 Magellan（麦哲伦）公司（原泰雷兹导航）、国内有中海达、上海华测导航、南方测绘等。

1）Trimble（天宝）的 GPS 接收机产品主要有 SPS751、SPS851、SPS781、SPS881、R8、R8GNSS、R7、R6 及 5800、5700 等。它作为美国军方控股企业，是世界上最早研究与生产 GPS 的部分企业之一，其中，SPS881、R8GNSS 为 72 通道 GPS/WAAS/EGNOS 接收机，它把三频 GPS 接收机、GPS 天线、UHF 无线电和电源组合在一个袖珍单元中，具有内置 Trimble Maxwell 5 芯片的超跟踪技术。即使在恶劣的电磁环境中，仍然能用小于 2.5W 的功率提供对卫星有效的追踪。同时，为扩大作业覆盖范围和全面减小误差，可以同频率多基准站的方式工作。此外，它还与 Trimble VRS 网络技术完全兼容，其内置的 WAAS 和 EGNOS 功能提供了无基准站的实时差分定位。SPS751、SPS851、SPS551 还具有接收星站差分改正信息的功能，最高单机定位精度可达到 5cm。

2）国际领先 GPS 导航仪品牌 Ahada（艾航达）源自美国硅谷，产品的核心功能有：地图查询；可以在操作终端上搜索目的地位置；可以记录要去地方的位置信息，并保留下来，也可以和别人共享这些位置信息；模糊地查询你附近或某个位置附近的如加油站、宾馆、取款机等信息；路线规划；自动导航；语音导航；画面导航；重新规划线路。

3）Leica Geosystems（徕卡测量系统）是全球著名的专业测量公司，其不仅在全站仪、

相机方面对行业产生了很大的影响，而且在测量型 GPS 的研发及 GPS 的应用上也做出了极大的贡献，是快速静态、动态 RTK 技术的先驱。GPS1200 系统中的接收机包括 4 种型号：GX1230 GG/ATX1230 GG、GX1230/ATX1230、GX1220 和 GX1210。其中，GX1230 GG/ATX1230 GG 为 72 通道、双频 RTK 测量接收机，接收机集成电台、GSM、GPRS 和 CDMA 模块，具有连续检核（SmartCheck +）功能，可防水（水下 1m）、防尘、防沙。动态精度：水平 10mm + 1ppm，垂直 20mm + 1ppm；静态精度：水平 5mm + 0.5ppm，垂直 10mm + 0.5ppm。它在 20Hz 时的 RTK 距离能够达到 30km 甚至更长，并且可保证厘米级的测量精度，基线在 30km 时的可靠性是 99.99%。

4）日本 TOPCON（拓普康）公司生产的 GPS 接收机主要有 GR-3、GB-1000、Hiper 系列、Net-G3 等。其中，GR-3 大地测量型接收机可 100% 兼容三大卫星系统（GPS + GLONASS + GALIEO）的所有可用信号，不仅仅是世界上最早研发出能同时接收美国 GPS 与俄罗斯 GLONASS 两种卫星信号的双星技术的厂家，也是现今世界上唯一可以同时接收所有 GNSS 卫星的接收机技术，有 72 个超级跟踪频道，每个通道都可独立追踪三种卫星信号，采用抗 2m 摔落坚固设计，支持蓝牙通信，内置 GSM/GPRS 模块（可选）。静态、快速静态的精度：水平 3mm + 0.5ppm，垂直 5mm + 0.5ppm；RTK 精度：水平 10mm + 1ppm，垂直 15mm + 1ppm；DGPS 精度：优于 25cm。

5）中海达测绘的 GPS 接收机产品主要包括静态一体化接收机 HD-8200G 和 GD-8200X，其中 HD-8200G 配备有无线遥控器，可远距离查看卫星状况等关键信息，8200X 配备有语音导航功能，可通过面板直接设置静态采集关键参数卫星高度角和采样间隔。RTK 产品主要有珠峰 HD-5800、V8 CORS RTK、V8 GNSS RTK。RTK 静态后处理精度：平面 ±2.5mm + 1ppm，高程 ±5.0mm + 1ppm；RTK 定位精度：平面 ±1cm + 1ppm，高程 ±2cm + 1ppm；码差分定位精度：0.45m（CEP）；单机定位精度：1.5m（CEP）。

6）华测导航的 GPS 接收机产品主要有 X60CORS、X20 单频接收机、X90 一体化 RTK、X60 双频接收机等。其中，X90 为 28 通道双频 GPS 接收机，集成双频 GPS 接收机、双频测量型 GPS 天线、UHF 无线电、进口蓝牙模块和电池，动态精度：水平 10mm + 1ppm，垂直 20mm + 1ppm；静态精度：水平 5mm + 1ppm，垂直 10mm + 1ppm，能达到 10 ~ 30km 的作用范围（因实际地域情况有所差别），既可以承受从 3m 高度跌落到坚硬的地面，也可浸入水下 1m 深处进行测量。X90 具有静态、快速静态、RTK、PPK、码差分等多种测量模式，精度范围为毫米级到亚米级，而且可与天宝、徕卡等主流品牌联合作业。

7）南方测绘的 GPS 接收机产品主要有 RTK S82、S86、蓝牙静态 GPS 等。其中 S82 采用一体化设计，集成 GPS 天线、UHF 数据链、OEM 主板、蓝牙通信模块、锂电池，其 RTK 定位精度：平面 ±(2cm + 1ppm)，垂直 ±(3cm + 1ppm)；静态后处理精度：平面 ±(5mm + 0.5ppm)，垂直 ±(10mm + 1ppm)；单机定位精度：1.5m（CEP）；码差分定位精度：0.45m（CEP）。

（六）几种 GPS 的应用

1. 车载 GPS

当通过硬件和软件做成 GPS 定位终端用于车辆定位的时候，称为车载 GPS，但光有定位还不行，还要把这个定位信息传到报警中心或者车载 GPS 持有人那里，称为第三方。所以 GPS 中还包含了 GSM 网络通信（手机通信），通过 GSM 网络用短信的方式把卫星定位信

息发送到第三方。通过微机解读短信电文，在电子地图上显示车辆位置。这样就实现了车载GPS定位。与此同时，在车上安装相应的探测传感器，利用车载GPS定位的GSM网络通信功能，同样能把防盗报警信息发送到第三方，或者把这个报警电话、短信直接发送到车主手机上，完成车载GPS防盗报警。可以看出，车载GPS定位的GSM网络部分实际上是一个智能手机，可以和第三方互相通信，还可以把车辆被抢、司机被劫、被绑架等信息发送到第三方。所以说车载GPS定位是定位、防盗、防劫的。

2. GPS预警器

GPS预警器是通过GPS卫星在GPS预警器中设定坐标来完成的，比如遇到一个电子眼，然后通过相关设备在电子眼的正下方设立一个坐标，这样，使得装上这个坐标点数据的预警器到达这个点时，在达到坐标点的前300m左右就会开始预警，告诉车主前面有电子眼测速，不能超速驾驶，这样就起到一个预警作用。

3. 智能GPS

智能GPS主要由两大部分组成，即本地的监控中心软件管理平台和远程的GPS智能车载终端。远程的GPS智能车载终端将车辆所处的位置信息、运行速度、运行轨迹等数据传回到监控中心，监控中心接收到这些数据后，会立即进行分析、比对等处理，并将处理结果以正常信息或者报警信息两类形式显示给管理员，由管理员决定是否要对目标车辆采取必要措施。

（七）GPS在新世纪的发展

1. GPS连续运行站网和综合服务系统的发展

在全球地基GPS连续运行站（约200个）的基础上所组成的IGS（International GPS Service），是GPS连续运行站网和综合服务系统的范例。它无偿向全球用户提供GPS各种信息，如GPS精密星历、快速星历、预报星历、IGS站坐标及其运动速率、IGS站所接收的GPS信号的相位和伪距数据、地球自转速率等。这些信息在大地测量和地球动力学方面支持了无数的科学项目，包括电离层、气象、参考框架、精密时间传递、高分辨的推算地球自转速率及其变化、地壳运动等。

1）IGS现在提供的轨道有三类：一是最终（精密）轨道，要在10～12天以后得到它，常用于精密定位；二是快报轨道，要在1天以后得到，它常用于大气的水汽含量、电离层计算等；三是预报轨道。

关于对GPS星钟偏差方面的估计，目前只有两个IGS分析中心提供。IGS目前近200个永久连续运行的全球跟踪站中，使用的外部频率标准近70个，其中约30个使用氢钟，约20个使用铯原子钟，约20个使用铷原子钟，其余的使用GPS内部的晶体振荡器。

2）就地区性的GPS连续运行站网和综合服务系统而言，发达国家也已做了很多这方面工作，取得了进展。在美国布设了GPS“连续运行参考站”（CORS）系统。它由美国大地测量局（NGS）负责，该系统的当前目标是：使美国各地的全部用户能更方便地利用它来达到厘米级水平的定位和导航；促进用户利用CORS来发展GIS；监测地壳形变；求定大气中水汽分布；监测电离层中自由电子浓度和分布。

美国NGS宣布为了强化CORS系统，以每个月增加3个站的速度来改善该系统的空间覆盖率。此外，CORS的数据和信息包括接收的伪距和相位信息、站坐标、站移动速率矢量、GPS星气、站四周的气象数据等，用户可以通过信息网络下载而得到。

英国建立的“连续运行 GPS 参考站”（COGPS）系统的功能和目标类似于上述 CORS，但结合英国本土情况还多了一项监测英伦三岛周围的海平面相对和绝对变化的任务。英国的 COGPS 由测绘局、环保局、气象局、农业部、海洋实验室共同负责。目前已有近 30 个 GPS 连续运行站，今后的打算是扩建 COGPS 系统和建立一个中心，其主要任务是传输、提供、归档、处理和分析 GPS 各站数据。

日本已建成全国近 1200 个 GPS 连续运行站网的综合服务系统。目前它在以监测地壳形变、预报地震为主功能的基础上，结合气象和大气部门开展 GPS 大气学的服务。

3）IGS 持续地支持低轨卫星（LEO），专门建立了 LEO 工作组。LEO 工作组制定了工作计划。

① 提供极移和世界时（格林尼治时间，简称 UT）信息。IGS 公布的最终每日极坐标（x，y），其精度为 ±0.1m，快报的相应精度为 ±0.2m。GPS 作为一种空间大地测量技术，本身并不具备测定世界时（UT）的功能，但由于一方面 GPS 卫星轨道参数和 UT 相关，另一方面，也和测定地球自转速率有关，而自转速率又是 UT 的时间导数，因此 IGS 仍能给出每天的日长（LOD）值。IGS 现在还能进一步求定章动项和高分辨率的极移（达每 2 小时 1 次，而不是现在的 1 天 1 次），后者主要源于 IGS 各观测站观测质量的提高，数据传输迅速和及时，以及数据处理方法的改进，并没有本质的改变，而前者却是技术上的一个跨跃。

② 提供的一个极为有用和重要的信息是 IGS 的那些连续运行站（跟踪站）的坐标、相应的框架、历元和站移动速率。IGS 站坐标所采用的坐标参考框架是和 IER S 互相协调的。1993 年末开始使用 ITR F91，1994 年使用 ITR F92，1995 年到 1996 年中期使用 ITR F93，1996 年中期到 1998 年 4 月一直使用 ITR F94，1998 年 3 月 1 日转而采用 ITR F96，1999 年 8 月 1 日开始 IGS 采用 1TR F97。

③ IGS 在测定短期章动方面的新贡献。地球自转轴在地球表面上的移动称为极移，而它在惯性空间中的运动称为岁差和章动。GPS 技术不能确定 UT，而只能确定日长。同样这一原则也适用于章动，即 GPS 数据不能测定章动的经度和倾角，但能确定这些量的时间变率（对时间的导数）。基于这一原理，用了 3 年中每天的 W 和 E 值资料，估算短期章动项的章动振幅，并与 VLBI 结果作了比较，结论认为，就测定章动短周期项而言，GPS 方法优于 VLBI，而对超过一个月以上的长周期而言，VLBI 较优。由于对于 GPS 技术的 IGS 作出了如此大的成绩和贡献，因此在 1999 年 9 月各国的 VLBI 站和 SLR 站决定组织类似于 IGS 的相应的 IVS 和 ILRS。法国的 DORIS 和德国的 PRARE 也正在考虑成立类似模式的国际组织，力求使这类空间大地测量观测系统组织起来，提高效率，提高精度和可靠性。

4）LEO 工作组提出了一些建议：

① 建立 IGS 为追踪 LEO 的相应标准化地面站网。

② IGS 对这些地面站网的数据进行传输和处理，提供 LEO 所需要的数据和产品。

③ 为地面站网的 GPS 1Hz 采样率数据，建立 GPS 数据交换格式。

④ 调查 IGS 精密轨道对 LEO 平台上 GPS 数据采集的作用和意义。

2. GPS 应用于电离层监测

GPS 在监测电离层方面的应用，也是 GPS 空间气象学的开端。太空中充满了等离子体、宇宙线粒子、各种波段的电磁辐射，由于太阳常在 1s 内抛出百万吨量级的带电物，电离层

由此而受到强烈干扰，这是空间气象学研究的一个对象。通过测定电离层对 GPS 信号的延迟来确定在单位体积内的总自由电子含量（TEC），以建立全球的电离层数字模型。

GPS 卫星发射 L1 和 L2 两个载波，这两个载波可以削弱电离层对 GPS 定位的影响，或者说可以求定电离层折射，因为这一折射和载波频率有关。

当人们建立地区或全球电离层数字模型时，总是做简化的假定，所有自由电子含量都表示在一个单层面上，该面离地面高为 H。这样的话，电子含量就可以用在接收机和卫星连线与此单层面交点（刺入点）处的电子含量 E_s 表示，它可以视为 E 与刺入点处天顶距 Z' 的函数 $E\cos Z' = E_s$。可以将在球面上的电子浓度 E_s 加以模型化，例如写成经纬度的球谐函数等，这方面有很多专家提出了各种模型。IGS 提出了一种电离层地图的交换格式，它的作用是使基于各种理论和技术所获得的电离层地图能在统一规格的基础上进行综合和比较。电离层模型有各不相同的理论基础，而取得数据来源的技术也不同，数据覆盖面也不完整，所以目前只能将 IGS 和全球各种 TEC 的图和 GPS 卫星信号的差分码偏差用 IONEX 形式向全世界用户提供，通过比较，逐步联合起来。

3. GPS 应用于对流层监测

由于 GPS 轨道精度大大提高后，对流层折射已成为限制 GPS 定位精度提高的一个重要障碍。由于这个实际情况，对流层折射要顾及其随机过程的变化来加以模型化。在 GPS 应用于对流层研究中，IGS 的快速轨道和预报轨道信息对于天气预报会起重大作用。此外，IGS 通过德国 GFZ 的“IGS 对流层比较和协调中心”提供的每两小时的对流层天顶延迟系列就像是控制点，对于区域性或局部性的对流层研究来说，可以起到对流层延迟绝对值的标定作用。

4. GPS 作为卫星测高仪的应用

利用 GPS 定位中的多路径效应发展 GPS 测高技术，即利用空载 GPS 作为测高仪进行测高。它是利用海面或冰面所反射的 GPS 信号，求定海面或冰面地形，测定波浪形态、洋流速度和方向。通常卫星测高或空载测高测的是一个点，连续测量结果在反向面上是一个截面，而 GPS 测高则是测量有一定宽度的带，因此可以测定反射表面的起伏（地形）。测量时在空载平面安装 2 台 GPS 接收机，1 台天线向上用于对载体的定位，1 台天线向下，用于接收 GPS 在反射面上的信号。美国在海上作了测定洋流和波浪的试验。丹麦在格陵兰作了测定冰面地形及其变化的试验。

5. 卫星-卫星追踪技术（SST）

SST 技术的实质是高分辨率地测定 2 颗卫星间的距离变化，一般它分为两类，即高低卫星追踪和低低卫星追踪。前一类是高轨卫星（如对地静止卫星、GPS 卫星等）追踪低轨（LEO）卫星或空间飞行器，后一类是处于大体为同一低轨道（LEO）上的 2 颗卫星之间的追踪，2 颗卫星间可以相距数百千米，这两类 SST 技术都将 LEO 卫星作为地球重力场的传感器，以卫星间单向或双向的微波测距系统测定卫星间的相对速度及其变率。这一速度的不规则变化所反映的信息中，就包含了地球重力场信息。卫星轨道越低，这一速度变化受重力场的影响越明显，所反映重力场的分辨率也越高。这两类 SST 技术中，以高低卫星追踪所获得的信息比较丰富，这是因为高轨卫星，特别是有多个高轨卫星（如 GPS）能获得低轨卫星处于大部分轨道上所传递的信息；对地面重力场的中波、长波、短波信息都能恢复；不同于低轨卫星，高轨卫星受重力场影响比较小，因此卫星间的速度变化能比较好地反映重力场信

息，同时高卫星的轨道也比较容易精确地求定。欧空局（ESA）在德国（GFZ）主持下所发射的 CHAMP、GRACE 和 GOCE 三颗卫星，在今后 10 年中将专门进行 SST 和卫星重力梯度测量（SGG）的试验，以改善人们对地球重力场的认识。

6. GPS 今后的发展趋势

1）卫星系统的更新与多个卫星定位系统共存，将明显改善卫星导航定位的精度和可靠性。

2）双频高精度测地型接收机将继续高度被几个技术领先的 GPS 厂家所垄断，美国将继续保持其绝对优势。

3）单频测地型接收机和导航接收机 OEM 板产业将扩散到世界各地，虽是低档次的 GPS 产品，但用途广、用户多、市场大。美国把 GPS 单频 OEM 板的生产技术转让出口，因而推动了世界各地企业投资 GPS OEM 的生产。陆地导航定位产品将成为发展最快的 GPS 产业。

二、北斗卫星导航系统

北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System）是我国自行研制开发的独立区域性、有源三维卫星定位与通信系统（CNSS）。北斗卫星导航系统促进了卫星导航产业链的形成，形成了完善的国家卫星导航应用产业支撑、推广和保障体系，推动了卫星导航在国民经济社会各行业的广泛应用。目前全世界有 4 套卫星导航系统：中国北斗、美国 GPS、俄罗斯“格洛纳斯”、欧洲“伽利略”。其中美国 GPS、俄罗斯“格洛纳斯”已建成投入使用。中国北斗，欧洲“伽利略”仍处于建设阶段。

卫星导航系统是重要的空间基础设施，为人类带来了巨大的社会经济效益。中国作为发展中国家，拥有广阔的领土和海域，高度重视卫星导航系统的建设，努力探索和发展拥有自主知识产权的卫星导航定位系统。图 14-11 为北斗卫星导航系统。

2000 年以来，我国已成功发射了 8 颗“北斗导航试验卫星”，建成了北斗导航试验系统（第一代系统）。2011 年 4 月 10 日 4 时 47 分，我国在西昌卫星发射中心用长征三号甲运载火箭，将第八颗北斗导航卫星送入太空预定转移轨道。2012 年 12 月 27 日起，向我国及周边地区提供连续的导航定位和授时服务。

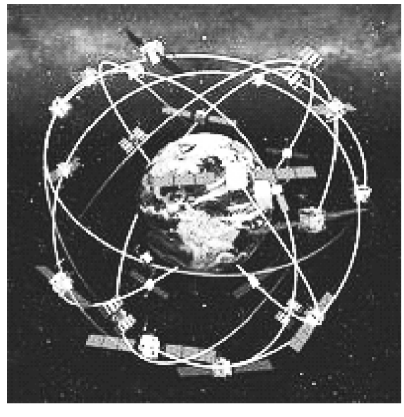


图 14-11　北斗卫星导航系统

我国的北斗卫星导航系统提供两种服务方式，即开放服务和授权服务（属于第二代系统）。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务；授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

我国计划在 2020 年左右将覆盖全球，使我国成为继美、俄之后的世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。该系统已成功应用于测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和公共安全等诸多领域，产生显著的经济效益和社会效益。特别是在 2008 年北京奥运会、汶川抗震救灾中发挥了重要作用。

（一）组成

北斗卫星导航系统由空间端、地面端和用户端三部分组成。空间端包括5颗静止轨道卫星和30颗非静止轨道卫星。30颗非静止轨道卫星又由27颗中轨道（MEO）卫星和3颗倾斜同步（IGSO）卫星组成，27颗中轨道卫星平均分布在倾角为55°的三个平面上，轨道高度为21500km，采用“东方红”-3号卫星平台；地面端包括主控站、注入站和监测站等若干个地面站；用户端由北斗用户终端以及与美国GPS、俄罗斯“格洛纳斯”（GLONASS）、欧洲“伽利略”（GALILEO）等其他卫星导航系统兼容的终端组成。

（二）工作原理

北斗卫星导航系统的工作过程是：首先由中心控制系统向卫星Ⅰ和卫星Ⅱ同时发送询问信号，经卫星转发器向服务区内的用户广播。用户响应其中一颗卫星的询问信号，并同时向两颗卫星发送响应信号，经卫星转发回中心控制系统。中心控制系统接收并解调用户发来的信号，然后根据用户的申请服务内容进行相应的数据处理。对定位申请，中心控制系统测出两个时间延迟：从中心控制系统发出询问信号，经某一颗卫星转发到达用户，用户发出定位响应信号，经同一颗卫星转发回中心控制系统的延迟；从中心控制系统发出询问信号，经上述同一卫星到达用户，用户发出响应信号，经另一颗卫星转发回中心控制系统的延迟。由于中心控制系统和两颗卫星的位置均是已知的，因此由上面两个延迟量可以算出用户到第一颗卫星的距离，以及用户到两颗卫星距离之和，从而知道用户处于一个以第一颗卫星为球心的一个球面，和以两颗卫星为焦点的椭球面之间的交线上。另外中心控制系统从存储在计算机内的数字化地形图查询到用户高程值，又可知道用户处于某一与地球基准椭球面平行的椭球面上。从而中心控制系统可最终计算出用户所在点的三维坐标，这个坐标经加密由出站信号发送给用户。技术参数如下：

1）短报文通信：一次可传送多达120个汉字的信息。

2）精密授时：精度达10ns。

3）定位精度：水平精度100m（1σ），设立标校站之后为20m（类似差分状态）。

4）工作频率：2491.75MHz。

5）系统容量：每小时540000户。

（三）建设原则

北斗卫星导航系统的建设与发展，以应用推广和产业发展为根本目标，不仅要建成系统，更要用好系统，强调质量、安全、应用、效益，遵循以下建设原则：

（1）开放性　北斗卫星导航系统的建设、发展和应用将对全世界开放，为全球用户提供高质量的免费服务，积极与世界各国开展广泛而深入的交流与合作，促进各卫星导航系统间的兼容与互操作，推动卫星导航技术与产业的发展。

（2）自主性　中国将自主建设和运行北斗卫星导航系统，北斗卫星导航系统可独立为全球用户提供服务。

（3）兼容性　在全球卫星导航系统国际委员会（ICG）和国际电联（ITU）框架下，使北斗卫星导航系统与世界各卫星导航系统实现兼容与互操作，使所有用户都能享受到卫星导航发展的成果。

（4）渐进性　中国将积极稳妥地推进北斗卫星导航系统的建设与发展，不断完善服务质量，并实现各阶段的无缝衔接。

（四）系统优劣势

（1）优势

1）和美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 相比，增加了通信功能。

2）全天候快速定位，与 GPS 精度相当。

3）同时具备定位与通信功能，无需其他通信系统支持。

4）覆盖中国及周边国家和地区，24h 全天候服务，无通信盲区。

5）特别适合集团用户大范围监控与管理，以及无依托地区数据采集用户数据传输应用。

6）独特的中心节点式定位处理和指挥型用户机设计，可同时解决“我在哪?”和“你在哪?”的问题。

7）自主系统，高强度加密设计，安全、可靠、稳定，适合关键部门应用。

（2）劣势

1）北斗一号系统属于有源定位系统，系统容量有限，定位终端比较复杂。

2）北斗一号系统属于区域定位系统，目前只能为中国以及周边地区提供定位服务。

（3）与 GPS 的比较

1）覆盖范围。北斗卫星导航系统是覆盖中国本土的区域导航系统。覆盖范围东经为 70°～140°，北纬为 5°～55°。GPS 是覆盖全球的全天候导航系统，能够确保地球上任何地点、任何时间能同时观测到 6～9 颗卫星（实际上最多能观测到 11 颗）。

2）数量和轨道。北斗导航系统是在地球赤道平面上设置 2 颗地球同步卫星，卫星的赤道角距约 60°。GPS 是在 6 个轨道平面上设置 24 颗卫星，轨道赤道倾角 55°，轨道面赤道角距 60°，导航卫星轨道为准同步轨道，绕地球一周为 11 小时 58 分。

3）定位原理。北斗导航系统是主动式双向测距二维导航，地面中心控制系统解算，提供用户的三维定位数据。GPS 是被动式伪码单向测距三维导航。由用户设备独立解算自己的三维定位数据。“北斗一号”的这种工作原理带来两个方面的问题，一是用户定位的同时失去了无线电隐蔽性，这在军事上相当不利，另一方面由于设备必须包含发射机，因此在体积、重量、价格和功耗方面处于不利的地位。

4）定位精度。北斗卫星导航系统的三维定位精度约为几十米，授时精度约为 100ns。GPS 的三维定位精度 P 码目前已由 16m 提高到 6m，C/A 码目前已由 25～100m 提高到 12m，授时精度目前约为 20ns。

5）用户容量。北斗卫星导航系统由于是主动双向测距的询问-应答系统，用户设备与地球同步卫星之间不仅要接收地面中心控制系统的询问信号，还要求用户设备向同步卫星发射应答信号，这样，系统的用户容量取决于用户允许的信道阻塞率、询问信号速率和用户的响应频率。因此，北斗导航系统的用户设备容量是有限的。GPS 是单向测距系统，用户设备只要接收导航卫星发出的导航电文即可进行测距定位，因此 GPS 的用户设备容量是无限的。

6）生存能力。和所有导航定位卫星系统一样，“北斗一号”基于中心控制系统和卫星进行工作，但是“北斗一号”对中心控制系统的依赖性明显要大很多，因为定位解算在那

里，而不是由用户设备完成的，一旦中心控制系统受损，系统就不能继续工作了。GPS 为了弥补这种系统易损性，正在发展星际横向数据链技术，使万一主控站被毁后 GPS 卫星可以独立运行。

7）实时性。“北斗一号”用户的定位申请要送回中心控制系统，中心控制系统解算出用户的三维位置数据之后再发回用户，其间要经过地球静止卫星走一个来回，再加上卫星转发和中心控制系统的处理，时间延迟就更长了，因此对于高速运动体，就加大了定位的误差。此外，“北斗一号”卫星导航系统也有一些自身的特点，其具备的短信通信功能是 GPS 所不具备的。

8）实际应用。

① 军用。我国大陆卫星导航定位应用近年来发展迅速，但是绝大多数的军民应用范畴都是建立在美国 GPS 之上，一旦发生战争，美国将会关闭 GPS 或加大民用码误差。所以我国必须发展自主的卫星导航定位系统。“北斗”卫星导航定位系统的军事功能与 GPS 类似，如：飞机、导弹、水面舰艇和潜艇的定位导航；弹道导弹机动发射车、自行火炮与多管火箭发射车等武器载具发射位置的快速定位，以缩短反应时间；人员搜救、水上排雷定位等。不过，因运作方式不同，“北斗”卫星导航定位系统有一些 GPS 没有的军事功能，其中最重要的就是部队的指挥管制。由于“北斗”卫星导航定位系统的简短通信功能可进行“群呼”，如集团用户中心发出的各种指令经“北斗”指挥型用户机上传至“北斗”卫星接着转给地面控制中心，再经出站链路传至“北斗”卫星向目标用户转发，使得集团用户中心可对其下属用户进行指挥调度。另外，当用户提出申请或按预定间隔时间进行定位时，不仅用户知道自己的测定位置，而且其调度指挥的上层单位或其他有关单位也可得知用户所在位置。

② 民用。北斗卫星导航定位系统的服务区域为中国及周边国家和地区，它可以在服务区域内，在任何时间、任何地点，为用户确定其所在的地理经纬度信息，并提供双向短报文通信和精密授时服务。北斗系统可广泛应用于船舶运输、公路交通、铁路运输、海上作业、渔业生产、水文测报、森林防火、环境监测等众多行业，以及军队、公安、海关等其他有特殊指挥调度要求的单位。我国北斗卫星导航系统 2011 年 10 月完成全面测试，具备向我国大部分地区提供初始服务的条件，2012 年已为亚太地区用户提供服务。

9）覆盖全球。第一代卫星导航系统在我国卫星导航系统建设中是一个起步阶段，可以说是用很少的资金投入，打破了国外卫星导航领域的垄断，填补了我国卫星导航领域的空白。但是由于本身原理上的限制，只能是一个区域卫星导航定位系统，无法发展成像 GPS 那样的全球卫星系统。所以在第一代导航系统建设的同时，中国也同时开始了第二代卫星导航系统的建设论证。策略是“解决急需，兼顾长远；先区域，后全球”。因此，第二代系统的建设分为几步走：首先，完成一期工程，建成区域卫星导航系统。在我国重点地区提供基本的导航、定位、授时服务，满足急需。同时为应用开发全球系统建设奠定基础。这一阶段，就是要在 2012 年把区域系统的卫星全部发射上天，其中包括地球静止轨道（GEO）卫星、倾斜同步轨道（IGSO）卫星、中圆轨道（MEO）卫星。到目前为止，已经发射了 16 颗北斗导航卫星。卫星上天需要轨道位置，系统运行需要频率资源。导航卫星的频率资源大部分被美国的 GPS 占有，俄罗斯的格罗纳斯也占了一部分，中国和欧盟就只能见缝插针，因此

北斗系统和伽利略系统计划使用的频率互有重叠。在 2015 年前，将完成全球系统建设的在轨飞行技术试验工作，全面解决二期工程的关键技术。2020 年前，将完成二期工程，建成与国外先进卫星导航系统技术服务相当的全球卫星导航系统。到时，北斗系统的空间段将由 30 多颗不同轨道类型的卫星组成。二期工程完成之后，北斗导航系统服务范围将由我国及周边地区向全球扩展，导航定位精度将提高，全球区域达到水平 5m，高程 8m。此外，系统安全性能将进一步提高，短报文通信性能也将得到进一步改善。在民用领域，民间已可以开始使用北斗系统。目前，在建的北斗卫星导航系统除空间段卫星系统、地面运控系统外，用户应用系统也在大力建设之中。我国已经把北斗系统用户终端机的开发作为推广应用的重要内容，不少国内厂商都在积极研制基于北斗系统的轻便、实用的用户终端设备。

（五）未来发展

较之目前仍在运行的“北斗一号”，“北斗二号”在诸多方面具有优势，包括可以有效避免遭受电磁干扰和攻击，实现无源定位，在精度方面大大提高，“北斗一号”精度在 10m 之内，而“北斗二号”可以精确到“厘米”之内。

随着北斗二号的发射成功，中国自主研制的北斗卫星导航系统预计在 2020 年左右将形成覆盖全球的卫星导航定位系统。

正在建设的北斗卫星导航系统空间段将由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，提供开放服务和授权服务。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务，定位精度为 10m，授时精度为 50ns，测速精度为 0.2m/s。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。随着“北斗一号”卫星导航定位系统的推广应用，中国正在着力研究开发下一代卫星导航定位系统（CNSS）。

北斗卫星导航系统将是一个由 30 余颗卫星、地面段和各类用户终端构成的大型航天系统，技术复杂、规模庞大，其建设应用将实现我国航天从单星研制向组批生产、从保单星成功向组网成功、从以卫星为核心向以系统为核心、从面向行业用户向大众用户的历史性转型，开启我国航天事业的新征程，并将对维护我国国家安全、推动经济社会科技文化全面发展提供重要保障。

（六）面临的挑战

在与国外导航系统竞争的情况下，在较短时间内完成北斗在国家经济安全领域的推广应用和在大众市场的迅速扩展，还面临不少挑战：

1）必须拥有核心自主知识产权的接收机芯片。在卫星导航芯片这一核心技术领域，我国的专利还寥寥无几，而国外厂商仅基带芯片已拥有 2000 多项专利。在不远的将来，可能会出现又一个“有机无芯”的产业。要解决这一问题，需要创造更好的机制，鼓励在基础研究、产品开发等方面自主创新，掌握核心技术，保护自主知识产权，提高核心竞争力。

2）必须提出有竞争力的应用解决方案和规模推广策略。目前，GPS 已占据我国卫星导航应用的绝大部分市场，在这种情况下，北斗系统产业化面临巨大挑战。我国拥有全球卫星导航应用的最大市场，紧紧抓住应用的基础市场，充分发挥北斗服务特色，创造性地提出应用解决方案和规模化推广策略，是北斗系统应用推广和产业化的关键。

3）卫星性能的竞争。导航卫星设计和研制水平决定着系统的性能，目前北斗卫星设计已经达到国外导航卫星水平，在未来发展中要不断自主创新，争取在国际导航卫星研制领域处于领先地位。

4）系统发展的博弈。面向未来，卫星导航系统需要持续的发展建设，以满足用户更高的使用要求；需要国家持续的经费投入、人才培养、产业推广，以确保我国北斗卫星导航系统在未来发展与国际竞争中占据优势地位。

“北斗”导航应用将迎来“规模化、社会化、产业化、国际化”的历史机遇，我国将在2015年前完成“北斗”导航产品标准、民用服务资质等法规体系建设，同时在北京建设一个国家级检测中心，在全国按区域建设7个区域级授权检测中心，加快推动“北斗”导航检测认证进入国家认证认可体系，相关检测标准进入国家标准系列。

第八节　10GW太空电站的建设

10GW太空光伏电站由200万个小阵列组成，每个阵列5kW，并联发射到地面。地面接收后合并，逆变升压后并网输出。

一、10GW太空电站主体建设

（一）太空发电及电力发送部分

本部分由电池板、磁控管组件、发射天线及电缆等构成。

1. 电池板

太空电池选用原则：

1）选用薄膜太阳电池，效率15%以上。

2）比功率W/kg性能指标大。

3）能在150℃以上稳定工作。

4）抗辐照能力强。

5）寿命在30年以上。

可供选择的有非晶硅、微晶硅、砷化镓、碲化镉、铜铟镓硒薄膜太阳电池。在太空中已使用过的有单结砷化镓、双结铝砷化镓/砷化镓。硅电池在高温下不能有效地工作。表14-5为太空用太阳电池。

表14-5　太空用太阳电池

电池类别 / 项目	铜铟镓硒(CIGS)	三结砷化镓(GaInP/GaAs/Ge)	三结非晶/微晶/微晶(a-Si:H/μc-Si:H/μc-Si:H)
量产效率(%)	12	23	13.3
抗辐射	好	较好	可以
比功率/(W/kg)	1430	210	1200
最大组件面积/m^2	0.7	1.6	5.7
基体材料(衬底)	聚酰亚胺	Ge	聚酰亚胺
稳定性	最好	较好	好
最高承受温度/℃	450	200	300
使用寿命/年	25	30	25
成本/(美元/W)	1.8	4	1

（续）

项目 \ 电池类别	铜铟镓硒（CIGS）	三结砷化镓（GaInP/GaAs/Ge）	三结非晶/微晶/微晶（a-Si:H/μc-Si:H/μc-Si:H）
制造工艺	后硒化法	金属有机化学气相沉积技术（MOCVD）	超高频等离子体化学气相沉积法
结论（座次）	1	2	3

采用铜铟镓硒（CIGS），电池效率15% 基体材料（底板）聚酰亚胺，比功率（W/kg）1430，6993t，最大组件面积0.7m^2，120W，83340000 块，加辅助面积，总面积为67.2km^2，8km×8.4 km。采用三结砷化镓也可以，但比功率较小，如能改进，当首选该种电池。太空薄膜电池单件面积巨大，在地面上制造时大设备所需的高真空度难以达到，因此可考虑在太空建电池厂，在地面完成半成品加工后，运往地球同步轨道，薄膜沉积工艺放在太空中做。

2. 磁控管组件的构成

5kW 一组，2000000 组，一组重15kg，30000t。之所以分为独立小功率并联发射，主要考虑大功率带来的电磁波危害较大，且发热严重。发送电力的天线要和地面的接收天线位置对准，因此，磁控管组件配有控制系统。

（1）磁控管。它能将直流电转换成微波，用特高频（2450MHz）功率放大管，将微波送到地面。多个小功率磁控管可进行并联。磁控管与市面上出售的微波炉所用的磁控管相似，量大，价格低，使用方便，可控制相位改变，输送功率。用磁控管（直流电-微波转换器）、发射天线（带散热功能）、相位和振幅控制管、放大器以及带反馈的驱动装置，组成一个微波发射阵列（MDA）。表14-6 为磁控管特性。

表14-6 磁控管特性

阳极电压	15～20kV	重量	1kg
效率	85%～90%	输出功率	3～5kW
阳极损耗	0.56kW	阴极寿命	50 年
工作电流	100～400mA	散热器温度	350℃

表14-7 为1～10GHz 频率的微波传输损耗。

表14-7 1～10GHz 频率的微波传输损耗

传输空间	数值	传输空间	数值
太空	0.1%	对流层	0.2%

（2）直流电-微波转换器（波形磁控管） 直流电-微波转换器由定子、转子及永久磁铁组成，永久磁铁在纸面和垂直方向建立磁场，转子中输入直流电，转子在磁力推动下转动，合成磁场通过喇叭天线边转动边增幅发送出去。图14-12 为直流电-微波转换器。

3. 发射天线

有两种发射天线可供选择：

特制的石墨天线板。圆形板，既可作天线，又可当散热板。该材料在100～300℃时，

热传导率比铜高 2 倍，密度却为铜的 1/2.5，是理想的散热材料。

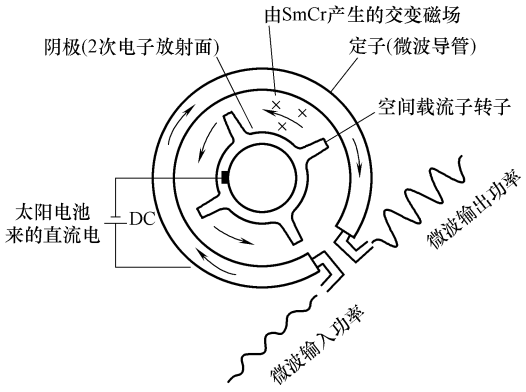


图 14-12　直流电-微波转换器

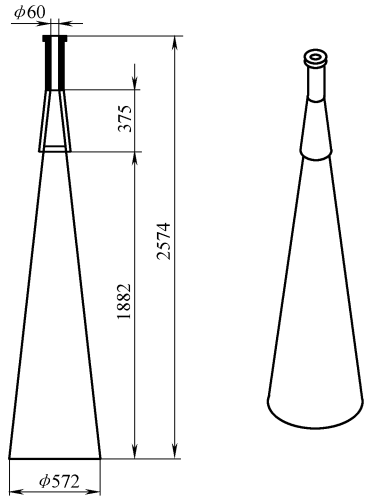


图 14-13　喇叭天线

喇叭天线。喇叭天线是使用最广泛的一类微波天线，喇叭天线的基本形式是把圆波导管或矩形波导管的开口面逐渐扩展而成，称为喇叭，是一种面天线。图 14-13 为喇叭天线。波导管开口面是逐渐扩大的，改善了波导与自由空间的匹配，使得波导中的反射系数小，即波导中传输的绝大部分能量由喇叭辐射出去，反射的能量很小。喇叭天线结构简单和方向图易于控制，最常见的是用作反射面的馈源：大型射电望远镜的馈源，卫星地面站的反射面天线馈源，喇叭—抛物反射面天线具有频带宽、副瓣低和效率高等特性，常用于微波中继通信；相控阵的单元天线；在天线测量中，喇叭天线常用作对其他高增益天线进行校准和增益测试的通用标准等。当它用作独立天线时，一般都加上校正相位的反射面或透镜，而透镜因其重量较重和结构复杂等原因，已很少用作喇叭的相位校正。

（1）喇叭天线分类

1）圆波导馈电的喇叭一般是圆锥喇叭。

2）矩形波导馈电的喇叭根据扩展的形式不同分为三种喇叭，即 E 面扇形喇叭（扩展其窄边形成）；H 面扇形喇叭（扩展其宽边形成）；和角锥喇叭（其宽边、窄边均扩展而形成）。

3）TEM 喇叭。

4）脊波导喇叭等。

（2）喇叭天线的分析方法

1）解内问题：求口径面上的电磁场分布。

喇叭的渐变扩展部分也可看做是波导，与分析波导中场分布时把波导看做无限长波导一样，首先也是把喇叭看做一无限长渐变波导，由麦氏方程出发，求边值问题。用分离变量法求解喇叭渐变波导中的电磁场表示，然后把实际的有限长喇叭口面上的电磁场，看做无限长喇叭在同一截面上的电磁场。这样的近似，忽略了喇叭口面所产生的反射波及高次模，这将带来一定的误差。但是，喇叭口的反射系数不大，而高次模又相对较弱，在工程上，这点误

差可忽略。口面场则由喇叭的口面尺寸与传播波型所决定。可用几何绕射理论计算喇叭壁对辐射的影响，从而使计算方向图与实测值在直到远旁瓣处都能较好地吻合。它的辐射特性由口面的尺寸与场分布决定，而阻抗由喇叭的颈部（始端不连续处）和口面的反射决定。当喇叭长度一定时，若使喇叭张角逐渐增大，则口面尺寸与二次方相位差也同时加大，但增益并不和口面尺寸同步增加，而有一个其增益为最大值的口面尺寸，具有这样尺寸的喇叭就叫做最佳喇叭。

2）解外问题：由喇叭口径面上的场分布求远场。

圆锥喇叭和角锥喇叭传播的是球面波，而在一个面（E 或 H 面）张开的扇形喇叭中传播的则是柱面波。喇叭口面场是具有二次方相位差的场，二次方相位差的大小与喇叭的长度和口面大小有关。

为了扩展喇叭的频带，必须减小喇叭颈处与口面处的反射。口面尺寸加大，则反射减小。此外，把波导与喇叭的过渡段尽量做得平滑些，也可以减小该处的反射。由于该位置附近的喇叭尺寸还很小，因此，不能传播高次模，一般都传输单模。为了控制辐射方向图，有时口面上需要多模场分布，这时应在喇叭内适当位置引入能产生高次模的器件。这种喇叭叫做多模喇叭，可用作单脉冲雷达或高效率天线馈源。由于各模在喇叭内的相速不同，多模喇叭的频带比常规喇叭的要窄。

（3）天线及结构件　一组重 10kg，20000t。

4. 电缆

高导母线，105kg/km。一组 30m，60000000m，6300t。

（二）运输

根据太空的工作环境及运输量，确定具体的太空运输工具。我国已具备地球同步轨道的运输能力。表 14-8 为 10GW 太空光伏电站太空部分重量。

表 14-8　10GW 太空光伏电站太空部分重量

项目	规格	数量	单重/kg	总重/t
电池板(10GW)	铜铟镓硒(CIGS),120W,	83340000 块	0.084	6993
磁控管组件构成	5kW 一组	2000000 组	15	30000
天线及结构件		2000000 组	10	20000
连接线	高导母线	60000000m	0.105	6300
小计				63293

（三）电池板的安装

太空中电池板安装是在失重状态下，面积大，10GW 电池板总面积为 67.2km^2，8km × 8.4 km。人工安装难度较大，时间长，因此要用自动放板机械进行安装，自动送出、展开、定位、接线。

太空垃圾会碰撞电池板，星际灰尘会粘在电池板上，对于无人值守的太空电站是一个破坏，要有预防的措施。

（四）太空电力的接收

1）电池板与发射系统组成一个 10GW 光伏电站卫星，与地球同步运动，地面设置一个接收点，接收点面积为 25km^2，发射系统发射出 23kW/m^2 电力密度，地面接收点的电力密度见表 14-9。

表 14-9　地面接收点的电力密度

距中心距离	电力密度/(mW/cm²)
中心点	23
3km	10
1km	1

在太空中发射的电力密度虽然大，但地面周边的电力密度却很低，在人畜安全指标内(美国定为 10mW/cm²)。发射和接收二者要协调，太空中的定向发射装置如操作不当或设置不妥，都会影响输电效率，甚至会使地面接收不到全部电力，因此，要使太阳电池阵始终对太阳定向，发射天线的微波束指向地面的接收天线，由反馈系统确认位置无误，再发出电力输出指令。

2）接收天线。接收天线由对称振子和二极管组合而成。图 14-14 为接收天线。对称振子产生高频电流，二极管用于检波用。接收后可直接将微波转为直流电引出。该天线无需冷却，也没有污染。如将网孔的大小设计到适当的尺寸，可完全阻断微波射线，保证天线下面充分安全。适当的网孔尺寸要多次试验才能确定。

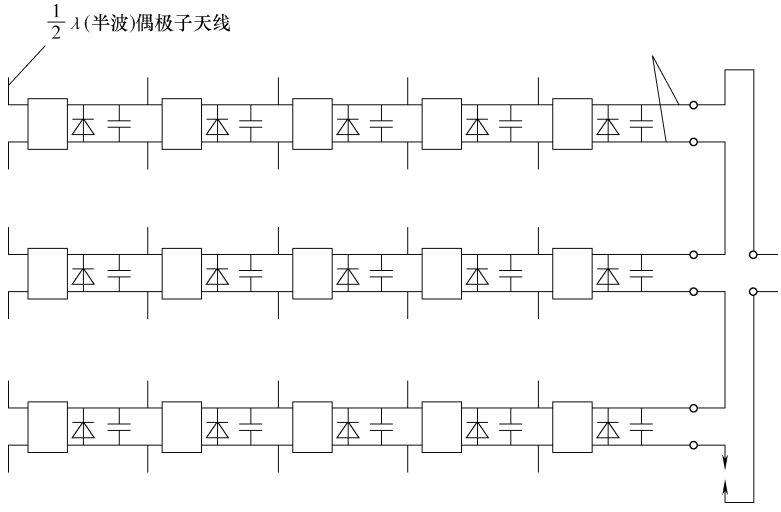


图 14-14　接收天线

大功率的微波能量传输需要天线阵来实现，因为单个天线只能整流几瓦的能量。对通常的相控阵（phased array）天线，天线互联和相位分配是个问题。硅整流二极管天线阵的问题不同，因为它们是通过直流电的相位而非微波相位来连接的。

当串联或并联两个硅整流二极管天线时，它们不会在其最佳输出功率下工作，且功率之和要小于各自单独运行的功率和。这是由射频-直流电的转换效率特性决定的。理论和实验已证明串联天线的总功率衰减要大于并联天线的总功率衰减。

太空电站需要直径超过千米的硅整流二极管天线阵，而目前的实验项目不多。东京大学开发了由 2304 个单元组成的 3.54m×3.2m 的天线阵用于地对地实验。另一个是神户大学和通信研究院开发的 2.7m×3.4m 天线阵用于无燃料飞船的试验研究。这些项目与太空电站需要的天线阵还有很大距离。大规模硅整流二极管天线阵需进一步研究。

3）由于发射器与接收器之间有相对移动，准确识别接收器以及高效的形成波束是非常重要的。太空功率传输需要应用逆向反射系统。角形发射器是最常见的逆向反射系统，它由相互垂直顶点相接的金属薄片组成，入射信号与原方向相反被反射回。范阿塔天线阵同样也是基本的逆向反射系统，该天线阵由与阵列几何中心对称且由同样长度传输线连接的多对天线组成，工作时，阵列中每一对天线单元的一个天线单元（1、2）接收的信号被与它成对的另外一个天线单位（1'、2'）再辐射出去。通常阵元数为偶数。图 14-15 为四单元范阿塔天线阵。

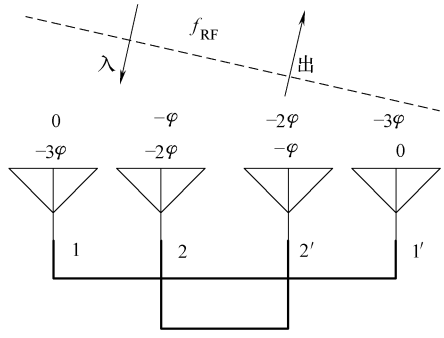


图 14-15　四单元范阿塔天线阵

逆向反射实现的条件是相位共轭，即阵列的每个端口接收的相位和发射的相位共轭。范阿塔天线阵之所以具有逆向反射功能，主要是因为其互为成对的阵元，使其空间位置对称而满足广义相位共轭。

目标的信号被接收再以共轭相位沿反方向发射信号，目标的信号称为先导信号，通常使用振荡器发射频率为先导信号两倍的本机振荡信号作为返回信号，准确度取决于先导信号与返回信号频率的稳定。

逆向反射系统通过相位共轭回路、同一目标识别与波束形成。有些方法将对先导信号的识别与波束形成分开，即软件逆向反射，利用计算机对先导信号的相位信息进行计算，得到天线阵列的最佳相位及振幅分布，利用软件逆向反射可以自由形成波束，但所有天线需要变相器。目标识别之后需要形成精确的波束，算法很多，如神经网络法、遗传算法、多目标优化等。对形成的波束有多种要求，如抑制旁瓣等级、提高波束的接收效率、生成多个功率的波束等。无论波束是靠软件还是共轭回路形成，波束相位和频率的标准对于控制微波束瞄准目标区域非常重要，信号（比如本机振荡信号）的相位和频率的标准不同，则无法形成对指定区域的微波束。对于范围超过公里，由数以亿计的同一相位阵列，最好使用一种本机振荡器，但是实际上很难做到。更好的办法是将振荡器分组组成子相阵列，使它们彼此同步。该方法已有一些尝试，如无线同步。目前的精度频率可低于 0.6×10^{-6}，相位差在 3.5° 以内。

（五）太空电力的地面传送

太空电力的地面传送系统由汇流箱、直流柜、电缆、逆变器、交流柜、变压器及架空线等构成。太空电力必须要并入电网才能发挥效益，接受地点的选址很重要。一是周边无人居住，二是已建有足够大的智能网站，可将电力送往终端用户。青海格尔木市已具备该条件，有 18 万 km^2 的沙漠地，建有 750kV 的高压变电站。

二、太空电站建设需要解决的问题

太空电站的环境特殊，需要考虑以下问题：

1）太空垃圾会对电池板造成破坏。

2）运输成本大。

就世界范围来说，我国长征号飞船运费最便宜，但运到同步轨道（35800km）上，也要 11538 美元/kg（2009 年价）。

3）接收站不在赤道线上。

太空接收电站最佳设置在赤道线上，接收站不在赤道线上，将增加技术上的难度。

4）电站上需带有小型推进器。

太阳和月球重力作用、太阳光压和地球偏心率等因素会造成太空光伏电站卫星轨道漂移，小型推进器可及时修正漂移量。

5）太空光伏电站绕地球运动时，每年有一小段时间被地球遮挡住阳光。

太空光伏电站设置在地球同步轨道上，每年有277天是全日照，但春分、秋分前后各有45天时间，电池板会被地球遮住阳光，出现地球阴影（亦称星蚀期）。在这90天里，地球阴影每天有75min左右，最长不超过75min，该时间是可以预测的。因此太空光伏电站平均每天满负荷发电时间为23.76h。

三、太空电站建设条件

1）合适的运输工具。

一年内完成太空电站物资的运输，要有新的运输工具，要采用新的推进技术。欧洲航天局及澳大利亚国立大学成功测试了一种离子发动机。该发动机性能上比现有的推进器大大提高，为空间推进技术迈出了重要一步。离子发动机通过使用电场加速推动带电粒子（或离子）实现推进。该发动机的效率是目前太空飞船动力的10倍。

2）太空行走技术成熟。

3）电池比功率达到2500W/kg以上。

四、太空电站效益及回收期

10GW太空电站建站时间为4～6年，一年发电量综合效率为60%，扣去四季变化减少的辐照量，一年可发电504亿kW·h（度），按0.62元/kW·h，年收入计312.5亿元，回收期20年。我国2009年用电36430亿kW·h，要建73座10GW太空电站才可满足全国电力需求。

第九节　世界太空电站建设现状

美国煤气电力公司于2011年3月宣布，他们将与加州的一家太阳能公司合作，在环绕地球的外空轨道上设立太阳电池板，然后将生成的电能转化为无线电波传送回地球，再由地面的电力储备站接收，转化为电能后供应给千家万户。他们打算在2016年提供20万kW电力，在15年内满足25万个家庭用电。他们先把太阳能卫星发射到距赤道约35400km的轨道上，并保持与地球位置相对不变，太阳能板宽度将达若干千米。系统在采集太阳能后将其转变为电，然后再转为无线电波返回到地球上。该项目需要花费约20亿美元，主要用于地球太阳能基地建设和发射卫星，远远高于同等规模项目所需的1亿～2亿美元。

日本航空宇宙开发中心也在研究，有望2030年启动太空电站建设。他们选择微波传送，微波比无线电波的波长短，并且只能直线传播。他们试图采用2.45GHz和5.8GHz的微波传送，这项技术日本已经应用于工业和医疗设备。在北海道的研究基地，日本科学家用直径2.4m的仪器装置进行了地面接收太空微波的实验。他们的最终目标是要建立一个约3km^{2}的地面接收站，生产100万kW的电力，供50万个家庭供电。高强度的辐射可能带来环境污染，但支持者认为，只要接收站面积足够大，就不会对人类及动植物构成伤害。因此地面接收站应选在人烟稀少、地域广阔的地方，并配套电力传输系统。

第十五章　智 能 电 网

进入21世纪以来，随着市场化的加深、数字化技术的不断发展、全球气候的不断恶化以及环境监测的日趋严格，电力网络与市场和用户的交互越来越多，对电能质量的要求越来越高，分布式发电数量不断增加，而传统电网由于自身特点的限制，难以支撑如此多的发展要求，各国纷纷调整能源政策，新一轮能源变革正在世界范围内蓬勃兴起，变革的方向是推动能源发展方式战略转型，进一步提高能效水平，调整能源结构，实施能源替代。全球能源格局正在发生重大而深刻的变化，这一轮世界能源变革的焦点是新能源，核心是电力，这就对电网提出了更高的要求。智能电网的提出，使人们能够在传统电网的基础上对其进行升级，推动电网的创新发展，以符合不断变化的要求。

第一节　智能电网的定义及特征

一、智能电网的定义

从世界能源发展的趋势看，呈现三个重要特征：第一，能源开发利用方式越来越清洁，生产、生活中的以电代油、以电代煤、以电代气越来越普遍，以电为中心的能源格局正在逐步形成。第二，电网配置能源的范围越来越广，超大规模、超远距离输电成为能源配置的新趋势。第三，能源系统的开放性、智能化水平越来越高，电网的功能、形态将发生深刻变化，正在从单纯的输电载体向配置能源、信息等各类资源的综合平台转变。由此，提出了智能电网的概念。智能电网的基本思想是，拓展对电网全景信息（指完整的、正确的、具有精确时间断面的、标准化的电力流信息和业务流信息等）的获取能力，以坚强、可靠、通畅的实体电网架构和信息交互平台为基础，以服务生产全过程为需求，整合系统各种实时生产和运营信息，通过加强对电网业务流实时动态的分析、诊断和优化，为电网运行和管理人员提供更为全面、完整和精细的电网运营状态图，并给出相应的辅助决策支持，以及控制实施方案和应对预案，最大程度地实现更为精细、准确、及时、绩优的电网运行和管理。

目前对智能电网（SmartGrid，IntelliGrid 或 ModernGrid）没有公认的统一定义，智能电网的实现形式可以多种多样，规模可大可小。世界各国的智能电网并非千篇一律，我国各地也需要因地制宜，提出适合自己的智能电网发展策略。从技术发展和应用的角度看，世界各国、各领域的专家、学者普遍认同以下观点：智能电网是将先进的传感测量技术、信息通信技术、分析决策技术、自动控制技术和能源电力技术相结合，并与电网基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。智能电网的最终目标是：实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标，实现能源，包括可再生能源的规模化高效利用，实现经济、环境和社会效益的最大化。

中国国家电网公司（简称国电）成立于2002年12月，是全球最大的公用事业企业。综合国内外情况，国电给出我国智能电网的定义：“智能电网是以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，具有信息化、自动化、互动

化特征，包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度六个环节，覆盖所有电压等级，实现电力流、信息流、业务流的高度一体化融合的、坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网”。

二、我国智能电网的特征

1）坚强。具有坚强的电网基础体系和技术支撑体系，能够抵御各类外部干扰和攻击，经受物理的和网络的攻击而不会出现大面积停电或者不会付出高昂的恢复费用；在电网发生人为或自然大扰动和故障时，能够做出辨识与反应，保证人身、设备、电网、电力信息安全；能够同时承受对电力系统几个部分的攻击和在一段时间内多重协调的攻击。坚强功能的实现主要通过智能电网的科学设计、运行，以及电力企业与政府之间就重大威胁信息的密切沟通来实现。

2）自愈。这是智能电网最重要的特征。“自愈”指的是把电网中有问题的元件从系统中隔离出来，并且在很少或不用人为干预的情况下可以使系统迅速恢复到正常运行状态，从而几乎不中断对用户的供电服务。信息技术、传感器技术、自动控制技术与电网基础设施有机融合，可获取电网的全景信息，及时发现、预见可能发生的故障。故障发生时，电网可以快速隔离故障，实现自我恢复，从而避免大面积停电的发生。从本质上讲，自愈就是智能电网的“免疫系统”。自愈电网确保了电网的可靠性、安全性、电能质量和效率。自愈电网经常应用连接多个电源的网络设计方式。当出现故障或发生其他问题时，在电网设备中的先进传感器确定故障，并和附近的设备进行通信，以切除故障元件或将用户迅速地切换到另外的可靠电源上。

3）兼容。电网可以容纳包含多种不同类型电源甚至是储能装置。支持可再生能源的有序、合理接入，适应分布式电源和微电网的接入。

4）经济。支持电力市场运营和电力交易的有效开展，实现资源的优化配置，降低电网损耗，提高能源利用效率，运行在供求平衡的基本规律之下，价格公平且供应充足。智能电网利用投资，控制成本，减少电力输送和分配的损耗，电力生产和资产利用更加高效。通过控制潮流的方法，减少输送功率拥堵和允许低成本的电源包括可再生能源的接入。电力市场与批发电力市场甚至是零售电力市场实现无缝衔接，有效的市场设计可以提高电力系统的规划、运行和可靠性管理水平，电力系统管理能力的提升促进电力市场竞争效率的提高。引入最先进的信息和监控技术优化设备及资源的使用效益，可以提高单个资产的利用效率，从整体上实现网络运行和扩容的优化，降低它的运行维护成本和投资。优化资源配置，提高设备传输容量和利用率；在不同区域间进行及时调度，平衡电力供应缺口；支持电力市场竞争的要求，实行动态的浮动电价制度，实现整个电力系统优化运行。通信、信息和现代管理技术的综合运用，将大大提高电力设备使用效率，降低电能损耗，使电网运行更加经济和高效。

5）集成。实现电网信息的高度集成和共享，采用统一的平台和模型，实现标准化、规范化和精益化管理。实现包括监视、控制、维护、能量管理（EMS）、配电管理（DMS）、市场运营（MOS）、企业资源规划（ERP）等和其他各类信息系统之间的综合集成，并实现在此基础上的业务集成。实现实时和非实时信息的高度集成、共享与利用，为运行管理展示全面、完整和精细的电网运营状态图，同时能够提供相应的辅助决策支持、控制实施方案和应对预案。

6）交互。智能电网中的交互包含两层含义：①发电与电网之间的互动；②电网与用户

之间的互动。电网为发电商提供透明公开的电价信息，发电商之间通过报价竞标参与博弈。同样的道理，用户也通过透明公开的电价信息决定用电量和自有分布式电源的使用情况，通过电力市场参与者之间的互动，实现社会效益最大化。

7）优质。在数字化、高科技占主导的经济模式下，电力用户的电能质量能够得到有效保障，实现电能质量的差别定价。简化的信息展示可将大量数据压缩成易懂的模式，包括着色和动画技术、信息的快速刷新、声音识别、触摸屏、全息视频、电子地图墙、“仪表盘”展示等技术，将在智能电网的分析决策方面发挥重要作用。

8）分布。智能电网中将广泛采用具有分布式智能功能的分析和控制装置或工具，实现优化分析与控制、安全分析与控制等功能。分析和控制装置具有地理分布性、功能分散化等特征。在这些分布式装置和工具的支撑下，作为分布式复杂大系统的智能电网，其建设的成本效益问题、系统的演进与设计问题就都被提了出来。

三、重要特征

1. 智能电网的坚强特征

坚强的内涵是指具有坚强的网架结构、强大的电力输送能力和安全可靠的电力供应。坚强的网架结构是保障安全可靠电力供应的基础和前提；强大的电力输送能力是与电力需求快速增长相适应的发展要求，是坚强的重要内容；安全可靠的电力供应是经济发展和社会稳定的前提和基础，是电网坚强内涵的具体体现。以坚强为基础来发展智能电网，可以提高电网防御多重故障、防止外力破坏和防灾抗灾的能力，能够增强电网供电的安全可靠性；可以提高电网对新能源的接纳能力，推动分布式和大规模新能源的跨越式发展；可以提高电网更大范围的能源资源优化配置能力，可充分发挥其在能源综合运输体系中的重要作用。

随着我国国民经济的持续快速发展和人民生活水平的不断提高，电力需求较快增长的趋势在较长时间内不会改变，同时，我国能源与生产力布局呈逆向分布，能源运输形势长期紧张。我国电网发展相对滞后，在能源综合运输体系中的作用还不明显。这些在客观上要求加快转变电力发展方式，提升电网大范围优化配置能源的能力。建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网才能满足这一要求。特高压输电具有远距离、大容量、低损耗、高效率的优势，建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网，能够促进大煤电、大水电、大核电、大型可再生能源基地的集约化开发利用。同时，特高压电网可以提升电网抵御突发性事件和严重故障的能力，进一步提高电力系统运行的可靠性和稳定性，使坚强智能电网建设具备坚实的网架基础。因此，在坚强智能电网建设中，必须以特高压电网为骨干网架，连接大型能源基地及主要负荷中心。

坚强智能电网的发展，使得电网功能逐步扩展到促进能源资源优化配置、保障电力系统安全稳定运行、提供多元开放的电力服务、推动战略性新兴产业发展等多个方面。作为我国重要的能源输送和配置平台，坚强智能电网从投资建设到生产运营的全过程都将为国民经济发展、能源生产和利用、环境保护等方面带来巨大效益。

坚强智能电网对于电力系统的意义有以下几点：

1）能有效地提高电力系统的安全性和供电可靠性。

2）可以促进电网技术创新，实现技术、设备、运行和管理等各个方面的提升，以适应电力市场需求，推动电网科学可持续发展。

3）减少有效装机容量。利用我国不同地区电力负荷特性差异大的特点，通过智能化的

统一调度，获得错峰和调峰等联网效益；同时通过分时电价机制，引导用户低谷用电，减小高峰负荷，从而减少有效装机容量。

4）降低系统发电燃料费用。建设坚强智能电网，可以满足煤电基地的集约化开发，优化我国电源布局，从而降低燃料运输成本；同时，通过降低负荷峰谷差，可提高火电机组使用效率，降低煤耗，减少发电成本。

5）提高电网设备利用效率。首先，通过改善电力负荷曲线，降低峰谷差，提高电网设备利用效率；其次，通过发挥自我诊断能力，延长电网基础设施寿命。

6）降低线损。以特高压输电技术为重要基础的坚强智能电网，将大大降低电能输送中的损失率；智能调度系统、灵活输电技术以及与用户的实时双向交互，都可以优化潮流分布，减少线损；同时，分布式电源的建设与应用，也减少了电力远距离传输的网损。

2. 智能电网的交互特征

用户将是电力系统不可分割的一部分，鼓励和促进用户参与电力系统的运行和管理是智能电网的另一重要特征。

1）建立双向互动的服务模式，用户可以实时了解供电能力、电能质量、电价状况和停电信息，合理安排电器使用；电力企业可以获取用户的详细用电信息，为其提供更多的增值服务；智能电网中用户和商家（发电厂商、供电公司等）之间双向互动性增强。

2）用户可参与负荷控制和管理，对电力使用管理可细化到每个用电装置；用户也可自发电供给电网，成为个体发电厂商。

3）从智能电网的角度来看，用户的需求完全是另一种可管理的资源，它将有助于平衡供求关系，确保系统的可靠性；从用户的角度来看，电力消费是一种经济的选择，通过参与电网的运行和管理，修正其使用和购买电力的方式，从而获得实实在在的好处。用户将根据其电力需求和电力系统满足其需求能力的平衡来调整其消费。同时需求响应计划将满足用户在能源购买中有更多选择的基本需求，减少或转移高峰电力需求的能力使电力公司尽量减少资本开支和营运开支，通过降低线损和减少效率低下的调峰电厂的运营，同时也提供了大量的环境效益。

4）在智能电网中，和用户建立的双向实时通信系统是实现鼓励和促进用户积极参与电力系统运行和管理的基础。实时通知用户其电力消费的成本、实时电价、电网目前的状况、计划停电信息以及其他一些服务的信息，同时用户也可以根据这些信息制定自己的电力使用方案。如果说信息化、数字化和自动化是实现智能电网的手段，那么，互动化则可以称为智能电网的目的和本质要求。

5）电力工业市场化改革使得发电与电网之间的互动成为可能。早在1998年，国务院办公厅发文，首次正式明确要求电力工业实行“厂网分开、竞价上网”，并确定6省（市）电网为首批试点单位。2002年2月国务院颁布《电力体制改革方案》（国发［2002］5号文），标志着我国电力市场改革的开始。国家电力监管委员会、国家电网公司、南方电网公司及五大发电集团公司相继挂牌成立。电力市场有三种交易方式，即现货交易、期货交易和远期合约交易。发电商通过博弈，合理地决定在各个市场中的投标发电量，实现发电与电网之间的互动。发电侧开放和用户侧开放，是电力市场化改革的两个方面，缺一不可。2005年颁布《中华人民共和国可再生能源法》之后，不仅大型并网风电场和光伏电站得到快速发展，而且与新能源密切相关的分布式发电也得到迅速发展，如光伏建筑一体化（BIPV）等。可见，

在可再生能源发电快速发展的新市场环境下，将赋予智能电网互动化新的内涵：

① 在《节能发电调度办法（试行）》的约束下，发电商之间的博弈与互动呈现新的格局。

② 用户侧同时拥有可并网的分布式发电设备，可以根据信息平台的实时电价信息，积极地参与到电力供需平衡中。

四、智能电网成本效益分析

智能电网作为以政府、电力企业投资为主的大型建设项目，建设投资大、周期长、社会影响面广，根据美国 EPRI 的初步估计，美国发展智能电网未来 20 年的投资需求为 1650 亿美元，而社会收益为 6380 亿～8020 亿美元，智能电网投资收益率为 4 左右，这还是比较保守的估计。目前国内外比较公认的看法是，投资明显强于不投资。智能电网建设的原始推动力之一就是如果不投资建设，其成本和花费会随着时间的推移越来越高，这方面的成本包括：停电的直接和间接损失、电能可靠性低的损失、电能质量不合格的损失、电网阻塞的成本、可再生能源不能大规模接入的损失等。国外已就停电损失费用问题进行了大量分析，国内在这方面还缺少系统的分析和研究。分析如何以最小的成本获得最大的收益问题，也就是对不同投资建设方案进行评估的问题。经济性是最早被人们关注也是较容易计算的评估指标，环境和社会效益则较难衡量。而智能电网实施的环境和社会效益却相当可观。例如，智能电网实施目的之一就是方便分布式能源的接入，实现能源，包括可再生能源的规模化高效利用。分布式能源利用具有环境友好、排放少甚至零排放等优点，它们对环境保护和节能减排的贡献可以通过合理设计环境效益指标反映出来。这就要求在制定智能电网规划时，要计算经济、环境和社会三个方面的收益，进行全面的成本效益分析，要充分考虑智能电网所带来的好的外部性，而不仅仅算经济账，才会更有动力制定鼓励智能电网发展的政策和法规，推动智能电网发展。

五、智能电网技术创新、技术转移与技术能力建设

无论是从发展智能电网的角度看，还是从建设创新型国家的高度看，都离不开技术的创新。智能电网本身就是多种新技术的综合体现，为各种新技术提供了非常广阔的市场应用场景。技术创新的方式分为原始创新、集成创新及引进消化吸收再创新三种。原始创新是通过理论创新、原理创新、方法创新实现的；集成创新是将若干独立要素和单元通过创造性的融合，集合在一起成为一个有机功能体；引进消化吸收再创新则是在引进、消化、吸收国内外先进技术基础上的创新。技术创新往往从引进消化吸收再创新开始，然后发展到集成创新，再到原始创新。发展智能电网不能闭门造车，不能一味为了自主研发就拒绝国外先进技术。在初期阶段，应通过多种形式的技术转移途径，广泛学习借鉴国外先进技术和经验。国际技术转移模式根据不同的分类标准可以从不同角度进行分类。一类是以国际技术转移是否以市场为媒介，将技术转移模式分为以市场为媒介技术转移模式和非市场媒介的技术转移模式。如果将常见的国际技术转移模式按照对市场的依赖程度逐渐递减的方式排列，则依次为外商直接投资（FDI）、许可证、合资企业、授予特权、市场合同、技术服务合同、交钥匙合同、国际分包和非传统的转移渠道，如反向工程、反向的人才流动等。另一类是根据国际技术转移是否把转移技术作为明确目标而分为正式技术转移模式和非正式技术转移模式。如果将常见的国际技术转移模式按照是否把技术作为明确的转移目标进行排列的话，像 FDI、许可证、合资企业、授予市场特权、市场合同、技术服务合同、交钥匙合同、国际分包等都属于

正式的技术转移模式，而反向工程、反向的人才流动、合作联盟和其他的非产权联系则被称为非正式技术转移模式。过去在国际技术转移过程中，人们比较偏爱以市场为媒介的正式的技术转移模式。由于技术主要由意会性知识构成，技术转移的困难也在于如何转移意会性知识，学习掌握意会性知识是掌握技术的关键，而非市场媒介和非正式技术转移方式不仅转移技术本身，还转移如何对技术进行再创新的能力，因此，非正式和非市场媒介的技术转移模式在当今技术发展形式下越来越受到重视。发展智能电网，正确处理技术引进与自主创新的关系十分重要，既不能出于狭隘的保护主义而拒绝国外的先进技术，因为这样反而对自主创新能力的提高有害，使国内技术和产品的成本居高不下，造成资源浪费和分配不公；也不能一味引进国外成套技术，尤其不能搞大规模批量引进，使国内市场被国外技术完全占据，堵塞了国内技术发展的机会。应该鼓励合作研发，鼓励采用非市场媒介和非正式技术转移方式，在引进消化吸收的基础上，注重技术创新能力建设，提高对引进技术进行再创新的能力，实现从跟踪者到领先者的跨越。

第二节　智能电网的建设

1. 产学研结合

建立智能电网初期要产学研合作，该体系对智能电网技术的快速发展非常关键。所谓产学研合作体系，就是由官、产、学、研、中介、金融六个部分构成，由产业界启动，以学术界研究与开发为起点，在政府、中介、金融机构等的支持下，经过产业界成功的市场实践而形成的产学两界合作交流的创新体系。智能电网技术的发展应该立足在这种立体化的产学研合作网络中，由企业主导技术转化和生产销售，高校和研究机构进行技术创新和人才培养，政府提供政策和法律支撑，中介组织沟通信息、搭建合作网络，金融机构负责资金筹集和运转，六方围绕科技创新有机结合，相互影响，相互促进，在市场机制下形成一个知识的消化、生产、转移和价值再造的动态链条，将学习与研究、研究与产业化紧密结合，从而大大缩短由知识到技术再到产品的周期，推动智能电网技术的快速应用和发展。在这里特别强调重视大学等科研机构在其中所起的作用。因为以大学为代表的学术界提供了新思想、新方法、新概念的源泉，原始性的创新主要依赖他们来完成。与大学的紧密合作可以弥补企业创新研发能力的不足。

2. 智能电网的效率与电力体制改革

智能电网不可避免地会遇到效率和制度安排的问题。电力市场化改革是智能电网活力和效率的重要制度保障。智能电网运行得是否有效率，与市场化的体制建立密切相关。竞争性市场过程通常具有较高的效率。在放松管制、促进竞争的电力市场条件下，智能电网的效率才有保障。市场也会存在无效率的情况。这需要通过政策、法规、组织（如电力监管委员会等）或政府干预的手段进行规范和调节。

3. 演进与设计

智能电网作为复杂大系统，不是一蹴而就，也不是一成不变的。随着社会发展和需求的提高，以及创新的不断涌现，智能电网将不断演进和发展。在经济学中用“新奇”这一概念来表达新的行动可能性的发现，它是人类创新性的结果。由于不可能充分预见到新奇的创生，因而行为者也就无法采取最优的行为。智能电网的最优方案或最优性能也是不能完全预

见和实现的，很可能有些预期的新技术没有实现，而没有预期到的新技术却悄然出现了，所以智能电网建设的过程只能是一个依据经验不断发展乃至试错的过程，以满意度作为考察的量化指标更为合适。我国智能电网可以分层分级实现：

1）以解决能源资源分布和经济发展不均衡、提高电网输送能力、实现远距离大容量输电为目的的智能特高压输电网为第 1 个层次。在该层次，应该加强统一协调和统一规划，以利于形成统一调度运行的统一或联合电网。

2）以提高安全性和解决大规模可再生能源接入为目的的智能高压大电网为第 2 个层次。在该层次，也由电网公司统一规划和推动实施，其优点是，实施阻力小，交易成本（谈判成本）低，便于统一调度。

3）以提高供电质量和可靠性、解决分布式能源、经济学视角思考分散化、小容量、多数量接入为目的的智能配电网为第 3 个层次。在该层次，可以多开展一些体现多元化和多样性的智能电网建设试点，包括微网技术的示范等，多吸引社会力量的参与，引入市场化机制，鼓励开展有序竞争，在对涌现出的各种新方案通过实践检验并进行科学比较论证的基础上，逐步规范化和给出推广建议。

4. 信息化建设

我国电力工业信息化可以追溯到 20 世纪 60 年代。初期只是电子计算机应用起步阶段，主要应用在电力实验计算、工程设计与计算、科研计算、发电厂设备自动监测、变电站自动监测等方面；20 世纪 80 年代以后，信息技术、计算机技术在电力工程领域得到广泛应用，如电网调度自动化、发电厂生产自动化控制系统、电力负荷预测与控制、计算机辅助设计、计算机仿真系统等，各电力企业信息技术的应用由操作层向管理层延伸，从单机、单项目向网络化、整体性、综合性应用发展，从局部应用发展到全局应用，从单机运行发展到网络化运行；在“十一五”期间，电力信息化建设已纳入企业总体发展战略，信息化进一步与电力企业的生产、管理与经营融合。

电力信息化的成果主要体现在：

1）电力通信硬件设施的不断完善。电力通信的传输方式从 20 世纪 70 年代的电力线载波、80 年代的模拟微波、90 年代的数字微波，到今天以光纤和数字微波为主，卫星、电力载波、电缆、无线等多种通信方式并存，通信范围已基本覆盖了全国，电力专用通信网已初具规模。

2）电力工业软件系统不断升级。电力信息化可分为两大类：一是电力生产控制，如数据采集与监控（SCADA）系统、分散控制系统（DCS）、配电管理系统（DMS）、能量管理系统（EMS）、相量测量单元/广域测量系统（PMU/WAMS）；二是电力企业管理，如管理信息系统（MIS）、企业资源规划（ERP）、企业资产管理（EAM）、自动作图/设备管理/地理信息系统（AM/FM/GIS）、电能计量（TMR）、电力营销系统等。

3）进入“十一五”之后，国家电网公司开始实施“SG186”信息化工程，这是电力信息化建设新时期的标志性事件。许多示范工程成果已经纷纷上线，如华东电网企业级信息系统项目、华北电网企业级信息技术集成平台项目、西北电网 ERP 项目、上海电力“SG186”示范工程等。

5. 数字化建设

1998 年 1 月 31 日，美国前副总统戈尔在加利福尼亚科学中心讲演时首次提出了“数字

地球”的理念。随后，各个行业也纷纷提出自己的数字化理念，如“数字城市”、“数字水利”、“数字电网”等。2000年，卢强院士在国内首次提出了“数字电力系统（Digital Power Systems，DPS）”的概念。文献将DPS定义为：“它是某一实际运行的电力系统的物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况、科教活动等数字地、形象化地、实时地描述与再现。”可见，电力系统数字化涵盖系统运行、企业管理、外部环境等所有方面，实现对研究对象的实时描述与再现两个方面的功能。“数字南方电网”有两层含义，即数字化南方电网和智能化南方电网。其中数字化阶段的目标是实现管理、安全、运行等信息的获取、传递和使用的数字化；而智能化阶段的目标则是在数字化的基础上，实现全局性智能决策以及智能决策的自动分解、执行。

综上可见，数字化包括两个方面的工作：

1）对系统状态、企业管理、外部环境等信息的数字表示，这与信息化建设密切相关。

2）基于数字仿真的高级应用系统，这与自动化建设紧密联系。这也从一个侧面说明，智能电网的“四化”建设是一个有机的整体，相辅相成，互相促进。

目前，电力系统离线仿真软件都是电磁暂态与机电暂态分离，实时仿真主要还是依靠数模混合仿真系统。电力系统实时数字仿真器正得到越来越广泛的应用。电力系统仿真必然朝着全过程、超实时、全数字的方向发展。当前，调度侧基于SCADA、PMU/WAMS等数据采集传输系统开发了EMS、在线动态安全分析系统以及广域监测分析保护控制系统等高级应用系统。这些可以看做是数字化电网的初级阶段。

6. 自动化建设

传统电力系统自动化按照领域可划分为调度自动化、厂站自动化和配电自动化。

1）电网调度自动化系统发展迄今已经历3代：

① 20世纪70年代基于专用计算机和专用操作系统的SCADA系统可以称为第1代。

② 20世纪80年代基于通用计算机的EMS称为第2代。

③ 20世纪90年代基于RISC/UNIX的开放式分布式EMS/DMS称为第3代。

随着计算机和网络技术的飞速发展，第4代自动化系统的基础条件如Internet技术、面向对象技术、数据库技术、Java技术、中间件技术、多代理技术、厂站自动化技术、安全防护技术、电力市场运营技术等已经具备，预计新一代自动化系统将于21世纪初诞生。

2）厂站自动化随着计算机、自动化、通信和网络技术的发展，大体经历了集中式、分层分布式和现场总线式三个发展阶段。

3）配电自动化的进程明显落后于世界先进水平。西方发达国家的配电自动化已经经历了三个阶段：

第1阶段是20世纪70年代实现重要线路故障自动隔离、自动抄表等。

第2阶段从20世纪80年代开始，进行了大量的配电自动化试点工作及馈线自动化、营业自动化、负荷控制的试点工作。

第3阶段从20世纪末开始，伴随计算机与网络通信技术发展以及电力工业市场化改革，以配电管理系统、配电自动化、用户自动化为主要内容的综合自动化成为配电网自动化的发展方向。

1999年原国家电力公司《配电系统自动化规划设计导则》正式对“配电系统自动化”的概念进行了定义。我国从20世纪90年代中后期开始了配电自动化的试点工作，目前基本

处于发达国家发展历程中的第 2 阶段。按照自动控制的功能可以将电力系统各项控制措施划分为“三道防线”。其中，第一道防线——快速可靠的继电保护，有效的预防性控制措施，确保电网在发生常见的单一故障时能稳定运行以及电网的正常供电；第二道防线——采用稳定控制装置及切机、切负荷等紧急控制措施，确保电网在发生概率较低的严重故障时能继续保持稳定运行；第三道防线——设置失步解列、频率及电压紧急控制装置，当电网遇到概率很低的多重严重事故而稳定破坏时，依靠这些装置防止事故扩大，防止大面积停电。随着电力系统越来越复杂，以及测量、通信技术的发展，“三道防线”正朝着在线、优化、协调、自适应和综合防御的方向发展。

决策支持技术将复杂的电力系统数据转化为系统运行人员一目了然的可理解的信息，因此动画技术、动态着色技术、虚拟现实技术以及其他数据展示技术用来帮助系统运行人员认识、分析和处理紧急问题。在许多情况下，系统运行人员做出决策的时间从小时缩短到分钟，甚至到秒，这样智能电网需要一个广阔的、无缝的、实时的应用系统、工具和培训，以使电网运行人员和管理者能够快速地做出决策。

第三节　智能电网的意义

1）提供满足 21 世纪用户需求的电能质量。

电能质量指标包括电压偏移、频率偏移、三相不平衡、谐波、闪变、电压骤降和突升等。由于用电设备的数字化，对电能质量越来越敏感，电能质量问题可以导致生产线的停产，造成重大损失，因此提供能满足 21 世纪用户需求的电能质量是智能电网的又一重要特征。但是电能质量问题又不是电力公司一家的问题，因此需要制定新的电能质量标准，对电能质量进行分级，因为并非所有的商业企业用户和居民用户都需要相同的电能质量。电能质量的分级可以从“标准”到“优质”，取决于消费者的需求，它将在一个合理的价格水平上平衡负载的敏感度与供电的电能质量。智能电网将以不同的价格水平提供不同等级的电能质量，以满足用户对不同电能质量水平的需求，同时将优质优价写入电力服务的合同中，减少来自输电和配电系统中的电能质量事件。

通过先进的控制方法监测电网的基本元件，从而快速诊断并准确地提出解决任何电能质量事件的方案。此外，智能电网的设计还要考虑减少由于闪电、开关涌流、线路故障和谐波源引起的电能质量的扰动，同时应用超导材料、储能以及改善电能质量的电力电子技术最新研究成果来解决电能质量的问题。另外，智能电网将采取技术和管理手段，使电网免受用户电子负荷变化对电能质量所造成的影响；通过监测和执行相关的标准，限制用户负荷产生的谐波电流注入电网。除此之外，智能电网将采用适当的滤波器，防止谐波污染送入电网，恶化电网的电能质量。

2）容许各种不同类型发电和储能系统的接入。

智能电网将安全、无缝地容许各种不同类型的发电和储能系统接入系统，简化联网的过程，类似于“即插即用”，这一特征对电网提出了严峻的挑战。改进的互联标准将使各种各样的发电和储能系统容易接入。从小到大各种不同容量的发电和储能在所有的电压等级上都可以互联，包括分布式电源，如光伏发电、风电、先进的电池系统、即插式混合动力汽车和燃料电池。商业用户安装自己的发电设备（包括高效热电联产装置）和电力储能设施将更

加容易和更加有利可图。在智能电网中，大型集中式发电厂包括环境友好型电源，如风电和大型太阳能电厂以及先进的核电厂将继续发挥重要的作用。加强输电系统的建设使这些大型电厂仍然能够远距离输送电力。同时各种各样的分布式电源的接入一方面减少对外来能源的依赖，另一方面提高供电可靠性和电能质量。

3）促使电力市场蓬勃发展。

在智能电网中，先进的设备和广泛的通信系统在每个时间段内支持市场的运作，并为市场参与者提供了充分的数据，因此电力市场的基础设施及其技术支持系统是电力市场蓬勃发展的关键因素。智能电网通过市场上供给和需求的互动，可以最有效地管理如能源、容量、容量变化率、潮流阻塞等参量，降低潮流阻塞，扩大市场，汇集更多的买家和卖家。用户通过实时报价来感受价格的增长，从而降低电力需求，推动成本更低的解决方案，并促进新技术的开发。新型洁净的能源产品也将给市场提供更多选择的机会。

4）优化其资产应用，使运行更加高效。

智能电网优化调整其电网资产的管理和运行，以实现用最低的成本提供所期望的功能。这并不意味着资产将被连续不断地用到极限，而是有效地管理需要什么资产以及何时需要，每个资产将和所有其他资产进行很好的整合，以最大限度地发挥其功能，同时降低成本。智能电网将应用最新技术来优化其资产的应用，例如，通过动态评估技术使资产发挥最佳的能力；通过连续不断地监测和评价其能力，使资产能够在更大的负荷下使用。

5）对于能源资源配置的意义。我国能源资源与能源需求呈逆向分布，80% 以上的煤炭、水能和风能资源分布在西部、北部地区，而 75% 以上的能源需求集中在东部、中部地区。能源资源与能源需求分布不平衡的基本国情，要求我国必须在全国范围内实行能源资源优化配置。建设坚强智能电网，为能源资源优化配置提供一个良好的平台。坚强智能电网建成后，将形成结构坚强的受端电网和送端电网，电力承载能力显著加强，形成“强交、强直”的特高压输电网络，实现大水电、大煤电、大核电、大规模可再生能源的跨区域、远距离、大容量、低损耗、高效率输送，显著提升电网大范围能源资源优化配置能力。

6）对于清洁能源发展的意义。目前，风能、太阳能等清洁能源的开发利用以生产电能的形式为主，建设坚强智能电网可以显著提高电网对清洁能源的接入、消纳和调节能力，有力推动清洁能源的发展。

① 智能电网应用先进的控制技术和储能技术，完善清洁能源发电并网的技术标准，提高了清洁能源接纳能力。

② 智能电网合理规划大规模清洁能源基地网架结构和送端电源结构，应用特高压、柔性输电等技术，满足了大规模清洁能源电力输送的要求。

③ 智能电网对大规模间歇性清洁能源进行合理、经济调度，提高了清洁能源生产运行的经济性。

④ 智能化的配用电设备，能够实现对分布式能源的接纳与协调控制，实现与用户的友好互动，使用户享受新能源电力带来的便利。

7）对于节能减排的意义：

① 支持清洁能源机组大规模入网，加快清洁能源发展，推动我国能源结构的优化调整。

② 引导用户合理安排用电时段，降低高峰负荷，稳定火电机组出力，降低发电煤耗。

③ 促进特高压、柔性输电、经济调度等先进技术的推广和应用，降低输电损失率，提

高电网运行经济性。

④ 实现电网与用户有效互动，推广智能用电技术，提高用电效率。

⑤ 推动电动汽车的大规模应用，促进低碳经济发展，实现减排效益。

8）给人们的生活带来的好处。智能电网的建设，将推动智能小区、智能城市的发展，提升人们的生活品质。

① 让生活更便捷。家庭智能用电系统既可以实现对空调、热水器等智能家电的实时控制和远程控制，又可以为电信网、互联网、广播电视网等提供接入服务，还能够通过智能电能表实现自动抄表和自动转账交费等功能。

② 让生活更低碳。智能电网可以接入小型家庭风力发电和屋顶光伏发电等装置，并推动电动汽车的大规模应用，从而提高清洁能源消费比重，减少城市污染。

③ 让生活更经济。智能电网可以促进电力用户角色转变，使其兼有用电和售电两重属性；能够为用户搭建一个家庭用电综合服务平台，帮助用户合理选择用电方式，节约用能，有效降低用能费用支出。

④ 日新月异的智能家电、智能家庭、智能建筑、智能社区、智能交通、电动汽车等的发展，都离不开智能电网的基础支撑。电力的智能化应用，将全面提升从发电、输配电到用电设施的整体效率，促进电力用户节能降耗。同时，通过实施电力光纤到户等智能电网工程，还可促使电网与电信网、广播电视网、互联网等有机融合，依托丰富的电网资源，构建开放式的公共网络服务平台，大幅度减少重复建设和投资，实现社会资源的综合利用与节约。

第四节　国内外智能电网的建设

21 世纪初智能电网在欧美的发展，为全世界电力工业在安全可靠、优质高效、绿色环保等方面开辟了新的发展空间。虽然国际上对智能电网的研究和应用还处于初期阶段，但美国、日本及欧洲一些国家已经在智能电网及其相关领域取得明显成果，电网智能化水平不断提高。

一、国外智能电网的建设

1. 美国

2001 年，智能电网概念的雏形已被提出。美国电力科学研究院（EPRI）提出了智能电网（IntelliGrid）技术并进行相关研究。

2005 年，美国一个工程师发明了一种技术，利用的是群体行为原理（Swarm），让大楼里的电器互相协调，减少大楼在用电高峰期的用电量。坎贝尔发明了一种无线控制器，与大楼的各个电器相连，并实现有效控制。例如，一台空调运转 15min，可以把室内温度维持在 24℃；而另外两台空调可能会在保证室内温度的前提下，停运 15min。这样，在不牺牲每个个体的前提下，整个大楼的节能目标便可以实现。这个技术赋予电器以智能，提高能源的利用效率。

2006 年中期，一家名叫“网点”（Grid Point）的公司开始出售一种用于监测家用电器耗电量的电子产品，可以通过互联网通信技术调整家用电器的用电量。这个电子产品可以看做智能电网中的一个基础设施。

2006 年，美国 IBM 公司曾与全球电力专业研究机构、电力企业合作开发了“智能电网”解决方案。这一方案被形象比喻为电力系统的“中枢神经系统”，电力公司可以通过使用传感器、计量表、数字控件和分析工具，自动监控电网、优化电网性能，防止断电，更快地恢复供电，消费者对电力使用的管理也可细化到每个联网的装置。这个可以看做智能电网最完整的一个解决方案，标志着智能电网概念的正式诞生。

2008 年美国科罗拉多州的波尔得（Boulder）已经成为了全美第一个智能电网城市，每户家庭都安装了智能电能表，人们可以很直观地了解当时的电价，从而把一些事情，比如洗衣服、烫衣服等安排在电价低的时间段。电能表还可以帮助人们优先使用风电和太阳能等清洁能源。同时，变电站可以收集到每家每户的用电情况，一旦有问题出现，可以重新配备电力。

2008 年 9 月，Google 与通用电气联合发表声明对外宣布，他们正在共同开发清洁能源业务，核心是为美国打造国家智能电网。美国电力科学研究院估计在美国实现智能电网需要在未来投资 2650 亿美元。而在未来的智能电网工程实现后，由于系统降低了能耗和阻塞，具有较高的能量效率、电能质量和供电可靠性，较低的系统运行和维护费用，较高的系统利用系数，较少的对发电和输配电的资产投入，较大的系统安全性、清洁的环境和较低的能量成本，其综合社会效益可达 6380 亿 ~ 8020 亿美元，投资收益率为 400% 。

2009 年 1 月 25 日美国白宫发布的《复苏计划尺度报告》宣布：将铺设或更新 3000miles（1mile = 1609. 344mm）输电线路，并为 4000 万美国家庭安装智能电能表。奥巴马总统将智能电网建设提到了国家发展战略的高度，奥巴马政府的经济刺激计划中，有大约 45 亿美元贷款用于智能电网投资和地区示范项目。智能电网技术将在未来几年内为美国直接创造出 28 万个新的就业机会。

2009 年 2 月 4 日，地中海岛国马耳他公布了和 IBM 达成的协议，双方同意建立一个“智能公用系统”，实现该国电网和供水系统数字化。IBM 及其合作伙伴将把马耳他 2 万个普通电能表换成互动式电能表，这样马耳他的电厂就能实时监控用电，并制定不同的电价来奖励节约用电的用户。这个工程造价高达 9100 万美元（合 7000 万欧元），其中包括在电网中建立一个传感器网络。这种传感器网络与输电线、各发电站以及其他的基础设施一起提供相关数据，让电厂能更有效地进行电力分配并检测到潜在问题。IBM 将会提供搜集分析数据的软件，帮助电厂发现机会，降低成本及碳密集型发电厂的排放量。

2009 年 2 月 10 日，美国 Google 表示已开始测试名为谷歌电能表（ Power Meter ）的用电监测软件。这是一个测试版在线仪表盘。美国 Google 2009 年 3 月 3 日向美国议会进言，要求在建设“智能电网（Smart Grid）”时采用非垄断性标准。

2. 欧洲

欧洲在 2005 年成立了 Smart Grids（智能电网）欧洲技术论坛，对欧洲的智能电网发展战略进行研讨。主要项目有 Dispower、CRISP 和 Microgrids。2006 年欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》强调智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。但这时候的智能电网是指输配电过程中的自动化技术。

英国、法国、意大利、瑞典均在积极规划推动智能电网，都在加快推动智能电网的应用和变革。

3. 日本

日本由于能源的供给多样化，风能、太阳能同时给电网输送能源，所以日本的智能电网能对天气实行 24h 预估和监控，最大限度地利用自然绿色能源，并且根据太阳能、风能、潮汐能以及实际的能源消耗情况来关闭、开启煤电或者燃油发电站。

4. 国外智能电网建设背景

国外发达国家的电力工业已步入成熟期，输电网架构变化很小，电网发展趋于平稳，电力需求趋于饱和，电力供应及冗余储备趋向平衡。由于各国的具体情况不同，其智能电网的建设动因和关注点也存在差异。美国主要关注电力网络基础架构的升级更新，最大限度地利用信息技术，实现系统智能对人工的替代。欧美国家所倡导的智能电网，更关注于分布式电源及客户端的接入、信息的获取与传输及其之上的高级功能与业务应用。欧美国家对智能电网的研究开展较早，且已经形成强大的研究群体。国外工业发达国家建设智能电网的驱动因素是，大力开发可再生能源、清洁能源，电力需求趋于饱和后提高供电可靠性和电能质量等。

5. 智能电网概念的发展

智能电网概念的发展有三个里程碑：

1）第一个就是 2006 年，美国 IBM 公司提出的“智能电网”解决方案。IBM 的智能电网主要是解决电网安全运行、提高可靠性等问题，从其在中国发布的《建设智能电网创新运营管理——中国电力发展的新思路》白皮书可以看出，解决方案主要包括以下几个方面：一是通过传感器连接资产和设备提高数字化程度；二是数据的整合体系和数据的收集体系；三是进行分析的能力，即依据已经掌握的数据进行相关分析，以优化运行和管理。该方案提供了一个大的框架，通过对电力生产、输送、零售各个环节的优化管理，为相关企业提高运行效率及可靠性、降低成本描绘了一个蓝图。这是 IBM 的一个市场推广策略。

2）第二个是奥巴马提出的能源计划，除了已公布的计划，美国还将着重集中对每年要耗费 1200 亿美元电路损耗和故障维修的电网系统进行升级换代，建立美国横跨四个时区的统一电网；发展智能电网产业，最大限度发挥美国国家电网的价值和效率，逐步实现美国太阳能、风能、地热能的统一入网管理。图 15-1 为新能源。全面推进分布式能源管理，创造世界上最高的能源使用效率。可以看出美国政府的智能电网有三个目的：一个是由于美国电网设备比较落后，亟需进行更新改造，提高电网运营的可靠性；二是通过智能电网建设将美国拉出金融危机的泥潭；三是提高能源利用效率。

3）第三个是 2009 年 2 月 2 日我国能源问题专家武建东在《全面推动互动电网革命拉动经济创新转型》的文章中，明确提出我国电网亟需实施“互动电网”革命性改造。武建东提出的“互动电网”，将智能电网的含义涵盖其中。互动电网定义为：在开放和互联的信息模式基础上，通过加载系统数字设备和升级电网网络管理系统，实现发电、输电、供电、用电、客户售电、电网分级调度、综合服务等电力产业全流程的智能化、信息化、分级化互动管理，是集合了产业革命、技术革命和管理革命的综合性效率变革。它将再造电网的信息回路，构建用户新型的反馈方式，推动电网整体转型为节能基础设施，提高能源效率，降低客户成本，减少温室气体排放，创造电网价值的最大化。

① 互动电网的作用。互动电网还可以通过电子终端将用户之间、用户和电网公司之间形成网络互动和即时连接，实现电力数据读取的实时、高速、双向的总体效果，实现电力、



太阳能



风能



地热能

图 15-1　新能源

电信、电视、智能家电控制和电池集成充电等的多用途开发，实现用户富余电能的回售；可以整合系统中的数据，完善中央电力体系的集成作用，实现有效的临界负荷保护，实现各种电源和客户终端与电网的无缝互连，由此可以优化电网的管理，将电网提升为互动运转的全新模式，形成电网全新的服务功能，提高整个电网的可靠性、可用性和综合效率。互动电网既是下一代全球电网的基本模式，也是我国电网现代化的核心。实际上，互动电网的本质就是能源替代、兼容利用和互动经济。从技术上讲，互动电网应是最先进的通信、IT、能源、新材料、传感器等产业的集成，也是配电网技术、网络技术、通信技术、传感器技术、电力电子技术、储能技术的合成，对于推动新技术革命具有直接的综合效果。由此，智能电网具备可靠、自愈、经济、兼容、集成和安全等特点。互动电网学说的本质就是以信息革命的造发性（创造发展）标准和技术手段大规模推动工业革命最重要财产——电网体系的革新和升级，建立消费者和电网管理者之间的互动。

② 互动电网的运转功效和社会意义。互动电网的功效包括：一是智能电网能够实现双向互动的智能传输数据，实行动态的浮动电价制度；二是可以利用传感器对发电、输电、配电、供电等关键设备的运行状况进行实时监控和数据整合，遇到电力供应的高峰期之时，能够在不同区域间进行及时调度，平衡电力供应缺口，从而达到对整个电力系统运行的优化管理；三是智能电网能够将新型可替代能源接入电网，比如太阳能、风能、地热能等，实现分布式能源管理；四是可以提高供电效率，减少能量损耗，改善供电质量，解决电网商业化运转；五是智能电能表可以作为互联网路由器，推动电力部门以其终端用户为基础，进行通信、宽带业务或传播电视信号。图 15-2 为互联网路由器。

为此，IT 产业的深度革命和能源革命将成为孪生兄弟，智能电网改革将推动全球能源革命的深度扩散。通过建造互动电网，将推进 IT 革命进入创新阶段；将为消费者提供更好的减少能源消耗的路径；将为整个社会节约成本、降低温室气体排放，并促进绿色经济占主导地位。



图 15-2　互联网路由器

界定电网信息化的概念是确定一个国家电网现代化的基本前提。我国电网升级化路线应该定义为互动电网的变革，互动电网的发展是全球工业和信息业的一次新产业革命、技术革命和管理革命，应该以此为基础制定我国高起点的电网现代化战略发展路线。

二、国内智能电网的建设

1. 国家电网工作进展

我国智能电网相关研究工作的开展稍迟于西方发达国家。2009 年 6 月由余贻鑫院士发起在天津大学举办了“第 1 届智能电网研究学术论坛”，从智能电网的基本理念、技术组成、设备需求等多个角度对我国智能电网的建设和发展进行了探讨。智能电网是一个浩大的系统性工程，作为复杂大系统的智能电网，涉及能源、信息、经济、法律等多个学科领域，对技术、经济、社会、环境等因素都会产生相互作用和影响，与每个人的生活都息息相关，不但需要电力专家、经济学家、企业家、政府官员的参与，也需要工程技术人员、经销商、用户等最广泛的社会参与。

2010 年 1 月，国家电网公司以“1 号文件”的形式，公布了今后 10 年坚强智能电网的建设规划，我国将分三个阶段推进坚强智能电网的建设，在三个阶段里总投资预计将超过 4 万亿元。2009—2010 年为规划试点阶段，重点开展“坚强智能电网”发展规划工作，制定技术和管理标准，开展关键技术研发和设备研制及各环节试点工作；2011—2015 年为全面建设阶段，加快特高压电网和城乡配电网建设，初步形成智能电网运行控制和互动服务体系，关键技术和装备实现重大突破和广泛应用；2016—2020 年为引领提升阶段，全面建成统一的“坚强智能电网”，技术和装备全面达到国际先进水平。届时，将形成以华北、华东、华中特高压同步电网为接收端，东北、西北电网为输送端，连接全国各大煤电、水电、核电和可再生能源发电基地的坚强电网结构。

我国目前已将能源技术列为国家科技发展的战略重点，智能电网与能源技术息息相关，因此受到高度重视。国家科技部组织了“十二五”863 计划战略，研究先进能源领域规划制定工作，其中电网分组的规划委托国家电网公司组织专家撰写；国家自然科学基金委员会组织了“十二五”电工学科发展战略规划制定工作以及“2011—2020”能源科学发展战略规划工作；国家电网公司已积极筹划智能电网的规划和建设，目前也正组织专家进行“国家电网 2030 技术路线图”的制定工作，并计划到 2020 年在我国全面建成统一的坚强智能电网。

2010 年 1 月 12 日，国家电网公司制定了《关于加快推进坚强智能电网建设的意见》，确定了建设坚强智能电网的基本原则和总体目标。

2010 年计划投资 250 亿元人民币投入智能电网，用于试点示范项目。

2011 年 6 月 2 日，全球可持续电力合作组织在美国纽约成立，国家电网公司应邀加入

该组织。

我国的智能电网建设基于不同重点进行规划，不仅要涵盖欧美智能电网的概念和范围，还要加强骨干电网建设，即建立一个以特高压电网为骨干网架的各级电网高度协调发展的智能电网。

我国发展智能电网的优势如下：

1）在电网网架建设方面，网架结构不断加强和完善，特高压交流试验示范工程和特高压直流示范工程成功投运并稳定运行；全面掌握了特高压输变电的核心技术，为电网发展奠定了坚实基础。

2）在大电网运行控制方面，具有“统一调度”的体制优势和丰富的运行技术经验，调度技术装备水平国际领先，自主研发的调度自动化系统和继电保护装置获得广泛应用。

3）在通信信息平台建设方面，建成了“三纵四横”的电力通信主干网络，形成了以光纤通信为主，微波、载波等多种通信方式并存的通信网络格局；SG186 工程取得阶段性成果，ERP、营销、生产等业务应用系统已完成试点建设并开始大规模推广应用。

4）在试验检测手段方面，已根据智能电网技术发展的需要，组建了大型风电网、太阳能发电和用电技术等研究检测中心。

5）在智能电网发展实践方面，各环节试点工作已全面开展，智能电网调度技术支持系统、智能变电站、用电信息采集系统、电动汽车充电设施、配电自动化、电力光纤到户等试点工程进展顺利。

6）在大规模可再生能源并网及储能方面，深入开展了集中并网、电化学储能等关键技术的研究，建立了风电接入电网仿真分析平台，制定了风电场接入电力系统的相关技术标准。

7）在电动汽车充放电技术领域，我国在充放电设施的接入、监控和计费等方面开展了大量研究，并已在部分城市建成电动汽车充电运营站点。

8）在电网发展机制方面，我国电网企业业务范围涵盖从输电、变电、配电到用电的各个环节，在统一规划、统一标准、快速推进等方面均存在明显的优势。

智能电网已为国际上众多国家能源决策部门及电力企业所认可。但基于不同的国情、出发点和认知，智能电网的发展和实施内容各具特色。我国智能电网的发展，必须遵循中国特色进行规划实施，既要立足于目前处于发展期的现实，又要兼顾未来成熟期的前景。对于国外发达国家目前关于智能电网的一些发展思想和技术思路，汲取其精华，在我国智能电网建设的过程中结合国内特点，实现跨越发展。

2009 年、2010 年两年来的工作进展如下：

1）2010 年初第一批智能电网项目试点完成之后，国家电网的第二批试点项目已正式启动。此次试点完成后，总投资约 4 万亿元（2020 年之前）的我国智能电网将步入规划建设阶段。

2）在控制系统新技术方面，围绕中国电力科学研究院等单位承担、周孝信院士担任首席科学家的国家 973 计划项目“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”，研究人员开展了基于智能和专家系统的电力系统故障诊断和恢复控制技术研究，为智能型的电力系统动态调度与控制提供了基本的分析工具。

3）国家电网公司推行了 SG186 一体化平台建设，山东、浙江、江苏、上海等各省

（市）电力公司都在积极推动用电信息采集系统、营销业务系统信息化建设等项目，并取得了突出成果。

4）在可再生能源发电方面，国家也启动了多项 863 高技术研究发展计划项目，“十一五”期间，在三大先进能源技术领域设立重大项目和重点项目，包括以煤气化为基础的多联产示范工程，MW 级并网光伏电站系统，太阳能热发电技术及系统示范等项目。

5）国家电网公司大力推进特高压电网、“SG186”工程、一体化调度支持系统、资产全寿命周期管理、电力用户用电信息采集系统和电力通信等建设，打造坚强电网，强化优质服务，为智能电网建设奠定了扎实的基础。目前，1000kV 交流输变电工程已正式投入运行，特高压系统和设备运行平稳，全面验证了特高压交流输电的技术可行性、设备可靠性、系统安全性、设计和施工方案的先进性以及环境的友好性，实现了我国在远距离、大容量、低损耗的特高压核心技术和设备国产化上的重大突破。自主研发的能量管理系统（EMS）等在省级以上调度机构得到了广泛应用，全部地区级以上电力调度机构均配置了电网调度自动化系统，引入了电能量计费系统和广域测量系统，新规则下的电力市场交易技术支持系统正在建设之中。变电站实现了计算机监控和无人、少人值守，地理信息系统（GIS）已开始应用于输电、变电和配电管理等业务。以提高信息化水平和生产效率为目标的生产运营管理信息系统，如电网生产运行管理系统、设备检修管理、变电站建设视频监控系统等，在电网生产管理业务方面发挥了重要作用。

6）国家电网公司在北京、上海建成了第一批电力光纤到户智能小区试点工程，并正在开展电动汽车充电站建设和天津生态城智能电网综合示范工程建设等，到今年年底国家电网公司将完成 75 个电动汽车充电站、6209 个充电桩的建设。

7）国家能源局多次组织人力对发展智能电网问题进行深入研究，启动了风光储输示范工程。先后批准成立了大型风电并网、太阳能发电、海上风电技术装备等研发中心，而且国家智能电网技术研发中心建设方案已经通过专家评审。

8）根据国家电网规划，到 2020 年，坚强智能电网将基本建成，届时，我国清洁能源装机将达到 6 亿 kW，占全国总装机的 35% 左右，发电量将占总发电量的 27% 左右。预计从目前到 2020 年，以坚强智能电网为平台，通过各方共同努力，将推动实现二氧化碳减排累计超过 100 亿 t。

9）为了让能源独立、高效利用可再生和不可再生能源的设想变为现实，中国国家电网公司直属的国网电力研究院（SGRPRI）与思博伦通信科技（北京）有限公司合作在南京建立业界第一个智能电网技术研究测试试验室——SGEPRI-SPIRENT 信息通信技术实验室。该实验室将帮助开发高效满足发电、配电、储电和用电需求的安全的、基于标准的 IP 网络，为智能电网的信息通信提供技术支撑。SGEPRI-SPIRENT 信息通信技术实验室将国网电力研究院在电力系统领域的专业知识与思博伦通信科技（北京）有限公司在 IP 测试领域的技术领先优势融合在一起，将在开发下一代智能电网和技术中发挥重要作用。实验室进行的研究将帮助指导智能电网的系统选择、网络规划、部署、故障排查和系统优化。近年来，我国电力工业快速发展，跨区跨省电网建设快速推进，电网网架结构得到加强和完善。

10）2009 年 1 月，我国自主研发、设计和建设的具有自主知识产权的 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程正式投运，标志着我国在远距离、大容量、低损耗的特高压核心输电技术和设备国产化上取得重大突破，建设智能电网具备了一定的物质基础。

11）国家电网公司按照统筹规划、统一标准、试点先行、整体推进的原则，在建设由1000kV交流和±800kV、±1000kV直流构成的特高压骨干网架、实现各级电网协调发展的同时，围绕主要环节和信息化等方面，分阶段推进坚强智能电网发展。

12）上海世博园国家电网馆承载着专为世博会供电的高新技术变电站，这座服务世博会的智能变电站，其运行的信息采集、传输、处理和输出等流程均实现了数字化和智能化。

13）上海2009年用电量达1153亿kW·h。向家坝至上海的±800kV特高压直流示范工程于7月8日建成投运，至此上海一半以上的电量来自中西部地区的清洁能源，成为全球使用绿色电力最多的城市。

14）2011年建设坚强智能电网的工作主要分成以下几个内容：实现特高压电网和省级骨干电网有机衔接；解决高危用户、电气化铁路等重要用户供电问题；初步探索风能、光伏等各种新能源的接入，并解决其对电网的波动影响；建设电动汽车充电站；梳理各级电网投资规模，为第二阶段摸底等。

2. 区域电网建设进展

（1）华东电网公司　华东电网公司于2007年在国内率先开展了智能电网可行性研究，并设计了2008—2030年“三步走”的行动计划，在2008年全面启动了以高级调度中心项目群为突破的第一阶段工作，整合提升调度系统、建设数字化变电站、完善电网规划体系、建设企业统一信息平台4条主线，到2010年全面建成华东电网高级调度中心，使电网安全控制水平、经营管理水平得到全面提升。

（2）华北电力公司　2009年2月28日，作为华北电力公司智能电网建设的一部分——华北电网稳态、动态、暂态三位一体安全防御及全过程发电控制系统在京通过专家组验收。这套系统首次将以往分散的能量管理系统、电网广域动态监测系统、在线稳定分析预警系统高度集成，调度人员无需在不同系统和平台间频繁切换，便可实现对电网综合运行情况的全景监视，并获取辅助决策支持。此外，该系统通过搭建并网电厂管理考核和辅助服务市场品质分析平台，有效提升调度部门对并网电厂管理的标准化和流程化水平。

（3）陕西省电力公司　陕西省电力公司在陕西电力科学研究院成立了智能电网技术中心，并抽调高压电器技术研究所、电网技术研究所、生产技术部、计量中心、科研中心等部门的技术骨干专职从事智能电网的研究工作。按照“规划试点、全面建设、引领提升”三步走战略，建设以“八站十五线”750kV电网为骨干网架，各级电网协调发展，具有信息化、自动化、互动化特征的统一坚强智能电网，实现陕西电网发展方式的根本性转变。具体分为三个阶段实施：

2009—2010年为规划试点阶段。重点开展坚强智能电网发展规划编制工作，积极参与国家电网公司技术和管理标准制定，关注和跟踪国内外关键技术研发和设备研制，争取国家电网公司的相关试点工作。

2011—2015年为全面建设阶段。加快750kV电网建设和各级电网协调发展，全面完成老旧设备改造，以及关键技术和装备的广泛应用，初步形成智能电网运行控制和互动服务体系。

2016—2020年为引领提升阶段。全面建成统一坚强智能电网，电网的管理、技术和装备水平全面达到国内领先。

该智能电网技术中心负责组织开展智能电网关键技术研究和课题攻关，针对智能化建设

中调控一体化、专业化检修、状态检修、用电系统的技术变革，研究管理新模式，适应管理智能电网新要求。

（4）国电南京自动化股份有限公司　国电南京自动化股份有限公司（以下简称国电南自）在电网自动化方面技术实力扎实，率先布局了智能电网关键设备的研发，电子式互感器市场份额第一，最近两年来参与了多个典型的数字化变电站、智能变电站试点项目。智能一次设备是公司新推出的一大业务板块，研发和生产基地设在扬州。新基地占地 500 亩（1 亩 = 667m^2），未来主要的产品包括智能一次设备组件、在线监测设备等。国电南自是专门研发、生产输变电智能设备组建的企业，是一、二次设备合作的典范，代表了一次设备智能化的方向。2010 年公司定向增发募集资金 7.8 亿元，主要用于电子式互感器、智能开关、智能一次设备在线监测系统等七个项目。在光伏发电方面，国电南自已经具备提供从太阳电池板输出到最终电力接入电网的全部一、二次设备的能力。

国电南自的研发团队认为风电、光电等分布式能源接入的技术方向应该是建立既独立又可以控制的微电网，并与智能电网相融合。公司重点投入微电网的控制、通信、保护等各方面的研究，力求在不久的将来能提供微电网接入的系统解决方案。

（5）江苏省电力公司　该公司将着手实施苏州、无锡、扬州等地智能电网试点工程，推进 220kV 西泾智能变电站工程、智能用电技术研究检测中心、电动汽车充放电站试点工程、智能电网调度技术支持系统试点工程等重点项目的建设，仅南京一地就要投入 20 亿元。

（6）天津电力公司　该公司主要以区域试点为主，总投资额为 73.8 亿元，争取在分布式电源、用户信息采集、电动汽车充电站、配网自动化建设等项目上寻求突破。其中亮点之一是，启动中新天津生态城智能电网综合示范试点项目建设，为建设整体性智能电网探路。

（7）西泾智能变电站　无锡西泾智能变电站（以下简称西泾变）是国家电网公司首座完整意义上的 220kV 智能变电站，采用大量新技术、新设备、新材料，实现全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化，可自动完成顺序控制、一次设备在线监测、辅助系统智能联动及变电站自动化系统高级应用等先进功能，从主系统到辅助系统全面实现智能化，是建设绿色节能坚强电网的一次新的探索和尝试。

西泾变 220kV 所有间隔、110kV 所有间隔和主变高、中、低压侧配置了全光纤型电流互感器。10kV 各间隔和主变公共绕组配置了传统电流互感器。220kV 线路、220kV 母线、主变 220kV 侧和 110kV 母线配置了三相电容分压型电压互感器，110kV 有源线路配置了单相电容分压型电压互感器，10kV 母线配置了传统电压互感器。作为国家电网公司的首座 220kV 智能变电站，西泾变工程技术方面具有以下十个特点：

1）国内首次全站范围大规模采用全光纤型电流互感器，提供双 A/D 采样数据，保证数据可靠性。

2）全站各电压等级均采用保护测控合一装置。

3）工程调试中采用了智能变电站集中集成测试模式。在变电站土建施工的同时，并行开展智能变电站集中集成测试，大大节约了现场调试的时间，同时也保证了变电站的安全可靠性。

4）全站采用 IEC 61850 标准实现二次装置信息交互数字化、标准化，利用光纤实现二次装置互联互通，极大简化了二次接线，提高了装置互操作性。

5）变电站各间隔保护测控装置、合并单元、智能终端、在线监测 IED 等设备均下放布

置于配电装置现场，节省了空间和大量缆材。

6）站控层采用 MMS、GOOSE、SNTP 共网传输，220kV 线路和母联保护过程层采用直采直跳方式，220kV 母线保护和主变保护过程层采用直采网跳方式，110kV 过程层采用 SV、GOOSE、IEEE 1588“三网合一”方式。

7）首次建立数字式计量系统与常规计量系统的对比分析系统，用于验证两种计量系统长期运行中各种外部条件下的精度偏差，为电子式互感器的计量应用提供指导数据。

8）定制自动化系统高级功能，实现顺序控制、智能告警与故障诊断、取代功能等高级应用。

9）首次利用“物联网”技术建立传感测控网络，建立智能监测与辅助控制系统，实现图像监视、安全警卫、火灾报警、主变消防、采暖通风、给水排水、SF_6 泄漏监测、运行温度监测等辅助系统的集成应用和联动控制。

10）全站建立统一的在线监测后台系统，为站内重要的一次设备实行状态检修提供技术支撑。

220kV 西泾智能变电站的设计和建设水平全国领先，对国家电网公司智能变电站建设起到了引领和示范作用。国电南自作为该变电站的系统集成商，投入大量技术人员，保障了西泾变的顺利投运。西泾变的站控层采用国电南自新一代 PS6000 + 一体化信息平台系统，间隔层采用 PS600U 系列数字化保护测控装置，过程层采用 PSIU600 系列智能终端，所有产品完全满足国家电网公司的各项指标和要求。

3. 重视管理技术

管理技术主要体现在以下几方面：

1）可视化。将大量的数据裁剪成格式化的、分时间段的、按技术分类的数据。可视化技术将这些数据展示为运行人员可以迅速掌握的可视格式，以便运行人员分析和决策。

2）决策支持。决策支持技术确定现有的、正在发展的以及预测的各种问题，对问题进行分析，并展示系统运行人员需要的各种情况、多种选择以及每一种选择导致的结果。

3）调度员培训。利用决策支持技术工具，以及行业内认证的软件动态仿真器对调度员进行培训，提高系统调度员的技能和水平。

4）用户决策。需求响应（DR）系统以很容易理解的方式为用户提供信息，使他们能够决定如何购买电力、何时购买电力、是否需要储存或生产电力。

5）提高运行效率。集成决策支持技术与现有的资产管理过程，提高电网运行、维修和规划的效率及有效性。智能电网运行得是否有效率，与市场化的体制建立密切相关。竞争性市场过程通常具有较高的效率。在促进竞争的电力市场条件下，智能电网的效率才有保障，这需要通过政策、法规、组织（如电力监管委员会等）或政府干预的手段进行规范和调节。

第五节　智能电网技术

智能电网工作的程序是通过高速通信网络，实现对运行设备的在线监测，获取设备的运行状态，在最恰当的时间，给出需要维修设备的信号，实现设备的状态检修，同时使设备运行在最佳状态；通过系统的控制装置，自动将系统调整到损耗最低和无阻塞的状态，采用最小成本的能源输送系统，提高运行的效率；同时，先进的信息技术提供大量的数据和资料，

集成到有关企业的管理系统中，供给管理者决策使用。

智能电网的主要技术有通信技术、量测技术、控制技术、电力电子技术、标准体系，未来智能电网将主要应用三个方面的先进技术：电子电力技术、超导技术以及大容量储能技术。通过采用新技术和在电网和负荷特性之间寻求最佳的平衡点来提高电能质量。通过应用和改造各种各样的先进设备，如基于电力电子技术和新型导体技术的设备，来提高电网输送容量和可靠性。配电系统中要引进许多新的储能设备和电源，同时要利用新的网络结构，如微电网。新型的储能技术将被应用到分布式能源或大型的集中式电厂中。大型发电厂和分布式电源都有其不同的特性，它们必须协调有机地结合，才能优化成本，提高效率和可靠性，减少对环境的影响。

一、主要技术

1. 通信技术

建立高速、双向、实时、集成的通信系统是实现智能电网的基础，没有这样的通信系统，任何智能电网的特征都无法实现，因为智能电网的数据获取、保护和控制都需要这样的通信系统的支持，因此建立这样的通信系统是迈向智能电网的第一步。同时通信系统要和电网一样深入到千家万户，从而形成两张紧密联系的网络——电网和通信网络，只有这样才能实现智能电网的目标和主要特征。高速、双向、实时、集成的通信系统使智能电网成为一个动态的、实时信息和电力交换互动的大型基础设施。当这样的通信系统建成后，它可以提高电网的供电可靠性和资产的利用率，繁荣电力市场，抵御电网受到的攻击，从而提高电网价值。

高速双向通信系统的建成，使得智能电网通过连续不断地自我监测和校正，应用先进的信息技术，实现其最重要的特征——自愈。它还可以监测各种扰动，进行补偿，重新分配潮流，避免事故的扩大。高速双向通信系统使得各种不同的智能电子设备（IEDs）、智能表计、控制中心、电力电子控制器、保护系统以及用户进行网络化的通信，提高对电网的驾驭能力和优质服务的水平。

在这一技术领域主要有两个方面的技术：其一是开放的通信架构，它形成一个“即插即用”的环境，使电网元件之间能够进行网络化的通信；其二是统一的技术标准，它能使所有的传感器、智能电子设备（IEDs）以及应用系统之间实现无缝通信，也就是信息在所有这些设备和系统之间能够得到完全的理解，实现设备和设备之间、设备和系统之间、系统和系统之间的互操作功能。这就需要电力公司、设备制造企业以及标准制定机构进行通力合作，才能实现通信系统的互联互通。

2. 量测技术

参数量测技术是智能电网基本的组成部件，先进的参数量测技术获得数据并将其转换成数据信息，以供智能电网的各个方面使用。它们能评估电网设备的健康状况和电网的完整性，进行表计的读取、消除电费估计，防止窃电、缓减电网阻塞以及实现与用户的沟通。

智能电网将取消所有的电磁表计及其读取系统，取而代之的是可以使电力公司与用户进行双向通信的智能固态表计。基于微处理器的智能表计将有更多的功能，除了可以计量每天不同时段电力的使用和电费外，还可以储存电力公司下达的高峰电力价格信号及电费费率，并通知用户实施什么样的费率政策。更高级的功能有用户自行根据费率政策编制时间表，自动控制内部电力使用的策略。

对于电力公司来说，参数量测技术给电力系统运行人员和规划人员提供了更多的数据支持，包括功率因数、电能质量、相位关系（WAMS）、设备状况和能力、表计的损坏、故障定位、变压器和线路负荷、关键元件的温度、停电确认、电能消费和预测等数据。新的软件系统将收集、储存、分析和处理这些数据，为电力公司的其他业务所用。

广域监测系统、保护和控制方案将集成数字保护、先进的通信技术以及计算机代理程序，计算机代理程序是一个自治和交互的自适应软件模块。在一个集成的分布式保护系统中，保护元件能够自适应地相互通信，这样的灵活性和自适应能力将极大地提高可靠性，因为即使部分系统出现了故障，其他的带有计算机代理程序的保护元件仍然能够保护系统。

3. 控制技术

控制技术是指智能电网中分析、诊断和预测状态并确定和采取适当的措施以消除、减轻和防止供电中断和电能质量扰动的装置和算法。这些技术将提供对输电、配电和用户侧的控制方法，并且可以管理整个电网的有功和无功。从某种程度上说，先进控制技术紧密依靠并服务于其他关键技术领域，如通信技术、量测技术、设备等，提供及时和适当的响应，并且对任何事件进行快速的诊断。另外，先进控制技术支持市场报价技术，并提高资产的管理水平。

控制技术的分析和诊断功能引进预设的专家系统，在专家系统允许的范围内，采取自动的控制行动，这样所执行的行动将在秒级水平上，这一自愈电网的特性极大地提高了电网的可靠性。当然先进控制技术需要一个集成的高速通信系统以及对应的通信标准，以处理大量数据。先进控制技术支持分布式智能代理软件、分析工具以及其他应用软件。

（1）收集数据和监测电网元件　控制技术使用智能传感器、智能电子设备、分析工具以及电网元件，对整个系统的状态进行数据收集，这些数据都是准确的实时数据，可以反映电网整体的运行状况，同时，利用向量测量单元以及全球卫星定位系统的时间信号，实现电网早期预警。

（2）分析数据　具有强大的计算机软件分析工具对准实时数据进行分析，在秒级时间精度完成数据分析。

（3）诊断和解决问题　运行人员得到分析信息后，有足够的时间来响应紧急问题；专家系统将分析信息用于快速决策；负荷预测将应用分析信息来准确预测负荷；概率风险用分析信息来确定电网在设备检修期间、系统压力较大期间以及不希望的供电中断时的风险水平；电网建模和仿真采用分析信息来建立准确的电网场景。

（4）修改系统设置　智能电网通过实时通信系统和高级分析技术的结合可以降低已经存在问题的扩展，防止紧急问题的发生，修改系统设置、状态和潮流，以防止预测问题的发生。

4. 电力电子技术

电力电子技术是以电力、电能为研究对象的电子技术，它研究各种电力电子半导体器件，以及由这些电力电子器件构成的各式各样的电路或装置，实现对电能的变换和控制，是横跨电力、电子和控制三个领域的一门新兴工程技术。电能分直流（DC）和交流（AC）两类，DC 有电压、电流、极性三个要素，AC 有电压、电流、频率、相位四个要素，实际应用中常常要进行变换。这些变换有四种基本类型：AC→DC、DC→AC、AC→AC、DC→DC。

AC→DC，即交流电转换为直流电，称为整流，实现的装置称为整流器，应用场合有充电、电镀、电解、直流电动机等。

DC→AC，即直流电转换为交流电，称为逆变，实现的装置称为逆变器，可以是恒频，也可以是变频，应用场合有太阳能光伏电站、中频感应加热等。

AC→AC，即将交流的有关参数进行转换，如交流调压、变频等，应用场合有调压器、交流电动机的调压、调速等。

DC→DC，即将直流的有关参数进行转换，如将恒定直流变成断续脉冲状态，称为斩波器。

电能转换的控制方式主要有相位控制、通断控制及脉冲宽度调制（PWM）。电力电子技术在智能电网中的作用，主要是提高和改善电能质量。电网用户使用的设备常使电网无功损耗增加、电压跌落瞬时停电、大量非线性故障负载使用、电网出现各次有害谐波波形，使电网发生严重畸变。采用电力电子器件构成的各种控制器和补偿器可有效地提高和改善电能质量。电力电子技术包括器件及其应用，装置依赖于器件，新的器件出现能开拓许多新的应用领域，做出新的装置，应用中出现的问题又对器件提出新的要求，推动新器件的研制。

二、标准体系

1. 国外智能电网标准制定情况

从智能电网技术标准方面来讲，目前国内外组织都在进行标准的研究。IEEE（非营利性科技协会）致力于制定一套智能电网的标准和互通原则（IEEE P2030），主要内容包括电力工程（power engineering）、信息技术（information technology）和互通协议（communications）等方面的标准和原则，如各个能量源头如何与整个智能电网连接，计量设备的接入（如电能表）和时间同步性的标准等。

除 IEEE 外，IEC（国际电工委员会）也在发挥重要作用，它负责信息自动化的模式和环境标准，IEC 组织成立了“智能电网工作组（SG3）”，牵头开展智能电网标准的研究。美国国家标准与技术研究院 NIST（National Institute of Standards and Technology，NIST）协调各部门之间的合作；参与标准制定的 15 家机构分别负责标准制定的不同环节。NIST 发布了“智能电网互操作化框架与路线图”。美国机动车工程师学会（SAE）则主要关注机动车接入网络的标准。欧洲标准化组织成立了工作组，积极推进智能电网标准研究工作。日本经济产业省成立了智能电网标准化战略工作组。

2009 年 5 月 18 日，美国智能电网建设的第一批标准宣布。表 15-1 为首批 16 个智能电网行业标准。

表 15-1　首批 16 个智能电网行业标准

标　　准	应　　用
AMI-SEC 系统安全性需求	先进的量测基础设施(AMI)和智能电网端到端安全性
ANSI C12. 19/MC1219	收益量测信息模型
BACnet ANSI ASHRAE 135-2008/ISO 16484-5	建筑自动化
DNP3	变电和馈电设备自动化
IEC 60870-6 / TASE. 2	内部控制中心通信

（续）

标　准	应　用
IEC 61850	变电自动化与保护
IEC 61968/61970	应用层面能源管理系统界面
IEC 62351 Parts 1-8	电力系统控制操作的信息安全
IEEE C37.118	相量测量(PMU)通信
IEEE 1547	电力公司与分布式发电(DG)之间的物理与电气互联
IEEE 1686-2007	智能电子设备(IEDs)的安全
NERC CIP 002-009	大型电力系统的网络安全标准
NIST Special Publication (SP) 800-53, NIST SP 800-82	联邦信息系统的网络安全标准与指南,包括大型电力系统
Open ADR(开放自动需求响应)	价格反应灵敏和直接负载控制
Open HAN	家庭区域网(HAN)设备通信、测量和控制
ZigBee/Home Plug Smart Energy Profile	家庭区域网设备通信和信息模型

2. 我国智能电网标准制定情况

我国智能电网标准的研究从2009年就开始了。2009年国家电网公司启动了智能电网技术标准体系研究，成立了专家工作组。该工作组从智能电网的需求出发，按照8个专业分支，在梳理已有的779项国际标准和772项国内标准的基础上，编制完成了《国家电网智能电网技术标准体系规划》，并确定了标准体系规划三步走的部署。这个规划提出了包括综合与规划、智能发电、智能输电、智能变电、智能配电、智能用电、智能调度、通信信息的智能电网技术标准体系。从标准体系的层级来看，共分为5个层级，国家电网公司智能电网技术标准体系由8个专业分支组成，每个专业分支下又分为若干个技术领域，共26个技术领域，每个技术领域又涵盖若干标准系列，共有92个标准系列，每个标准系列又有若干个具体标准组成。规划是用于指导智能电网企业标准编制工作的纲领性文件和技术指南。国家电网公司将以此为指导，加快编制智能电网企业标准。

从目前标准体系规划的进展情况来看，智能发电方面《风电场接入电网技术规定》已作为企业标准发布，《光伏电站接入电网技术规定》已经申请发布；在智能输电方面，《架空输电线路在线检测系统通用技术条件》已作为公司企业标准发布，《输变电设备在线监测系统技术导则》等6项标准2010年完成；智能变电方面，《变电站智能化改造技术规范》等已经作为企业标准发布；从智能用电方面来讲，首先“智能电能表”相关的12项技术标准和“用电信息采集系统”相关的24项技术标准已经作为企业标准发布。此外与电动汽车有关的5项标准已经作为企业标准发布。

在制定标准体系的同时，国家电网公司依据与智能电网的关系和重要性，选取了部分与智能电网建设密切相关、系统性强、涉及面广、相对重要的技术标准作为国家电网公司首批推荐的22项核心标准。

国家电网公司的上述技术标准是企业性标准，代替不了国家标准，也代替不了行业标准，只能作为企业标准的纲领性指南。在国家有关部委指导下，国家电网公司将加快智能电网企业标准的编制，并且积极参与行业标准和国家标准的制定，开展智能电网标准国际化工作。以前标准的程序是先企业标准，后行业标准，再国家标准，然后看看能不能再成为国际

标准。现在我们在智能电网方面应该有这样一个思路，就是在没有国家标准、行业标准，甚至是企业标准的情况下，抢先成为国际标准。其他国家没有国家标准，仅是行业标准，ABB、西门子等国际公司之所以大量涉足智能电网，更多的是在抢占智能电网的标准，一旦一些标准被这些企业抢占以后，他们才会投入大量的资金用于研发，和我国先研发、后应用、再制定标准的模式完全不一样，所以国家电网公司首先以企业标准为立足点，积极发展为国家标准和行业标准，同时也要抢占国际标准。

三、智能电网技术展望

智能电网建设不仅是电力系统本身的事情，而且是影响到整个社会经济发展全方位的战略性项目，它影响到清洁能源的发展，新型技术的发展以及新产业的发展，它能够为整个社会带来巨大效益。

从技术层面来讲，智能电网的发展在建设坚强、稳定的大电网基础上还要在以下几个方面着重推进，以实现从发电到输电、配电和用电整个过程的智能化。

1）微电网技术。

2）智能化电器设备的技术研发。

3）能容纳各类新能源的、具有灵活的调度管理系统、先进的用户侧管理系统的智能配电网技术。

4）基于物联网的电力设备全寿命周期管理技术。

第六节　智能电网设备

国家电网公司公布的《智能电网关键设备（系统）研制规划》对庞杂的智能电网设备进行了分类梳理，系统地提出 7 个技术领域、28 个技术专题和 137 项关键设备。该规划分析了目前国内外智能电网关键设备的研制状况，针对“已有设备”、“在研设备”和“待研设备”提出明确的工作策略，制定每一类设备的研制内容、研制目标和研制计划，充分应用在材料、超导、储能、电力电子和微电子技术方面的最新研究成果，从而提高功率密度、供电可靠性、输配电系统的性能、电能质量、电力生产以及管理的效率。

一、设备分类及特点

1. 设备分类

从技术角度划分，智能电网设备可分为发电、输电、变电、配电、用电、调度和信息通信 7 个专业；从制造角度划分，可分为一次设备、二次设备及管理设备三大类别。

2. 专业特点

（1）发电专业　发电专业分为常规能源发电、可再生能源发电和大规模储能三类。在可再生能源领域，风电产能过剩其实是风机产能过剩，我国真正影响风电发展的关键设备仍然不过关，风力发电的预测、风力发电和电网的衔接都不过关。在储能方面发展更加缓慢，储能在今后一个阶段是真正能够带动一个产业发展的行业。目前新能源发电监控系统已经研制成功，50kW 垂直轴风电机组也研制成功，并开发了风光储智能协调控制系统。

（2）输电专业　输电专业分为检测装置、监测系统、柔性交流输电、柔性直流输电四个领域。完成了柔性直流输电系统关键设备样机研制，研发成功 500kW 故障电流限制器等 FACTS 装置，正在进行输变电设备状态监测系统研发。

（3）变电专业　变电专业分为过程层设备、站控层设备、辅助支持设备三个领域，变电方面主要是智能变电站，它分为变压器、互感器、开关等。在该专业中，电子式互感器、工业以太网交换机等设备研制成功，电力变压器、开关设备等正在进行智能化研究。

（4）配电专业　配电专业分为智能配电设备、配电自动化、分布式电源三个领域，配电自动化和分布式电源接入是设备研发的重点，光伏并网逆变器、微网运行控制器等关键设备研制成功，电能智能监测系统研制成功并投运。

（5）用电专业　用电专业分为用电信息采集、智能用电服务、用户侧分布电源、充放电设施、双向互动服务、智能量测装备六个领域。在我国智能电网很大的一部分就是用电，这里设计的用电信息采集系统涵盖智能电能表。智能用电包括“三网融合”、电力装嵌到户等，还有分布式电源、电动汽车的充放电设备等。

（6）通信信息专业　通信信息专业分为骨干传输网、配用电通信网、通信支撑网三个领域。

二、关键设备

我国在建设智能电网的设备方面已经具备了比较好的条件，例如已有设备基本满足电网建设和发展的常规需求，其中部分设备已经达到或处于国际先进水平（比如在电网的二次控制方面），特别是在特高压交流、特高压直流上，我国一直在国际上是领先的。我国具有向智能化发展的基础，但是从建设智能电网的要求来说，还存在一些差距，首先是大部分关键设备不能满足智能电网信息化、自动化、互动化的要求；其次是智能设备技术标准不统一，互换性差，技术性能有待提升；再者部分关键设备的核心技术还没有完全掌握，比如我国数字化变电站二次控制部分核心设备交换机还处于进口阶段。

从关键设备的研制思路来看，关键设备不是泛指所有的输配电设备，而是指具有“信息化、自动化、互动化”的技术特征，可显著提升电网智能化水平的设备。目前从关键设备的研制进展来说可划分为三类，分别是已有设备、在研设备和待研设备。国家电网公司针对不同类型提出不同的发展思路，对于已有的关键设备，注重提升设备性能，拓展产品种类，提高产业能力，加大推广应用。针对正在研制的设备，国家电网公司的工作思路是明确目标重点、加快研制进度、强化示范应用、形成生产能力。在在研设备里面需要强调的是变电站智能设备的研发，现在电工行业的很多变压器厂家、开关厂家、互感器厂家都在配合国家电网公司开发智能变电站的关键设备智能化，特别是在开关和变压器方面。在研设备中应明确重点目标，例如在开关和变压器智能化方面，指出工作重点，哪些检测确实需要外界检测，50 万 kW 的变压器和 11 万 kW 的变压器重点如何区分，开关重点在哪里等。国家电网公司智能化变电站现在有 74 个，这些设备，特别是开关设备和互感设备，必须具备智能化的要求，这就需要强化示范应用。

国家电网公司针对待研制设备，着重跟踪发展趋势、加强技术攻关、坚持自主创新、提升整体实力。

规划对 137 项关键设备国内外发展水平、智能电网对其需求、关键设备技术要求和设备的技术标准都一一做了详细解释。根据各技术领域的需求，国家电网公司 2009 年选择了 10 大类的 117 项专题开展研究，2010 年又确定了 88 项重点专题，并建立了国家能源太阳能发电研发（实验）中心、国家能源大型风电并网系统研发（实验）中心、智能用电技术研究与检测中心（南京）、国家能源智能电网技术研发（实验）中心四个研究检测机构。在现有

的技术和理论依据支撑下，智能电网关键设备研制取得了一些成果。

1. 发电环节

成功研制 650A · h 钠硫单体电池和 5kW 钠硫单体模块、50kW 垂直轴风电机组，正在组织开发风光储智能协调控制系统。

2. 输电环节

完成柔性直流输电系统关键设备样机研制、输变电设备状态监测系统研发和监测终端检测标准的制定、故障电流限制器等 FACTS 装置；变电环节的电子式互感器、交换机、智能开关、状态监测设备等研制取得重要进展，完成变电站一体化信息平台研发，正在开展一次设备智能化研究；统一潮流控制器、静止同步串联补偿器、柔性多端直流输电系统、柔性直流输电电缆的研究。

3. 配电环节

成功研制光伏并网逆变器、微网运行控制器、环保智能化柱上开关和环网柜的研究，电能质量监测系统也成功投运。

4. 变电环节

开展智能 GIS/断路器、电网故障定位系统、广域及区域保护控制、检验/测试评估系统、在线自校/预警/定值的研究。

5. 用电环节

研发成功智能电能表安全芯片和电动汽车充电站监控系统，智能插座、居民家用分布式电源及储能管理系统，智能楼宇、小区通信关键技术。

6. 调度环节

完成了智能电网调度支持系统基础平台和基本应用的研发，并在华中电网调试运行，年底全部完成试点工程；完成了常规电源网厂协调参数的实测和联调。

7. 通信信息

建成世界最大的电力专用通信网络。此外光纤复合低压电缆、中高压电力线载波通信设备、电力数据线传输装置以及可穿越变压器的工频通信装置等设备研制成功。

8. 大型计算机

智能电网的核心关键技术是大型计算机，也就是类似我国的银河、华光等超巨型计算机。智能电网的原理很简单，就是根据使用情况（或历史数据），即时、动态地分配每条输电线的能量，达到最优化的能源分配方案，以降低损耗。所以输送的设备没有什么特别的，只是电网的每个变压器都带有数据接口，并都能即时地反馈各种数据，每个大型的变电站都是联网控制的。因此智能电网的核心其实就是巨型计算机，它需要一个足够强大、快速的计算机数据系统，实时地分析每一根电网的温度、功率、负荷，每个变压器的负载以及某个小区的实时能源消耗和预计消耗等来即时调整每个变压器、输电网的功率，从而达到电能的最大利用率。凡是计算机发达的国家电网的智能化程度就高。美国是全球唯一一个完全实现全国电网智能的国家，能做到某个镇上的一个小变压器都能对全国的电网产生影响。

9. 2011—2015 年的研制计划

仍将重点突出关键设备“信息化、自动化、互动好”的技术特征。如在发电环节开展常规能源的自动化成套控制系统、水电厂电网调度支撑系统、可再生能源的风电场故障穿越装置、风光储能监控系统、大规模储能的集成储能功率平滑调节、化学电池模块化继承等的

研究。

10. 现有一次设备的智能改造

智能电网建设最重要的内容就是要完成变电站一次设备的智能改造（智能化）。按照智能化导则的描述，一次设备智能化最基本的功能就是实现一次设备本体的智能控制与状态监测，另外还可以集成测量、计量、保护等二次功能。一次设备智能化分三个阶段，第一阶段为所有的智能组件以及传感器均与一次设备本体分离，属于松散型布置，现在基本处于这个阶段；第二阶段则是所有的二次部分整合为一个智能组件，相应的传感器与一次设备一体化设计集成，这个阶段目前看来还没有能够实现；第三个阶段则是没有一、二次设备的界线，一次设备本身高度集成各种二次功能，提供标准的接口和数据通信模型，只需插一根网线就可以通过 IEC 61850 的相关服务接口获取各种数据以及实现控制调节等功能。

11. 其他成果

（1）配电 FSM（系统快速仿真与模拟）支持的自愈功能

1）网络重构。

2）故障定位、隔离和服务恢复（FLIR）。

3）当系统拓扑结构发生变化时继保再整定（RPR），即实现电力系统更新运行方式后的保护。

（2）灵活的分布式电源　节省对输电网的投资，提高全系统的可靠性和效率，并具有其他辅助服务功能，如无功支持、电能质量改善等；巨大的灵活性，如在风暴和冰雪天气下，当大电网遭到严重破坏时，分布式电源可自行形成孤岛或微电网向医院、交通枢纽和广播电视等重要用户提供应急供电。

（3）高级计量体系和需求侧管理　高级计量体系由安装在用户端的智能电能表、位于电力公司内的计量数据管理系统（MDMS）和连接它们的通信系统组成，为了加强需求侧管理，该体系又延伸到了用户住宅之内的室内网络（HAN）。

（4）智能电能表

1）实现多种计量（如 kW·h，kvar，kW，V 等）。

2）设定计量间隔（如 5min，15min，1h 等）。

3）具有双向通信功能。

4）支持远程设置、接通或断离、双向计量、定时或随机计量读取。

5）通向用户室内网络的网关——提供给用户实时电价和用电信息，并实现对用户室内用电装置的负荷控制，达到需求侧管理的目的。

（5）分布式发电供能系统　此系统是指利用各种可用且分散存在的能源，包括可再生能源（太阳能、生物能、小型风能、小型水能、波浪能等）和本地可方便获取的化石类燃料（主要指天然气）进行发电供能的系统。发电容量通常在几千瓦到几十兆瓦。

该成果的特点为：清洁、高效、能源多样性；发电容量小，分散在负荷附近；可再生能源具有间歇性/随机性；能源利用效率高。

（6）电网在线智能测量系统　嵌入式电网在线智能测量仪运用电压互感器和电流互感器可以同时对电网线电压、相电流、控制角、有功功率、无功功率、功率因数等参数进行实时检测，16 路信号采样，有扩展能力。精度优于 0.2%。对智能设备采集的数据采用透明转发技术，通过以太网或其他辅助传输网络进行实时信息传送，可以进行远程设备运行状态信

息处理单元查询。

（7）微电网储能　分布式能源中的风电并网、光伏并网、蓄电池储能、保护控制、电能质量等多项技术，为风光储与微电网控制的研究奠定了良好的基础。目前共有以下实验平台与仿真平台：

1）微电网实验研究平台。

2）微电网仿真研究平台。

3）电动汽车综合运营调度测试平台。

4）电能质量分析与控制平台。

5）RTDS 电力系统实时仿真系统。

6）数字化变电站与继电保护试验平台。

（8）基于智能电网和物联网技术的城市综合能源系统　智能电网技术与物联网技术能将城市能源负荷与供给联系在一起，解决城市冷热电负荷需求随机性变化大所带来的城市能源系统规划与运行难题。该项目通过在能源供给侧和终端需求侧建立物联网系统，实现智能电网对供给侧和终端需求侧的综合控制，获得节能效益。国家发改委正在大力推行“合同能源管理”，市场潜力超千亿元。该技术项目的经济效益将通过能源服务公司的形式获得转化。

（9）电力线载波通信模块　电力线载波通信模块（简称 PLM）是一种利用低压电力线完成数据交换的专用设备。在同一台电力变压器的供电范围内，利用现存的供电线路，使用多台 PLM 可把数据终端设备连接成一个网络，从而达到各个数据终端设备之间通信的目的。PLM 可以广泛应用于电表集中抄录、路灯照明监控、控制电器运行状态监控、楼宇自动化及防盗监控等领域。PLM 利用电力线作为传输介质，无需另外敷设通信线路，使用非常方便。发送端 Modem 把由数据终端设备 RS232 接口发来的数据转换成载波信号发送到电力线上，接收端 Modem 把收到的载波信号还原成数据信号经 RS232 接口传送给数据终端设备。它的全双向透明信道为各种协议的通信提供了一种理想的电力线通信解决方案。

三、智能电网工程

1）发电环节。常规电源网厂协调试点工程选取华北、华东电网火电机组开展试点建设，已于 2010 年 8 月 6 日通过验收；新能源方面，国家电网公司在河北张家口地区投建了风光储输联合示范工程，这是一个集电网、风电、光伏和储能系统的联合示范电站；在西北、吉林、甘肃电网开展大规模风电功率预测及运行控制试点工程。后两项工程于 2011 年 6 月竣工。

2）输电环节：主要是输电线路状态监测系统以及输电线路直升机/无人机智能巡检、柔性直流输电等试点工程。

3）变电环节：主要是智能变电站的建设与改造，如江苏西泾、四川北川等四座智能变电站在 2010 年底竣工，浙江兰溪等三座变电站在 2011 年完成智能化改造。

4）配电环节：包括配电自动化、分布式光伏发电接入及微电网运行控制。2011 年底前，完成杭州、厦门、银川、北京四个试点配电自动化工程建设，并在 19 个重点城市继续推广。

5）用电环节：包括用电信息采集系统、电动汽车充换电设施、智能小区/楼宇等。

6）用电信息采集系统。试点工程在 2011 年内全部完成，在国家电网范围内 26 个省市

（自治区）安装220万户智能电能表，建成75座公共充电站和6209个交流充电桩，并对电动汽车交换电技术及运行模式进行研究。

7）通信信息平台。为全面支撑国家“三网融合”战略，计划在14个网省公司、26个城市开展电力光纤到户试点建设，采用光纤复合低压电缆，实现电力光纤到户36740户。

8）建立跨环节的电网运行集中监控、输变电设备状态监测系统等试点工程，建成上海世博园智能电网综合示范工程和中新天津生态智能电网综合示范工程。

四、设备市场情况及企业界

1. 市场情况

到2020年，我国将基本建成坚强智能电网，形成以华北、华东、华中特高压同步电网为接收端，东北、西北电网为输送端，连接全国各大煤电、水电、核电和可再生能源发电基地的坚强电网结构。智能电网建设将是我国电网未来十年发展的主要方向，国家电网公司将分三个阶段推进坚强智能电网的建设，在三个阶段里总投资预计将超过4万亿元。第一阶段（2009—2010年）投资5500亿元；第二阶段（2011—2015年）预计投资2万亿元，其中特高压电网投资3000亿元；第三阶段（2016—2020年）预计投资1.7万亿元，其中特高压投资2500亿元。根据国家电网公司的发展规划，智能电网在我国将分三个阶段逐步推进：2009—2010年为规划试点阶段，重点开展“坚强智能电网”发展规划工作，制定技术和管理标准，开展关键技术研发和设备研制及各环节试点工作；2011—2015年为全面建设阶段，加快特高压电网和城乡配电网建设，初步形成智能电网运行控制和互动服务体系，关键技术和装备实现重大突破和广泛应用。

2011年6月中国电器工业协会智能电网设备工作委员会（简称“智网委”）成立，智网委作为电工行业相关企业、研究院所在智能电网设备方面的全国性行业组织，将在我国智能电网建设中发挥行业协会职能，代表行业协调与用户之间的关系，搭建企业同政府、企业同用户之间的交流对话平台，推动智能电网设备行业有序、健康、快速发展。

经过2009、2010两年的积极推进，国家电网公司目前已开展了两批共计21类、228项试点工程建设，覆盖全国26个省市，贯穿发、输、变、配、用、调六个环节以及通信信息平台。

《智能电网关键设备（系统）研制规划》是《国家电网智能化规划》的子规划之一。针对“已有设备”、“在研设备”和“待研设备”，提出了明确的工作策略，制定了每一类设备的研制内容、研制目标和研制计划。按照该研制规划，国家电网公司将分三个阶段开展智能电网关键设备研制。为确保关键设备研制规划的顺利实施，国家电网公司提出了具体保障措施。智能电网关键设备研制的总体目标为：

第一阶段（2009—2010年）“保障试点工程”，完成试点工程所需关键设备研制，保障试点工程建设如期完成，智能电网关键设备研制全面展开。

第二阶段（2011—2015年）“支撑全面建设”，已有关键设备进一步完善和提升，全面完成规划中关键设备的研制，支撑智能电网全面建设。

第三阶段（2016—2020年）“力争国际领先”，全面提升设备性能指标，主要领域装备位居世界前列水平，保障坚强智能电网国际领先。

我国智能电网于2011年进入全面建设期，二次设备是重中之重，投资约3400亿元。二次设备需求年均复合增长率将达到20%，占电网设备投资的比重将由目前的5%提升至未来十年

合计的11%。具体包括智能电能表（年均71～90亿元）、储能电池（年均45～60亿元）、数字化变电站（年均40～45亿元）、柔性输电（年均29～41亿元）、配电自动化（年均18～20亿元）、智能调度（年均18～20亿元）和变压器在线监测装置（年均10～12亿元）等。

2. 企业界

（1）业内企业

1）荣信电力电子股份有限公司。柔性输电在电网的渗透率目前很低，智能电网给荣信电力电子股份有限公司的柔性输电产品带来的新市场将远大于目前工业节能市场，来自电网的订单已占2009年新订单的20%。高压变频产品市场份额强劲提升，合同能源管理模式下余热余压发电业务增长迅速，亦是该公司未来的亮丽看点。

2）思源电气股份有限公司。该公司由一次设备向智能电网全面转型，已介入在线监测、数字化变电站、柔性输电、电动汽车充电柜等业务，均获得电网订单。

3）国电南瑞科技股份有限公司。该公司二次设备占比重较大。

4）科陆电子科技股份有限公司。智能电能表集中招标带来市场集中度的明显提升，2009年招标中该公司市场份额大幅提升。

5）许继集团有限公司。是电力设备产业链最为完整的公司，在智能电网全面开始建设的情况下，公司将全面受益于智能变电站、配电自动化、智能电能表、风电接纳、电动汽车充换电等的快速建设，其中在电动汽车充电领域，许继集团有限公司下属的许继电源有限公司在上海世博会的公交车充电站项目中完成了196台9kW充电机和56台30kW充电机的设计与生产，使公司在该领域内处于领先位置。

6）其他积极参与智能电网设备制造和供应的招标企业还有中国西电集团公司、河南平高电气股份有限公司、特变电工股份有限公司、保定天威保变电气股份有限公司、国电南自、东方电子股份有限公司、金风科技股份有限公司、深圳奥特迅电力设备股份有限公司、中兴通讯股份有限公司、烽火通信科技股份有限公司、北汽福田汽车股份有限公司、南京新联电子股份有限公司（用电信息采集系统）、厦门科华恒盛股份有限公司（新能源接入）、深圳市英威腾电气股份有限公司（用电侧自动化）、科大智能科技股份有限公司（配网自动化中压载波）等。

（2）企业存在的问题

1）“服务意识”不足。这里的“服务意识”不是指售后服务。可追踪、互动是智能电网对电力设备的基本要求，电工企业中，每个电力设备应有一个独特的IP地址，使运行管理人员能辨识每一台设备。聪明的电力设备意味着，电网内的每一台变压器、电抗器、高压开关等都能被运行管理人员在网上分辨出来，即这些设备的位置、运行状态、运行年限等信息能明确传递给运行管理人员。现实与此差距颇大，电工企业没有足够的服务意识。所谓的“服务意识”，就是电工企业要考虑用户所想，自觉满足用户不断提高的要求。以变压器为例，建设智能电网，需要对变压器进行在线监测，以便实时了解其运行状态。当前，在线监测的方法一般是在变压器内特定位置安装传感器，但是至今大多数企业也没有考虑在制造设备时预埋传感器，或者为用户安装传感器预留空间。

2）不能提供小批量产品。研究部门希望企业提供小而精的设备，小，不是指设备体积小，而是生产批量小。但很多企业提供不了，比如需要100个部件，企业做不了，只能1万个起订。

对于服务意识的欠缺，有客观原因。很多企业从20世纪80年代做起，保留着原来计划经济体制时的“计划”概念，再加上这些年来电网建设一直火热，多数电力设备产品供不应求，延迟了企业从“计划”向“市场”的观念转变。

3）“产学研”作用不足。“产学研”是我国企业科研的重要方法，很多科技成果由此产生，但没有放上“用”，显然是不足的。事实已经证明，“产学研用”更加有效。从“产学研”到“产学研用”，变化的不仅是多了一个字，而是一种理念的根本转变：从做什么就让客户买什么，到客户需要什么企业就做什么。

虽然电工企业与可追踪、互动的要求尚有差距，但已经认识到这一问题重要，已在正确的研发路线上摸索。例如衡阳湘变电工制造有限公司了解到客户关于预留传感器空间的诉求，正在尝试研究解决可预设传感器放置问题；ABB公司在特高压直流工程中，为换相变压器提供技术支持的同时，还提供了一台监测设备；南通晓星公司也研制了变电站综合自动化系统，尝试解决变压器的监测问题。

3. 市场信息与企业的联系

（1）出版《智能电网设备采购指南》　为配合我国智能电网的建设工作，“智能电网设备网”拟编辑出版《智能电网设备采购指南》，拟推荐、选择一批业界实力强大、技术含量高、信誉良好的相关单位以及正在研发中有智能电网产品设备、解决方案的项目入编，为政府主管部门、项目建设、采购单位提供决策依据和标准。

（2）网上信息发布　继2010年初第一批智能电网项目试点完成之后，国家电网的第二批试点项目已正式启动。此次试点完成后，总投资约4万亿元（2020年之前）的我国智能电网，将步入规划建设阶段。第二批项目高达16类，包含新建和跨环节试点项目内容，较第一批试点多7类。

1）浙江电网承担8类14个项目的建设内容，预计总投资约40亿元。

2）2011年2月底3月初，浙江、陕西、重庆、江苏、天津、湖北等地的电网公司，已先后召开第二批智能电网试点布置工作会议，为全年智能电网铺设做最后动员。

（3）坚强智能电网项目　2010年1月，国家电网公司以“1号文件”的形式，公布了今后10年坚强智能电网的建设规划，称“将分三个阶段推进坚强智能电网的建设”。其中，2009—2010年为规划试点阶段，重点开展坚强智能电网发展规划工作，制定技术和管理标准，开展关键技术研发、设备研制及各环节的试点工作。2011年国家电网公司建设坚强智能电网的工作主要分成以下几个内容：实现特高压电网和省级骨干电网有机衔接；解决高危用户、电气化铁路等重要用户供电问题；初步探索风能、光伏等各种新能源的接入，并解决其对电网的波动影响；建设电动汽车充电站；梳理各级电网投资规模，为第二阶段摸底等。2011年将推广建设11类智能电网试点工程。

（4）上市公司中标多　2009年智能电网产品招标共涉及6个变电站，电压等级从750kV到220kV都有涉及，相关智能的产品主要是以有源和无源的电子式互感器为主。尽管招标数量都不是很大，但具有示范意义，未来伴随智能电网大规模建设开启，新建及改建变电站需求将得以释放。和传统220kV以上产品招标情况有所区别，中标公司几乎全部以上市电力设备公司为主，作为替代产品，智能电网类的设备要求精密度更高，产品的安全可靠性更好，具有资质的供货商原本就不多，很多上市公司都是储备了两三年才拥有自主生产能力的，从结果来看，有源电子式互感器为国电南自一家独得，无源互感器则为南瑞集团公司

和许继集团有限公司两家瓜分，而中国西电集团公司作为国内最大的输配电成套商，中标范围覆盖变压器、电抗器、组合电器和避雷器，各分项产品几乎都有斩获，这些公司是智能电网建设初期（主要以一次设备招标为主）最大的受益商。尽管此次招标数量较小，且智能化产品只有互感器一个子产品，但是智能电网建设大幕拉开，未来数字化开关和断路器都将向数字化领域招标，行业前景更为广阔。从电网投资来看，2012 年特高压建设和智能电网两项并举，将带动 3000 亿元以上的投资。

国家电网公司招投标管理中心集中规模招标采购智能电网第三批项目（二次设备）已结束，其内容有：第 1 分标保护类设备（共 14 个包），第 2 分标变电站计算机监控系统（共 9 个包），第 3 分标故障录波器（共 8 个包），第 4 分标相量测量装置（共 3 个包），第 5 分标时间同步装置（共 7 个包）。

（5）搭建用电侧智能化的基础架构　用电侧主要解决的是需求管理的问题，而要实现分时电价，乃至实时电价、双向电价，最关键的是电能表的真正智能化，而不是停留在目前仅能实现远程抄表的程度。未来智能电能表不仅将成为智能家电的重要“网关”，也将成为分布式电源接入的重要计价方式。从目前的低压载波技术来看是无法满足未来传输容量和稳定性需求的，电能表还将面临功能和信道上的技术升级。

变电智能化有望成为近期启动的环节，智能化变电站与目前的变电站相比，增强了智能化的功能，其中包括自适应、自协调、互动、控制等。

（6）配电网改造　智能配电网将是未来智能电网的核心，从国外经验来看，配电网是智能电网技术和投资的主要吸收地，主要原因是配网侧集中了分布式电源（包括光伏、风电、充电桩）以及配网自动化等智能电网的核心部分，也是支撑整个智能电网承上启下的关键环节。同时配电网覆盖面广，包含了大量的线路损耗，智能化改造具有显著的经济意义。从技术可行性上来看，配电网电压等级适中，是最适合进行智能化改造的环节。但是我国电力体制尚未完善，配电网主要的资金来源于地方和区域电力公司自筹，国家电网公司短期直接投资动力有限。

（7）启动顺序　各环节启动的先后顺序为用电、变电、配电。用电侧智能化的关键点——智能电能表已经开始大规模安装，未来用电侧将向技术纵深和运用领域升级发展；变电智能化试点已经铺开；配电目前仅限于试点起步阶段，后续铺开依赖于投资力度。我国配电和用电侧的投资落后于输电侧投资，国外的电网投资大概是电源投资的 1.2 倍左右，其中配电投资是输电的 1 倍多，相比之下我国配电网的投资不足输电网的一半，其主要原因是配电网稳定性并不在国家电网公司的考核范围内。但是在提升用电质量的驱动下，下一阶段国家电网公司投资将向配电网侧和用电侧延伸。

五、受益方

1）配电将是未来智能化增量最大的领域，变电环节增量是一次设备的智能化改造和控制升级，所以受益方仍然以传统的一次和二次设备提供商为主。

2）一次和二次设备的融合将是行业发展的重要方向，用电侧的核心为电能表的智能化，主要竞争格局已经确立。

3）配电网是新技术增量较大的部分，包括分布式能源接入、微电网、充电桩、智能建筑、配电网自动化等都需要大量新技术的支撑，期间将会有更大的技术型企业成长的空间。

第十六章　电 能 质 量

理想的电能应该是完美对称的正弦波。当日照强度和环境温度变化时，太阳电池输出的电压、电流呈非线性关系变化，其输出功率也随之变化，MW 级的大型光伏电站并入电网后，处理不妥会对电网带来冲击，使波形偏离对称正弦，带来频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、暂时或瞬态过电压、波形畸变（谐波）、电压暂降、中断等问题。另外，电力系统存在着大量非线性、冲击性和波动性负荷，比如大功率的变频设备及拖动装置、电气化铁路、电化工业的整流设备、感应加热炉、电弧炉等，这些负荷造成了电网发生波形畸变（谐波）、电压波动、闪变、三相不平衡、非对称性，使得电网电能质量降低。大型太阳能电站是并网运行的，因此要对太阳能电站及电网的电能质量（Power Quality）有所了解。

基于计算机，微处理器控制的精密电子仪器在国民经济企业中大量使用，对供电质量的敏感程度越来越高，对电能质量提出了更高的要求，从而使电能质量问题及其解决措施成为研究的热点。要对电网的电能质量进行控制，首先要对电能质量做出精确的检测和分析，测量电网的电能质量水平，并分析和判断造成各种电能质量问题的原因，为电能质量的改善提供依据。在现代电力系统中，电压暂降和短时中断已成为最重要的电能质量问题。

本章主要介绍电能质量概念、电能质量监测、电能质量在线监测及国外解决电能质量案例。

第一节　电能质量的概念

一、电能质量定义及指标

1. 电能质量定义

电能质量是用来描述正常运行条件下电力从发出一直传输到终端用户这个过程的一整套参数，这些参数用来描述供电的连续性（短时断电和长时断电）和供电电压的各种特性（幅值、不对称性、频率和波形）。

2. 理想的电能指标

（1）电网频率　我国电力系统的标称频率为 50Hz，GB/T 15945—2008《电能质量　电力系统频率偏差》中规定：电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 ±0.2Hz，当系统容量较小时，偏差限值可放宽到 ±0.5Hz，标准中没有说明系统容量大小的界限。在《全国供用电规则》中规定，供电局供电频率的允许偏差：电网容量在 300 万 kW 及以上者为 ±0.2Hz；电网容量在 300 万 kW 以下者，为 ±0.5Hz。实际运行中，从全国各大电力系统运行看都保持在不大于 ±0.1Hz 范围内。

（2）电压偏差　GB/T 12325—2008《电能质量　供电电压偏差》中规定：35kV 及以上供电电压正、负偏差的绝对值之和不超过标称电压的 10%；20kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 ±7%；220V 单相供电电压偏差为标称电压的 -10% ~7%。

（3）三相电压不平衡　GB/T 15543—2008《电能质量　三相电压不平衡》中规定：电力系统公共连接点电压不平衡度限值为：电网正常运行时，负序电压不平衡度不超过2%，短时不得超过4%；低压系统零序电压限值暂不作规定，但各相电压必须满足GB/T 12325—2008的要求。接于公共连接点的每个用户引起该点负序电压不平衡度允许值一般为1.3%，短时不超过2.6%。

（4）公用电网谐波　GB/T 14549—1993《电能质量　公用电网谐波》中规定：6～220kV各级公用电网电压（相电压）总谐波畸变率是0.38kV为5.0%，6～10kV为4.0%，35～66kV为3.0%，110kV为2.0%；用户注入电网的谐波电流允许值应保证各级电网谐波电压在限值范围内，所以国标规定各级电网谐波源产生的电压总谐波畸变率是：0.38kV为2.6%，6～10kV为2.2%，35～66kV为1.9%，110kV为1.5%。对220kV电网及其供电的电力用户参照本标准110kV执行。

（5）公用电网间谐波　GB/T 24337—2009《电能质量　公用电网间谐波》中规定：间谐波电压含有率是1000V及以下＜100Hz为0.2%，100～800Hz为0.5%，1000V以上＜100Hz为0.16%，100～800Hz为0.4%，800Hz以上处于研究中。单一用户间谐波含有率是1000V及以下＜100Hz为0.16%，100～800Hz为0.4%，1000V以上＜100Hz为0.13%，100～800Hz为0.32%。

（6）波动和闪变　GB/T 12326—2008《电能质量　电压波动和闪变》规定：电力系统公共连接点，在系统运行的较小方式下，以一周（168h）为测量周期，所有长时间闪变值*Plt*满足：≤110kV，*Plt*=1；＞110kV，*Plt*=0.8。

3. 电能质量指标含义

（1）谐波（harmonic）　谐波是指其频率为基波的倍数的辅波或分量；一般是指对周期性的非正弦电量进行傅里叶级数分解，其余大于基波频率的电流产生的电量。产生的原因：由于正弦电压加压于非线性负载，基波电流发生畸变产生谐波。主要非线性负载有UPS、开关电源、整流器、变频器、逆变器、变压器、电动机、发电机、电弧设备及电光源设备如电弧炉、荧光灯等。谐波的危害：降低系统容量如变压器、断路器、电缆等；加速设备老化，缩短设备使用寿命；浪费电能、谐波对发动机、变压器、电动机、电容器等所有连接于电网的电器设备都有大小不等的危害，主要表现为产生谐波附加损耗，使得设备过载过热以及谐波过电压加速设备的绝缘老化等；并联到线路上进行无功补偿的电容器对谐波会有放大作用，使得系统电压及电流的畸变更加严重；谐波电流叠加在电容器的基波电流上，会使电容器的电流有效值增加，造成温度升高，减少电容器的使用寿命；谐波电流使变压器的铜损耗增加，引起局部过热、振动、噪声增大、绕组附加发热；谐波污染也会增加电缆等输电线路的损耗，对通信质量有影响；当电流谐波分量较高时，可能会引起继电保护的过电压保护、过电流保护的误动作等。

因此，如果系统量测出谐波含量过高，除了电容器端需要串联适宜的调谐电抗外，并需针对负载特性专案研讨加装谐波改善装置，如有源电力滤波器是治理谐波的最优产品。

（2）电压不平衡　电压不平衡是指三相电压的幅值或相位不对称。不平衡的程度用不平衡度（电压负序分量和正序分量的方均根值百分比）来表示，典型的三相不平衡是指不平衡度超过2%，短时超过4%。在电力系统中，各种不平衡工业负荷以及各种接地短路故障都会导致三相电压的不平衡。

（3）过电压　过电压是指持续时间大于1min，幅值大于标称值的电压。典型的过电压值为1.1～1.2倍标称值。过电压主要是由于负载的切除和无功补偿电容器组的投入等过程引起的，另外，变压器分接头的不正确设置也是产生过电压的原因。

（4）欠电压　欠电压是指持续时间大于1min，幅值小于标称值的电压。典型的欠电压值为0.8～0.9倍标称值。欠电压一般是由于负载的投入和无功补偿电容器组的切除等过程引起的。另外，变压器分接头的错误设置也是欠电压产生的原因。

（5）电压骤降（Voltage Dip或Voltage Sag）　电压骤降是指供电电压幅值（有效值）短暂降低，随后恢复正常的特征。它是指在工频下，电压的有效值短时间内下降。典型的电压骤降值为0.1～0.9倍标称值，持续时间为0.5个周期到1min。电压骤降产生的原因主要有电力系统发生故障，如系统发生接地短路故障；大容量电动机的起动和负载突增也会导致电压骤降。

（6）电压骤升　电压骤升是指在工频下，电压的有效值短时间内上升。典型的电压骤升值为1.1～1.8倍标称值，持续时间为0.5个周期到1min。电压骤升产生的原因主要有电力系统发生故障，如系统发生单相接地等故障；大容量电动机的停止和负载突降也是电压骤升的重要原因。

（7）供电中断　供电中断是指在一段时间内，系统的一相或多相电压低于0.1倍标称值。瞬时中断定义为持续时间在0.5个周期到3s之间的供电中断，短时中断的持续时间在3～60s之间，而持久停电的持续时间大于60s。

（8）电压瞬变　电压瞬变又称为瞬时脉冲或突波，是指两个连续稳态之间的电压值发生快速的变化，其持续时间很短。电压瞬变按照电压波形的不同分为两类：一是电压瞬时脉冲，是指叠加在稳态电压上的任一单方向变动的电压非工频分量；二是电压瞬时振荡，是指叠加在稳态电压的同时包括两个方向变动的电压非工频分量。电压瞬变可能是由闪电引起的，也可能是由于投切电容器组等操作产生的开关瞬变。

（9）电压切痕　电压切痕是一种持续时间小于10ms的周期性电压扰动。它是由于电力电子装置换相造成的，它使电压波形在一个周期内有超过两个的过零点。由于其频率非常高，用常规的谐波分析设备无法测出，因此以前一直未把此项作为电压质量的一个指标。

二、国际上电能质量研究成果

1. 电能质量的基本分类与描述

对于电能质量现象可以根据不同基础来分类。以下介绍近几年国际上在电能质量现象分类和特性描述等方面取得的研究成果。其中，在国际电工界有影响的IEC以电磁现象及相互干扰的途径和频率特性为基础，引出了广义的电磁干扰的基本现象分类，表16-1为IEC关于引起电磁扰动的基本现象分类。

表16-1　IEC关于引起电磁扰动的基本现象分类

现　象	分　类	现　象	分　类
传导型低频现象	谐波、间谐波	传导型低频现象	感应低频电压
	信号系统(电力线载波)		交流电网中的直流成分
	电压波动	传导型高频现象	感应连续波电压或电流
	电压暂降和中断		单方向瞬变
	电压不平衡		振荡性瞬变
	工频变化	辐射型低频现象	工频电磁场

（续）

现　象	分　类	现　象	分　类
辐射型高频现象	磁场	静电放电现象(ESD)	
	电场	核电磁脉冲(NEMP)	
	电磁场		
	连续波		
	瞬变		

表 16-2 给出了 IEEE 关于电能质量领域电磁现象的具体分类。

表 16-2　IEEE 制定的电力系统电磁现象的特性参数及分类

类　别			典型频谱	典型持续时间	典型电压幅值
瞬变现象	冲击脉冲	纳秒级	5ns 上升	<50ns	
		微秒级	1ms 上升	50ns ~ 1ms	
		毫秒级	0. 1ms 上升	>1ms	
	振荡	低频	<5kHz	0. 3 ~ 50ms	0 ~ 4p. u.
		中频	5 ~ 500kHz	20ms	0 ~ 8p. u.
		高频	0. 5 ~ 5MHz	5ms	0 ~ 4p. u.
短时间变动	瞬时	暂降		0. 5 ~ 30 周波	0. 1 ~ 0. 9p. u.
		暂升		0. 5 ~ 30 周波	1. 1 ~ 1. 8p. u.
	暂时	中断		0. 5 周波 ~ 3s	<0. 1p. u.
		暂降		30 周波 ~ 3s	0. 1 ~ 0. 9p. u.
		暂升		30 周波 ~ 3s	1. 1 ~ 1. 4p. u.
	短时	中断		3s ~ 1min	<0. 1p. u.
		暂降		3s ~ 1min	0. 1 ~ 0. 9p. u.
		暂升		3s ~ 1min	1. 1 ~ 1. 2p. u.
长时间变动	持续中断			>1min	0. 0p. u.
	欠电压			>1min	0. 8 ~ 0. 9p. u.
	过电压			>1min	1. 1 ~ 1. 2p. u.
电压不平衡				稳态	0. 5 ~ 2%
波形畸变	直流偏置			稳态	0 ~ 0. 1%
	谐波		0 ~ 100th	稳态	0 ~ 20%
	间谐波		0 ~ 6kHz	稳态	0 ~ 2%
	陷波			稳态	
	噪声		宽带	稳态	0 ~ 1%
电压波动			<25Hz	间歇	0. 1 ~ 7%
工频变化				<10s	

2. 变化型和事件型分类

电能质量问题还有一种分类方法，即按照电能质量扰动现象的两个重要表现特征——变化的连续性和事件的突发性为基础广泛地分成两类。这是一种比较实用的分类方法。所谓变

化型是指连续出现的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流的幅值大小、频率、相位差等在时间轴上的任一时刻总是在发生着小的变化。这一类现象包括前述的电压幅值变化、频率变化、电压与电流间相位变化、电压不平衡、电压波动、谐波电压和电流畸变、电压陷波、主网载波信号干扰等。所谓事件型是指突然发生的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流短时严重偏离其额定值或理想波形。这一类现象包括电压暂降和电压短时间中断、瞬态过电压、阶梯形电压变化、相位跳变等。

三、产生电能质量的原因

产生电能质量的原因有电压骤降、谐波、电弧、供电电压偏差等。

1. 电压骤降的原因

（1）外部原因

1）雷击，造成对地短路故障使配电线路产生大电流，从而导致供电电压骤降。这种电压骤降影响区域大，持续时间一般超过100ms。

2）供电设备故障。

3）接地故障。

4）交通事故，车辆撞到电线杆上。

5）线路故障，动物、大雪、狂风和挖掘等引起压降。

6）重合闸，突加负载引起的较大电流导致压降。

（2）内部主要原因　大型电动机负载起动。

图16-1为电压骤降波形。

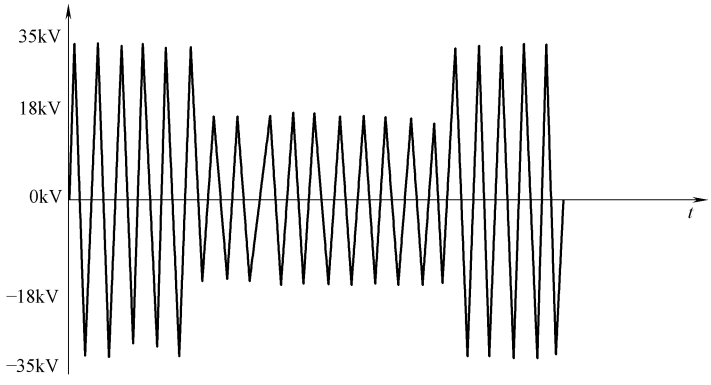


图16-1　电压骤降波形

（3）电压骤降的影响

1）对通用电器设备的影响。随着经济的发展，高科技设备获得了广泛的应用，这些设备对电压变化很敏感，短时的供电中断或电压有效值下降，往往会造成设备不正常运行，发生停机等事故。电压骤降就是针对这一问题提出的。与供电中断事故相比，电压骤降有发生频度高、事故原因不易觉察的特点，处理起来也比较困难。电压骤降会引起敏感控制器不必要的动作（引起跳闸），造成自动化控制装置停顿或误动、变频调速器停顿，引起低压保护启动，造成电动机、电梯等停顿，引起高温光源（碘钨灯）熄灭，造成公共活动场所失去照明等。不同的设备对同一电压骤降的感受度是不同的，如制冷电子控制器，当电压低于约80%时，控制器动作将制冷电动机切除；高端测试仪，当电压低于约85%时，测试仪停止

工作；可编程序控制器（PLC），当电压低于约 81% 时，PLC 停止工作；一些 I/O 设备，当电压低于约 90% 、持续时间仅几个周期时，就会被切除；精密机械工具，由机器人控制对金属部件进行钻、切割等精密加工，工作电压一般设为 90% ，当电压低于此值且持续时间超过 2 ~ 3 个周期时，就会跳闸；当电压低于约 80% 时，直流电动机跳闸；调速电动机（VSD），当电压低于约 70% 、持续时间超过 6 个周期时，VSD 被切除。电压骤降导致线上材料报废、产量的降低、相应的人工成本增加。

2）对敏感电气设备的影响。计算机是敏感电气设备，现在办公室和个人计算机、商业和制造业微处理器控制设备激增，计算机运算速度的加快达到无线电波频率范围内，电路变得越来越纤小，电路板上相邻线路也越来越挤，过电压的击穿危险增大了，相邻信号通道的干扰也增加了，微处理芯片变得更小更密，它本身也产生电磁干扰，其电路更易受电磁波的干扰，这妨碍了热量的逸散。工作电压的不断下降也为它们的小型化创造了条件。数字量的“1”位已经被降低到 3. 5 ~ 5. 0V，甚至更低，而“0”位则提高到 0 ~ 1. 5V。因此某些很小的瞬间过电压就可能导致运算错误。显而易见避免瞬态过电压和高频干扰对微电子线路是非常重要的。另外，随着计算机微型化的不断发展，开关模式电源应运而生。过去用直流操作的设备（包括所有电子电路）都有又大又重的电源，一般都用降压变压器降压，再将低压送到一个半波（单二极管）或全波（桥式）整流器上，这种电源既笨重且效率很低。“开关模式电源”是将全波桥式整流器直接接到 120V 交流电源上。在脉冲直流送到变压器前，将储存在电容器中的能量以短脉冲（这是准方波）的形式送出来，这样变压器在高频脉冲直流上运行，而以前是在 50Hz 交流上运行。这种运行方式使变压器可以做得比原来同样容量的用 50Hz、120V 电源的变压器更小更轻。因此，总电源效率大大提高了，由传统电源的约 50% 提高到开关模式电源的约 80% 。但是，这种电源输出的高频脉冲可产生谐波，这些谐波可以流回到配电系统，影响其他不间断电源、变频传动装置、充电器等设备甚至配电系统本身，这些设备既易产生电源质量问题又易受到不良电源质量的干扰。

2. 谐波的原因

谐波能造成数据丢失、敏感电子设备的误操作、断路器无故跳闸、设备过早失效、相线特别是中性线及电气设备过热等电气故障，谐波源于三相系统非线性负荷。

在三相平衡负荷回路（每相均为相同的线性负荷，作用在每相上的都是平滑的 50Hz 正弦波电压，中性线上通过的是各相电流的相量和，其值为零。但是如果一相或一相以上的导线上通过谐波频率高于 50Hz 基波）的电流，它们在中性线上不能由相量相加来消除，而是在中性线上叠加。一般的仪表可能测不到这些。如果谐波电流是正弦波，可用数学公式推算出，偶次谐波在中性线上是可以被抵消的。但是奇次谐波因相位相同，会叠加而出现在中性线上，使中性线过热，中性线上的电流比任一相线上的电流都大（已经有因谐波引发火灾的报道）。

如果基波或谐波是非正弦波，例如是由脉冲电源产生的方波，数学分析就变得非常困难。相线本身可通过正弦波形和非正弦波形成 50Hz 基波，以及形成非正弦波形的高频脉冲电流，它会使相线过热，根据欧姆定律，这些畸变电流会产生畸变电压，使设备发生故障，并会危及到同一建筑物内的其他设备。

3. 电弧的原因

电弧是一种气体放电现象，是电流通过某些绝缘介质（例如空气）所产生的瞬间火花。

起动中的大电动机、电子调光设备、灯具镇流器（特别是电子式）、带电刷的电动机、电焊机、气体放电灯（荧光灯和高强度气体放电灯）、弧焊机和其他产生电弧的设备、医疗设备（例如 MRI 和 X 光机），都可以成为很强的电磁干扰源，电弧对任何频率都具有很强的干扰能力，这些设备可将平滑的正弦波形变成阶梯形波形，改变输出的电压和频率，这种干扰可因某种不适当的屏蔽或接地方式而传导到敏感设备上。从傅里叶分析可知，任何形状的波形都可以由各种频率和振幅的正弦波组成。开关模式电源和变频器输出的方波或准方波也是由若干正弦波构成的。50Hz 正弦波是基波，而方波则还包含更高频率的波，它们是 50Hz 基波的谐波，其尖刺部分会产生瞬态过电压。这些谐波还能使电路和中性线发热，并使数字逻辑运算产生错误。此外，方形波的前沿或电压尖刺则像高频正弦波（无线电波）那样导致上述的运算错误。

4. 供电电压偏差的原因

1）供电距离超过合理的供电半径。

2）供电导线截面积选择不当，电压损失过大。

3）线路过负荷运行。

4）用电功率因数过低，无功电流大，加大了电压损失。

5）冲击性负荷、非对称性负荷的影响。

6）调压措施缺乏或使用不当，如变压器分接头摆放位置不当等。

7）用电单位装用的静电电容器补偿功率因数未采用自动补偿。

第二节　电能质量的改善

这里介绍的电能质量改善办法有一部分是美国 IEEE 协会推荐的。

一、电压质量的改善

1. 电压骤降的解决

据统计和案例反映，造成用户用电设备异常运行或停电的绝大部分因素是电压骤降问题，反映电压骤降发生频度的主要量化指标是 SARFI（x）。对于一个系统中选定的供电点来说，SARFI（x）是指一年中发生的电压真有效值（RMS 值）在 $x\%$ 以下的电压骤降次数。

1）解决电压骤降问题，供电企业要做的工作有：

① 优化输配电系统设计及运行结构，减少故障对电网用户点供电电压的影响。采用静态（电力电子）快速负荷切换开关。

② 应用电力调整装置，为用户提供定制电力。

③ 采用恒压变压器、静态负荷切换开关、电压骤降动态校正器、储能发电机组等电压骤降过渡技术及设备。

2）解决电压骤降问题，用户要做的工作有：

① 对用电设备及布局进行优化设计。

② 在设备订货时向制造商明确过渡电压骤降的能力。解决电压骤降问题，需要了解用电设备对电压有效值变化敏感的特性，即什么水平的电压骤降会引起用电设备不正常运行。目前，国际上还没有统一的标准规定用电设备耐受或过渡电压骤降的能力。每一设备对电压骤降的敏感程度是不一样的，需要通过试验才能知道实际情况。国际上一些行会组织制定了

技术标准，规定了用电设备过渡电压骤降的能力。美国计算机制造商会提出了 CBEMA 曲线，描述计算机能耐受一定幅度及持续时间的电压骤降的能力；国际半导体生产商组织制定了 SEMI F47 标准。

2. 电压降的改善

尽管 NEC 标准允许分支回路电压降不超过 3%，但对敏感设备的供电回路在满负载时，电压降的设计仍建议不超过 1%，馈电回路的电压降不应超过 2%。这意味着导线的截面积应比法规规定的最小值大，但是大容量的导线因其有更小的电阻，减少了导线上的能耗，使初期投资的回收期缩短。另一个计算电压降所需考虑的因素是峰值因数（给定波形的峰值与平均值的比率），正弦波的峰值因数是 1.414，大多数表格计算公式和法规都是基于这种通常的波形。而非正弦波形包括谐波和不规则波形的峰值因数是 3、4 或更高。因此，波峰电流引起的电压降可能是通常正弦波情况下的几倍。在计算电压降时就出现了需要使用哪一电流值的问题，以及在高频谐波下使用哪一回路阻抗值的问题。有些工程师建议用设备铭牌负荷的 3～4 倍，来考虑峰值因数增大、肌肤效应补偿以及可能出现的高频电流分量引起高感抗等因素。这种保守的估算在大多数情况下并不需要，但为慎重起见，相线不应承载至规定载流量的限值。选用比负荷需要的更大的截面积，又规定导线电压降限制在 1% 以内，这就防止了在大多数情况下分支回路电压降过大的问题。应指出的是，增大导线截面积增加的材料费用占基建时电气装置总费用的份额很小。

二、谐波问题的改善

1. 两倍截面积的中性线

谐波易使设备发生故障，影响到运行安全，可以采用两倍截面积的中性线的方法来解决问题，这是美国计算机制造商会与商用设备制造商协会（信息工业协会的前身）所推荐的，也可为每相电路设置单独的中性线来解决。已有电缆制造商在生产 AC 型或 MC 型电缆，这种电缆的结构有三种类型：

1）三根相线各有一根单独的中性线。

2）三根相线（12 号线）共用一根两倍截面积的中性线（8 号线，白色）。

3）三根相线，一根两倍截面积的中性线和一根隔离接地线（绿色带黄线条）。

这种电缆内有加大截面积的中性线或增加了中性线的数量。这种增加中性线截面积的办法费用不多，却能有效地保证安全。

注意，这三种类型的电缆内都有一根绿色的设备接地线。

2. 装谐波滤波器

装有滤波器对于已建好的建筑物来讲是最经济的，因为重新布线会很困难而且费用也高。滤波器是用来限制或减少有害电流，减少导线上的谐波负载的电器。但是滤波器的设计是由它要被安装上的设备决定的，如果设备上的关键元件发生变化，滤波器就可能失效。为某一特定装置安装滤波器时，需请专业人员进行有针对性的设计，其每千伏安的价格较昂贵。

3. 隔离变压器

隔离变压器是一种电源或负载减少谐波的滤波设备。对于存在电源质量问题的地方，加装这种设备也是一种技术改造的方法，其每千伏安的价格较贵。

4. K 额定值变压器

K 额定值变压器内的导线有所加粗，并加强冷却以便承载谐波负载。而普通变压器则需要靠降低额定容量来减少因谐波产生的热量。根据实际运行情况，普通变压器负载最低需降到铭牌额定值的 50%，这种方法未尝不可以解决谐波问题，但是变压器的效率降低了。在确定处理方案之前，应仔细比较采用 K 额定值变压器与采用普通变压器降容两种方法，确定哪一种方法更为经济。

5. 按谐波量标定的断路器和配电屏

谐波产生的过热现象是危险的，选用提高参数的器件可对整个设备起到保护作用，如中性线的额定电流可定为相线额定电流的两倍。

三、电气系统改进

1. 布线要点

设计更好的电气系统和增加回路。对新建的建筑物来说，应用这些技术较为便宜。

（1）将敏感设备与其他设备分开　在每个办公室里设置计算机专用电路，至少在末端配电箱上设置单独的回路。在某些场合，更好的做法是给敏感设备从单独配电盘上引单独回路来供电。应尽量避免使敏感设备和电动机使用同一电路、同一配电盘。而像激光打印机、复印机和传真机等设备也应与计算机分开回路供电。

（2）中性线和接地线分开　专用回路内包括单独的相线、中性线和接地线，每一回路应套单独的金属管。

（3）台下安装的插座　其中一个是隔离接地的插座，它有明显的橘红色“计算机”文字标记。另外的是普通插座，上有棕色的“电源”文字标记。这两种插座由两回分开的回路自两个配电箱供电，插座内还装有瞬态涌压防护器。

（4）限制每个回路插座数量　对每回 20A 回路推荐只装用 3～6 个插座，而不是规范中的 13 个插座。这将减少分支配电回路中敏感设备的数量，有助于减少电压降，减少相互影响，并为将来的发展和装用设备的变更留有余地。

2. 金属套管

接地良好的金属套管为穿过它的导线起到了对射频干扰的屏蔽作用。但无论如何不能因为穿了金属套管，就把回路的接地线（绿色绝缘铜线）取消，接地线用于人身安全，但同时也提供了一个连续的低阻抗的接地通路。接地线应穿入金属套管内，而不是在套管的下面。

所有连接处都应该紧密连接，以避免因不良连接而可能出现的射频感应，对腐蚀和连接松动等弊病，都需要做定期的检查维修，以保证所有套管接头的低阻抗导电的连续性。

若没有单独的铜接地线，则用硬钢管做接地线比铝管好。如果考虑到不论哪种金属管都可能腐蚀和松动，最佳的方法是任何情况下都选用一根单独的有足够截面积的铜质接地线。

3. 导线材料

导线的连接不良，轻则引起电压波动，重则引起灾难性事故。采用铜质导线可减少这类电气危险。铜是用以衡量其他导电金属材料性能的标准导电金属材料。在相同的截面积下它的电阻较低，这意味着在同一负载条件下，铜导线的截面积和其套管的截面积都较小。氧化铜仍是良导体，而氧化铝却是绝缘体。敷设铜导线没有特殊的要求，使用铜导线时维护工作量也少，它不需要使用防腐剂。由于铜导线良好的连接性能，其引起电源质量问题导致电气

事故的危险很小。

4. 电气接地

大约 80% 的电源质量问题与布线或接地不当有关。关于电气接地，术语“地(ground)”是指大地（地球）或指代替大地的某一大物体，而术语“被接地（grounded)”是指一个系统中的某一部分元件被特意地接到“地”上。在英国是用“earth”和“earthing”这个词来代替“ground”和“grounding”的，这显得更恰当，但是由于许多资料和美国标准都采用“ground”和“grounding”，因此，本书也采用这种用法。“地(ground)”实际上表达了一个对地电压参考电位点，或者叫“0”电位点。当计算机同其他设备联通时，零电位对它们正常运作是非常重要的。由于大地就在我们身边，因此大多数情况下，它是零电位点的最佳选择。当一个人站在地上时，他身体的电位与大地的电位是非常接近的。如果建筑物是金属结构的，那么建筑物结构的金属构件或水管（如果也是金属的话）的电位也与大地非常接近。电气系统接地的主要目的是在系统发生故障（接地短路）时，保护人员和财产的安全。接地系统的第二个作用是提供给雷电电流一个可控制的低阻抗的通路，使之安全地流入大地而不造成危害。包绕导线的金属物体或在发生接地短路或静电放电时有可能带电的金属物体，都应接地，以保证人身安全。而交流供电系统最好采用直接接地。

（1）金属外护物　所有金属外护物、设备接地线与接地极之间，应由一个连续的电气连接系统以牢固的方式连接在一起，即建筑物的钢结构应与一个铜母排连接在一起，通过铜母排与电源回路的接地线连接在一起，以及和建筑物设备的接地线以及金属水管等连接。

（2）接地环　采用埋于建筑物外部的接地环，接地可以将建筑物接地系统与大地间的接地电阻进一步降低，它也可将建筑物内各种接地连接在一起。将一根裸铜线［允许的最小截面积是#2AWG（美国线规，直径为 6.544mm），但是 4/0（直径 11.684mm）、250kcmil 和 500kcmil 也经常使用（kcmil 美国线规，面积单位，500kcmil 为 250mm^2）］埋在冻土线以下。截面增大意味着增大了表面积，从而降低了接地电阻。接地环埋于离建筑物边缘的几英尺的壕沟内，并围绕建筑物基础结构一周。还可用增大土地电导的回填材料（膨润土、天然黏土材料或其他适当材料）来提高土地的导电性。这种埋地环形接地环需接到建筑物钢结构、防雷保护引下线、接地极系统、跨越它的金属管道系统和其他现有接地极。有时候接地环上还需增加垂直接地棒。例如在一个大学的研究所，在建筑物的每个屋角处打入三根接地棒，有时在屋边中点再打三根接地棒，接地棒之间用 500kcmil 的裸铜线，在冻土层深处相互连通并环绕整个新建筑物一周（只要施工现场在继续施工，土沟已经开挖，施工人员仍在现场，就没有必要吝啬这一点接地线）。这所大学建筑物今后将长期使用，它的用途在几十年使用期内是要变化的，没必要节省这 1% ~2% 的电气基建费用（用于加大中性线，增加配电回路数，完善接地系统）。花了这笔钱就可以保证建筑物电气系统长期正常工作而不需再动工挖土或作电气系统改建，因为这些改建可能花大笔费用，而且在以后的环境条件下是无法实现的。

5. 接地电阻

接地系统在安装后应用接地电阻表检查接地电阻，而且根据实际情况定期进行检查，如每半年或一年一次。若检测的结果与原值有较大出入，需查明原因并给予修正。尽管 NEC 规定接地电阻需要小于或等于 25Ω，这个规定是基于在故障条件下使过电流保护器（断路

器）动作的接地电阻。对于敏感电子设备是不能按上述规定做的，换句话说，如果不能达到25Ω，按规程允许安装第二个接地极，而且不用再进行检查就可以了。很多电话和通信公司要求接地电阻为5Ω或更小。没有一个接地电阻值可以保证设备不出故障，但通常是越低越好，10Ω或更小的阻值是大多数土壤都能达到的。施工中，只要已经动工，施工人员还在现场，应尽可能地安装最好的接地系统，这样做更为经济。

6. 接地极埋设深度

如在不大的建筑物场地或在罕见的高土壤电阻值地区施工时，需要深埋接地线。铜管型接地极有时可达数十至数百英尺长，穿入钻孔中，这种情况极少但不是没有。例如在山顶地区，为了达到要求的接地电阻，这种深钻孔的办法可能比在岩石表面或陡坡上做分散布置的接地系统更为经济。按一般说法，深接地棒比分散布置接地棒更有效，20ft（1ft = 0.3048m）长的接地棒的效果肯定比10ft长的好。由于深处的温度稳定和湿度增大，接地电阻随接地棒的增长而迅速下降。接地棒的间距也是重要的，经验作法是当有多个接地棒时，接地棒之间的间距应该是接地棒长度的两倍。也就是每根10ft长的接地棒安装间距不应小于20ft。

7. 雷电

雷电通过的道路是对地电阻最小的通路，如线路和设备的通路电阻最小，它就要从线路和设备入地。雷电能在很短的时间里产生很大的电流，足以导致火灾或损坏几英里外的微电子线路。避雷针或接闪器是源于本杰明·富兰克林的发明。这种方法为雷电提供了简便可控的接闪点，并安全地把它们导入地下。为了提供最小电阻的通路，接闪器（避雷针）和引下线应采用大截面的铜线。防雷引下线应和建筑物钢筋、电源接地线直接接至上述接地环或其他类型的接地极系统。引下线应采用大截面铜线以降低阻抗。

通过采用上述推荐的措施，电源质量问题可以大大地减少。在建筑物新建或改建期间，只要施工还在进行，施工人员还在现场，花费在增加一些材料和加大导线截面的费用是很少的。对减少生产率降低和停产造成的损失来讲，多这一点钱是很值得的。如果正在生产的工厂中出现了电源质量问题，有必要仔细研究，采用最好的解决方法，解决方法可能很简单，例如调整一下一些供电分支回路上的负荷；对电源线路的布线稍加改动或增加一些供电分支回路；在有些情况下安装隔离变压器或谐波滤波器等。环形接地结合增加垂直接地棒可在建设新建筑物时考虑；这种方式不能用于建筑物改建，特别是不能用于城市或其他土地空间有限制的地区。对于改建来说，最好的解决办法是采用加长垂直接地棒或用化学药品来提高接地棒与大地间的电导，但应确认埋入地下的化学药品和回填材料，应是经过国家环保机构承认和批准的环保材料。

四、电网用户改善电能质量

电网用户涉及的电能质量问题主要是功率因数问题、谐波问题以及电压瞬变问题。针对这些问题的治理手段有好几种，比如电容补偿、调谐补偿、动态投切补偿、无源滤波、有源滤波等。每种手段主要针对某个方面的问题进行治理，但同时会影响到其他方面，或者会产生不利影响，或者会有帮助作用。所以，治理电能质量问题，应该把几个方面一起考虑，免得分别治理的时候彼此产生干扰冲突，或者重复浪费。另外，高压、中压、低压母线上的电能质量问题是彼此有影响的，比如在中压段设置了无源滤波来治理谐波，因为无源滤波技术同时具有补偿效果，所以低压母线上的无功补偿容量就应该降低一些，免得浪费投资。所以，一个工程项目的高压、中压和低压部分存在的电能质量问题也应该综合设计以免重复浪

费。对功率因数、谐波、电压瞬变问题同时考虑，综合设计统一的治理措施，对高压、中压、低压母线上的电能质量问题同时考虑，形成整个项目的综合治理措施，这就是电能质量综合治理的概念。

电能质量综合治理的目的就是防止不同治理手段之间产生冲突，避免重复作用造成浪费，避免用高投资手段解决低投资手段可以解决的问题，以尽量少的投资，达到尽可能好的治理效果。

1. 产生电能质量问题的原理和解决方法

（1）无功功率的原理和解决方法　电动机一类设备在磁场下工作，磁场在交流电下会不断储存和释放电能，但不会消耗电能，所以称为无功功率。无功功率虽然不会做功，但磁场储存能量的时候需要流入电能，释放能量的时候又要流回去，这些来回流动的能量占用了线路、变压器、开关、发电机等设备的能力，不能充分发挥作用，而且还会增加线路损耗。

解决的办法是就近设置电场类设备也就是电容器，电场在交流电下也不断储存和释放能量，但正好和磁场储存和释放能量的时间错开，于是，磁场储存的能量就正好来自电场释放的能量，磁场释放的能量也正好存进电容器里去，无功功率就近互相提供，不再经过发电机、变压器、线路等系统设备了，这就是无功补偿原理。

（2）产生谐波的原理和不同谐波源谐波的解决方法　如果正弦交流电压加在设备上，产生的电流却不是正弦交流电流，这样的设备就称为非线性阻抗设备，简称非线性设备。不是正弦波形的交流电就含有谐波成分，所以非线性设备也称为谐波源。谐波会导致设备发热增加、产生附加负荷导致过载故障，引起线路干扰，还会因为共振导致设备中有谐振回路的部分损坏等。

工业电网中主要的谐波源有三种类型：

1）三相桥式整流回路在每一相的正负波形上都会产生波形变化，一个周期里就有六个非正弦的波形，所以称为六脉波设备。六脉波设备的谐波很有规律，会产生六的倍数加减 1 次数的谐波，即 5、7、11、13、17、19……次谐波，而且随着谐波次数升高谐波幅值会逐渐降低，所以通常只需要处理 5、7、11、13 次谐波。这类设备包括三相桥式整流器的所有设备，比如直流驱动器、变频器、软起动器、UPS 等，是目前工业用电设备中最常见的一类谐波源。六脉波谐波源产生的谐波，次数稳定，可以用调谐技术滤除。

2）类似工业电弧炉这样的设备工作时，电流波形变化很频繁，会分解出次数和幅值不断变化的谐波。这类谐波需要采用针对可变次数谐波进行滤除的技术，比如有源滤波技术。

3）非线性的单相设备，比如带有单相整流环节的电子仪器等，因为三相不对称原因会在零线上形成 3 次零序谐波。3 次零序谐波需要采用零序接法的滤除技术，比如四线制有源滤波，或者分相式无源滤波技术。

（3）产生电压瞬变的原因和解决方法　大容量电动机在直接起动或者通过软起动器起动时，由于起动时功率因数非常低，会产生很大的无功电流，总电流比正常运行时高几倍，在线路中产生很大的瞬时电压降，导致系统电压突然下降。一些负荷周期性冲击变化的机械设备例如飞剪机等，因为负荷的变化，电流也会大幅度周期性变化，导致系统电压周期性变化，这种现象称为闪变。电压突降和电压闪变都会给其他设备的运行带来干扰。两种情况都和大量的短时无功电流有关，如果无功补偿能够及时投入和切除就可以大幅度缓解。

（4）电能质量问题的治理手段　解决电能质量问题，首先涉及的是供电企业、用户以

及用电设备制造商，进一步需要设计、咨询、标准化组织、研究部门以及监测仪器制造商的广泛参与。

1）单纯电容补偿。电容器可以补偿电动机产生的无功功率，以提高功率因数。但这些电容器会和变压器形成谐振回路，而且随着电容器的投入和切除，谐振频率会不断变化，就有可能在某些投切比例下正好放大了系统中存在的谐波，造成系统谐波超标、电容器寿命缩短甚至爆炸等危害。因此，单纯的电容补偿措施，在目前工业环境下已经属于应该淘汰的措施。

2）固定调谐电容补偿。在补偿电容器回路上附加电抗器，让电容器和电抗器形成频率固定的谐振回路，并且让这个频率比系统中存在的所有谐波频率都小，这样不仅不会再放大谐波，而且还具有一定的衰减作用。固定调谐补偿是一种可以在有谐波存在的环境下运行的无功补偿技术，同时具有一定程度的谐波滤除作用。

电容器和电抗器之间的阻抗比不同，谐振频率就不同，产生的作用也就有差别，常见的阻抗比有 14%、12.5%、7%、5.67% 四种。

14% 阻抗比的情况，对于 3 次以上的谐波都不会放大，但对各次谐波的滤除能力最低，而且对 3 次零序谐波没有滤除作用。由于六脉波谐波源不产生 3 次非零序谐波，所以这种阻抗比不常用。

12.5% 阻抗比的情况，作用和 14% 的情况差不多，只是谐波滤除作用略微强一点，也不常用。

7% 阻抗比的情况，对于 5 次以上的谐波都不会放大，并且具有一定的滤除作用，大约可以滤除 20% 的六脉波谐波源产生的谐波，特别适合于只有六脉波谐波源，且谐波问题本来不严重的情况下，作为同时治理无功功率和谐波问题的综合措施，也可以配合无源滤波或者有源滤波技术使用。

5.67% 阻抗比的情况，对于 5 次以上的谐波都不会放大，而衰减作用更大，对六脉波谐波源产生的谐波，可滤除 40% ~50%，但对电容器和电抗器的参数漂移有一定要求，投资比 7% 阻抗比的设备要高一点，适合于只有六脉波谐波源，固有谐波成分轻微超标的情况下，作为同时治理无功功率和谐波问题的综合措施，比如变频器一类设备占总容量比例在 20% ~40% 之间的应用场合。

固定调谐补偿设备是在有谐波环境下工作的，元件上承受的电压和电流都比没有谐波的情况高，所以，为单纯电容器补偿设计的电容器，以及不是专门为谐波环境运行设计的电抗器，都不能用来组成固定调谐补偿设备。低、中、高压系统都可以采用固定调谐补偿技术。

2. 动态投切技术

电容器切除后没有放完电就再次投入，如果正好是电源电压相位和电容器电压相反的瞬间，电容器上就会承受超过电网峰值的电压，甚至达到峰值电压两倍的过电压，同时充电电流很大，会损坏电容器。

在电容器初充电期间，充电电流的最大瞬时值远大于正常运行情况，如果正好在电流最大瞬时值的时候切除，也可能损伤电容器。

因此，接触器投切的电容器，投入和切除动作之间必须有时间间隔。

这样，就做不到利用在无功功率快速变化的同时进行实时补偿的方式，来缓解电压瞬

变了。

利用晶闸管配合触发电路上的检测判断功能，可以在检测到电源电压与电容器电压接近的瞬间投入，或者在电容器充电电流过零时切除，能够不受投切时间间隔限制，达到快速投切的要求，这种方式称为动态投切。

动态投切用带控制单元的晶闸管作为投切开关，投资比接触器投切要高。

实际上并不需要把所有补偿回路都设计成动态投切，只需要一部分补偿回路采用动态投切，利用自动转换方式，在静态投切的电容器放电完成或者充电平稳之后，与动态投切的电容器之间进行交换，始终让一半左右的动态投切回路保持投入，这样，不论是需要投入还是切除补偿回路，都可以利用动态投切回路瞬时执行，达到动态投切的效果，这种方式就是动-静结合投切技术。

动态投切技术目前只能用于低压补偿。

3. 无源滤波技术

无源滤波技术也称调谐滤波技术，它本质上仍然是调谐原理，只不过调谐频率从衰减端更加靠近需要滤除的谐波频率，例如调谐频率略低于250Hz的调谐回路，能够滤除大部分5次谐波；调谐频率略低于350Hz的调谐回路，能够滤除大部分7次谐波等。把能够滤除大部分5、7、11、13次谐波的四个分支回路组合起来，就能够滤除六脉波谐波源产生的大部分谐波。

无源滤波技术适用于谐波源都是六脉波设备，谐波成分又严重超标的情况。

无源滤波和固定调谐补偿一样，基本回路都是由电容器和电抗器组成的调谐回路，同时具有滤波和补偿功能。固定调谐补偿以无功补偿为主，滤波功能为辅，而无源滤波以谐波滤除为主，且具有补偿作用。

无源滤波的调谐频率很接近谐波频率，因此要求调谐频率非常精确，而且不能明显漂移，所以，对于设计计算能力，电容器和电抗器的质量，以及参数漂移的限制等都要高很多，所以投资明显高于固定调谐补偿，而且能够掌握此技术的制造商也远没有固定调谐补偿普遍。

无源滤波技术虽然是很多谐波治理厂商没能掌握的技术，但对于掌握了此项技术的厂商而言，却属于成熟技术，其运行可靠性是相当高的。

无源滤波技术既可以用于低压系统，也可以用于中、高压系统。

4. 有源滤波技术（ACF）

和无源滤波不同，有源滤波技术利用的不是调谐原理，而是有源逆变技术，产生出谐波来和系统原有谐波抵消，达到滤波的目的。

有源滤波需要实时检测系统谐波情况，然后以有源逆变作为执行手段，实时产生反相位谐波去抵消系统谐波。

所以，有源滤波技术实际上是一种自动控制技术，不受调谐频率限制，可以滤除一定范围内的各次谐波，使用四线制的带零序的有源逆变，还能够滤除3次零序谐波，而且，滤除谐波的程度要比无源滤波更强，滤除得更干净。

有源滤波同样可以逆变出不同相位的基波成分来抵消基波无功电流，因此也具有无功补偿的能力。有源逆变的发生机制是实时的，可以实时补偿无功功率和滤除谐波，所以，有源滤波也能够有效缓解电压瞬变。

所以，有源滤波从功能来说，几乎可以说是万能的电能质量治理手段。

但有源滤波技术是一种复杂技术，投资成本远高于调谐技术，而且有源逆变理论上还存在逆变颠覆的技术隐患，所以，有源滤波技术应该用在调谐滤波技术不能充分解决问题的场合，不应该作为谐波治理的首选手段。

存在大量的非六脉波谐波源产生的变化谐波的场合，需要把谐波成分滤除得特别干净的场合，以及存在大量的3次零序谐波的场合，才是真正需要有源滤波技术的合理应用场合。

另外因为元件因素，有源滤波目前还很难直接制造中压以上的产品。

5. 中压SVC技术

SVC技术也是一种调谐滤波技术，是调谐频率可以动态改变的调谐滤波技术的总称，分为两个大类：一类是通过晶闸管动态投切调谐回路内的电容器而电抗器容量保持不变，使得回路谐振频率动态变化的TSC方式；另一类是通过晶闸管动态投切调谐回路内的电抗器而保持电容容量不变，使得回路谐振频率动态变化的TCR方式。SVC技术用于在中压环境解决谐波次数不断变化的谐波滤除需求，是有源滤波技术在中压领域的一种替代技术。

和有源滤波不同的是，能够同时滤除的谐波次数受到设备回路数的限制，也就是每一个回路虽然可以改变谐振频率用于滤除不同次数的谐波，但只能同时滤除单次谐波，有几个回路就只能同时滤除几个单次谐波。

SVC技术是利用晶闸管串并联方式进行投切的，技术要求相当复杂，投资成本相当高。

因此，SVC技术是一种高成本的替代技术，用于弥补中压系统不能使用有源滤波技术的问题，但其功能作用并不能完全替代有源滤波技术。

6. 不同电能质量情况的治理建议

电能质量综合治理要求把功率因数、谐波、电压瞬变等问题统一考虑，设计治理措施。

因此，针对几种电能质量问题的不同组合情况，对应的合理治理手段组合也应该不一样，不可能存在对任何情况都适用的组合。

比如，目前的一种流行设计习惯是，以固定调谐补偿作为改善功率因数的措施，以有源滤波作为治理谐波的措施，以一种组合方式应付各种不同情况，就明显不符合综合治理原则。

这里，针对一些比较常见的电能质量问题的情况，提供一些综合治理建议。

1）有大量无功功率存在，没有谐波或者只有极少量谐波的应用情况，适合于使用单纯电容补偿，以改善功率因数。

在现在的工业应用环境下，这种情况已经不多。

2）有大量无功功率存在，六脉波设备占总装机容量的20%以内，没有或者只有极少量其他类型谐波源的情况，这时适合于采用阻抗比7%的固定调谐补偿措施，在防止谐波放大并且滤除部分谐波的情况下，解决无功补偿问题。

对于低压系统，如果同时有大容量电动机直接起动或者周期性冲击负荷，因此存在较大电压瞬变的情况，固定调谐补偿应采用动态投切或者动-静结合投切方式，以便在改善功率因数的同时缓解电压瞬变。

对于中压系统，如果存在需要改善电压瞬变的问题，可以把补偿容量的一部分用中压SVC技术代替，其作用相当于低压的动-静结合投切方式。

3）有大量无功功率存在，六脉波设备容量占总装机容量的20%～40%，没有或者只有

极少量其他类型谐波源的情况，适合于采用阻抗比 5.67% 的固定调谐补偿措施，在防止谐波放大情况下解决无功补偿问题，同时滤除接近一半的谐波。

对于低压系统，如果同时有大容量电动机直接起动或者周期性冲击负荷，因此存在较大电压瞬变的情况，固定调谐补偿应采用动态投切或者动-静结合投切方式，以便在改善功率因数和抑制谐波畸变的同时缓解电压瞬变。

对于中压系统，如果存在需要改善电压瞬变的问题，可以把补偿容量的一部分用中压 SVC 技术代替，其作用相当于低压的动-静结合投切方式。

4）有大量无功功率存在，六脉波设备容量占总装机容量的 50% 及以上，没有或者只有极少量非六脉波谐波源和 3 次零序谐波源的情况，适合于采用无源滤波技术滤除谐波，同时配合采用阻抗比 7% 的固定调谐补偿措施，以补偿剩余部分的无功功率。

对于低压系统，如果同时有大容量电动机直接起动或者周期性冲击负荷，因此存在较大电压瞬变的情况，其中的固定调谐补偿应采用动态投切方式，以便在改善功率因数和滤除谐波的同时缓解电压瞬变，此时需要的固定调谐补偿容量因为无源滤波技术具有的补偿能力而明显减小，所以不适合再采用动-静结合投切方式。

和无源滤波配合时，固定调谐补偿的容量，应该按达到目标功率因数需要的补偿容量，扣除无源滤波的补偿能力以后设计。

对于中压系统，如果存在需要改善电压瞬变的问题，可以用中压 SVC 技术代替无源滤波技术，这时 SVC 技术既起到滤波作用，同时又相当于动态投切补偿，与固定调谐补偿措施组成类似于低压系统的动-静结合投切方式。

5）有大量无功功率存在，同时存在大量或者较大数量的非六脉波形变化谐波源的情况，适合于采用有源滤波技术滤除谐波，同时配合采用固定调谐补偿措施以补偿无功功率，阻抗比可选用 14%、12.5% 或者 7%，不适合选用 5.67% 阻抗比，以避免有源滤波和固定调谐补偿之间发生阻抗冲突。由于有源滤波技术能够缓解电压瞬变问题，此时固定调谐补偿一般不用考虑动态投切。

和有源滤波配合时，固定调谐补偿的容量应该按达到目标功率因数需要的全补偿容量考虑。

对于中压系统，可用 SVC 技术代替有源滤波技术。

这种应用情况对应于有短路电弧炉一类特殊负荷存在的场合。

6）有大量无功功率存在，同时存在大量或者较大数量的 3 次零序谐波源的情况，适合于采用四线制有源滤波技术滤除谐波，同时配合采用固定调谐补偿措施以补偿无功功率，阻抗比可选用 14%、12.5% 或者 7%，不适合选用 5.67% 阻抗比，以避免有源滤波和固定调谐补偿之间发生阻抗冲突。由于有源滤波技术能够缓解电压瞬变问题，此时固定调谐补偿一般不用考虑动态投切。

中压系统中一般不会出现这种情况。

这种应用情况对应于有大量非线性单相负荷存在的场合。

7）无功负荷较低，系统原始功率因数较高，但又存在较大谐波量的场合，不论谐波源是什么类型，都不适合采用调谐式滤波，这种情况适合单独采用有源滤波措施解决谐波问题，并且同时缓解电压瞬变。

如果其中包含较多的单相非线性设备，则应该选择四线制有源滤波设备。

8）高压系统一般不会直接为用电设备供电，而是为中压系统馈电，因此通常不承担谐波和电压瞬变的治理，仅采用固定调谐补偿治理功率因数问题即可。

第三节　电能质量监测

解决电能质量问题，首先要对电网电能质量状况进行监测评估。电能质量监测要做的是：

1）捕捉快速干扰的波形，这种快速干扰的波形是毫秒级或微秒级，暂态或瞬态的，很多瞬时扰动很难用个别参量（如有效值）来完整描述，且随时性强，因此需要采用多种判据，如幅值、波形畸变、幅值上升等来起动量测装置。

2）测量各次谐波及间谐波的幅值、相位，需要有足够高的采样速率，以便能测得谐波的信息。

3）建立有效的分析和自动辨识系统，使之能反映质量指标的特征和随时间变化的规律。

一、电能质量监测方式

电能质量的监测方式主要有三种：

1）单点“快照”监测方式。使用便携式仪器即时监测选定点的电压、电流变化，掌握电压偏差、谐波、闪变、电压不平衡等稳态电能质量水平。

2）时间“趋势”方式。使用流动安装的电能质量监测装置，监测记录一段时间（一星期或一个月）内的电能质量变化，应用后台分析软件，对监测时间段内的电能质量变化进行分析统计，给出这段时间内的电能质量变化规律与趋势。

3）系统监测方式。在若干系统选定点安装在线监测装置，通过通信网与电能质量分析主站通信，实时监测系统的电能质量状态，对系统内的电能质量变化进行分析统计，给出电能质量变化的历史趋势。

电能质量的监测点，可根据情况选择为变电站、用户接入点以及有问题的负荷侧。

采用便携式仪器的流动监测方式，适合发现一些特定的电能质量问题；而系统监测方式主要用于评价系统电能质量水平，发现设备问题以及评估安装的电力调整设备的性能。

电能质量监测是解决电能质量问题的重要环节，但这并不能代替对电能质量问题的整体评估、监督。

二、电能质量监测分类

电能质量监测分为在线监测、定期监测、不定期监测和专项监测四种方式。在线监测主要用于供电电压偏差和频率偏差指标的运行检测；定期监测多用于电网质量的定期普查，主要目的是全面了解电网电能质量水平和干扰源的特性；不定期监测主要用于需要掌握供电电能质量，而在线监测不具备条件所采用的监测方式；专项监测主要用于干扰源设备接入电网前后的监测方式，如电弧炉、换相设备、电容器组、滤波器等接入电网前后，测量这些设备对电网电能质量各项指标的影响。国内外对电能质量的监测方式主要为在线监测。在线监测也称为连续监测、全过程监测或日常监测等。对于大型干扰源如炼钢厂、电气化铁路等必须按照电能质量标准，对电压偏差、频率偏差、谐波、电压波动和闪变、三相不平衡等指标进

行连续跟踪监测。

三、电能质量管理

现行的供电规则或供电可靠性导则并没有充分地表述电能质量问题。电能质量问题的解决需要电力公司、用户、用电设备制造商及电力监管部门与行会组织的协调合作。

1）电力公司要做的工作有：

① 开展电能质量量化调查工作。

② 培训用户了解其用电设备的性能以及可能出现的问题。

③ 制定电能质量问题评估规范。

④ 进行电能质量案例研究。

2）用户要做的工作有：

① 研究分析用电设备对电能质量变化的敏感度。

② 制定设备技术规范，描述设备对电能质量变化敏感度以及可能产生的问题（谐波、闪变）。

③ 制定按电能质量调整设备导则。

④ 制定用电设备评估规范。

3）设备制造商要做的工作有：

① 制定设备测试规范，检验电能质量变化期间用电设备的性能。

② 提供设备的电能质量性能改善方案。

4）电力监管部门与行会组织要做的工作有：

① 制定电能质量标准。

② 制定评估规范，合理地分配电能质量责任。

第四节　电能质量监测设备

国内外电能质量监测设备种类繁多，就其性能来说，可分为高、中、低档，高档电能质量监测装置主要表现为功能丰富和精度高两个方面；就其监测的电能质量指标来说，可以分为专用型和通用型。专用电能质量监测装置只能检测某项电能质量指标，一般以所能检测的电能质量指标名称来命名，如电压检测仪、频率检测仪、负序检测仪、三相不平衡检测仪、谐波检测仪、闪变检测仪等。

一、通用质量检测装置

通用质量检测装置是指可以用来检测两项以上电能质量指标的装置。在线电能质量监测仪应满足一些基本的技术要求：

1）具备对电网电能质量扰动的快速捕获能力。

2）能对数据进行预处理，如去噪。

3）各种信息的提取、收集、分类和管理。

4）分析手段智能化，如小波变换技术、神经网络技术、模式识别技术和专家系统的综合应用。

5）为用户提供决策支持。

6）具备强大的通信能力，可以方便集成到企业信息管理系中。

二、电能质量监测仪技术

电能质量监测仪应具备数字信号处理器技术、微控制器技术、前两项组合（数字信号处理器＋微控制器）技术、虚拟仪器技术。

1. 数字信号处理器技术（DSP）

（1）A-D 转换器　要保证测量精度达到 0.05%，至少 12 位；要知道每路信号之间的关系，采用多通道同步采样技术。

（2）数字信号处理器　采用浮点算法，动态范围大、计算精度高、总线宽。

（3）传感器　采用霍尔传感器，其优点是：快速的动态响应特性，一般小于 1μs；传递频带宽，可以在 0～100kHz 内线性工作，线性度优于 0.1%；精度高，大于 0.5%；过载能力强。

（4）抗干扰设计　电磁干扰在空间无孔不入，在输入电路上采取的抗干扰措施有：

1）信号输入端加设 *RC* 滤波器，通过设置 *RC* 参数，只允许某一频带的信号通过。

2）软件数字滤波。

3）采用看门狗电路，一旦由于干扰影响，出现程序跑飞、死机现象时，系统可自动复位，重新开始执行程序。

4）为抑制尖峰脉冲的干扰，在交流电源的输入端并联压敏电阻。

5）在印制电路板的设计阶段，除了保证布线正确合理以外，针对 DSP 硬件系统中最容易出现高频干扰的特点，在布线时尽量使高频线短而粗，且远离易受干扰的信号线，如模拟信号线。此外，还应将电源滤波、模拟线与数字线分离。

2. 数字信号处理器＋微控制器技术（DSP＋MCU）

一个装置可以同时检测电力系统中多个不同点的电能质量，在增加检测点时，只需要增加负责信号处理的 DSP 板，减少成本和设备占用空间。目前用于电力系统电能检测的装置，一个 MCU 最多可以接入 8 个 DSP 板，DSP 可以任意插接。

3. 虚拟仪器技术

虚拟仪器技术是以计算机为基础，配以相应测试功能的硬件作为信号输入输出的接口，利用虚拟仪器软件开发平台，在计算机的屏幕上虚拟出仪器的面板，包括显示器、指示灯、旋钮、按键等，实现相应的功能。通过鼠标或键盘操作虚拟仪器面板上的旋钮、按键等，去选用仪器功能，设置各种工作参数，起动或停止一台仪器的工作。利用虚拟仪器实现电能质量的检测是最合适的方案，随着微电子技术的发展，虚拟仪器具有强大的检测功能和通信功能，具有稳定性好、精度高、灵敏度高、线性动态范围大、功能多、用途广、重量轻、结构精密等特点。

三、电能质量分析仪

（一）LCT-FB300 型电能质量分析仪

图 16-2 为 LCT-FB300 型电能质量分析仪。

LCT-FB300 型三相便携式电能质量分析仪是对电网运行质量进行检测及分析的专用便携式产品。它可以提供电力运行中的谐波分析及功率品质等数据分析，能够对大型用电设备在起动或停止的过程中对电网的冲击进行全程监测。它配备了大容量的存储器，32 位 DSP 与 32 位 ARM 双 CPU 内核，16 位 AD 三通道并行数据总线，高速采集 512 点每周波，采用小波分析算法，计算更加精确。

1）可测量三相电压、三相电流的谐波（2～50 次）、序分量、电压波动和闪变、电压偏差、功率因数、有功、无功、频率。

2）软锁相功能，避免了现场畸变电压对电能质量测量的影响。

3）320×240 大屏幕汉字显示。

4）实时监测、定时记录，参数自校正功能。

5）具有谐波超限，可设定报警、跳闸功能，多种通信模式，适合构成网络。

6）512M 数据存储，连续 1 个月数据存储，每 1min 存一次。

7）RS232/RS422/RS485、10M 网口。



图 16-2 LCT-FB300 型电能质量分析仪

8）技术参数：

电压测量范围：10～450V；

电流测量范围：0.05～6A；

基波误差：≤±1%；

谐波含有率：>1%时，相对误差<±5%；

谐波含有率：<1%时，绝对误差<±0.15%；

电压不对称因数绝对误差：<0.2%；

电流不对称因数绝对误差：<1%；

测频误差：<±0.01Hz；

环境温度：-15～70℃；

电源：AC220（1±15%）V，50Hz；

仪器尺寸（宽×高×深）：298mm×180mm×290mm；

重量：2.0kg。

9）注意事项：

① 在测量电阻前，待测电路必须完全放电，并且与电源电路完全隔离。

② 如果测试笔或电源适配器破损需要更换，必须换上同样型号和相同电气规格的测试笔和电源适配器。

③ 电池指示器指示电能耗尽时，不要使用仪器，若长时间不使用仪器，请将电池取出后存放。

④ 不要在高温、高湿、易燃、易爆和强电磁场环境中存放或者使用本仪器。

⑤ 请使用湿布或者清洁剂来清洗仪器外壳，请勿使用摩擦物或溶剂。

⑥ 仪器潮湿时，请先干燥，后存放。

（二）PW3198 型电能质量分析仪

1 台仪器可同时记录并分析电源问题，可按照 IEC 61000-4-30 ClassA 连续进行高精度的测量（V：标准电压的±0.1%，A 和 W：±0.2% rdg. ±0.1% f. s.），安全规格 CAT Ⅳ 600V，可测量谐波成分，电压测量高达 80kHz 的宽频带宽量程输入，可测量低电压至 1300V（三相四线间的电压）高电压，瞬间过电压峰值最大 6000V，可测量最高 700kHz，多种接口（LAN、USB、SD 卡），使用 GPS 选件，可保证多台仪器间的数据同步。

1. 产品特点

1）波形实时显示（4 路电压/4 路电流）。

2）半周期有效值测量（电压和电流）。

3）全部中文化。操作界面中文，上微机软件中文，独特的中文帮助键操作，操作直观。

4）自动识别电流钳，标配不含电流钳，用户根据实际需要选择电流钳。

5）可测量直流成分（配 PAC93 电流钳）。

6）各相谐波的测量、计算与显示可达 50 次。

7）总谐波失真度（THD）的计算。

8）快速暂态捕捉（每周期采样 256 点）。

9）相量图显示。

10）可测量总 VA、W 和 Var 电量值及其各相值。

11）可测量总 VAh、Wh 和 varh 电量值及其各相值。

12）*K* 因数计算。

13）COSϕ 位移功率因数（DPF）的计算。

14）210 次的暂态捕捉。

15）闪变计算。

16）三相不平衡度计算（电流和电压）。

17）可设置告警监控电网。

18）备份和储存截屏（图像和数据）。

19）趋势图记录可输出到 PC。PC 软件支持数据恢复读取、可实时与仪器保持通信。USB 数据实时通信：数据实时传输到 PC 中，实时记录分析并生成数据报告，并备份和储存截屏（图像和数据），PC 可以实时控制主表，可以在 PC 上设置测试参数。

20）大容量存储。2G 存储，1s 各种参数记录 1 次，可达 28 天。

21）所有参数同时测试。所有电能的各种参数可同时记录、传输并生成报告。

22）自定义测试模板。可以根据用户测试需要选择自己的测试项目，记录到测试模板中，以备以后使用，方便用户现场操作。

23）自定义报告模板。根据报告要求自定义报告的输出样式，快捷输出各种样式报告。

24）电动机起动电流测试模式。

25）电能累计，消耗计算，电能再生计算。

2. 技术参数

表 16-3 为电能质量分析仪 PW3198 的技术参数。

表 16-3　电能质量分析仪 PW3198 的技术参数

测量线数	单相二线/单相三线/三相三线/三相四线,ch4 测量电压/电流(直流或交流)
电压量程	ch1 ~ ch3:电压测量 600.00Vrms,瞬间电压测量峰值 6.0000kV ch:600.00Vrms 或 DC,瞬间电压测量峰值 6.0000kV
电流量程	AC 500.00mA ~ 5.0000kA(测量范围根据使用的传感器不同而不同)
功率量程	300.00W ~ 3.0000MW(根据使用的电压、电流量程自动决定)
基本精度	电压:±0.1% rdg. 电流:±0.2% rdg. ±0.1% f.s. + 电流传感器精度 有功功率:±0.2% rdg. ±0.1% f.s. + 电流传感器精度

（续）

测量功能	瞬间过电压：2MHz 采样率 频率 1 个波形：从 1 个波形开始运算 200kHz 采样率 电压 1/2 有效值、电流 1/2 有效值：每错开半个波形的 1 个波形运算 电压上升、电压下降、瞬间中断：电压 1/2 有效值时检测 冲击电压：电压 1/2 有效值时检测 电压波形比较：自动生成并比较判断区域 瞬间闪变值：符合 IEC 61000-4-15 频率：从 10 个波形、12 个波形开始运行 40 ~ 70Hz 频率 10s 间：从 10s 间的波形开始运算40 ~ 70Hz 电压波形峰值、电流波形峰值，电压、电流、有功功率、视在功率、无功功率、有功累积功率、无功累积功率、功率因数、位移功率因数、电压不平衡度、电流不平衡度谐波（电压/电流）：2 ~ 80kHz 频带 谐波/相位角（电压/电流），谐波功率：第 0 ~ 50 次 谐波电压/电流相位差：第 1 ~ 50 次 、综合谐波畸变率（电压/电流）、间谐波（电压/电流）：第 0.5 ~ 49.5 次 K 因素（倍增率） V10 闪变，IEC 闪变（短/长）
最长记录时间	反复功能 ON 时：1 年，最多记录事件数：55000 件（1 周最多 1000 件） 反复功能 OFF 时：35 天，最多记录时间数：1000 件
接口	SD/SDHC 卡（最大 32GB），RS232C，LAN（HTTP 服务器功能），USB2.0
显示	6.5in（1in = 0.0254m）TFT 彩色 LCD（640 × 480 点）
电源	AC 适配器 Z1002（100 ~ 240V，额定 1.7A，50/60Hz）电池组 Z1003（连续使用时间 180min，通过连接 AC 适配器充电，充电时间为 5 小时 30 分）
体积和重量	300mm（W）× 211mm（H）× 68mm（D），2.6 kg（含电池组 Z1003）
附件	SD 存储卡 2GB Z4001 × 1，电压线 L1000 × 1（红、黄、蓝、灰、黑 × 4，鳄鱼夹 × 8），AC 适配器 Z1002 × 1，电池组 Z1003 × 1，吊带 × 1，USB 连接线 × 1，说明书 × 1，测量指南 × 1

电流测量 3198 不能单独使用，测量时需要 1 个或 1 个以上电流传感器
9660 钳形电流传感器 AC 100A
9661 钳形电流传感器 500A
9669 钳形电流传感器 AC 1000A
9667 可弯曲式钳式传感器 AC 5000A
9694 钳形电流传感器 AC 5A
9290-10 钳形电源转换器 AC 1000A
电压测量
9264-01 连线适配器，用于三相三线
9264-02 连线适配器，用于三相四线
PC 通信器
9642 LAN 电缆（5m 长）
626 PC 卡 32MB（FA 用）
9627 PC 卡 64MB（FA 用）
9726 PC 卡 128MB（FA 用）
9727 PC 卡 256MB（FA 用）
9728 PC 卡 512MB（FA 用）
其他选件
9458 AC 电源转换器（已包括）
9459 电池（已包括）
9339 携带盒　携带软包
9340 携带盒　携带硬箱（防水、防尘）
9624-10 PQA HiVIEW PRO 高性能 PQA-查看软件
打印机
9671 AC 电源转换器（用于 9670）

（三）SF DZ-3 型电能质量监测仪

SF DZ-3 型电能质量监测仪是一台高性能的多功能电能质量测试分析仪器。

1. 仪器特点

1）工控机 + 多 DSP 构架实现多通道采集。

2）多 DSP 数据处理，保证设备参数准确测量。

3）软件硬件同步锁相技术相结合，保证信号严格同步采样。

4）参数自校验功能。

5）彩色液晶显示。

6）RS232、电话线、以太网等通信方式。

7）内置的 CT 与模块。

8）强大的数据采集单元。

9）安装在监测点进行实时记录。

10）构成网络、集中管理。

2. 主要功能

1）可测量电压和电流的 2 ~ 63 次谐波。

2）可测量电压偏差、频率偏差、电压波动和闪变等各种电能质量参数。

3）三相不平衡度、矢量图显示。

4）电压骤升、电压骤降、过电压、欠电压等暂态数据测量。

5）三相及单相功率、视在功率、有功功率、无功功率、基波功率因数、全功率因数。

第五节　国外解决电能质量案例

一、马来西亚电网公司解决潘昂岛电能质量问题

马来西亚政府重视吸引外资，发展高科技，设立了潘昂岛自由工业区。区内有 Intel、Hitachi 等跨国半导体生产商。这些半导体生产商对电能质量提出了很高的要求。短时电压骤降或停电中断都可能引起半导体生产商的敏感电子设备误操作，传统的 N-1 可靠性原则，不满足供电质量要求。2000 年，发生了多次影响用户设备正常运行的电压骤降事故。马来西亚电网公司（TNB）成立了专门班子解决潘昂岛的电能质量问题。具体工作步骤如下：

1）安装电能质量仪器，监测记录用户供电系统电压质量。记录数据表明，故障引起的电压有效值瞬时下降，是造成设备不正常运行的主要原因。

2）通过计算机仿真，对潘昂岛电网电压骤降性能进行评估。找出了造成潘昂岛电压骤降超标的电网故障区域，提出了改善电网电压骤降性能的电网接线调整方案。

3）按照 SEMI47 标准，对用户用电设备进行测试评估，提示用户不要使用不合要求的设备。

4）给用户提出电能质量校正设备投资建议。

5）对电能质量治理方案进行经济评估。

二、德国 MR 公司电能质量综合治理

德国 MR 公司的技术特点及优势

德国 MR（莱茵豪森集团）公司是专门从事电能质量管理的公司，所从事的业务范围包

括治理电压波动的有载调压技术以及治理无功功率、谐波、电压瞬变等。

1. MR 公司可提供的治理措施

1）MR 公司可提供阻抗比 14%、12.5%、7%、5.67% 的固定调谐补偿设备，其中阻抗比为 5.67% 的固定调谐补偿设备作为成熟产品提供的并不多见。各种阻抗比的固定调谐补偿设备，其电容器和电抗器均是为谐波环境运行设计的，其电压、电流的过载裕量等参数可保证元件在谐波环境下能够可靠工作，并保证足够的使用寿命。MR 公司的低压固定调谐补偿设备，既可以提供原装整柜，也可以提供包括电容器、电抗器和控制器在内的原装核心元件在国内成套装柜，以降低用户投资，低压固定调谐补偿设备控制器的最高回路数为 12 路。MR 公司可提供四种阻抗比的中压固定调谐补偿设备，控制器的回路数为 6 路。

2）MR 公司可为四种阻抗比的低压固定调谐补偿设备提供动态投切技术，所提供的晶闸管质量可靠，配备投切时机控制单元。

3）MR 公司还提供可以组成动-静结合投切的控制器，此控制器预先编制了动态投切和静态投切的转换程序，只需要把静态回路和动态回路分别连接到控制器的指定接口上，就可以完美实现动-静结合投切功能，以较低的投资实现动态投切的功能效果。

4）MR 公司的动态或者动-静结合投切的固定调谐补偿设备，也可以提供包括电容器、电抗器、晶闸管、动态投切控制器或者动静结合混合控制器在内的核心元件在国内成套装柜，以降低用户投资。

5）MR 公司可提供低压和中压无源滤波设备，用于滤除六脉波谐波源的谐波，无源滤波设备通常由 5、7、11 次谐波回路加一个高通滤波回路组成，能够大幅度滤除 5、7、11 次谐波，较大幅度地滤除 13 次谐波，同时还对更高的 17、19、23、15 等次谐波有抑制作用。MR 公司的无源滤波设备，无论中压还是低压，均只提供原装整柜。针对六脉波谐波源产生的谐波，相对于有源滤波技术，MR 公司的无源滤波设备具有很高的价格优势和更高的运行可靠性。

6）MR 公司可提供低压有源滤波设备，该设备为模块化技术，每个模块滤波容量为 100A，每个滤波柜最多可安装 3 个模块，使得每个滤波柜可以很简单地从滤波容量 100A 升级到 200A 和 300A，具有很好的可扩展性。MR 公司的有源滤波设备和同类进口设备相比具有技术优势和一定的价格优势，和国产有源滤波设备相比在可靠性和滤波效果等方面具有非常明显的技术优势，但没有价格优势。

7）MR 公司可提供与专用变压器组合的可用于中压系统的有源滤波技术，和作为替代技术的 SVC 相比有明显的性能优势和价格优势，只是其可提供的滤波容量有限制，用于 10kV 系统的中压有源滤波技术仅可达到 24A，用于 6kV 系统的中压有源滤波技术可达到 40A，用于 3kV 的中压有源滤波技术可达到 80A。

8）MR 可提供中压 SVC 设备，MR 公司的 SVC 设备是专为谐波滤波目的设计的，采用了包括晶闸管光控技术在内的多项高可靠性技术，用于中压谐波滤波具有很明显的技术优势，但用于中压系统作为动态投切技术以解决电压瞬变问题时，投资过高，没有价格优势。

9）MR 公司不提供单纯电容补偿的设备。

2. MR 公司的技术及服务特点

MR 公司作为电能质量管理的专业公司，除了在电能质量治理措施方面的产品技术优势以外，更具有强大的综合技术优势和特有的服务方式。

MR 公司可提供全面的设计服务，通过特有的强大设计软件，按照功率因数、谐波、电压瞬变多因素综合治理原则以及高压、中压、低压系统综合考虑的原则为用户完成全系统的电能质量综合治理优化方案，并仿真出该方案实施后能够达到的实际治理效果。

为设计方案收集原始数据的手段有两种：一是针对已建成系统的数据检测方式，通过检测系统各关键位置的运行情况，包括在不同情况下的功率因数、谐波总畸变率、谐波次数及分布、运行中的电压瞬变情况等，利用这些数据作出优化的综合治理改造方案；另一种是针对新建项目，通过输入系统各部分的变压器参数、用电设备类型和容量等数据，利用软件内部建立的庞大数据库，作出优化的综合治理方案。因此，MR 公司在提供具体的治理措施产品的同时，还提供了电能质量综合治理的设计、仿真和检测一条龙服务，综合起来，是为用户提供了量身定制的电能质量综合治理的完整解决方案。

下篇　实际运用

第十七章　10MWp 沙漠光伏电站

10MWp 沙漠光伏电站建设主要有以下内容：工程设计基础参数、太阳电池阵列设计、电气一次设计、电气二次设计、总平面布置及土建设计、支架及支架基础设计、给水排水设计、采暖通风设计、防风沙及电池板清洁设计、工程消防设计、施工组织设计、环境保护、节能分析、工程效益等。

第一节　工程设计基础

一、概述

1）工程名称：10MW$_p$ 并网光伏电站工程。

2）项目任务：发电，运行期 25 年。

3）场址：青海省格尔木市东出口。

4）项目规模：10MWp。

二、太阳能资源

青海省格尔木市是我国太阳能资源最丰富的地区之一，海拔高、阴雨天气少、日照时间长、辐射强度高、大气透明度好，本工程采用格尔木气象站 1978—2007 年站的太阳辐射数据，对 30 年的太阳辐射量、日照时数进行分析，得出本工程场址的年太阳辐射量为 6899.5MJ/m^2、年日照时间为 3080h。太阳辐射数据可用“太阳能光伏发电预报系统”进行验证。“太阳能光伏发电预报系统”由资料采集处理、数据库、预报产品制作和预报产品 Web 发布四个子系统组成，可以预报任何地点或光伏电站未来 3 天逐小时辐射量和发电量，并采用了两种发电量预报方法：一种是基于大气辐射传输、光电转换、直流/交流变换和交流并网等系列物理原理的原理预报法；另一种是基于数值天气预报模式产品、光伏电站发电量数据结合的动力统计法。两种模型方法的结果可以比对校验，从而可以避免单一预测方法下同样错误反复出现。由于两种方法均采用动态滚动预报，模型参数能及时更新，预报准确率明显提高。湖北省气象局用此系统开展了预报试验，分别测试 18kW、1.2MW 两个光伏示范电站的实际发电量数据，结果表明，小时辐射量预报效果优于国外同类预报方法，小时发电量预报效果也较为理想。

“太阳能发电预报系统”是由中国气象局部署的 2010—2011 年度示范研究、现代气候业务建设试点工作，也是我国气象部门自主研发的第一代光伏发电预报系统。

三、工程地质

本工程建在格尔木市东约 30km 的荒漠沙地区域内，场址位于柴达木盆地西南侧边缘地

带，距昆仑山脉布尔汉布达山北坡坡角约 9km，为基岩形成的低山区，地貌类型为荒漠沙地。范围内地势总体上南高北低，南部 2875m 北部降至 2867m，低 8m，地形开阔平坦，场区内冲沟不发育。

1. 岩土工程勘察分级

依据 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》，岩土工程勘察分级如下：

1）工程重要性等级为二级，即后果严重的一般工程。

2）地震设防烈度为Ⅶ度区，场地复杂程度为二级，即中等复杂程度场地。

3）根据地基复杂程度，地基土存在季节性冻土等特殊性土，地基复杂程度为二级，即中等复杂地基。

4）根据工程重要性等级、场地复杂程度等级和地基复杂程度等级，该工程岩土工程勘探等级为乙级。

2. 抗震安全性评价

（1）地震基本烈度　场址区地震分区为青藏高原中部地震区（I_7）、托素湖地震亚区（$\mathrm{Ⅲ}_{17}$）。根据 1:400 万《中华人民共和国地震构造图》，近时期地震主要分布在盆地东部的塔塔稜河以南、诺木洪镇以北、达布逊湖以东、托素湖以西地区，多为 6 级以下地震，场址区属构造基本稳定区。

（2）地基土类型及建筑场地类别　场址区地势平坦、开阔，地基土为稍密～中密的粉细砂为主，地基土类型为中软土。土层等效剪切波速为 120～160m/s，覆盖层厚度为 3～50m，属可进行建设的抗震较有利地段，建筑的场地类别为Ⅱ类。场址区及附近无活动性断裂通过，不存在发震断裂。

（3）地基土的液化评价　场址区地震烈度为Ⅶ度，地基土岩性为粉细砂层，为强透水地层，根据周边民井调查资料，场址区地下水埋深一般大于 30m，雨季最高水位时地下水埋深约 20m，即地面以下 0～20m 范围内，不存在饱和砂层，故粉细砂层不存在振动液化问题。

3. 地基土腐蚀性

本次勘察对钻孔内 0～5m 范围内土样进行了易溶盐分析，判定地基土对混凝土及砌体结构无腐蚀性，对钢结构及钢筋砌体结构中的钢筋具中等腐蚀性，应采取必要的防腐措施。

4. 环境水的腐蚀性

场址范围内及周边地表水不发育，地下水埋藏较深，钻孔 15m 范围内未见地下水，经对场址区附近河东农场七连、八连民井地下水采样分析，场址区地下水总矿化度为842.38～1025.44mg/L，属淡水～微咸水，pH 值为 7.66～7.83，属弱碱性水，总硬度为 410.0～425.0mg/L，属极硬水。地下水对混凝土及砌体结构无腐蚀性，对钢筋混凝土中钢筋及钢结构具弱腐蚀性。

5. 盐渍类土工程地质评价

根据 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》中对盐渍土的定义：当岩土中易溶盐的含量大于 0.3%，并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特性时，应判定为盐渍土。

经对钻孔内 0～5m 范围内的土样进行溶盐分析实验，总易溶盐含量为 0.16%～0.72%，平均值为 0.40%，仅部分土样易溶盐总量小于 0.3%，判定地基土 5.0m 以上为盐渍类土，主要为亚氯盐渍土，占土样总量的 56%，其次为氯盐渍土，占 44%。按含盐量分类，氯及

亚氯盐平均含盐量 0.45%，属弱盐渍土。

场址区位于干旱半干旱地区，蒸发量大，降雨量小，毛细作用强，极利于盐分在地表聚集。盐渍类土中盐分的分布随季节气候和水文地质条件而变化，旱季时盐分向地面聚集，这时上部土层含盐量较大，局部土层内形成盐晶粒，随深度增加含盐量逐渐减少。雨季时地表盐分被地面水冲洗溶解，并随水渗入地下，表层含盐量减少，地表白色盐霜甚至消失。因此，在盐渍类土地区，经常发生盐类被淋溶和盐类聚集的周期性过程。

盐渍类土对地基土的力学强度影响较大，即土的力学强度随盐渍类土的总含盐量的增加而减少，其原因是盐渍类土具有盐胀性和溶陷性。根据盐渍类土的工程性质，结合光伏电场盐渍类土的特征，经分析有关盐渍类土的试验成果，工程中应注意采取防水、排水措施，防止由于水的作用而导致溶陷引起的地基变形破坏。

6. 季节性冻土评价

根据《中国季节性冻土标准冻深线图》，工程区标准季节性冻土深度为 1.0m。场址区季节性冻土为粉细砂层，冻土带内土层含水量低，一般呈干燥或稍湿，冻土构造类别为整体构造，仅于孔隙中见少量晶粒状冰，冰晶融化后原土结构不发生改变，冻土类型为少冰冻土。虽冻土层粒径 <0.075mm，含量 >15%，但冻土层含水量 <10%，冻结期间地下水位埋深 >15m，故冻胀等级为Ⅰ级，冻胀类别为不冻胀，季节性冻土对建筑物基础影响不大。

7. 地基土工程地质评价

场址区地层自上而下分为 2 层：第四系全新统风积（Q_4^{eol}）粉细砂层（①层、②层）、砾砂层透镜体（②1 层）。

场址区地基土上部粉细砂层（第①层）1.0m 位于季节性冻土带内，含水量较低，冻土类型为少冰冻土，冻胀等级为Ⅰ级，冻胀类别为不冻胀，季节性冻土对建筑物基础影响不大，该层厚度为 2.0m 左右，结构呈松散～稍密状，承载力低，具压缩变形特征，不建议作为天然地基使用。冻土带以下粉细砂层及砾砂透镜体（第②层、②1 层），结构呈中密～密实状，承载力相对较高，工程性能较好，可作为持力层或基础下卧层，地基承载力建议值为 180～220kPa。

场址区地势较平坦、开阔，不存在滑坡、不稳定体、泥石流、移动沙丘等不良物理地质现象，适宜修建光伏发电工程。

8. 集控中心工程地质条件

集控中心工程地质条件和场址区基本一致，冻土带以下的②粉细砂层呈中密～密实状，承载力相对较高，可作为基础持力层和下卧层。

9. 施工水源及生活用水水源

建议施工水源和生活用水水源采用自备水井解决，井深 150m，取水地层为 100～130m。单井出水量为 15m^3/h，基本可以解决工程施工、生活用水需求。

10. 天然建筑材料

对混凝土骨料进行了地质调查。109 国道东出口以东公路南北两侧一宽浅冲沟（或小型季节性河流），上覆冲洪积砂、卵、砾石，距场址西南侧约 5.5km，质量、储量满足要求。格尔木周边分布有多处正在使用的砂砾料场，亦可分散收购。

11. 中控室

中控室的框架地基要建在 2m 以下，因场址地势由南向北倾斜，中控室地面要垫高，与

109 国道平齐。

四、发电单元及发电量预测

1. 太阳能光伏发电系统效率分析

影响太阳能光伏发电系统效率的因素包括：太阳电池老化、交直流低压系统损耗、逆变器效率、变压器及电网损耗。

1）太阳电池老化系数 η_1：太阳电池由于老化等因素的影响，使光伏系统运行期发电效率逐年衰减。本工程电池老化系数按逐年衰减 0.90% 计。

2）系统老化综合系数 η_2：太阳电池方阵组合的损失、尘埃遮挡、线路损耗、逆变器变压器等电气设备老化等，这些损耗均使系统效率降低。本工程系统老化综合系数 η_2 取 79.3%。

2. 年理论发电量计算

根据所选工程代表年，最佳倾斜面上各月平均太阳总辐射量，可得出本工程月及年峰值日照小时数。格尔木的日照时间为每年 3096.3h，每天从早上 6～8 点到晚上 7～9 点（冬夏季不同），早上和中午的日照强度是不同的，晴天的中午日照强度大约每平方米 0.9～1.2kW，日出日落时分别接近于零。因此，发电量要按峰值日照小时数计算。将太阳电池组件所在平面上，某段时间中能接收到的太阳辐射量，转换为 1000W/m^2 条件下的等效小时数，称为峰值日照小时数。

例：太阳电池组件，在 1h 中接收到的太阳辐射量为 1MJ/ m^2，求峰值日照小时数。

解：由峰值日照小时数的定义可得

$$1\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 1000000\text{J}/(\text{m}^2 \cdot 3600\text{s}) = \frac{1000\text{W}/\text{m}^2}{3.6}$$

故太阳电池组件在 1h 中接收到的太阳辐射量为 1MJ/ m^2，则其在 1000W/m^2 条件下的等效小时数为 1/3.6h。

由于太阳电池组件的峰值功率均在 1000W/m^2 条件下标定，因此，采用峰值日照小时数乘以光伏电站的装机容量，即为光伏电站的理论发电量（最大发电量）。

10MWp 固定安装式电池阵列的峰值日照小时数见表 17-1。

表 17-1　10MWp 发电量统计

月份	多年月平均辐射量/[MJ/(m^2 · 月)]	多年月平均峰值日照小时数/h	月份	多年月平均辐射量/[MJ/(m^2 · 月)]	多年月平均峰值日照小时数/h
1	613.52	170.42	8	711.97	197.77
2	601.80	167.17	9	685.84	190.51
3	700.83	194.67	10	714.34	198.43
4	717.07	199.19	11	633.13	175.87
5	724.68	201.30	12	575.48	159.86
6	669.09	185.86	合计	8033.48	2231.53
7	685.73	190.48			

经计算，年峰值日照小时数为 2231.52h，平均每日的峰值日照小时数为 6.1h，年理论发电量为 2231.52 万 kW · h。

3. 上网发电量预测

上网发电量 A_n 可采用下式计算：

$$A_n = \text{年理论发电量} \times (1 - \eta_1) \times \eta_2$$

太阳电池老化系数 $\eta_1 = 0.9\%$，系统老化综合系数 $\eta_2 = 79.3\%$。

计算结果：电站建成后第一年上网发电量为 2013.45 万 kW·h，运行 25 年平均发电量为 1810.29 万 kW·h，年利用小时数为 1749.3h。

4. 发电单元

1）通过技术与经济综合比较，选用 55WpCIGS 薄膜太阳电池，表 17-2 为 55Wp 双结非晶硅薄膜太阳电池的主要参数。

表 17-2 55Wp 双结非晶硅薄膜太阳电池的主要参数

类　　型	双结非晶硅	类　　型	双结非晶硅
最大功率 P_{max}/W	70.9	长度/mm	1245
最大功率时的电压 U_{mp}/V	55.5	宽度/mm	635
最大功率时的电流 I_{mp}/A	1.28	厚度/mm	9.6
开路电压 U_{oc}/V	74.4	重量/kg	15.1
短路电压 I_{sc}/A	1.52	面积/m^2	0.79
效率 η(%)	11		

2）选用 500kW 逆变器 20 台。

五、太阳光伏发电系统的组成

太阳光伏发电系统按与电力系统关系分类，通常分为离网太阳能光伏发电系统和并网太阳能光伏发电系统。并网太阳能光伏发电系统是与电力系统连接在一起的光伏发电系统，一般分为集中式和分散式两种，集中式并网电站一般容量较大，通常在几百千瓦到兆瓦级以上，而分散式并网系统一般容量较小，在几千瓦到几十千瓦。本工程属于集中式大型并网光伏电站。并网太阳能光伏系统不设蓄电池。

集中式并网光伏电站中，太阳能通过太阳电池组成的光伏阵列转换成直流电，经过三相逆变器（DC-AC）转换成电压较低的三相交流电，再通过升压变压器转换成符合公共电网电压要求的交流电，并直接接入公共电网，供公共电网用电设备使用和远程调配。

本工程光伏发电系统主要由太阳电池阵列、逆变器及升压系统三大部分组成，其中太阳电池阵列及逆变器组合为发电单元部分。

六、太阳电池阵列参数

1. 太阳电池阵列的运行方式选择

在光伏发电系统的设计中，光伏组件方阵的运行方式对系统接收到的太阳总辐射量有很大的影响，从而影响到光伏供电系统的发电能力。光伏组件的运行方式有固定安装式、倾角季节调节式和自动跟踪式三种型式。其中自动跟踪系统包括单轴跟踪和双轴跟踪。单轴跟踪（东西方位角跟踪和斜单轴跟踪）系统以固定的倾角从东往西跟踪太阳的轨迹，双轴跟踪系统（全跟踪）可以随着太阳轨迹的季节性位置的变换而改变方位角和倾角。非晶硅薄膜电池组件效率较低，也就是说相同的功率下，所占用的面积较大，如果采用自动跟踪式，所需自动跟踪支架的费用与晶硅类电池组件相比将大幅上升。因此，国内外光伏电站采用的非晶

硅薄膜电池组件基本都采用固定式安装。

2. 电池阵列最佳倾角计算

电池阵列的安装倾角对光伏发电系统的效率影响较大，对于固定式安装电池列阵和斜单轴安装电池阵列，其最佳倾角即光伏发电系统全年发电量最大时的倾角。计算倾斜面上的太阳辐射量，通常采用 Liu 和 Jordan 在 1962 年提出，后来由 Klein 在 1977 年改进的计算方法。利用 RETScreen 软件，采用所选工程代表年的太阳辐射资料，在不同的运行方式条件下计算不同角度倾斜面上各月日平均太阳辐射量。表 17-3 为不同倾角各月平均太阳辐射量。

表 17-3　不同倾角各月平均太阳辐射量　（单位：MJ/m^2）

序号	角度	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	多年日平均值
1	25°	4.91	5.52	6.09	6.79	6.86	6.63	6.54	6.62	6.33	6.07	5.34	4.57	6.0252
2	30°	5.20	5.74	6.20	6.75	6.72	6.45	6.38	6.53	6.36	6.25	5.60	4.85	6.0861
3	31°	5.25	5.78	6.21	6.73	6.68	6.41	6.34	6.51	6.37	6.28	5.65	4.90	6.0942
4	32°	5.30	5.82	6.23	6.72	6.65	6.37	6.31	6.49	6.37	6.30	5.69	4.96	6.1008
5	33°	5.35	5.86	6.24	6.70	6.61	6.33	6.27	6.46	6.36	6.33	5.74	5.01	6.1061
6	34°	5.40	5.90	6.26	6.68	6.57	6.29	6.23	6.44	6.36	6.36	5.78	5.06	6.1101
7	35°	5.45	5.94	6.27	6.66	6.53	6.24	6.19	6.41	6.36	6.38	5.82	5.11	6.1125
8	36°	5.50	5.97	6.28	6.64	6.49	6.20	6.14	6.38	6.35	6.40	5.86	5.16	6.1137
9	37°	5.54	6.00	6.29	6.62	6.45	6.15	6.10	6.35	6.34	6.42	5.90	5.20	6.1135
10	38°	5.59	6.04	6.30	6.59	6.41	6.10	6.06	6.32	6.33	6.44	5.94	5.25	6.1119
11	39°	5.63	6.07	6.30	6.56	6.36	6.05	6.01	6.28	6.32	6.46	5.97	5.29	6.1089
12	40°	5.67	6.10	6.31	6.54	6.32	6.00	5.96	6.25	6.31	6.47	6.01	5.34	6.1045
13	45°	5.87	6.23	6.31	6.37	6.06	5.72	5.70	6.05	6.23	6.52	6.15	5.54	6.0618

根据表 17-3 的数据作出曲线图，图 17-1 为不同倾角日平均太阳辐射量。

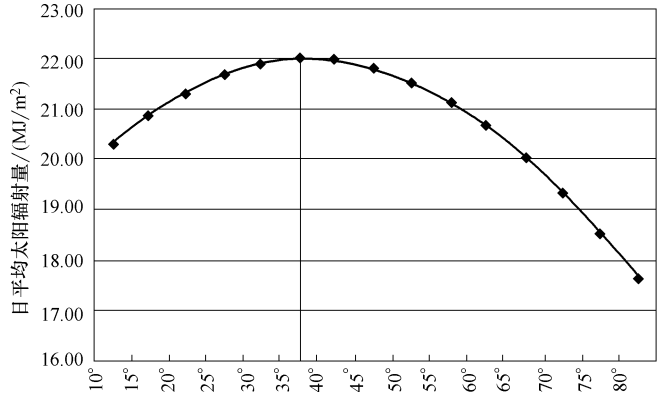


图 17-1　不同倾角日平均太阳辐射量

从表 17-3 看出，多年日平均数最大值为 6.1137 时，对应的角度为 36°，即图 17-1 中直线所示。从而得出，当电池组件倾角为 36°时，全年日平均太阳总辐射量最大。因此确定本

工程固定式安装电池方阵的最佳倾角为36°。在此状态下，最佳倾角各月平均太阳辐射量见表17-4。

表17-4 最佳倾角各月平均太阳辐射量 （单位：MJ/m^2）

1月	2月	3月	4月	5月	6月
613.52	601.80	700.83	717.07	724.68	669.09
7月	8月	9月	10月	11月	12月
685.73	711.97	685.84	714.34	633.13	575.48

七、逆变器选择

1. 逆变器技术指标

对于逆变器的选型主要采用以下几个指标进行比较：

1）逆变器输入直流电压的范围：由于太阳电池组串的输出电压随日照强度、天气条件及负载影响变化范围比较大，就要求逆变器能够在较大的直流输入电压范围内正常工作，并保证交流输出电压稳定。

2）逆变器输出效率：大功率逆变器在满载时，效率必须在90%或95%以上。中小功率的逆变器在满载时，效率必须在85%或90%以上。即使在逆变器额定功率10%的情况下，也要保证90%（大功率逆变器）以上的转换效率。

3）逆变器输出波形：为使光伏阵列所产生的直流电经逆变后向公共电网并网发电，就要求逆变器的输出电压波形、幅值及相位等与公共电网一致，以实现向电网无扰动平滑供电。所选逆变器应输出波形良好，波形畸变以及频率波动小于门槛值。

4）最大功率点跟踪：逆变器的输入终端电阻应自适应于光伏发电系统的实际运行特性，保证光伏发电系统运行在最大功率点。

5）可靠性和可恢复性：逆变器应具有一定的抗干扰能力、环境适应能力、瞬时过载能力及各种保护功能，如：过电压情况下，光伏发电系统应正常运行；过载情况下，逆变器需自动向光伏电池特性曲线中的开路电压方向调整运行点，限定输入功率在给定范围内；故障情况下，逆变器必须自动从主网解列。

6）监控和数据采集：逆变器应有多种通信接口进行数据采集并发送到远控室，其控制器还应有模拟输入端口与外部传感器相连，测量日照和温度等数据，便于整个电站数据处理分析。

7）逆变器的主要技术指标还有额定容量、输出功率因数、额定输入电压、电流、电压调整率、负载调整率、谐波因数、总谐波畸变率、畸变因数、峰值因子等。

2. 逆变器的选型

对美国Power-one、合肥阳光、德国SMA、意大利圣诺、艾默生等厂家的产品作技术比较，各厂家提供的逆变器技术参数均满足《国家电网公司光伏电站接入电网技术规定》的要求，最终选择艾默生的产品。艾默生SmartShine^{TM}系列光伏并网逆变器采用模块化设计和先进的智能休眠技术，并选用业界高效率功率开关器件-COOLMOS，配合两级变换、三电平控制技术、DSP控制技术、模块冗余备份和热插拔等，并采用了高功率密度和系统集成设计。产品具有更高效率、宽范围电压输入、高质量电能输出、高可靠性和快速便捷维护等诸多

优点。

1）宽电压输入范围为 300～850V，能在 300～450V 低压部分继续发电，也就是早晚及阴天时能比普通逆变器多发电。

2）智能休眠技术，适应光照变化，始终保持动态高效率运行。

3）先进的两级变换、三电平控制和 DSP（数字信号处理器）控制技术。

4）系统根据功率器件的最新进展，选用 COOLMOS 器件，并采用先进拓扑设计，确保更宽的输入电压、标准的电压输出、高质量电能输出以及系统精确控制。

5）模块化结构，可靠性高。一个甚至多个模块出现故障，系统仍可继续向电网提供电能。

6）模块化维护及在线热插拔。模块更换时间小于 10min，无需专业技术人员。

7）输出电压 380/400/415V AC，50Hz，无需隔离变压器，即可直接与 380V AC 交流电网匹配。逆变器内部集成交流配电单元，无需额外配置交流配电柜，直接接入普通双绕组变压器即可（无需双分裂变压器），降低系统造价。

8）高功率密度和一体化系统设计，提高效率，尺寸为 1200mm×2120mm×1000mm，与同容量逆变器相比，可节省 50% 的占地空间。

9）全方位的专业监控解决方案。

10）中国本土化生产和贴近客户的本地化服务。艾默生逆变器完全在国内生产，年生产能力达 500MW，交货周期短，配合响应效率高，服务网络覆盖全国，备品备件库靠近客户。

第二节　太阳电池阵列的设计

一、并网光伏发电系统分层结构

1. 层次

并网光伏发电系统分为 5 个层次：太阳电池组串→太阳电池组串单元（阵列）→阵列逆变器组→太阳电池子方阵→太阳电池阵列。

1）太阳电池组串（简称组串）：由几个到十几个数量不等的太阳电池组件串联起来，其输出电压在逆变器允许工作电压范围之内，太阳电池组件串联的最小单元称为组串。

2）太阳电池阵列（简称阵列）：将布置在一个固定支架上的所有太阳电池组串并联，形成一个阵列。

3）阵列逆变器组：由若干个阵列与一台逆变器联合构成一个阵列逆变器组。

4）子方阵：由一个或若干个阵列逆变器组，组合形成一个子方阵，本工程中 1MW 为一个子方阵。

5）工程阵列：由一个或若干个子方阵组合，形成工程阵列。

2. 系统方案

10MWp 采用分块发电、集中并网方案，最佳倾角为 36°，采用固定安装运行方式。根据场地形状，工程阵列由 9 个 1MWp 子方阵和 2 个 0.5MWp 子方阵组成；每个 1MWp 子方阵和 0.5MWp 子方阵均由太阳电池组串、汇流箱、逆变器及升压设备构成。

二、太阳电池子方阵设计

1. 原则

1）太阳电池组串单元其输出电压的变化范围，必须在逆变器正常工作的允许输入电压范围内。

2）每个逆变器直流输入侧连接的太阳电池组件的总功率，应大于逆变器的额定输入功率，而不应超过逆变器的最大允许输入功率。

3）太阳电池组串其最高输出电压，不允许超过最高系统电压。

4）太阳电池板至逆变器的直流部分电缆通路应尽可能短，以减少直流损耗。

2. 太阳电池组件的串、并联设计

太阳电池组件串联的数量，由逆变器的最高输入电压和最低输入电压、太阳电池组件允许的最大系统电压所确定；太阳电池组件并联的数量，由逆变器的容量确定。在条件允许时，应尽可能提高直流电压，以降低直流部分线路的损耗，同时还可以减少汇流设备和电缆的数量。

本工程所选 500kW 逆变器的最高输入电压为 880 V DC，输入电压 MPPT（最大功率点跟踪）工作范围为 300 ~ 850 V DC；55.5Wp 电池板开路电压 74.4V，最佳工作点电压 U_{mp} 为 55.5V。

太阳电池组件串联的数量计算公式为

$$\frac{U_{dcmin}}{U_{mp}} \leqslant N \leqslant \frac{U_{dcmax}}{U_{oc}}$$

式中 U_{dcmin}——逆变器直流侧最小输入电压，300V；

U_{mp}——电池组件最佳工作电压，55.5V；

N——电池组件串联数；

U_{dcmax}——逆变器直流侧最大输入电压，850V；

U_{oc}——电池组件开路电压，74.4V。

经计算：$5.4 \leqslant N \leqslant 11.4$，为节约材料，$N$ 取大值，取 $N = 11$。

太阳电池组件输出的最低电压条件：太阳辐射强度最小，组件工作温度最高。这种情况一般发生在夏季日出、日落时。

太阳电池组件输出的最高电压条件：太阳辐射强度最大，组件工作温度最低。这种情况一般发生在冬季中午至下午时段。

3. 校核

1）最低电压：夏季日出、日落时，当辐射强度为 100W/m^2 时，采用 11 组串联，开路电压为 68.2V，组串电压为 750.2V，大于逆变器初始工作电压 300V，逆变器可以起动。

2）最高电压：冬季中午至下午时段，当辐射强度为 800W/m^2 时，采用 11 组串联，开路电压为 74.4V，组串电压为 818.4V，小于逆变器最高工作电压 880V，逆变器可以正常工作。

综上所述，根据逆变器最佳输入电压以及电池组件工作环境等因素进行修正后，最终确定串联组数为 $N = 11$（串）。每一路额定功率容量分别为：$55.5\text{Wp} \times 11 = 610.5\text{Wp}$。

500kWp 逆变器，对应 55.5Wp 电池板，需要串联 500/0.6105 = 819 路，考虑逆变器效率及系统损失 3% 后，取 844 路。

4. 太阳电池阵列的排列方式

太阳电池阵列的排列方式有多种，但要求最佳排列方式接线简单、装夹方便，线缆用量少、施工复杂程度低。

（1）电池组件竖放、横放的确定　从电池的物理结构分析，竖放横放均不影响电气性能，但横放雨水流路线短，四个装夹点即可夹紧，而竖放雨水流路线长，需要六个装夹点，因此选择横放。

电池板横放，排成 4 行 11 列，44 块电池板。

（2）阵列确定　阵列逆变器组由 844/4 = 211 个阵列组成，1MWp 为一个子方阵，需要 2 个阵列逆变器组，即 422 个阵列，一个子方阵由 422 个阵列组成；共 18568 块电池板，装机 1030524Wp，即 1.030524MWp。图 17-2 为阵列。

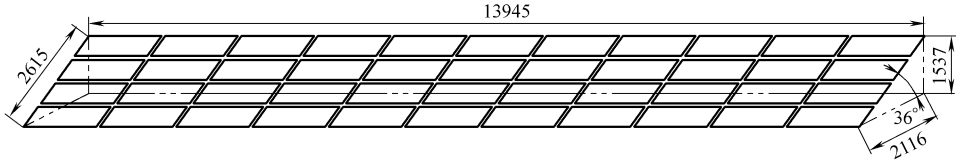


图 17-2　阵列

（3）阵列最小间距 D 计算（见图 17-3）　计算原则：冬至当天 9：00 ~ 15：00 的时间段内，太阳电池方阵不被遮挡。

已知：支架倾角 36°，当地纬度 36.35°，支架长度 $L = 2615\text{mm}$。由公式计算得

$$D = L\cos 36° + L\sin 36°\frac{0.707\tan 36.35° + 0.4338}{0.707 - 0.4338\tan 36.35°}$$

$$= 5894\text{mm}$$

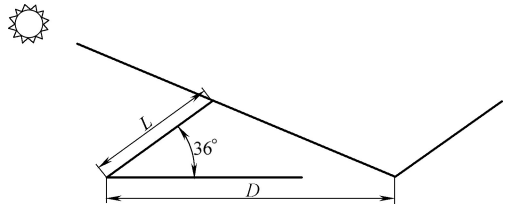


图 17-3　阵列最小间距计算图

经计算，阵列行间最小距离为 5.89m。由于地形坡度的影响，每个太阳电池组件单元之间留出 1.0m 的空间，既可作为纵向交通使用，又可使两个太阳电池组件单元相互之间不产生影响。

三、逆变器室布置

本工程共有 9 个 1MWp 及 2 个 0.5MWp 固定安装非晶硅薄膜电池方阵，逆变器室有两种布置方案：

方案一：每座逆变器室装设 1 台 500kW 逆变器，逆变器室位于 500kWp 发电单元的中心，方阵中最远的汇流箱距逆变器室的距离为 120m，10MWp 电池方阵共需要 20 座逆变器室。

方案二：每座逆变器室装设 2 台 500kW 逆变器，逆变器室位于 2 个 500kWp 发电单元（一个子方阵）的中心，方阵中最远的汇流箱距逆变器室的距离为 190m，10MWp 电池方阵共需要 10 座逆变器室。

通过对电池方阵及逆变器室组合方案的对比，主要结论为：

1）对于 1MWp 电池方阵，两种组合方式均能满足线路电压损耗的限定要求，方案一所

用电缆规格低于方案二，总电缆量也小于方案二，但经济性差别不大。方案一较方案二增加了 1 座逆变器室，相应地增加了成本。

2）方案二比方案一逆变器室数量少，相应设备数量少，损耗小，故障率小，可靠性高，经济性较好，运行管理及维护工作量小。

采用方案二，即 10MWp 电池方阵按 9 座 1MWp 逆变器室及 2 座 0.5MWp 逆变器室的设计，每个 1MW 逆变器室内安装 2 台 500kW 逆变器；每个 0.5kW 逆变器室内安装 1 台 500kW 逆变器。

四、汇流箱及线缆的选择

根据方阵平面布置，薄膜电池方阵汇流箱初步选用 24 路及 18 路防雷智能汇流箱。24 路汇流箱汇流后电流为 122.88A，18 路汇流箱汇流后电流为 92.16A，方阵中最远的汇流箱距逆变器室的距离为 190m。方阵中每一路电池组串直流电压为 610.5V，电池组件至汇流箱与逆变器室之间采用不同型号电缆汇流时，直流线路压降及电缆参考价格比较见表 17-5。

表 17-5　汇流电缆价格与压降对比表

序号	电缆型号	计算压降率	电缆价格/（万元/km）
1	YJV_{22}-2 ×25mm^2	4.08%	5.02
2	YJV_{22}-2 ×35mm^2	2.99%	6.84
3	YJV_{22}-2 ×50mm^2	2.17%	8.91
4	YJV_{22}-2 ×70mm^2	1.63%	12.66

按直流线路总压降率为 2% 左右控制，考虑电缆载流量并进行经济性比较后，汇流箱与逆变器室之间的连接为：当汇流箱至逆变器距离大于 115m 时，电缆采用 YJV_{22}-2 ×50mm^2；当汇流箱至逆变器距离小于 80m 时，电缆采用 YJV_{22}-2 ×35mm^2。

汇流箱设计如下：

汇流箱对 24、18 路光伏太阳电池串联直流电流进行汇流并连接，通过监控进行运行参数和故障分析，经由防雷器与断路器输出至直流配电柜。监控系统采用 24 位双 DSP 和直流 CT 传感器，循环监测输入的每组太阳电池阵列的电压和电流，具有报警和本地故障定位的功能，通过 RS485（数据串口）与光伏电站监控装置通信。汇流箱选用室外防雨壁挂式结构、防护等级 IP65、耐火耐压的聚碳酸酯外壳；

1）同时可接入 24 路或 18 路输入，装有高压直流熔断器（施耐德/ABB），每回路设 5A 熔断器保护，熔断器的耐压值为 1000V，可保护每路光伏组串；能承受直流电压 1000V。

2）每回路均设有二极管防反流保护功能。

3）配有光伏专用高压防雷器，正负极都具有防雷功能（菲尼克斯/ABB 防雷器）。

4）集成串行通信监测系统，包括通信故障情况下的警报，直流过电压保护。

5）可以测量每路电流。

6）断路检测。

7）环境测量——辐照、温度、风向和风速。

五、工程阵列设计

工程阵列由 9 个 1MWp 子阵列及 2 个 0.5MWp 子阵列组成，1MWp 为一个子方阵，需要 2 个阵列逆变器组；0.5MWp 子阵列需要 1 个阵列逆变器组；阵列逆变器组由 844/4 =211 个

太阳电池阵列组成。每一个阵列由 4 排 11 串电池板组成，每一个阵列装 44 块电池板。1MWp 子阵列由 422 个阵列组成，0.5MWp 子阵列由 211 个阵列组成。一个 1MWp 共装 18568 块电池板，装机 1030524Wp，即 1.030524MWp，工程阵列共装 185680 块电池板，10.30524MWp。

组串按单元输入汇流箱，经埋地电缆接入直流配电柜，然后经逆变器和交流配电柜接入 10kV/0.27kV 升压变及配电装置，最后经 35kV 升压站升压后送至当地电网。

第三节　电气一次设计

一、电力接入系统设计

采用 35kV 一级电压接入当地电网，出线为 1 回，线路采用高压架空线路。电站的建设应与地区电网的局部结构优化改造和电力电量平衡相结合。具体接入系统设计不属于本书介绍内容。

二、电气一次设计内容

1. 阵列接线

每个阵列由 11 块电池板串联，共 44 块电池板连接成四串，四串并联接入汇流箱，一个汇流箱汇集 24 个阵列电流。图 17-4 为阵列电池组件接线图。

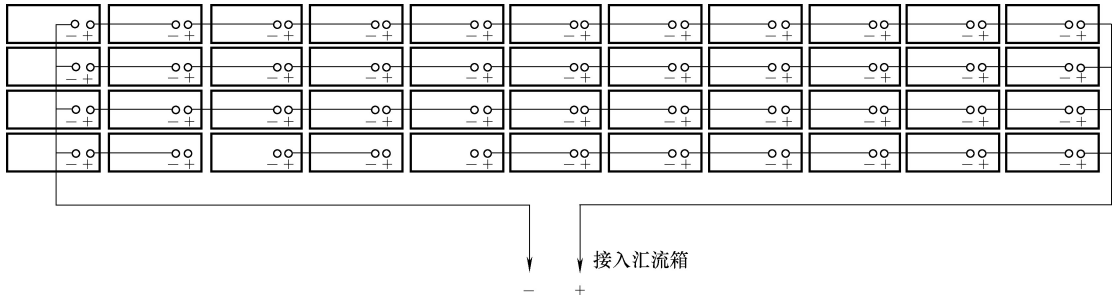


图 17-4　阵列电池组件接线图

9～10 台汇流箱接入直流配电柜，然后接入一台 500kW 逆变器。图 17-5 为子阵列（1MW）接线图。

图 17-6 为直流防雷汇流箱电气原理图。

2. 逆变器与升压变压器的组合方式

本光伏电站采用 1MWp 子方阵的设计方案及 0.5MWp 两种子方阵的设计方案。由于受并网逆变器输出功率、输出交流电压（0.27kV）及场区面积过大等因素的制约，升压变压器的容量选择受到限制。为提高光伏方阵的效率，本电站 1MWp 方阵采用 2 台 500kW 逆变器与 1 台 1000kVA 双分裂绕组升压变压器（升压至 10kV）的组合方式；0.5MWp 方阵采用 1 台 500kW 逆变器与 1 台 500kVA 双分裂绕组升压变压器（升压至 10kV）的组合方式。图 17-7 为 1MWp 逆变器室设备布置图。每个逆变器室安装两台逆变器、两台直流配电柜、两台交流配电柜，1 台升压变压器安装在室外。0.5MWp 逆变器室安装数量减半。

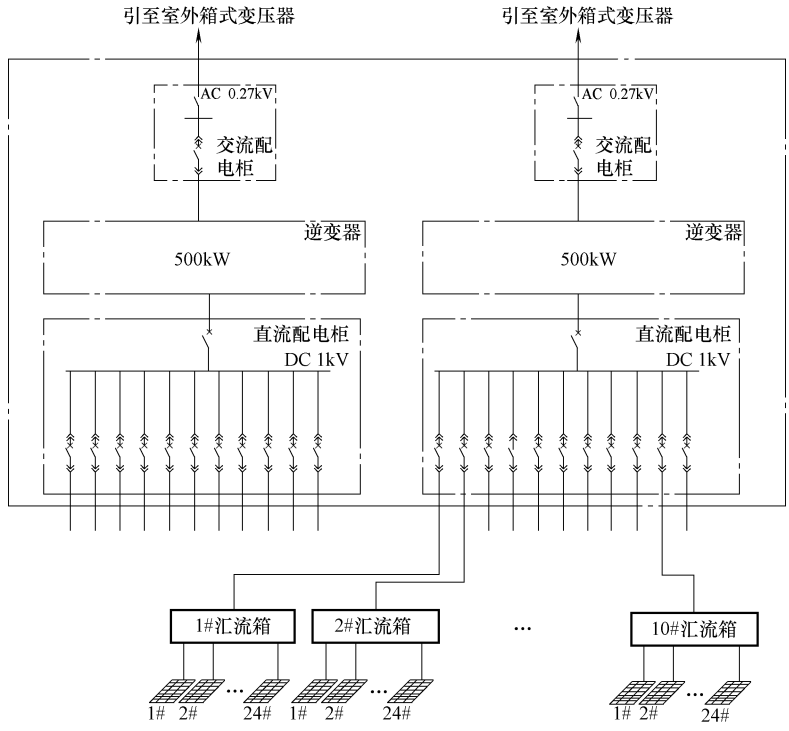


图 17-5　子阵列（1MW）接线图

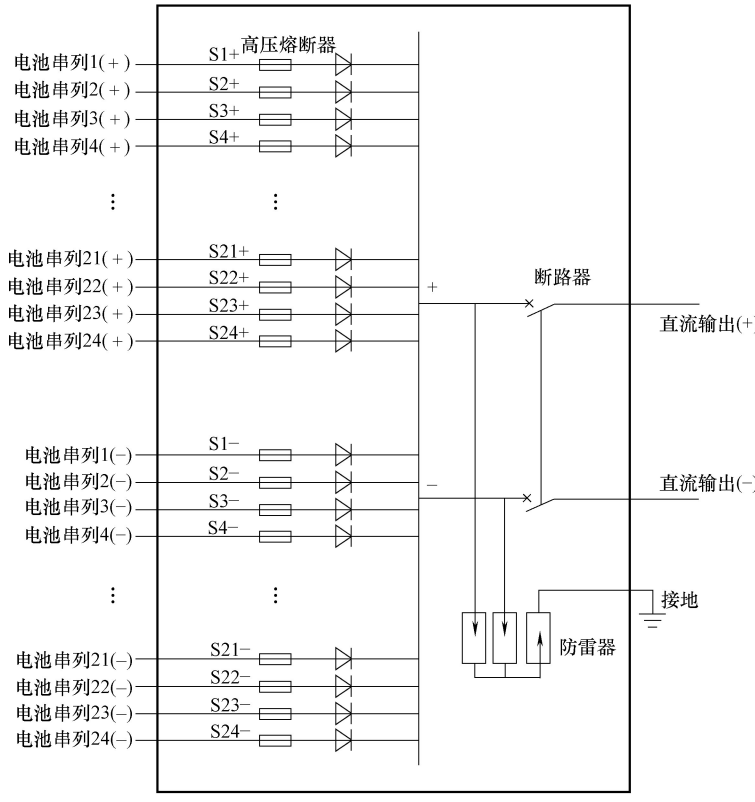


图 17-6　直流防雷汇流箱电气原理图

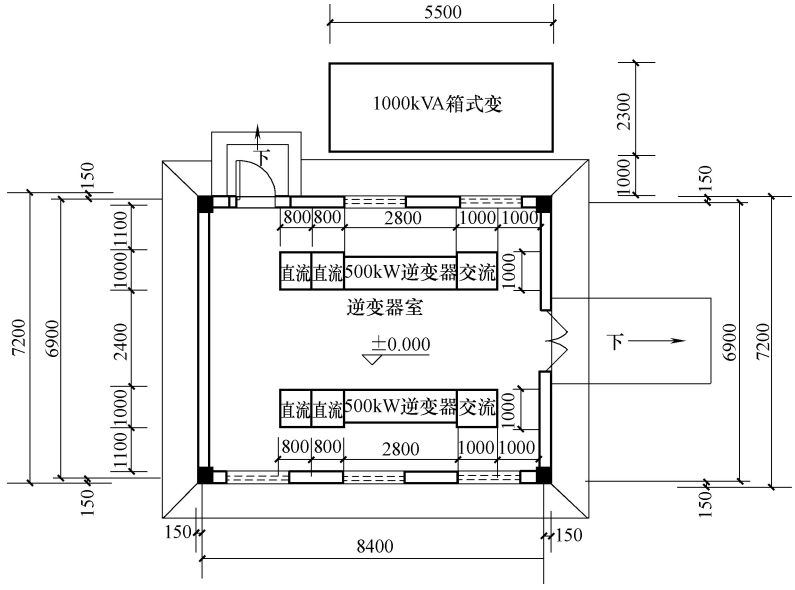


图 17-7　1MWp 逆变器室设备布置图

3. 电气一次接线

采用 0.27kV/10kV/35kV 两级升压方式。每个 1MWp 逆变器室的 2 台 500kW 逆变器出口交流电压 0.27kV，经 1 台容量为 1000kVA 升压变压站升压至 10kV。每个 0.5MWp 逆变器室的 1 台 500kW 逆变器出口交流电压 0.27kV，经 1 台容量为 500kVA 升压变压站升压至 10kV。然后均用 10kV 电缆汇流至 10kV 配电母线，再通过 1 台容量为 10000kVA、35kV/10kV 主变压器升压至 35kV 后接入电网。图 17-8 为 35kV 升压站平面图。

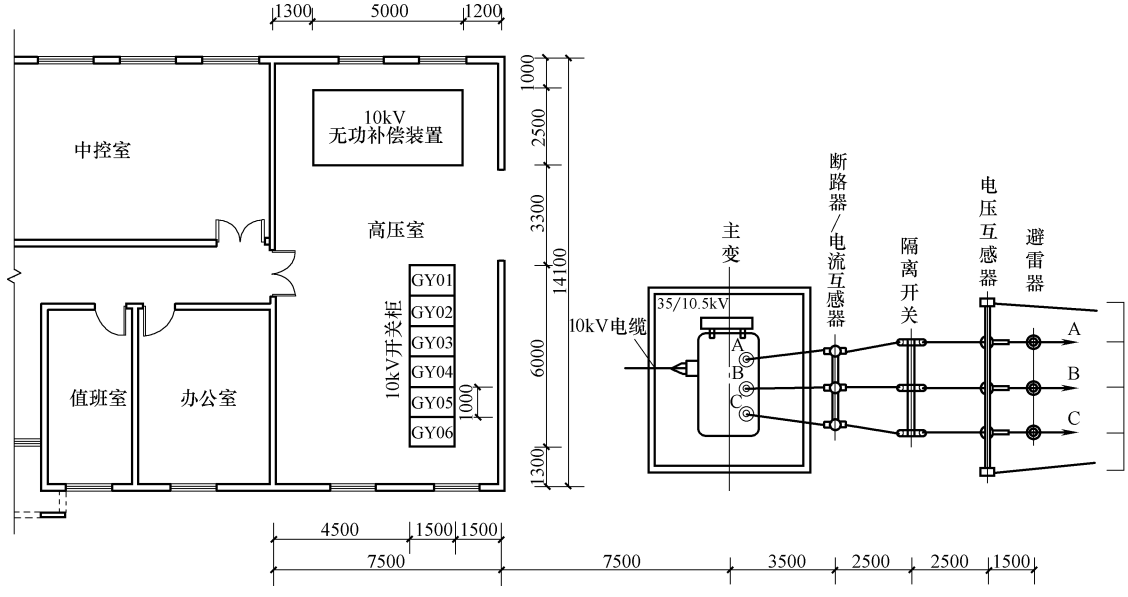


图 17-8　35kV 升压站平面图

升压站电气设备有：

1）9 台 1000kVA、10kV/0.27kV/0.27kV 箱式升压变电站。

2）2 台 500kVA、10kV/0.27kV/0.27kV 箱式升压变电站。

1 台 10000kVA、35kV/10kV 主变压器。

3）6 面 10kV 高压开关柜。

4）1 套 35kV 户外升压设备，含有断路器、CT、PT、避雷针等。

根据《国家电网公司光伏电站接入电网技术规定》中对无功调节的要求，大型和中型光伏电站的功率因数应能够在 0.98（超前）~0.98（滞后）范围内连续可调，无功补偿容量需由接入系统设计确定，按配置容量为 2000kvar 的无功补偿估算，无功补偿装置装设在 10kV 母线上。该方案调压方式简单，操作方便。只需在主变压器加装有载调压开关即可满足要求。

10000kVA、35kV/10kV 主变压器采用户外油浸式变压器。变压器整体效率：10kV 升压变电站平均效率为 99.1%，35kV 主变压器平均效率为 99.2%，则升压装置整体效率为 99.1% ×99.2% =98.3%。11 台 10kV 箱式升压变电站分为 2 组联合单元进线。10kV 侧共 2 回进线，1 回出线，回路数少，因此采用单母线接线，其优点是接线清晰，运行维护方便，经济性较好。因此，电气主接线为：2 台 500kW 逆变器与 1 台 1000kVA、10kV 箱式升压变电站，1 台 500kW 逆变器与 1 台 500kVA、10kV 箱式升压变电站组合；5 台或 6 台 10kV 箱式升压变电站在高压侧并联为 1 个联合单元；2 个箱式升压变电站联合单元分别接入 10kV 配电系统，10kV 配电系统采用单母线接线，汇集为 1 回 10kV 出线接入周边电网。考虑今后电站扩容的可能性，出线站设计应具有可延展性。图 17-9 为电气主接线图。

4. 厂用电电源及接线

根据初步负荷统计情况分析，电站选用变压器容量为 315kVA，采用 10/0.4kV 级电压供电，电能质量能够满足规程规范要求。厂用电采用双电源供电，主供电源引自附近 10kV 电网，通过室外 10kV 箱式降压变电站降压至 0.4kV；备用电源引自厂内 10kV 母线侧出线柜，通过 10kV 干式变压器降压至 0.4kV。主、备用电源分别接至中控室厂电双电源自动切换柜。图 17-10 为厂用电电源及接线。

5. 电气一次设备的选择

电气一次设备参数根据工程经验初选，下阶段将根据短路电流计算结果进行复核和调整。

（1）35kV 出线站配电装置

1）35kV 升压变压器。

型式：三相油浸式双绕组升压变压器；

额定容量：10000kVA；

额定电压：38.5/10.5kV；

短路阻抗：7.5%；

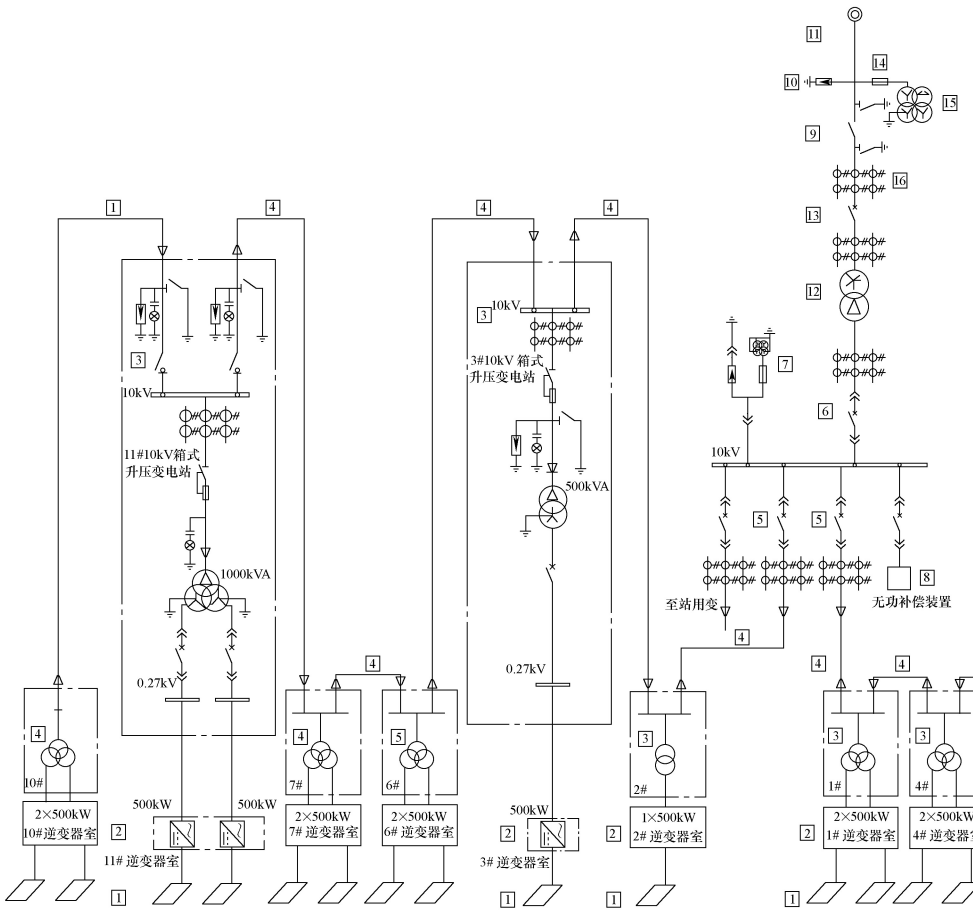
调压方式：有载调压；

联结组标号：YNd11。

2）35kV 断路器。

型号：ZN85-40.5；

额定电压：40.5kV；



主要电气设备表

序号	名 称	型号	单位	数量	备注
1	太阳电池方阵	薄膜太阳电池子方阵 (0.5MW)	块	249730	40或43Wp
2	逆变器室	500kW 逆变器	套	20	
		GCS 直流柜	台	40	
		GCS 交流柜	台	20	
10kV 箱式升压变电站					
3		升压变压器 SCB10−1000kVA 10.5±2×2.5%/0.27/0.27kV, Dyn11	台	9	
		熔断器额定电流 75A	套	9	
		升压变压器 SCB10−500kVA 10.5±2×2.5% /0.27kV, Dyn11	台	2	
		熔断器额定电流 40A	套	2	
		10kV 负荷开关 400A	台	11	
		0.4kV 断路器 CW1−1600A	台	20	
4	10kV 电缆	YJV_{22}−3×95	米	3200	
10kV 开关室设备					
5	10kV 进线柜	KYN28A−12(G)	台	2	
6	10kV 出线柜	KYN28A−12(G)	台	2	
7	保护柜	KYN28A−12(G)	套	1	
8	补偿装置		套	1	
35kV 出线站设备					
9	双接地隔离开关	GW4−35W/630	套	1	
10	35kV 避雷器	TBP−B/42F/310	组	2	
11	35kV 出线	LGJ−3x150	米	150	
12	主变压器	SZ9−10000/35 38.5±3×2.5%/10kV,YN,d11	台	1	U_d=7.5%
13	SF6 断路器	40.5kV 1250A	台	1	
14	熔断器	35kV 200A	组	3	
15	电压互感器	35kV/$\sqrt{3}$/0.1/$\sqrt{3}$/0.1/$\sqrt{3}$/0.1/3	套	1	
16	电流互感器	35kV 200/5	组	4	

附图 青海 格尔木 10MWp 并网光伏电站电气主接线图

图 **1729** 电气主接线图

额定电流：630A/2500A；

额定短路开断电流：31.5kA；

额定短路关合电流（峰值）：80kA；

额定短时耐受电流/时间：31.5kA/4s；

额定峰值耐受电流：80kA；

短时（min）工频耐受电压：95kV；

断路器断口耐受电压：95kV；

雷电冲击耐受电压（峰值）：185kV；

操动机构：弹簧操动机构。

3）避雷器。

型号：无间隙金属氧化物避雷器；

标称放电电流：5kA；

额定电压：42kV；

持续运行电压：23.4kV；

工频放电电压：不小于72kV（有效值）；

500A操作冲击电流残压：不大于105kV（峰值）；

5kA雷电冲击电流残压：不大于119kV（峰值）。

4）户外三相隔离开关。

型式：户外三相式双接地隔离开关；

额定电压：40.5kV；

额定电流：630A；

额定短时耐受电流/时间：31.5kA/4s；

额定峰值耐受电流：80kA；

5）电流互感器。

型号：LB6-35；

额定电压：35kV；

电流比：200/1A；

准确度：0.5/0.2S/5P/5P。

6）电压互感器。

型号：Y5C-41/108；

三相联结组标号：Y/Y/Y/△（开口三角形）；

电压比：$\frac{35}{\sqrt{3}}\Big/\frac{0.1}{\sqrt{3}}\Big/\frac{0.1}{\sqrt{3}}\Big/\frac{0.1}{\sqrt{3}}$kV；

准确度：0.5/0.2/3P。

7）避雷针。

高度：20m。

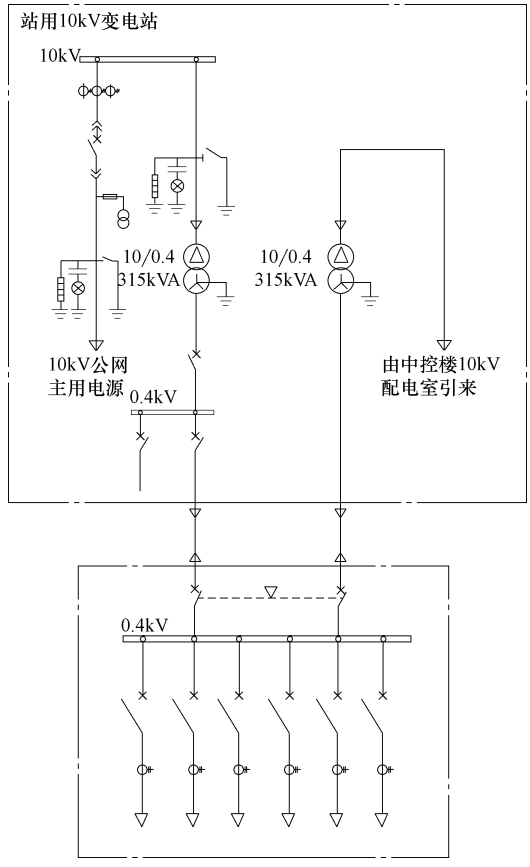


图17-10　厂用电电源及接线

（2）10kV 箱式变电站　10kV 箱式变电站内的一次电气设备主要有 10kV 升压变、负荷开关、熔断器、避雷器、低压断路器等。

1）10kV 升压变压器。

① 型式一：三相双分裂升压变压器；

额定容量：1000kVA；

额定电压：10/0.27/0.27kV；

短路阻抗：7.5%；

调压方式：无励磁调压；

调压范围：10.5±2×2.5%/0.27kV；

联结组标号：YNd11，d11。

② 型式二：三相双绕组升压变压器；

额定容量：500kVA；

额定电压：10/0.27kV；

短路阻抗：4.5%；

调压方式：无励磁调压；

调压范围：10.5×(1±2×2.5%)/0.27kV；

联结组标号：YNd11。

2）10kV 负荷开关。

额定电压：10kV；

最高工作电压：11.5kV；

额定电流：400A；

极限开关电流：1.25kA。

3）10kV 熔断器。

每台箱式变的高压侧装设 3 支插入式全范围保护熔断器，作为箱变过载和短路保护故障的保护元件。

型号：XRNT1-10；

额定电压：10kV；

额定电流：63A 或 31.5A。

4）低压断路器。

额定电压：400V；

额定电流：1600A；

极限分断能力：50kA。

（3）10kV 厂用变压器（室内）

型式：三相干式变压器；

容量：315kVA；

电压：10.5×(1±5%)/0.4kV；

联结组标号：Dyn11；

阻抗电压：4.5%。

（4）10kV 厂用箱式变电站（室外）

1）10kV 变压器。

型式：三相干式变压器；

容量：315kVA；

电压：10.5×(1±5%)/0.4kV；

联结组标号：Dyn11；

阻抗电压：4.5%。

2）10kV 熔断器。

型号：XRNT1-10；

额定电压：10kV；

熔体额定电流：20A。

3）负荷开关。

额定电压：10kV；

最高工作电压：11.5kV；

额定电流：400A；

极限开断电流：1.25kA。

6. 逆变器回路电力电缆

1）逆变器输入最高直流电压为 880V，采用 1kV 低压电缆连接。固定安装电池方阵中有 24 路、18 路输入汇流箱两种方式，根据汇流箱至逆变器室直流柜的距离及汇流箱电流大小，使最远处电池组件电压降控制在 2% 左右，从而可以确定各汇流箱至逆变器室直流柜的直流电缆型号与规格，初步采用 YJV_{22}-1kV-2×35mm^2、YJV_{22}-1kV-2×50mm^2 两种规格。

2）逆变器引至箱式变电站回路电压为 0.27kV，采用 1kV 低压电缆连接，经计算，每 500kW 采用 3 根 YJV-3×185+1×95mm^2 电缆并联连接。

3）高压电缆。10kV 集电线路为直埋电缆，5～6 个变压器环网连接，由最终端箱式变电站引入 10kV 开关柜室。10kV 集电线路采用 YJV_{22}-10kV-3×150mm^2 电缆。35kV 出线站引至第一级杆塔采用 LGJ-150mm^2 架空线。

7. 过电压保护及接地

（1）过电压保护　本电站的过电压保护及绝缘配合设计按 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》标准规范进行，35kV 设备外绝缘在下一步设计时按照工程所在地海拔修正，并根据当地污秽等级复核泄漏比。

（2）直击雷保护　根据气象资料显示，格尔木地区雷暴日数为 2.3d/a，属于少雷地区，本工程采用 35kV 出线 1km 架设避雷线、综合楼出线站设避雷针，太阳电池组件支架与厂区接地网连接等措施进行直击雷保护。

（3）侵入雷电波保护　本工程在 35kV 线路出线端及 10kV 配电装置母线均设有无间隙金属氧化物避雷器，箱式变电站、直流配电柜、汇流箱内均逐级装设避雷器。下阶段根据绝缘配合进一步优化和调整。

（4）接地　本工程接地种类包括：工作系统接地、防雷接地、保护接地。根据电站布置，采用镀锌扁钢形成一个接地网，接地电阻 $R \leqslant 2000V/I$（I 为流经接地装置的入地短路电流），避雷针接地电阻 $<10\Omega$。

8. 照明系统

照明系统电源从厂用电 0.4kV 母线引来。照明系统电压为 AC 380/220V。主要部位照明配置如下：

1）逆变器室、中控室及办公室采用格栅荧光灯。

2）宿舍、走廊及楼梯间采用节能吸顶灯。

3）在办公楼顶及场地周边设投光灯。

4）办公室、宿舍设电采暖插座。

第四节　电气二次设计

电站以 35kV 一级电压 1 回线接入系统。电站的调度管理方式暂定由省网调度中心调度。电站按“无人值班”或少人值班的原则进行设计。电站采用计算机监控系统，计算机监控系统满足全站安全运行监控所要求的全部设计功能，具有保护、控制、通信、测量功能，可实现光伏发电系统及 10kV 开关站的全功能综合自动化管理，中央控制室设置值班员控制台，可实现光伏电站与地调端的遥控、遥信功能及发电公司的监测管理。

电站的综合自动化系统包括计算机监控系统、继电保护、工业电视系统。

一、计算机监控系统

1. 计算机监控系统的内容

计算机监控系统包括数据采集、显示、控制、数据传输等内容。计算机监控系统以智能化电气设备为基础，以串行通信总线（现场总线）及光纤为通信载体，将太阳电池组件、逆变器、站级 10/0.27kV 系统、辅助系统、在线智能监测和监控设备等组成一个实时网络，通过网络内信息数据的流动，采集上述系统全面的电气数据进行监测，以采集的数据为基础进行分析处理，建立实时数据库、历史数据库，实现报表制作、指标管理、保护定值分析及管理、设备故障预测及检测、设备状态检修等电站电气运行优化、控制及专业管理功能。

2. 计算机监控系统的结构

计算机监控系统为开放式分层、分布式结构，可分为站控层、网络层和间隔层。站控层为全站设备监视、测量、控制、管理的中心，通过光缆或屏蔽双绞线与间隔层相连。间隔层按照不同的电气设备，分别布置在对应的开关柜内，在站控层及网络失效的情况下，间隔层仍能独立完成间隔层设备的监视和断路器控制功能。计算机监控系统通过远程工作站与调度中心保持通信联络。

站控层的主要设备包括主机/操作员站、远程工作站、网络交换机、通信管理机、打印机、GPS 时钟；网络层的主要设备包括网络设备及规约转换接口等；间隔层的主要设备包括全分散式的智能汇流箱数据箱采集处理装置、逆变器监控单元、环境参数采集仪以及电站一次设备所用的保护、测量、计量设备等二次设备。图 17-11 为 10MWp 光伏电站监控系统示意图。

3. 计算机监控系统的主要功能

1）数据采集与处理。

2）安全检测与人机接口。

3）运行设备控制、断路器及隔离开关的分合闸操作、厂用系统的控制。

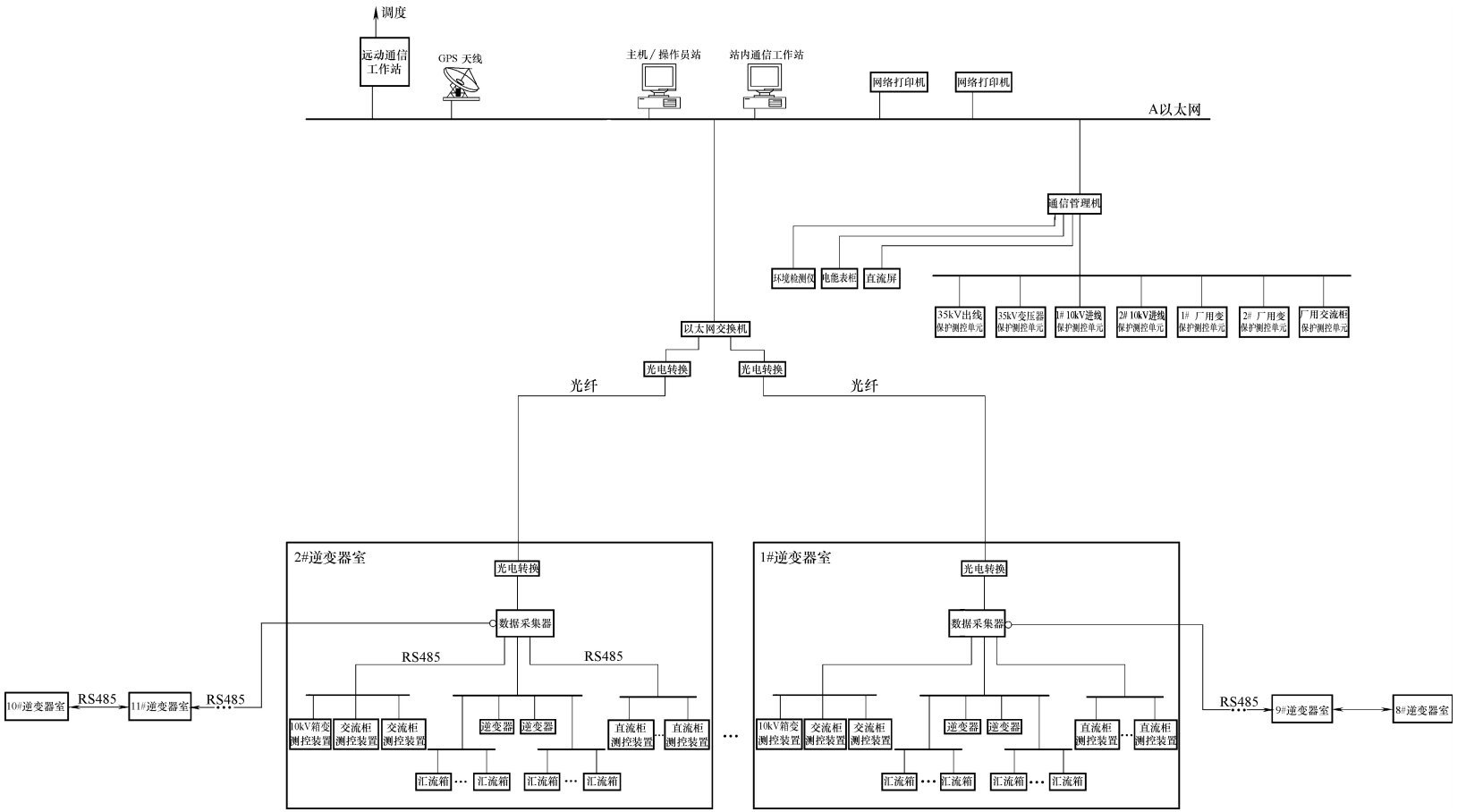


图 17211 10MWp光伏电站监控系统示意图

4）数据通信。

5）系统自诊断。

6）系统软件具有良好的可修改性，能很容易地增减或改变软件功能及方便升级。

7）自动报表及打印。

8）时钟系统。

4. 计算机监控系统的主要设备

选用两台工控计算所作为站级控制设备，其中一台为主机/操作员工作站，另一台作为通信远程工作站，另配制打印机两台、语音报警音响设备一套。

选用两套 2kVA 的 UPS，为计算机监控系统站控层设备供电。

5. 计算机监控发电设备及逆变器

1）发电设备有光伏阵列、汇流箱、直流配电柜、逆变器及交流配电柜。

2）太阳电池组件不单独设监控保护，汇流箱与逆变器共用一套监控系统，汇流箱对电池组件的实时数据进行测量和采集，共用的监控系统对其进行分析处理，对电池组件进行故障诊断和报警并及时发现汇流箱自身存在的问题，处理结果通过通信控制层传输到站控层，由运行人员监视和处理。

3）汇流箱与逆变器共用监控系统功能如下：

① 电池组件、逆变器可在 LCD 上显示运行、故障类型、实时功率、电能累加及并网等参数，采用键盘、LCD 和打印机进行人机对话。

② 电池组件、逆变器设有就地控制装置，与集中控制室联动。电池组件、逆变器的保护和检测装置由厂家配置，如温升保护、过负荷保护、电网故障保护、传感器故障信号等，保护装置动作后，逆变器出口断路器跳开，并发出信号。

③ 电池组件、逆变器远程监控在中控室，控制系统设有多级访问权限控制，有权限的人员才可进行远程操作。

4）显示每个子阵列及全部阵列数据，其数据包括：直流电压、直流电流、直流功率、交流电压、交流电流、逆变器机内温度、时钟、频率、功率因数、当前发电功率、日发电量、累计发电量、累计 CO_2 减排量、每天发电功率曲线图、每天发电量、月发电量、每兆瓦发电量显示、累积发电量显示、每天工作时间显示、系统运行时间、电池板表面温度显示、风力显示、气象台显示、阳光辐照强度显示。

5）有记忆功能，可查找历年的数据。

6）交、直流柜内设置直流线路保护开关、电流表、电压表，其开关状态及电流、电压等信号，通过通信控制层直接传输到站控层，由光伏电站运行人员远程监控。

7）报警装置：电流过小、电池组阵列出现短路、开路现象，可显示出电池组阵列编号位置；监控所有逆变器的运行状态，采用声光报警方式提示设备出现故障；可查看故障原因及故障时间。故障信息包括以下内容：电网电压过高、电网电压过低、电网频率过高、电网频率过低、直流电压过高、直流电压过低、逆变器过载、逆变器过热、逆变器短路、散热器过热、逆变器孤岛、DSP 故障、通信失败。

8）可实时测出电网电压的幅值、频率和相位，如果发生失电，将在电网电压有关参数上产生跳变信号。

9）可远程数据传输。

10）最大功率点跟踪。将太阳电池方阵的电压和电流检测后相乘得到功率，然后判断太阳电池方阵此时的输出功率是否达到最大，若不在最大功率运行，则调整脉宽，调制输出占空比 D，改造太阳电池方阵的工作点，再次进行实时采样，并做出是否改变占空比的判断，通过这样的寻优过程可保证太阳电池方阵始终运行在最大功率点。

6. 10kV 及 35kV 配电设备的监控

本光伏电站 10kV 及 35kV 配电设备包括：11 台 10kV 箱式变压器、10kV 开关站及 35kV 主变压器、35kV 出线站，每台箱式变压器的高压侧配置有负荷开关及高压插入式熔断器，低压侧配置有低压断路器。10kV 开关站为 2 进 1 出单母线接线，进出线设有户内成套金属封闭断路器，35kV 侧采用变压器线路组。上述负荷开关、低压断路器、断路器可以就地控制，也可以由计算机监控系统实施远程集中控制，其动作信号均送至中控室。10kV 箱式变、10kV 开关柜及 10kV 断路器均有五防功能。

二、继电保护与自动装置

1. 保护装置的选型

与集成电路型模拟式保护相比，微机保护装置功能齐全、运行灵活、可靠性高、抗干扰能力强、具备自检功能、价格适中且能方便地与电站计算机监控系统接口，因此采用微机型继电保护装置。

2. 保护配置方案

根据 GB 50062—2008《电力装置的继电保护和自动化装置设计规范》以及 GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》的要求，保护配置如下：

（1）35kV 出线站送出线保护　因为送出线较短，三段式电流保护的速断段保护范围很小，甚至不存在，尤其是在系统处于较小的运行方式下，更是如此。光纤纵差保护由于其具有绝对的选择性，不需要与相邻元件保护配合，且价格适中，已成为 10 ~ 110kV 短线的主要保护，为此出线配置一套光纤纵差保护，多段式过电流保护作为后备保护。

（2）10kV 配电室进线保护　进线设电流速断保护作为主保护，过电流保护作为后备保护，动作于跳闸。

（3）10kV 箱式变压器保护　由于箱式变压器高压侧为熔断器，低压侧为低压断路器，当箱式变压器过载或短路时，将断开高压侧熔断器与低压侧低压断路器，因此不另配置保护装置。箱式变压器高压侧熔断器动作信号、低压侧低压断路器动作信号均经逆变器室数据采集器送至计算机监控系统。

（4）厂用变压器保护　厂用变压器为干式变压器，设电流速断为主保护，保护出口动作于厂用变压器高低压侧断路器，限时速断保护与过电流保护为后备保护，限时动作于跳开厂用变压器高、低压侧断路器。设过负荷保护、温度保护，动作于信号。由高压侧（10kV）熔断器及低压侧低压断路器实现保护。

（5）逆变器保护　逆变器为制造厂成套供货，本身具有孤岛效应保护、直流过电压/过电流保护、极性反接保护、短路保护、接地保护、交流欠电压/过电压保护、过载保护、过热保护、过频/欠频保护、三相不平衡保护、相位保护、对地电阻监测、故障检测及报警。

（6）故障录波装置　根据 GB 19964—2005《光伏发电站接入电力系统技术规定》，全站需配置一台故障录波装置，以录取故障时 35kV 出线、10kV 进出线、10kV 母线的电流、电压等，应能记录故障前 10s 到故障后 60s 的情况，供故障分析。

3. 控制电源

直流控制电源电压等级为 220V。直流系统由一组 100Ah 阀控密闭蓄电池组、高频开关电源模块组成的充电装置、绝缘监测装置等组成。直流电源系统为单母线接线，直流系统选用一套微机监控装置，对电源模块、输入交流以及蓄电池组等进行全方位的监视、测量和控制，并与光伏电站计算机监控系统实现数据通信。

4. 二次接线

（1）测量系统　电站电气测量仪根据 SDJ 9—1987《电测量仪表装置设计技术规程》设置。由于配置了计算机监控系统，所有电气测量将全部进入计算机监控系统，根据设备运行需要在现地配置必要的常测仪表，常测仪表的精度可按一级考虑。

计费用的关口使用电能计量装置，其设备选型由当地供电部门认可，电流互感器准确度等级为 0.2S 级，电压互感器准确度等级为 0.2 级，电流、电压线圈专用。

（2）信号系统　采用全计算机监控系统，运行需要的监视信号均由相应的元件输入计算机监控系统，不再设独立的中央音响系统。由计算机显示实时状态信号并根据需要发出声、光报警信号。另外，在现场设备上也应有必要的运行状态和故障信号。

（3）互感器的选择与配置

1）电流互感器的选择原则：

① 连接测量仪表用的电流互感器的额定一次电流，应使正常负荷下仪表指示在刻度标尺的 2/3 以上，并应考虑过负荷运行时能有适当的指示，因此，电流互感器的一次电流可选为 1.25 倍的线路最大负荷电流。

② 电流互感器的准确度等级为：接带计量电能表的电流互感器准确度等级为 0.2S 级；接带常测仪表的电流互感器准确度等级为 0.5 级；继电保护用电流互感器采用 SP 级。

③ 电流互感器的额定二次电流选 1A。电流互感器的容量应不小于其实际负载。

2）电压互感器的选择原则：

① 电压互感器的额定一次电压应不小于负荷安装处的额定一次电压。电压互感器的准确度等级为：接带计量电能表的电压互感器线圈，其准确度等级为 0.2 级；接带常测仪表的电压互感器线圈其准确度等级为 0.5 级；接带保护用的电压互感器线圈其准确度等级为 3P 级。电压互感器的二次电压为$\frac{100\text{V}}{\sqrt{3}}$，辅助线圈为 100V/3。电压互感器各线圈容量均应大于（或等于）其实际负载。

② 电压互感器的配置见二次单线图。

三、工业电视系统

设置一套工业电视系统，实现对电站周界、电站主要电气设备、光伏电池阵列、逆变器室、主控室、进站通道等现场的视频监视，系统主要配置前置摄像机及相关附件、网络视频服务器、视频监视主机及网络输出设备。视频信号通过电网调度通信网络可实现视频信号的远传。

四、环境监测系统

在太阳能光伏发电场内配置一套环境监测仪，实时监测日照强度、风速、风向、温度等参数。该装置由风速传感器、风向传感器、日照辐射表、测温探头、控制盒及支架组成，可测量环境温度、风速、风向和辐射强度等参数，其通信接口可接入计算机监控系统，实时记

录环境数据。

五、通信与调度

（1）电站通信　由当地电信网引入电话电缆，在办公室设一套 20 门数字式程控交换机为站内生产管理、生活服务。

（2）电力调度　由中控室引光纤电缆至当地调度网络交换机，为电力调度及远动服务。

第五节　总平面布置及土建设计

一、总平面布置

1）本电站场址位于格尔木市东出口，109 国道以北的戈壁荒滩上，其范围为北纬 N36°21′0.43″～ N36°21′24.5″，东经 E95°07′49.3″～ E95°08′26.4″，海拔为 2865～2873m。场地开阔，地势平坦，局部有少量新月形沙丘，东侧距 750kV 变电站约 4km，南侧为 330kV、750kV 电力走廊，南距 109 国道约 2km，交通便利，运输方便。场址土地形状近似梯形，南北最宽处为 754.67m，东西长 923.4m，面积为 0.552km^2。光伏电站由生产区、管理区及防护林带组成，生产区面积为 0.491km^2，管理区位于电站中部，形状为长方形，主要的建筑物为综合楼、水泵房、35kV 开关站，管理区还配备有硬质广场、绿化区和休闲运动区。综合楼布置在管理区的北边，35kV 开关站位于综合楼的西边，紧邻 10kV 高压室。

2）生产区包括太阳电池组件阵列、逆变器室及检修通道等。太阳电池组件阵列由 9 个 1MWp 和 2 个 0.5MWp 薄膜电池组件子方阵组成，共 10MWp，每个子方阵设一座逆变器室，逆变器室位于子方阵的中间部位，共 11 座逆变器室，每座逆变器室占地 62.64m^2。逆变器室建筑高度为 4.1 m，东侧距电池阵列为 16.5m，西侧距电池阵列为 10.5m，北侧距电池阵列为 12m，不会对电池阵列产生阴影遮挡。

3）太阳电池组件子阵列结合用地范围和地形情况布置，采用多种方阵形状，通过这几种形状的组合，以达到用地较优、节约连接电缆、日常巡查线路较短的最佳布置方案。

4）进站交通道路位于管理区的中部，内接管理区的硬质广场，外与附近的公路相连，电站内的道路由生产区外围的环道和生产区的纵横交通道组成。生产区内设四条纵向和两条横向硬质道路，电池组件间的空地可以作为横向道路，所有纵横道路均与环道相连，形成一个场内道路系统，环道路宽度为 6 m，路面为粒料，生产区内纵向硬质道路宽也为 6 m，路面为混凝土，电池组件间的道路为现场原状，可稍作平整，便于较大设备的运输，满足日常检查和检修的需要。因地处沙漠及气候干燥，场地不考虑排水措施，冲洗电池板水散开，排向周围场地，雨水自然渗透。

5）本工程围墙沿占地范围设置，因光伏电站运行不需要原料供运，也无污物产生，同时考虑电站运行所需的人力物力较少，所以电站对外仅设置一个出入口，出入口处设电站大门。

6）绿化是改善生活、生产、生态环境的重要措施，具有滞尘、固定 CO_2、释放 O_2、降温等功效。结合光伏电站性质及当地气候，拟定几个绿化原则：

① 因地制宜，按功能分区绿化，如：四周种植阻挡风沙林带，进站道路两侧、建筑物周边，种植观赏性树种或果树、绿篱、草皮，建筑物靠近冬季主导风向布置常绿乔木、灌木，阻挡寒风。

② 选用适宜当地生长的，具有抗旱、抗污染、吸收有害气体、防尘和杀菌性能的树种。

③ 根据电站总平面布置统筹规划。

④ 站内空地广植草皮，逐步改沙漠为沙土。

二、土建设计

1. 综合楼

1）综合楼为一层钢筋混凝土框架结构，建筑面积为 476.97m^2，外墙为 300mm 厚加气混凝土砌块墙，内墙为 200mm 厚非承重多孔砖砖墙。楼内设置有 10kV 高压配电室、中控室、厨房及餐厅、管理办公室及宿舍。中控室内布置有监控系统操作员站、直流屏、集中监控系统、PC 系统运行、通信等设备；10kV 高压室布置有 10kV 高压配电柜、高压开关柜等设备。综合楼除 10kV 高压配电室、中控室处层高 4.5m 外，其余房间层高 3.6m，室内外高差 0.45m，建筑高度 4.95m，北边距电池阵列 18m，不会对电池阵列产生阴影遮挡。

2）门窗。综合楼外窗采用双层白色塑钢中空玻璃窗，外门采用铝合金中空玻璃门，内门为中级木门，外窗设防盗窗。

3）装修。外墙墙面为外墙瓷砖墙面，内墙面除卫生间贴普通瓷砖外，其余均为白色涂料，卫生间地面为防滑地砖，办公室装石膏吊顶，中控室卫生间采用铝合金条形扣板吊顶，其余采用白色乳胶漆顶棚。

2. 水泵房

水泵房地下部分为钢筋砌体结构，建筑面积为 154.51m^2。顶棚、墙面、地面采用水泥砂浆面层。

3. 逆变器室

逆变器室为一层钢筋混凝土框架结构，层高 3.8m，共 10 座，每座建筑面积为 62.64m^2，外墙为 300mm 厚加气混凝土砌块墙，室内外高差 0.3m，建筑高度 4.1m。窗采用双层白色塑钢中空玻璃窗，门采用防风沙门。顶棚、外墙墙面、内墙面采用白色乳胶漆，地面采用水泥砂浆面层。

4. 站内道路

管理区的硬质广场作为电站道路交通枢纽，内接电站内的道路，外与附近的公路相连。为满足设备运输及运行管理和消防需要，在生产区周围设环形通道，生产区内设纵横向道路，纵向道路均能到达每座逆变器室，并与周围环形道路相连，以方便检修巡视车辆的通行，所有道路面宽 6m，道路转弯半径不小于 6m。

5. 大门

大门位于管理区对外道路和围墙相会处，大门采用单开不锈钢电动自动伸缩门，一侧为门卫值班室，一侧为电站标识墙，贴石材。值班室为框架结构，建筑面积为 40m^2，外墙为 300mm 厚加气混凝土砌块墙，室内外高差 0.3m。

6. 围墙

沿场址范围四周设 2.4m 高景观围墙，防止外人进入，并展示电站的风貌。

7. 结构设计

结构设计遵照下列标准：

GB 50009—2001《建筑结构载荷规范》（2006 年版）；

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》（2006 年版）；

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》（附条文说明）；

GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》；

GB 50017—2003《钢结构设计规范》。

8. 工程地质条件及工程等级

1）场址地层由上而下分为两层：

① 第四系全新统风积粉细砂层。该层广泛分布于场址地层，属于季节性冻土，一般分布厚度为0.6～1.5m，最大厚度为2.3m，含水量较低。

冻土类别：少冻；

冻胀等级：Ⅰ级；

结构松散～稍密，承载力达160kPa。

② 第四系全新统风砾砂层，结构密实，承载力较高。

2）场址区地势较平坦、开阔，不存在滑坡、不稳定体、泥石流、移动沙丘等不良物理地质现象。场址区地下水埋深较大，地基土为盐渍土，对混凝土及砌体结构无腐蚀性，但对钢筋砌体结构中的钢筋及钢结构具腐蚀性。

3）设计基本地震加速度值为0.1g，抗震设防烈度为7度。

9. 基础

1）综合楼、逆变器室基础坐落在②层第四系全新统风砾砂层上，采用柱下独立钢筋砌体结构，室内地面要高出室外地面300mm，7级抗震设防，设计使用年限为50年，综合楼安全等级为二级，逆变器室安全等级为三级。

2）水泵房地下部分为钢筋砌体结构，地上部分为砖混结构。

3）箱式变压器采用混凝土基础。

10. 升压站

升压站内建有2座独立避雷针、一台主变压器及隔离开关、避雷器等。2座30m高独立避雷针由变截面钢筋插接拼装而成，钢筋混凝土基础；主变压器基础亦为钢筋混凝土基础；站内建一座15m^3事故油池。

11. 材料

1）混凝土强度等级：垫层C20，其余均为C30。

2）钢筋：直径≤12mm，采用HPB235，直径≥12mm，采用HRB235。

3）钢材：Q235。

4）砖砌体：地面以下采用烧结普通砖，水泥砂浆；地面以上框架结构采用非承重空心砖或加气混凝土块，砖混结构采用烧结普通砖，混合砂浆砌筑。由于地基是盐渍类土，对混凝土及砌体结构无腐蚀性，但对钢筋砌体结构中的钢筋及钢结构有腐蚀性，因此，应对地下基础表面进行防护，基础表面刷聚合物水泥浆两遍。参见GB 50046—2008《工业建筑防腐蚀规范》。

第六节　太阳电池支架及支架基础的设计

一、太阳电池支架（简称支架）

1. 沙漠电站对支架的要求

1）支架阵列要符合电气性能的要求：

① 单元阵列总瓦数与逆变器匹配。

② 有固定导线装置，防止导线接头在风力下松动。

2）抗风速可达 27m/s，换算为压强，确定为 0.45kN/m^2。

3）等寿命设计。支架关键是电池组件的装夹，电池组件是由玻璃制成的，四周没有铝合金边框，装夹件直接与玻璃接触，玻璃是易碎品，压力过大或压紧点不在一个平面上，都会造成破碎，支架的刚度、强度再好，基础再稳固，支架与基础的连接再牢，也都徒劳。因此，支架、基础的设计不可盲目追求高刚度、高强度，使加强筋过多，耗费钢材，但也不能柔弱无力，因此压力的大小以玻璃的抗拉强度为准，装夹牢固可靠，玻璃抗拉强度为 55MPa，计算在风速 27m/s 情况下，电池板所受的剪切力。

4）连接点尽可能少，便于现场组装，减少现场组装工作量。

5）抗震性能好。

6）使用寿命 25 年。

7）热镀锌防腐，现场装配时刮伤、碰伤需要补漆，采用富锌漆作为底漆，可实现阳极保护的作用，再加防锈漆，两道面漆。

8）前后支架之间的间隔距离，以冬至节气，9：00 ~ 17：00 时间段，电池板不被遮挡为准。

9）电池板横放。

10）薄膜电池周边无装夹用铝框，电池板的装夹，确定为上下各装两块压板，这种形式安全可靠，在橡胶衬垫老化失效的情况下，电池板仍不会脱落，装夹板不可盖住电池，以免影响发电量。

11）支架与基础的连接采用螺栓连接。

12）压板螺栓头不可高出压板，以免妨碍机械清洁电池板。

13）支架安装整齐牢固，刚度、强度达到图样要求，装玻璃电池的平面度 <2mm。

14）电池板安装：

① 四块压板在一个平面上，不可使玻璃板产生瓢曲现象，不能产生局部破碎，排布整齐，牢固，经得起速度为 27m/s 的风力。

② 电流相近的安装在一起。

2. 支架设计

本工程采用最简捷的设计：前后支柱、12 条纵梁，长 2700mm；5 根横梁，长 13500mm；两根斜支撑；6 根基础，每两根基础间距 2.2m。

横梁用 U 型钢连接，横梁与支柱也用 U 型钢连接，固定用不锈钢或热镀锌螺栓连接。横梁与纵梁都采用 C 型钢，横梁为 80mm ×40mm ×2mm，纵梁为 40mm ×40mm ×2mm，开口为 20mm，底部冲有连串的腰形孔，以便于调整距离，方便安装。后排支柱首尾加一斜支撑，以增加其刚性。支架与基础的连接用底板与地脚螺栓连接。横梁与纵梁直接用螺栓连接。电池板装在横梁上，一个阵列四排，每排 11 块电池板，共装 44 块。全部采用热镀锌。倾斜角度为 36°，电池板最低距地约 0.5m。

为保证支架的安全稳定，对所选用的檩条及支架构件需进行验算，主要计算项目包括强度、稳定性、挠度等。檩条计算依据规范公式进行，钢架计算采用中国建筑科学研究院 PKPMCAD 工程部编制的计算程序《钢结构计算机辅助设计软件》STS（2008 年版）计算。所有的连接为刚接。影响支架系统稳定的主要因素是风载荷，因此，确定合理的风载荷成为保

证支架系统安全、稳定、经济的主要因素。风载荷取自当地气象资料中多年的最大风速，换算成风压。表 17-6 为计算用原始数据。

表 17-6 计算用原始数据

序号	名 称	单位	参 数
1	电池组件长	mm	1245
2	电池组件宽	mm	635
3	电池组件重量	kg	15.1
4	每组电池组件行数	块	4
5	每组电池组件列数	块	11
6	钢架纵梁	mm	2700
7	纵梁跨度	mm	1600
8	前后立柱间距	mm	1294
9	体形系数		1.4
10	支架高度	mm	1820
11	基本雪载	kN/m^2	0.20
12	基本风速	m/s	27
13	纵梁断面尺寸	mm	40×40×2,开口 20
14	横梁断面尺寸	mm	80×40×2,开口 20
15	纵横梁布置		5 条横梁,12 条纵梁

二、支架基础设计

在沙漠安装支架，要求稳固、不下沉、不变形，支架是坐落在基础上的，基础的稳固是至关重要的，采用条桩基础。考虑支架整体重量较轻，季节性冻土对基础影响不大，因此将表面作为地基持力层。基础抗风计算主要包括：抗倾覆、抗滑移及抗上拔。基础是钢筋混凝土条桩，尺寸为 2000mm（长）×450mm（宽）×500mm（高），埋深 250mm，基础与支架采用螺栓连接。

经计算：

抗倾覆：抗倾覆力矩 M_R/倾覆力矩 $M_S = 1.41 > 1.2$；

抗滑移：摩擦阻力 F_g/滑移力 $F_n = 1.35 > 1.3$；

抗上拔：重力/上拔力 > 1.2。

结论：抗倾覆、抗滑移及抗上拔能力均满足安全条件。

第七节 给水排水设计

一、设计依据

GB 50013—2006《室外给水设计规范》；

GB 50014—2006《室外排水设计规范》；

GB 50015—2003《建筑给水排水设计规范》。

二、给水系统

1. 生活水源

本工程考虑在电站内打井，作为生活、生产用水水源，水源井水质需相关部门检验是否

达到饮用水标准，若未达到饮用水标准，则水源井仅作为生产用水，生活用水采用桶装纯净水。

2. 用水量

（1）生活用水量　按 15 人计，生活用水标准为 150L/d，最大日用水量为 2.3m^3/d。

（2）绿化用水量　本工程防护林面积约为 127159.5m^2，绿化用水标准为 2L/(m^2·次)，按十天浇灌一次计算，则最大日用水量为 25.4m^3/d；管理区绿化面积约为 4010.3m^2，绿化用水标准为 2L/(m^2·次)，按五天浇灌一次计算，则最大日用水量为 1.6m^3/d；本工程绿化最大日用水量为 27.0m^3/d。

（3）浇洒道路、广场用水量　本工程道路面积约为 35150m^2，浇洒用水标准为 2L/(m^2·次)，按十天浇洒一次计算，则最大日用水量为 7.0m^3/d；广场面积约为 2133m^2，浇洒用水标准为 2L/(m^2·次)，按五天浇洒一次计算，则最大日用水量为 0.85m^3/d；本工程浇洒道路、广场最大日用水量为 7.88m^3/d。

（4）冲洗电池组件用水量　本工程共 18568 块电池板，将采用机械化清洗，每年清洗 12 次，年用水量为 2370m^3。

（5）总用水量　全年用水量为 15933m^3/a。

3. 给水布置

生活用水与生产用水均引自水源井，但两者分开。

1）生活用水采用二次加压供水方式，水泵房内设一座 8m^3 生活水箱，两台紫外线消毒器，一套变频生活供水机组，供水机组型号为 HLS14/0.3，供水能力 12m^3/h，压力为 0.3MPa，生活热水由宿舍电热水器供给。

2）生产用水储存在室外 150m^3 的生产—消防合用水池内，用于生产上绿化、浇洒道路及冲洗电池板。电站内共设置地下洒水栓 90 套。两台浇洒泵，两台消防泵。浇洒泵型号为 KQL50/185-4/2，流量为 2.31～3.9L/s，扬程为 42～45.8m，功率为 4kW。

三、排水系统

本工程建在沙漠上，没有统一的排水管网，只能自行消化。雨水、污水采用分流制排放。

（1）雨水排水系统　建筑物屋面雨水经排水管引入明沟，流经外场地沟，渗透地下。

（2）污水排水系统　厕所采用化粪池，一年清理一次；厨房污水经二级处理后用于浇洒道路和绿化。化粪池沉渣及二级处理后的污泥，均由城市废固处理站定期收取。

第八节　采暖通风设计

一、设计依据

GB 50019—2003《采暖通风与空气调节设计规范》；

GB 50016—2006《建筑设计防火规范》。

二、室外空气计算参数

冬季采暖室外计算温度：－15℃；

冬季通风室外计算温度：－9℃；

夏季空调室外计算温度：30.5℃；

夏季通风室外计算温度：27℃；

极端最低温度：－33.6℃；

极端最高温度：35.5℃；

冬季大气压力：89.84kPa；

夏季大气压力：88.38kPa。

三、室内空气计算参数

1. 冬季采暖室内计算温度

中控室、办公室、餐厅及宿舍：18℃；

公共卫生间：16℃；

配电室、厨房：10℃；

库房：5℃。

2. 夏季空调室内计算温度

中控室：26℃。

3. 夏季通风室内计算温度

配电室、逆变器室：45℃。

四、采暖通风系统

1. 采暖系统

宿舍、办公室采用发热电缆地板，辐射方式取暖；

配电室、中控室采用中温辐射式电加热器采暖。

2. 通风系统

1）配电室、餐厅、逆变器室卫生间采用机械排风系统，排除室内余热及串味。

2）厨房保持负压，局部采用油烟机，加工间采用自然通风。

3. 空调系统

中控室设置单元空调机。

表 17-7 为采暖通风主要设备表。

表 17-7 采暖通风主要设备表

序号	名称	型号及规格	单位	数量	备注
1	柜式空调机	KFR-46LW/DY-J（E4），制冷量4600W，制热量5300W，1.6kW	台	2	
2	辐射式电加热器	HXB-20，1300 ~ 2000W，1114mm × 455mm × 95mm	台	6	
3	辐射式电加热器	HXB-15，1000 ~ 1500W，867mm × 455mm × 95mm	台	2	
4	辐射式电加热器	HXB-10，650 ~ 1000W，617mm × 455mm × 95mm	台	2	
5	发热电缆	TXLP/1/17，单导线，3100W，标准长度 182m，线性负荷 17W/m，总电阻值 15.6Ω	套	4	含温控器
6	发热电缆	TXLP/1/17，单导线，2600W，标准长度 153m，线性负荷 17W/m，总电阻值 18.6Ω	套	4	含温控器

（续）

序号	名称	型号及规格	单位	数量	备注
7	发热电缆	TXLP/1/17，单导线，2200W，标准长度 129m，线性负荷 17W/m，总电阻值 22.0Ω	套	2	含温控器
8	壁式轴流风机	XBDZ No.2.8，风量 1000m³/h，风压 4.5Pa，0.04kW	台	2	
9	轴流风机	T35-11No.5.6，风量 5000m³/h，风压 74Pa，0.37kW	台	2	
10	轴流风机	T35-11No.2.8，风量 2000m³/h，风压 192Pa，0.18kW	台	22	
11	管道式换气扇	BPT18-44A，风量 400m³/h，风压 265Pa，0.044kW	台	2	
12	管道式换气扇	BPT25-56A，风量 800m³/h，风压 410Pa，0.15kW	台	2	
13	防沙保温调节百叶窗	TLBC-S-FSB-Ⅱ，额定风量 2000m³/h	个	22	逆变器室

第九节　防风沙设计及电池板清洁

一、防风沙设计

1. 场地防风沙设计

1）太阳电池阵列分布在整个电站场区内，数量多、密度大，客观上增加了场地内地面的粗糙度，起到沙障作用，既能固定流沙，又能抑制风速的增加。

2）场地内播散耐旱草籽，加大绿化面积，可以起到有效固沙、增加空气温度、调节气温和提高土壤保水性作用。

2. 建筑防风沙设计

1）电站四季的主导风向与年主导风向一致，为西风。春季平均风速最大，建筑物采用南北向布置，减少冬季风对建筑的影响。

2）建筑物周围加大绿化，灌、乔、固沙草结合，通过层层防护，达到减弱风速、阻挡风沙的效果。

3）建筑物的窗及外门采用双层中空玻璃，门窗应能隔绝风沙的侵入，并加强门窗缝隙密封处理，建筑通风用的各种洞口均设防风沙百叶。

二、电池板清洁

电站所处环境沙尘较大，经常受到沙尘、强风的影响，电池组件很容易积尘，影响发电效率，必须对电池板表面进行定期和不定期清洁，并采取一定的清洁方法。

（1）定期清洁　每月进行一次，制定清洁路线，清洁时间安排在日出前或日落后。

（2）不定期清洁　不定期清洁分为恶劣气候的清洁和季节性清洁。

1）恶劣气候分为大风、沙尘和雨雪后的清洁。

2）季节性清洁主要指春秋季位于候鸟迁徙线路下的发电区域，对候鸟鸟粪的清洗。

（3）清洁方法

1）用水擦洗。光伏电站电池板数量多，人工清洗耗时费水，最令人头痛的是用水往往擦不干净，留下的水渍迹因很难擦干净，成为泥浆层附在玻璃表面。

2）压缩空气吹。这种方法亦不理想，易吹起满天灰尘。

3）机械自动擦除。在电池玻璃表面涂覆纳米材料，其作用是降低污物及灰尘对玻璃的附着力，增加亲水能力，使雨水能均匀分散在玻璃表面，然后加上自动橡胶刷，往复运动，达到除尘目的。机械刷工作环境恶劣，寿命只有 3 ~5 年。

4）电场除尘。在电池板表面覆盖一层透明的对灰尘敏感的薄膜电极，氧化铟锡，电池板表面的传感器监视灰尘沉积状态，当灰尘达到一定密度或厚度时，氧化铟锡薄膜电极提供 500 ~900V，5 ~20Hz 的交流电，发出一种灰尘排斥波，将灰尘推到玻璃板边缘，2min 内可去除 90% 的灰尘，所用电能来自电池板发的电，用量很少。缺点是成本高。

5）清洁机器人。有一家智能机械有限公司正在研制清洁机器人，清洁工作由 5 道工序组成，用水量少，清洁度高，效率高，两年内将推向市场。

电池板清洁方法要做到有较好的清洁效果，成本低，效率高，简单易行，为市场接受是不太容易的。比较行得通的办法是采取灵活的处理方法，即采用的除尘方法与工具因具体电站情况不同而采取不同的方法。随着光伏产业的发展，电池板除尘技术将会快速发展并很快成熟。

第十节　工程消防设计

一、设计依据、原则、方案

1. 消防设计依据

《中华人民共和国消防法》2009 年版；

GB 50016—2006《建筑设计防火规范》；

GB 50222—1995《建筑内部装修设计防火规范》2001 年版；

GB 50140—2005《建筑灭火器配置设计规范》。

2. 设计原则

1）贯彻“预防为主，防消结合”的消防工作方针，做到防患于未然，严格按照现行规范的要求设计，采取“一防、二断、三灭、四排”的综合消防技术措施。

2）工程消防设计与总平面布置统筹考虑，保证消防车道、防火间距、安全出口等各项消防要求。

3. 设计方案

采用综合消防技术措施，根据消防系统功能要求，从防火、灭火、救生等方面作完善的设计，力争做到防患于未然，减少火灾发生的可能，一旦发生也能在短时间内予以扑灭，使火灾损失减到最低程度，同时确保火灾时人员的安全疏散。

二、建筑消防设计

1. 建筑物火灾危险分类和耐火等级

表 17-8 为建筑物火灾危险分类和耐火等级。

2. 防火间距

综合楼与逆变器室、水泵房之间相距较远，间距远大于 9m，满足规范要求。

表 17-8　建筑物火灾危险分类和耐火等级

房间名称	火灾危险物类别	耐火等级
综合楼 10kV 高压室	丙	二
综合楼中控室	丙	二
综合楼其他房间	丁	二
逆变器室	丙	二
水泵房	丁	二

3. 安全疏散

1）综合楼共一层，建筑面积为 478m^2，根据功能要求共设有六个直接对外出口，中控室和 10kV 高压室均设两个出入口，其中一个直接对外，满足规范要求。

2）每个逆变器室面积为 63m^2，长度大于 7m，设两个出入口，满足规范要求。

3）水泵房设直接对外出口，满足规范要求。

4. 消防车道

通过进场交通道路，消防车可到达场区，场区内建筑物及构筑物前均设有道路，用于设备安装与检修，并兼作消防车道，路宽大于 4m，而且场区内形成环形通道，道路上空无障碍物，满足规范要求。

三、消防给水排水设计

1. 水源

生产—消防合用水池由水源井补给。

2. 用水量

全部建筑物面积约 2700m^2，室外消防栓系统用水量为 15L/s，一次火灾延续时间按 2h 计算，消防栓系统一次灭火用水量为 108m^3。

3. 消防给水

综合楼外设一座 150m^3 的生产—消防合用水池，其中储有消防水量 108m^3，水泵房内设有两台消防泵，综合楼外布置 SA100/65-1.0 型室外地下消防栓两套，室外消防管网采用环状布置，平时消防管网压力由生活变频供水机组维持，发生火灾时起动消防泵。消防泵型号：XBD4.5/15-80-200 型，流量 15L/s，压力 $P=0.45$MPa，功率 15kW。

4. 建筑灭火器及防毒面具

建筑物室内均配置手提式磷酸铵盐干粉灭火器，在逆变器室、中控室、10kV 高压室各配置 1 辆推车式磷酸铵盐干粉灭火器，在油浸式变压器附近配置砂箱两个，在中控室内配置防毒面具两具。

四、采暖通风消防设计

火灾发生时，应停止相关部位的通风系统运行，严禁采用明火采暖。

五、消防电气设计

1）消防电源采用两路供电，厂用变配电，电压为 380/220V。

2）消防泵采用两路供电，在消防泵控制柜自动切换。

3）逆变器室内部连接电线电缆均采用阻燃型。

4）逆变器室、35kV 出线站均设充电应急灯，放电时间不小于 30min。

5）中控室设对外直拨电话，直拨 119 火警电话。

第十一节　施工组织设计

一、工程条件

（1）交通运输条件　场址距 109 国道 2km，距市区 30km，交通便利，运输方便。

（2）场地条件　场地为荒漠沙地，开阔平坦，抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.1g。

（3）主要建筑材料来源　砂石料、水泥、钢材、砖等均可在格尔木市购买。

二、施工总布局

1. 施工总布局原则

1）施工临时设置应当紧凑合理，符合安装工艺流程，方便施工，保证运输方便快捷，尽可能做到运输距离短，减少二次搬运，充分考虑各阶段的施工过程，做到前后照应，左右兼顾，以达到合理用地、节约用地的目的。

2）路通为先，首先开通光伏电站通向外界的主干路，然后按工程建设的次序，修建厂内道路，道路宽度不用一次到位，能满足施工就行。

3）施工机械布置合理，机械的种类、规格、安装距离等只要满足施工要求就行，不要造成浪费。

4）材料堆放场所与加工场所保持合适的距离，方便运输，要着重考虑施工过程火险的可能性。

5）总平面布置尽可能做到临时性与永久性相结合，节约投资，降低造价。

2. 施工场地规划

施工区按集中原则布局，生活区靠近仓库，远离混凝土搅拌站，场内道路紧靠光伏组件旁，以满足设备一次到位、支架及光伏组件安装需要。表 17-9 为施工场地规划表。

表 17-9　施工场地规划表

名　　称	占地面积/m^2	说　　明
施工生活区	2500	含施工单位办公区
材料堆场	5650	钢结构、电池组件堆放
混凝土搅拌站	1250	含砂石料、水泥的堆放
加工厂	200	钢筋调直机、弯曲机、切断机、对焊机等

3. 施工电源

1）用电单位有生活区用电、办公区用电、搅拌站用电、加工厂用电、现场施工用电，估算需 180kW，当地电源较远，因此采用柴油发电机组发电，用一大一小两台，高原地区柴油机效率降低较多，发电量只有标称功率的 70% ~80%，可用 50kW、200kW 各一台。

2）配电设备都安装在室外，要有防雨措施，确保用电安全。

4. 施工水源

施工用水有机械用水、混凝土制作用水及生活用水，高峰期用水量为 30m^3/d。水源采用井水，施工队进驻前就要打好井。

5. 场地平整

场地不需作大量平整，支架阵列依地势而建，只要保证单个阵列的六条条桩基础在一个平面上即可，阵列之间不要求等高，以减少不必要的场地平整工作量。

6. 工程占地

光伏电站由生产区、管理区和防护林带组成，防护林沿周边布置，宽 30m。光伏电站全部占地 0.55km^2，为永久性占地，由当地政府提供。施工场地用电站未完工时的空地，不需额外占用土地。

三、主体工程施工

土建、设备安装都采用工程招标的方式，选择有类似工程施工经验的企业承建，企业资质不低于二级，含二级。中标企业应有施工方案，施工方案合理与否，将直接影响工程的安全、质量、工期及费用，要从工程实际出发，结合自身特点，用科学的方法，综合分析，比较各种因素制定科学、合理、经济的施工方案，在此基础上，编制相关项目的作业指导书，并按编、报、审、批的程序实行各级把关。逆变器、变压器的安装应在设备制造厂家技术人员的指导下进行。

1. 施工前的准备

根据物料清单编写《施工所需物料明细表》、《施工所需工具清单》等。根据清单进行物料准备，外协件、外购件应考虑供货周期，提前申购、联系厂家，以免耽误工期。

2. 土建施工方案

1）土建施工本着先地下、后地上的顺序；基础工程→结构工程→屋面→墙体工程→厕所防水工程→装修工程（给水排水、电、取暖、空调）。

2）接地网、地下管道主线与相应的地下设施，如给水排水、消防管道、电缆沟道等同步施工，电缆管预埋与基础施工应紧密配合，防止遗漏。

3）基础施工完后即加填。

4）起重机械行走时，要采取措施保护好下部已预埋的设备基础及预埋件，防止被压坏。

3. 特殊气象条件下的施工方案

（1）暴雨季节施工措施　排水系统要畅通，堆放物资处要有防水措施。

（2）高温季节施工措施

1）混凝土浇筑采用分层分块，薄层浇筑，并尽量利用低温时段或夜间浇筑，混凝土浇筑温度不得高于 28℃。

2）尽量选用低水化热水泥，优化混凝土配合比，掺优质复合外加剂、粉煤灰等，降低单位体积混凝土中的水泥用量，并掺加适量的膨胀剂。

（3）冬期施工措施

1）如气温低于 5℃，采用热水搅拌，热水温度控制在 40℃左右，保证混凝土出罐温度大于 10℃。

2）加防冻剂，掺量按规范进行，并在施工前进行试配。

3）浇筑过程中，必须保证新老混凝土接触面的温度在 2℃以上，小于 2℃时，必须采取升温措施，用碘钨灯烘烤地面，并及时用麻袋覆盖，以保证混凝土表面温度不会急速下降。

（4）钢结构工程施工安装

1）对具有资格证的焊工进行培训，掌握负温下焊接工艺。

2）在满足设计强度的前提下，选用屈服强度低、冲击韧性较好的低氢焊条，重要结构可选用高韧性超低氢焊条。

4. 条形基础施工

1）按现场坐标控制点，用白石灰进行放线，包括基线、水平线、基础轴线，安装条形基础的位置要测量准确。

2）地基处理　因是沙漠地，不用开挖，但地面要找平，夯实，采取洒水—夯实—再洒水—再夯实的工艺过程。

3）摆放条形基础模具　依次摆放六条条形基础模具，其要求是，六组螺栓不得偏斜；螺栓位置度≤2；六条基础上平面在一个平面上。

4）混凝土等级 C30，采用集中搅拌、小型装载机运输、浇灌工装、插入式振捣器振捣的施工方案。

5）浇筑完工要进行 14 天养护。

6）混凝土强度达到 90% 时方可进行支架的安装。

7）虽是安装在沙漠地面，但条形基础一般不会下沉。如发现有下沉现象，应及时查找原因，对地基进行处理。

5. 支架安装

支架面必须调整在同一平面，构件连接螺栓必须加防松垫。

6. 电池板安装

1）不破碎，排布整齐，牢固，经得起风速为 27m/s 的风力。

2）工作电流相等或接近的串联安装在一起。

3）电池板与支架不贴合时，不可用螺栓强行拧紧，而是要用胶垫调整。

4）电池板轻拿轻放，防止硬物刮伤和撞击玻璃表面，玻璃破损率 <0.01%。

5）电线连接插接要牢固，引出线要有余量，不可随风飘摆，电缆连接完毕要用绑带、钢丝卡等将电缆固定在支架上，以免长期风吹摇动造成电缆磨损或接触不良，引发故障。

7. 地线的埋设

本部分内容包括接地装置埋设在基础内的与电站接地网相通的接地体及接地网的埋设。

（1）引用的标准和规程规范

GB 50169—2006《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》；

DL/T 475—2006《接地装置特性参数测量导则》。

（2）埋设的一般要求

1）接地线应采用搭接焊接，焊缝的长度和质量要求，应符合施工图样和有关规范规定。焊接后应将焊件焊缝清理干净，并加涂防腐涂料。凡从接地装置中引出的延伸部分均应设明显标记，并采取防腐和保护措施。

2）接地装置全部敷设完毕并经降阻处理，应充分考虑到本地区土壤特性，如有必要，则应进行换土处理、添加降阻剂，安装后要进行接地装置的测试，以得到满足技术要求的接地电阻值。

8. 电气设备安装

（1）就位　逆变器、变压器、配电柜运抵安装地点后，用起重机从车上吊下，再用液

压小车就位。

（2）固定　逆变器、变压器、配电柜安装在基础槽钢上，基础槽钢水平安置，焊接在水泥基础预埋钢上，电器就位后要进行找正，然后用螺栓固定。

（3）接地　接地方式采用镀锌扁钢与室内接地扁钢连接，配电柜固定后可安装母线。

逆变器、变压器内置有高敏感性电气元件，搬运要非常小心。

9. 电缆敷设

1）电缆运达场地后，应严格按规格分别存放，电缆的长度要做好登记，严格遵守领用制度，以免混用。安装前应对照图样，核对电缆规格是否正确。

2）检查电缆走向是否合理，有无交叉现象，编制电缆敷设顺序表。

3）电缆的使用规格、安装路径严格按设计进行。

4）动力电缆应尽量减少中间接头，控制电缆要做到没有中间接头，对电缆容易受损伤的部位，应采取保护措施，对直埋电缆应每隔一定距离制作标志。

5）进入盘内的电缆其弯曲弧应一致。

6）电缆敷设完毕，应整齐美观。

7）电缆集中区应设有防鼠灭火设置。

10. 测试及调试

（1）测试　太阳电池组件安装完毕后要先测量总的电流和电压，如果不合设计要求，就要对各个支路分别测量，这时各个支路要相互断开。测试包括：阵列的测试、绝缘电阻测试、绝缘电压测试、接地电阻测试等。

（2）调试　并网前的调试包括电气一次、电气二次及运行前调试。

四、施工进度

1）总目标：12 个月内全部设备安装调试完工，全部阵列并网发电。

2）进度设计原则：

① 以人为本，施工前为建设人员提供较好的办公及生活条件。

② 综合楼和阵列基础工程先开工，尽可能保证每一套光伏系统安装完工后即可调试。

③ 其他项目同步进行。

3）制订好下列工程计划：

① 施工图交付计划。

在不能一次性交图的情况下，按下列次序交图：综合楼→条形基础→支架→水泵房→逆变器室→升压站→围墙、大门。

② 主要设备交付计划。

③ 分项施工进度计划。

当地气候条件，室外施工期 4 月初 ~10 月底，土建工程要抢在这一段时间完成。

表 17-10 为 10MWp 沙漠光伏电站进度表。

表 17-10　10MWp 沙漠光伏电站进度表

标志号	任 务 名 称	工期	开始时间	完成时间
1	前期准备工作	60 个工作日	第一个月初	第二个月底
2	签订光伏组件合同	30 个工作日	第一个月初	第一个月底

（续）

标志号	任 务 名 称	工期	开始时间	完成时间
3	监理招标及合同鉴定	30 个工作日	第二个月初	第三个月初
4	施工招标	30 个工作日	第一个月底	第二个月底
5	电气及其他辅助设备招标及合同签订	20 个工作日	第四个月初	第四个月底
6	零星设备、材料招标	20 个工作日	第三个月初	第三个月底
7	光伏电站土建施工图设计	30 个工作日	第一个月中	第二个月中
8	光伏电站电气施工图设计	45 个工作日	第一个月中	第二个月底
9	施工、检修道路设计	10 个工作日	第二个月中	第二个月底
10	施工队伍进场(四通一平等施工准备)	30 个工作日	第三个月初	第三个月底
11	生产综合楼及附属设施土建基础施工	115 个工作日	第四个月初	第七个月中
12	第一批光伏组件土建基础施工	40 个工作日	第五个月中	第六个月底
13	第二批光伏组件土建基础施工	40 个工作日	第六个月底	第八个月上
14	厂区道路施工	50 个工作日	第五个月中	第七个月上
15	厂区电缆沟施工	30 个工作日	第四个月中	第五个月中
16	生产综合楼电气设备安装、单体调试	45 个工作日	第七个月初	第八个月中
17	逆变器室电气设备安装、单体调试	30 个工作日	第七个月中下	第八个月中下
18	第一批光伏发电组件安装、单体调试	40 个工作日	第八个月初	第九个月中
19	厂区电缆敷设	20 个工作日	第九个月中	第十个月初
20	第一批光伏发电组件系统调试	30 个工作日	第九个月中	第十个月中
21	第二批光伏发电组件安装、单体调试	30 个工作日	第九个月中	第十个月中
22	第一批光伏发电组件试运行、并网发电	10 个工作日	第十个月中下	第十个月底
23	第二批光伏发电组件系统调试	30 个工作日	第十个月中	第十一个月中
24	第二批光伏发电组件试运行、并网发电	10 个工作日	第十一个月中下	第十一个月底
25	工程整套启动及投入商业运行	7 个工作日	第十二个月初	第十二个月初
26	光伏电站达标验收	20 个工作日	第十二个月中上	第十二个月底

第十二节　环 境 保 护

本工程的场址选择及建设与当地林业规划、城市建设发展、电力规划、能源开发、土地利用等方面协调一致，且受到国家及当地政府各部门的大力支持。要对本工程进行环境保护及水土保持设计，分析环境与本工程间的相互影响要素，并采取有效措施，使不利影响因素减至最低程度，使环境和水土在本工程建设与运行期内都得到很好的保护，进而使工程与其周围环境之间相互和谐。

一、环境概况

1. 格尔木概况

格尔木地处青藏高原腹地，辖区由柴达木盆地中南部和唐古拉山地区两块互不相连的区域组成，总面积近 12 万 km^2，市区位于柴达木盆地中南部格尔木河冲积平原上，市区海拔平均 2780m，属高原大陆性气候。本工程场址区为柴达木盆地南侧边缘地带，地貌单元为昆仑山山前洪积扇，地貌类型为沙漠荒地，有近 90% 的土地属于荒漠、半荒漠的戈壁滩，该市绿化覆盖率已达 23%。

地表水为格尔木河水系，流向大致自南向北展布，平水期流量较少，雨季流量较大，季节性较强，为常年流水，格尔木有大小河流 20 多条，水资源总量达 23.85 亿 m^3。

格尔木属于高原大陆性气候，夏无酷暑，冬无严寒，昼夜温差大，年均气温 5.3℃，极端高温 35.5℃，极端低温 -33.6℃，年均风速 2.8m/s，年降水量 42.6mm，年蒸发量 2504.1mm。格尔木有丰富的日照资源，年平均日照时数为 3096.3h，年太阳总辐射量在 6800MJ/m^2 以上，是我国太阳辐射量高值区之一。

格尔木地区每年的风沙天气近 180 天，该地区的水土流失几乎都是因为风蚀作用，其中极强程度达到 40%。

格尔木是一个典型的资源型地区，资源配置在全国独一无二，在以市区为圆心、半径 200km 的范围内，广泛分布着钾、钠、镁、锂、硼、锶、锑、石油、天然气、黄金等 50 余种矿藏资源，有 30 多种位居全国前 10 位，已探明石油地质储量 3 亿多吨，有 50 余种野生动物和 200 余种野生植物资源，其中 20 余种被列为国家级珍稀野生动植物。

格尔木市人口 27 万，现有 26 个民族，汉族人口占 90.2%，是一座社会经济快速发展的城市。

2. 场址区环境概况

1）生态环境。本场址区是荒漠戈壁滩，场址区内的土质主要为砾石夹砂土，属于植被脆弱区，场址区内无植被分布，场址周围未发现受国家保护的一、二级野生动物。

2）大气环境。气候干燥缺水，风沙天气日数多，因此空气中的沙尘量较高，人烟稀少，无工业污染源分布，因此无污染物排放。

3）场址区地下水多为孔隙性潜水，一般水位在 100m 以下，地下水受南部昆仑山基岩裂隙水、雪山融水补给，径向方向基本由南向北，在北部洼地、盐碱地排泄，部分在格尔木河排泄，潜水的化学特征主要受地形、气候、排泄的影响，矿化度相对较高。

4）声环境。场址区距 G109 国道约 2km，机动车辆的噪声对本场址区没有影响，荒漠戈壁滩没有别的噪声，因此声环境良好。

二、环境评价结论

1. 生态

施工场地没有环境敏感点，对当地的自然生态系统基本无影响。

2. 运行期

1）废水。生活污水经污水处理设备达到中水标准后，用于浇灌绿地。

2）固体废弃物。年产生活垃圾 5.5t，收集后定期运至格尔木市生活垃圾填埋场，填埋处理。

3. 结论

本工程地处荒漠戈壁滩，太阳能资源丰富、远离村庄、周边无敏感点，发电过程无废水、废气、固废物产生，从环保角度分析，该项目可行。

第十三节 工 程 效 益

一、工程概算

1. 编制原则

参考风电场工程现行的有关文件、费用定额、费率标准，按 2010 年四季度价格水平编制。

2. 编制依据

1）《风电场工程可行性研究报告设计概算编制方法及计算标准》，2007 年版；

《风电场工程概算定额》，2007 年版。

2）本光伏电站可研阶段设计资料及工程量清单。

表 17-11 为 10MW 工程总概算表。

表 17-11 10MW 工程总概算表

序号	名称及规格	单位	数量	单价/元		合价/万元	
	第一部分设备及安装						10119
一	发电设备及安装						9158
1	光伏阵列及安装						6556
2	逆变及配电安装						2118
3	集电线路						484
二	升压设备及安装						625
1	变压器系统						303
2	主要电气设备						74
3	站用电系统						52
4	电缆及出线						136
5	综合楼至汇集站						60
三	通信、监控及安装						194
1	环境检测系统						
2	计算机监控及通信						
3	继电保护及测控						
4	控制电源						
5	电能计量装置						
6	工业电视设备						
四	其他设备及安装						142
1	采暖通风和空调						

（续）

序号	名称及规格	单位	数量	单价/元		合价/万元	
2	照明系统						
3	消防及给水排水系统						
4	生产车辆购置费						
5	劳保安全卫生设备、安装						
6	接地						
7	其他						
	第二部分建筑工程						4027
一	发电设备基础工程						3300
1	光伏阵列基础工程						
2	集电线路基础工程						44
二	变配电工程						78
1	配电设备基础工程						24
2	配电设备构筑物						54
三	房屋建筑工程						320
四	交通工程						297
五	施工辅助工程						32
六	其他						487
1	环境保护及水土保持						34
2	消防设施						58
3	劳动安全与工业卫生						7
4	其他工程						288
	第三部分其他费用						1673
一	建设用地费						50
二	建设管理费						471
三	生产准备费						120
四	勘察设计费						500.00
五	其他						532.00
	总计						15819.00

注：1. 包含下列增加项目：汇集站 300 万，控制室至汇集站 60 万，公司办公及员工宿舍 120 万，2010 及 2011 年全部管理费。

2. 削减建设用地费 777.4 万（土地免费使用）。

二、节能减排效益

本项目所在地电力系统属于西北电网，建成预计每年可为电网提供电量 1810 万 kW·h，

与相同发电量的火电相比，相当于每年可节约标准煤 0.6 万 t，以平均标准煤煤耗 320g/（kW · h）计算，相应每年可减少多种大气污染物的排放，其中减少二氧化硫（SO_2）排放量约 64.9t，二氧化碳（CO_2）约 1.74 万 t，一氧化碳（CO）约 1.52 万 t，氮氧化物（Nox）66.97 t，烟尘 78.4t。

三、财务评价

1）上网电价如能保持 1.00 元/（kW · h），项目借款偿还期为 12.6 年，即满足贷款偿还要求。

2）在建设中要加强管理，控制投资的增加，确保工程如期发电。

第十八章　光伏建筑一体化（BIPV）

建筑中能耗（照明系统、空调系统、用电设备）大约占各国总能耗的30%～50%，光伏发电技术与建筑结合可以有效地减少建筑能耗。20世纪80年代，光伏地面系统除大量用于偏僻无电地区、游牧家庭、航海灯塔、孤岛居民供电以及某些特殊领域外，已开始进入一般单独用户、联网用户和商业建筑。进入20世纪90年代，随着常规能源的日益枯竭而引起的发电成本上升和人们环境意识的日益增强，一些国家纷纷开始实施、推广BIPV系统，1991年光伏技术与建筑一体化（BIPV）这一概念被正式提出，从而使得太阳能光伏发电得到广阔的发展空间。

第一节　BIPV概述

一、BIPV概念

BIPV定义：在建筑物外表面铺设光伏阵列提供电力。光伏建筑一体化BIPV是英文Building Integrated Photovoltaic的缩写。

BIPV技术是将太阳能发电产品集成到建筑上的技术，21世纪建筑的一个概念即由建筑物自己产生能源，BIPV便成为21世纪建筑及光伏技术市场的热点。在建筑物的外围护结构表面上布设光伏阵列，使太阳电池组件与建筑主体相结合，形成一个个清洁的小型电站，可以把从太阳能转化而成的电能源源不断地输入到城市电网中，在一定程度上缓解大中城市在用电高峰期时的限电问题。

二、BIPV形式及运用场合

1. 光伏系统和建筑结合形式的分类

（1）光伏系统与建筑贴合　光伏系统与建筑贴合就是在已建好的建筑物上安装光伏系统。利用支架或轨道把光伏组件安装在建筑物的屋顶或四壁上。

（2）光伏系统与建筑融合　光伏组件作为幕墙屋顶、外墙和窗户代替传统建材，作为建筑的一部分，与建筑同步施工。即用光伏组件来做建筑物的屋顶、外墙和窗户，既可用作建材也可用以发电。光伏方阵成为建筑不可分割的一部分。如光电瓦屋顶、光电幕墙和光电采光顶等。这种方式对光伏组件的要求较高，光伏组件不仅要满足光伏发电的功能要求，同时还要兼顾建筑的基本功能要求。把光伏器件用作建材，必须具备建材所要求的几项条件：坚固耐用、保温隔热、防水防潮、适当的强度和刚度等性能。若用于窗户、天窗等，则必须能够透光。除此之外，还要考虑安全性能、外观和施工简便等因素。将光伏组件安装在建筑表面，实现太阳能光伏发电与建筑的完美结合，被认为是最先进、最具发展潜力的高科技绿色节能建筑。目前光伏组件的生产成本较高，太阳能光伏发电的成本高于常规能源，采用BIPV系统，将光伏组件与建筑表面材料有机结合，可以降低光伏发电的成本，缩短投资回报周期。

2. 运用场合

（1）建筑物类型　高楼大厦、厂房、商住楼、火车站、顶棚、体育馆、商场、学校、

医院、展览馆等。

（2）安装位置

1）屋顶。平顶和斜顶，方位及角度受屋顶的制约。

2）墙壁。垂直安装，东西南北都有。

BIPV 系统按照光伏系统和建筑结合形式主要可以分为：

光伏屋顶结构（PV-ROOF），太阳能屋顶发电，在整个 BIPV 中，屋顶发电占 3/4。这主要是因为屋顶有更多受光面积，方便太阳电池组件的安装；光伏幕墙结构（PV-WALL），现代高层建筑，几乎都是被玻璃幕墙或者铝塑幕墙所包裹，所以用太阳能幕墙代替原来的幕墙，从光伏方阵与建筑墙面、屋顶的结合来看，主要为屋顶光伏电站和墙面光伏电站。而从光伏组件与建筑的集成来讲，主要有光电幕墙（尚德光伏研发中心大楼）、光电采光顶（洛阳中硅研发楼）、光电遮阳板等形式。

① 电池组件作屋面板光伏屋顶结构（PV-ROOF）。

用光电设备作屋面板时的理想屋顶应为斜屋顶。因为可以获得理想的倾角，相对于平屋顶而言，少了附加支撑带来的不协调。如果电池板与屋顶成为一体，则其夏天需要通风以降温，冬天则可以收集这些余热以采暖。电池板下面通风，夏天可避免光电元件过热，冬天可用于加热建筑。美国著名的 UNI-SOLAR 的太阳能屋顶产品是直接将非晶薄膜太阳电池生成在薄钢片上，钢片可以任意裁剪。所以，一片太阳电池板长度可以做到屋顶的宽度。另外，太阳能屋顶产品没有玻璃，不易破损；弱光性好；轻便易装。太阳能屋顶发电在整个 BIPV 中占 75%。这主要是因为屋顶有更大的受光面积，方便光伏发电系统的安装。

② 电池组件作建筑立面光伏幕墙结构（PV-WALL）。

由于大尺度新型彩色光伏组件的诞生，将其安装在立面不仅节约外装饰材料（玻璃幕墙等），减少建筑物的整体造价，且使建筑外观更有魅力；如果建筑有凸窗棂，必须保证窗棂较薄，使光电板不至于产生太多阴影。在保持玻璃幕墙的外观整洁方面，德国 RWE 的非晶太阳能玻璃幕墙做得非常优秀，为了防止电池片之间的连线有碍观瞻，他们的专利技术专门解决了电池片之间的“无线”连接。

如果光电设备安装在屋顶，则最好在设备下部留下一定量的空气层以供设备降温，同时冬天可以收集热空气采暖。双层墙可使空气在夏季流溢出来以给电池组件及建筑降温，冬天可用热空气加热建筑北部。

③ 电池组件与玻璃窗。

有两种典型的 PV 玻璃窗系统。一种是半透明的 PV 玻璃窗；另一种是由透明玻璃窗上安装不透明 PV 元件，这些元件的排列间距决定了玻璃窗的透光率，就像在玻璃窗上涂上井字网一样。太阳电池可以和不同的玻璃结合制成各种特殊的玻璃幕墙和天窗，如隔热玻璃组件、防紫外线玻璃组件、防盗或防弹玻璃组件、防火组件等。目前有一种仅用红外辐射发电的光电玻璃窗正在研制中。这样，既可以发电又可降低昼光温度，相信正是多数向南的办公大楼所需要的。

④ 光电设备与遮阳设备。

光电系统既可整体组合于入口雨篷中，也可组合于一些独立式遮阳结构中。就目前而言，虽然光电板用于露天停车场遮阳上的费用较高，随着电力汽车的数量增加，这些结构最终会成为理想的充电站。

图 18-1 为光伏建筑一体化。

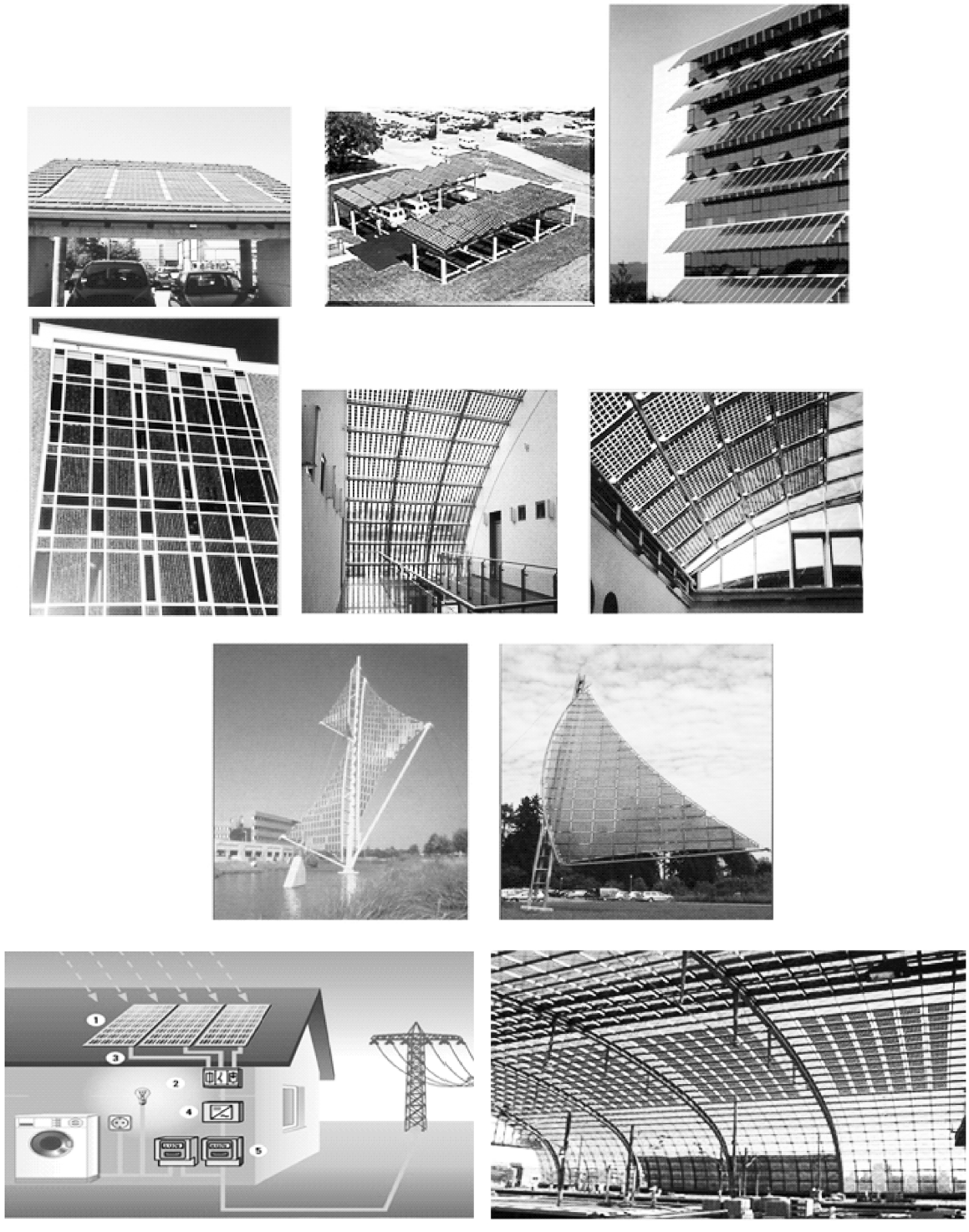


图 18-1　光伏建筑一体化

三、BIPV 优点

1）BIPV 产生的是绿色能源。

2）不占用土地资源。光伏阵列一般安装在闲置的屋顶或外墙上，不占用额外的地面空间，省去了单独为光电设备提供的支撑结构。

3）光伏陈列安装在屋面和墙面上，直接吸收太阳能，避免了墙面和屋顶温度过高，降低了室外综合温度，降低了空调负荷，并改善了室内环境。

4）在建筑过程中使用新型建筑围护材料，省去了外装饰材料（玻璃幕墙等），使建筑外观更有美学价值；统一安排建筑物和光伏发电系统一体化设计，使光伏系统合理分布在房顶和墙体中，取得了显著降低光伏建筑造价的效果。在一体化设计中，可消化掉光伏系统增加的成本。

5）可原地发电、原地使用，减少电流运输过程的费用和能耗；对于联网户用系统，省去蓄电池光伏阵列所发电力既可供给本建筑物负载使用，也可送入电网。在阴雨天、夜晚或光强很小的时候，负载可由电网供电。

6）因日照强度与高压电网用电高峰期基本同步，舒缓了电网在电力高峰时的压力，缓解电网峰谷供需矛盾，夏季，处于日照时，由于大量制冷设备的使用，形成电网用电高峰，而这时也是光伏阵列发电最多的时候。

7）由于光伏电池的组件化，光伏阵列安装起来很简便，而且可以任意选择发电容量。

8）能够满足建筑美学的要求，在 BIPV 建筑中，通过相关设计将接线盒、旁路二极管、连接线等隐藏在幕墙结构中，既可防阳光直射和雨水侵蚀，又不会影响建筑物的外观效果，达到与建筑物的完美结合。

9）能够满足建筑的安全性能要求，BIPV 建筑中使用的电池组件是由两块钢化玻璃，中间用 PVB 胶片复合太阳电池组成复合层。PVB 胶片有良好的黏结性、韧性和弹性，具有吸收冲击的作用，可防止冲击物穿透，即使玻璃破损，碎片也会牢牢黏附在 PVB 胶片上，不会脱落四散伤人，从而使产生的伤害可能性减少到最低程度，提高建筑物的安全性能。普通光伏组件封装用胶一般为 EVA。由于 EVA 的抗老化性能不强、使用寿命达不到 50 年，不能与建筑同寿命，而 PVB 膜具有透明、耐热、耐寒、耐湿，机械强度高等特性，并已经成熟应用于建筑用夹层玻璃的制作。BIPV 光伏组件采用 PVB 代替 EVA 制作能达到更长的使用寿命。

第二节　国内外 BIPV 现状

一、国外 BIPV 现状

面对全球能源危机和环境污染等问题，许多国家重视光伏发电系统的推广和应用，制定了相关的激励政策用于鼓励太阳能光伏技术与建筑一体化，其中最为成功的是德国和日本。至 2011 年底，世界光伏发电总装机容量约为 24GW，其中 85% 以上为并网光伏发电系统，而并网光伏系统的 90% 以上为屋顶系统。欧洲、日本、美国等国家的并网光伏系统主要为 BIPV 系统，2020 年前，BIPV 仍然是光伏发电的主要市场。

1. 德国

德国是世界上应用太阳能、实现太阳能建筑一体化的强国，素有“光伏黑洞”之称。

1990 年德国首先提出 1000 太阳能屋顶计划，在私人住宅的屋顶上推广容量为 1～5kW 的并网光伏发电系统。2003 年又公布《可再生能源促进法》，私人光伏发电系统用不完的电能，可以通过电力网卖给国家电力公司。为了迎接 2006 年世界杯，德国改建的柏林火车站，就应用了集成太阳能光伏屋顶。德国的太阳能光伏产业也始于“屋顶计划”。1991 年，政府为每位安装太阳能屋顶的住户提供补贴，有 2000 个并网型太阳能设备安装在德国的住户屋顶上。随即，该计划的数字很快被扩展到 10 万个。这一项目在 2004 年结束，10 万个并网的太阳能屋顶被成功安装。当项目接近尾声的时候，德国的光伏产业也拥有了大规模的生产能力。德国政府还通过“买回补助”的政策，支持初生的光伏产业及屋顶计划，以确保公司和个人投资者的收益。作为公共投资战略的结果，德国的光伏产业正在蓬勃发展。德国的太阳能光伏组件安装和制造一直处于世界领先。最近，德国出台规定，对建设屋顶光伏提出份额要求来保证屋顶光伏的建设。

德国莱比锡尼古拉教堂，是德国一座古老的教堂，教主提出“保护造物，使用阳光发电”的信念，正式提出这个与自然和解的愿望，当时遭到了多方面的反对与质疑，在一连串的努力与沟通后，在教区主教、执事与联邦政府古迹保护委员会的允诺下，这项将太阳能发电结合在历史性建筑物上的跨领域计划才得以贯彻执行。最后将原来的 $40m^2$ 斜屋顶全部换成深色太阳能光电板，并网发电，既保留了原建筑的整体风格，又宣示了教主的信念。其他著名教堂斯图加圣禾维西教堂，拥有最大的屋顶面积 $420m^2$，在教堂的南面屋顶，整片覆以薄膜晶片模组；德东文化古都德瑞斯登采用厂商特别制造的“整合于建筑形式内的模组”，让历史建筑披上太阳光电外衣。其中，圣安东尼教堂装置 3.45kWp，在 2002 年获得德国 21 世纪议程之表扬。

在光伏器件与建筑相结合方面，德国 ASE 所属几家公司分别推出了多种光伏组件，其中有大尺寸（1.5m×2.5m）的无边框非晶硅组件，每块组件功率可达 360Wp，可用于垂直外墙和倾斜屋顶；也推出了尺寸为 1m×0.6m 的非晶硅不透明组件，可分别用于屋面、垂直幕墙和窗户。

2011 年世界上最大的太阳能屋顶光伏系统安装在新慕尼黑贸易展览中心。欧盟可再生能源白皮书和“起飞运动”是欧洲太阳光发电的里程碑。

2. 日本

日本很重视光伏与建筑相结合的技术，是光伏和建筑结合得比较好的国家。20 世纪 90 年代，政府资助一些大学、研究所和公司进行开发研究。三洋电气公司推出了几种非晶硅电池与建筑材料相结合的产品（三洋公司在非晶体太阳电池技术方面是世界一流的）：一种是做成曲线形瓦片形状，每片面积为 $305cm^2$、输出功率为 2.7Wp，价格比较昂贵；另一种是 90cm×35cm 的平板非晶硅电池组件，组件背面有“脚”便于安装，一般用作屋顶材料。三洋电气公司还推出了半透明和不透明的非晶硅玻璃组件，用于商业建筑物的垂直幕墙。半透明组件的透光率为 30%，既可作为窗户采光用，又可用于发电（德国也有类似产品）。以上光伏组件已安装在三洋电气公司、Fsukasa 电力公司等办公楼建筑物上。1998 年，日本三家公司（清水建筑、夏普、川崎制铁）合作研制一种新型建筑材料，即把太阳电池安装在建筑材料里，并按需要做成三种，用作屋顶和外墙。

日本运用各种措施和项目，发展本国屋顶光伏，在“住宅光伏系统推广计划”中，日本将近 50 万户安装了屋顶系统，同时成本大幅度降低，1994 年，在日本的一家屋顶上安装

一个系统需花费 6 万美元，到 2005 年，安装成本下降到 2 万美元。日本政府在 2000 年推出的《新阳光规划》中，对光伏屋顶系统实行强有力的补贴政策，给每户家庭补助 10% 的安装成本，使居民光伏屋顶系统最近 5 年平均年增产率为 96.7%，日本在 2011 年实现了 1.2GW 的光伏装机量，相较于 2010 年增加了 30%，光伏发电装机容量在 2011 年累积达到 6.2GWp，日本市场将有可能在 2012 年内实现 40% 的增长量。日本正向在 30% 的屋顶上配备太阳能设备的目标迈进，现在日本已经结束了对屋顶光伏的政府资助。

在日本东京西北约 90km 的小城大田（大田是日本日照最充足的地点之一），太阳能被大力推广，成了小城主要的能源来源。在大田，有超过 550 户居民的房顶上，立着巨大的太阳电池板，相当一部分社区用电都由太阳能发电装置提供，居民所有家用电器都由太阳能驱动，而且居民们还可以将多余的电卖给当地电厂。

日本已拥有多家世界顶尖的太阳能公司，国内光伏产业具备了和其他能源发电竞争的能力。日本地震对多晶硅为首的光伏产业影响巨大，多家多晶硅厂因电力不足等原因，宣布停产，对中游的制造环节来说，由于物流不畅，硅料的供给在短期内将受到影响。

3. 美国

2010 年 7 月，美国参议院能源委员会通过了“千万太阳能屋顶提案”，该提案计划每年投专项资金用于补贴在建筑上安装太阳能系统，目标是在 2020 年之前安装 1000 万个太阳能系统。美国是联邦制国家，对于发展光伏产业，各个州的具体情况不一样，各州都有各州的政策和体系，加州因为政府大力倡导和良好的光照条件，发展迅速，现在基本实现上网电价，其他州有的还有完善的投融资体系，从早期的研发一直到后期的消费都有比较完善的金融服务。例如，居民住宅可以零首付安装屋顶光伏系统，所发电量除自用外还可以卖给电网。1993 年 6 月，美国能源部和国立再生能源实验室签订五年合同，实施“PV：BONUS”计划，耗资 2500 万美元发展与建筑相结合的光伏产品，即建筑幕墙光伏器件和大型屋顶光伏组件等。为了促进美国光伏产业的快速发展，降低光伏发电成本以及节约能源和保护环境，美国前总统克林顿于 1997 年 6 月 26 日在联合国环境与发展特别会议上宣布美国将实施“百万太阳能屋顶”计划，到 2010 年要在全国范围的住宅、商业建筑、学校和联邦政府办公楼屋顶上安装 100 万套太阳能系统，包括光伏系统和太阳能集热器，可以供应电力和热水。电池安装在任何摩天办公楼或商业建筑上，垂直面积往往是大于屋顶面积的，利用垂直面积来吸收太阳能的优势明显大于屋顶太阳能系统。位于马萨诸塞州的 Konarka Technologies 公司，由 2000 年诺贝尔化学奖获得者 Dr Alan Heeger 创立而成。他成功地研发了半透明彩色有机光伏电池，这种电池板可应用于建筑的垂直表面，大大提升了采集太阳能的表面面积，该太阳能电池板的发电时间更长，从日出到日落时分，可吸收全光谱的能量。

4. 印度

印度近年来大力推广太阳能，已取得了很大成绩。在发展中国家，印度的光伏产业及应用市场居领先地位，已成为继美国之后的第二大单晶硅太阳电池生产国。全国已有 40 万套光伏系统用于多种领域。并且，政府正在组织一些研究和生产机构开展光伏器件与建筑相结合的研究开发。在 2012 年，印度光伏市场将有望达到 1GW。当 2011 年内光伏产品价格的快速下跌与项目经济产生了巨大冲击时，许多印度开发商都遭受了财务、土地租赁和能源疏散设备等方面的困难。目前，开发商们都在纷纷加紧安装速度以赶在截止日期前完成安装，否则将面临失去购电协议的风险，从而导致了 2011 年 12 月和 2012 年 1 月的安装高潮。

5. 澳大利亚

由于政府取消了相应的补贴机制，澳大利亚的光伏装机量季度同比下跌了10%。2012年第一季度该市场的新增光伏装机量将再次出现20%的下跌，但是，这一市场有望随着大规模地面光伏支架系统的竣工联网而在2013年出现反弹。

6. 意大利

意大利只有南部有限的土地适合光伏发电，但工业厂房、商业大厦、居民住宅等有13000m^{2}发电潜力，因此意大利光伏系统运用集中在屋顶。2007年2月19日，实施了上网电价政策，根据装机容量大小、建筑一体化的程度分级等，按等级以固定价格收购20年所发的电，表18-1为上网电价补助。

表18-1　上网电价补助

功率P/kWp	非建筑一体化 /[欧元/(kW·h)]	BAPV /[欧元/(kW·h)]	BIPV /[欧元/(kW·h)]
$1 \leqslant P \leqslant 3$	0.384	0.422	0.470
$3 \leqslant P \leqslant 20$	0.364	0.404	0.442
$P > 20$	0.346	0.384	0.422

此外，满足下列条件的光伏电站多给5%的补助：

1）容量3kWp以上的非建筑一体化光伏电站项目，拥有者自身消耗70%以上的电量。

2）光伏电站拥有者是学校、医院。

3）应用于农业的项目，用组件取代石棉瓦或石棉覆盖物。

4）光伏电站拥有者是管理5000人以下的地方当局。

意大利电力局出版了《光伏电站建筑一体化指导准则》，从功能角度出发，提出了13种类型被认为是建筑一体化光伏结构：

1）光伏组件安装于平屋顶和露台。

2）光伏组件安装于倾斜表面（屋顶、幕墙、护墙和栏杆），但不取代原有覆盖材料。

3）光伏组件安装于路面两侧设备上，但不取代原有材料。

4）光伏组件和安装表面斜度相同，取代覆盖材料，具有覆盖材料相同的功能，并且光伏组件的安装不危害建筑的能源利用指数。

5）光伏组件被敷设作为风雨棚、顶棚或拱门，敷设走线方式不能损害整体结构的遮阳功能。

6）光伏组件用于替代一部分透明或半透明的覆盖材料。只有永久固定于地面的、顶棚下摆高于2m的绿色房子才被认定为BIPV。

7）光伏组件用于替代隔音墙的部分噪声防护部件。

8）光伏组件为道路两侧发光设备供能，包括街灯、停车计时器和广告灯箱，但是意大利电力局规定的最小功率为1kWp。

9）光伏组件被敷设作为遮蔽物，敷设在玻璃幕墙上，以保护玻璃表面。

10）光伏组件替代栏杆和扶手的覆盖材料，实现和支撑结构的一体化。

11）光伏组件用于部分或完全替代窗户玻璃。

12）光伏组件替代百叶窗的叶片。

13）光伏组件用于作为上面提到的任一表面的覆盖物，只要是适合的，这一条尤其适用于可覆盖建筑的任何表面的柔性薄膜光伏组件。

在有些情况下不能被认为是 BIPV 项目，以第一条为例：

1）忽略光伏组件和构造元件之间覆件和防水板等连接元件的使用，造成屋顶防雨和防漏功能失效。

2）光伏组件没有根据屋顶的几何特征布局。

3）光伏组件从屋顶探出身子。

意大利至 2017 年，每年补贴总额 60 亿欧元，新出台的补贴方案为 0.25 欧/(kW·h)，比目前下降 30%。

7. 泰国、韩国和我国台湾地区

亚洲地区内的其他新兴市场在 2011 年内也实现了 500MW 的新增光伏安装量，其中起到主要贡献的是泰国、韩国和我国台湾地区。随着马来西亚和菲律宾等新兴市场的逐步发展，预计 2012 年，地区内的光伏市场将出现进一步的 50% 的增长幅度。

政府补贴和持续下跌的组件价格将对光伏产业内这一快速发展的重要市场的增长潜力造成一定程度的损害。

二、国内 BIPV 现状

2006 年 9 月 30 日，深圳太阳能学会年会上首次提到我国的太阳能光伏建筑，BIPV 应用及发展在我国经历了从对其重要意义和作用的认识，到形成推进发展的政策方针；从技术研发到建立示范工程；从农村用电到市政设施应用；从单纯的光伏发电到和建筑结构形成有机结合等发展变化过程。目前，光伏建筑一体化应用与技术已经从研发进入示范推广，几乎所有大中型城市都开始建设各种各样的示范工程，随着光伏发电领域的转变，我国 BIPV 系统的研究与开发已取得了很大的发展。

1. 政策

1）2008 年国家发改委在《可再生能源发展“十一五”规划》中明确提出到 2010 年光伏装机容量达到 300MWp，其中 BIPV 占光伏发电总容量的 20%。到 2020 年，我国光伏总装机容量将达到 1600MW，其中 BIPV 装机将高达 1000MWp，占总装机容量的 62.5%。

2）2009 年 3 月中国财政部发布了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》。

3）财政部、住房和城乡建设部联合下发了《关于加快推进太阳能光电建筑应用的实施意见》。

4）7 月财政部、科技部、国家能源局又发布了《关于实施金太阳示范工程的通知》。

5）国家能源局综合司在 2011 年 3 月对《分布式发电管理办法》征询意见，这对政府屋顶光伏是利好消息，其中规定政府机关和事业单位建筑等六类建筑物是规划重点。有关的技术标准也已制定。六类建筑物中虽然包括城市居民小区和住宅楼，但屋顶光伏进入寻常百姓家尚需时日。力诺光伏已经开始做新能源合同管理解决方案，主要是为工厂和居民小区提供新能源利用的解决方案，其中就包括屋顶光伏能源合同管理解决方案。

6）2011 年 7 月，国家发改委关于《完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知》中，制定了全国统一的太阳能光伏发电标杆上网电价。2011 年 7 月 1 日以前核准建设，2011 年 12 月 31 日建成投产，尚未核定价格的太阳能光伏发电项目，上网电价统一核定为 1.15 元/(kW·h)。2011 年 7 月 1 日及以后核准的太阳能光伏发电项目，以及 2011 年 7 月 1 日之前

核准但截至2011年12月31日仍未建成投产的太阳能光伏发电项目，除西藏仍执行1.15元/（kW·h）的上网电价外，其余省（区、市）上网电价均按1元/（kW·h）执行。这解决了光伏业一直关心的上网电价问题。

7）建设部住房建设中心出台了《民用建筑光伏发电系统技术规范》。

2. 示范工程

“九五”期间，我国在深圳、北京分别成功建成170kW、7kW光伏发电屋顶并实现并网发电，“十五”和“十一五”期间，北京、上海、深圳等地相继建成了多个BIPV工程：

1）2004年，北京50kW屋顶光伏并网示范电站在大兴建成。

2）2008年，北京奥运会场馆建立BIPV工程。

3）2010年，上海世博会的场馆设计采用了光伏与建筑一体化理念。

4）深圳南玻幕墙建造的南玻光伏建筑一体化建筑。南玻大厦光伏幕墙总面积59m^2，2007年8月投入运行。光伏系统包含两个子系统，总容量为6015Wp，并网光伏系统容量为5095Wp，独立光伏系统容量为920Wp，采用的组件为双玻璃光伏组件，厚度为（6+2+6）mm，最大组件的长×宽尺寸为2460mm×1160mm，面积为2.85m^2，功率为280Wp，结构形式采用外循环双层幕墙的形式。外层为开放式光伏幕墙，光伏组件间空隙不打胶，保持空气流通，有利于控制电池片温度，提高组件发电效率。内层为铝板幕墙，可以很好地将雨水及热量阻挡在墙体之外。外层开放式光伏幕墙与内层铝板幕墙的完美结合，既避免了高温对光伏组件效率的降低，又有效地阻止了热量及雨水进入室内。此建筑的太阳电池板是建筑围护结构的一部分，既可以遮风挡雨，又可以发电，同时又起到了遮阳的作用。

5）深圳市国际园林花卉博览园并网光伏发电系统。太阳电池组件通过支架安装在原先建好的屋顶上。

6）洛阳中硅研发大楼，光伏发电项目采用阿特斯光伏发电产品、系统及其制作技术和洛玻集团的玻璃加工技术，光伏幕墙总面积为293m^2，集发电、采光、隔热、隔音、安全和装饰功能为一体。

7）锦江电谷大厦的1.5MW光伏并网发电系统，年发电量可达171万kW·h，大厦外墙的五个不同方位安装了4500m^2太阳能玻璃幕墙。

8）尚德光伏研发中心大楼拥有全球最大的光电幕墙，其光伏建筑一体化幕墙设计容量为1MW，由2552块太阳电池板（双层钢化玻璃覆盖的多晶硅太阳电池板）组成，总面积达6900m^2，加上功率为300kW的楼顶系统，年发电量将突破100万kW·h。

9）北京火车南站（423kW）、北京首都博物馆（300kW）、深圳国际园博园（1MW）、青岛火车站（103kW）、威海市民文化中心（275kW光伏屋顶）BIPV样板工程。

10）北京中锦阳能源有限公司330kW非晶硅薄膜厂房屋顶电站。

11）郑州保绿能源有限公司330kW非晶硅薄膜厂房屋顶电站。

12）湖南省长沙市某高档住宅区一期28栋别墅屋顶和景观长廊，天威薄膜将提供105W型白膜组件和85W半透光组件两种类型，其中，景观长廊全部采用半透光组件，这些组件将取代部分建筑构件，融入到整体建筑中，并集遮阳、发电功能于一身。平均每栋别墅日发电量为10~20kW·h，在满足住户日常用电需求的同时，还可起到装饰作用。

13）松山湖万科住宅产业化研究基地的光伏建筑一体化（BIPV）示范项目，总装机容

量为 682kWp，太阳能光伏转换效率达到 17.3%，项目完成后年发电量可达 788658kW·h，相当于每年节约标准煤 283.92t，燃油 23.7 万升，减少排放二氧化碳 786.29t、二氧化硫 23.66t。

14）同济大学科技楼、同济大学留学生楼分别安装了不同形式的光伏建筑一体化系统，是建筑美学与光伏技术的完美结合。同济大学科技楼作为国内领先的高校科研教学实践基地，部署 BIPV 项目形式包括光伏屋顶、光伏幕墙、遮阳板等规模达 650kW，整个光伏系统建筑面积超过 6300m^2。设计建造中的安装类型包括屋顶发电系统、光伏幕墙、遮阳板。同济大学留学生楼在南立面结合玻璃幕墙采用光伏玻璃，保持了建筑立面美观与太阳能光伏利用的协调。整个光伏系统采用 64 块薄膜太阳电池组件，直流额定发电功率为 7.104kWp，由单相逆变器均衡组成，通过交流并网配电柜连接到配电室 220V 低压单相并网，做到即时产生即时消耗的即发即用。

15）天津尤尼索拉津能（天津）能源有限公司，三结非晶硅柔性薄膜太阳电池组件生产车间屋面为竖立锁边金属屋面，面积超过 5000m^2，金属基面用溶剂清洗后，带有自粘胶层的尤尼索拉三结非晶硅柔性薄膜太阳电池，揭掉隔离膜后直接粘贴在金属屋面上，十分便利（抗风揭、防火和抗冰雹）。可供给 300kW 的装机容量，所发的电将并入该厂的供电体系中。

16）广州火车南站南侧的站台光伏雨篷（BIPV）项目。在建的广州南站光伏系统并网总功率达 253kW，透光率达 50% 以上。项目全部采用单晶硅，PVB 封装。图 18-2 为广州火车南站南侧的站台光伏雨篷（BIPV）项目。



图 18-2　广州火车南站南侧的站台光伏雨篷（BIPV）项目

17）金刚空中花园 BIPV 项目。此拱形大跨度屋顶工程并网总功率为 400kWp，其 25m 跨度近 10m 高度的顶棚设计，配以 2000mm×1750mm、1600mm×1500mm 两种 PVB 封装的双玻璃光伏组件。组件上以不同形式排列的电池片组成风格各异。采用隐框式幕墙结构设计，再与钢框架龙骨有机结合。采用侧面接线盒的方式，电缆藏于框架结构中，远处望去，简洁大方，不见电线、线槽，与普通建筑玻璃无异。图 18-3 为金刚空中花园 BIPV项目。

18）香港圣保罗小学。屋顶总面积为 82m^2，发电功率为 7.9kWp，由 65 片双玻璃光伏组件构成，采用 156mm×156mm 高效晶体硅电池片，安装方向为东南偏南，采用明框玻璃幕墙的结构形式，从接线盒引出电线进入铝合金龙骨内走线，2008 年 7 月竣工。图 18-4 为香港圣保罗小学。

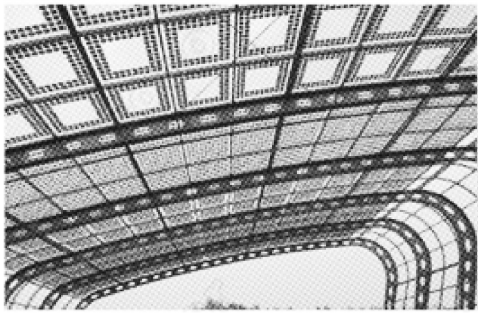


图 18-3　金刚空中花园 BIPV 项目

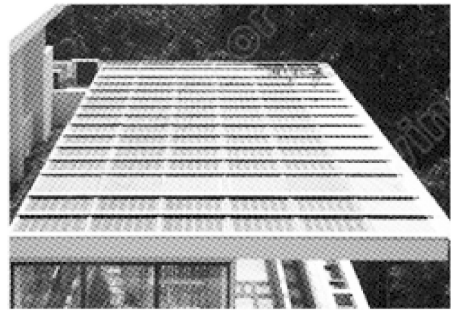


图 18-4　香港圣保罗小学

从项目实际开展情况看，不少用户侧并网光伏发电项目业主是第三方投资者，并非建筑物业主，且所发电量不是主要用于自用，而是作为独立发电站运行。

3. 骨干企业

（1）天威薄膜公司　天威薄膜的技术通过 TUV 莱茵质量认证，取得进入欧洲光伏市场的通行证，天威薄膜公司的叠层组件也已量产，在保持原有非晶硅薄膜良好的高温和弱光性能的基础上，增加微晶硅薄膜层，使光谱吸收范围从原来的 300 ~ 700nm 扩大到 300 ~ 1100nm，提升了光伏组件的光吸收能力，每片光伏组件功率提升 30W，光致衰退率下降 5%，转换效率提升至 9.3% 以上。

建成河北满城 1.3MW 薄膜光伏建筑一体化项目国家金太阳示范工程、山西纳克办公楼及吉林能源局办公楼光伏系统等；为江苏常州等地的光伏农业发电项目提供薄膜透光组件。以山东寿光光伏农业并网发电示范项目为例，一块非晶硅薄膜组件日均发电量 0.4kW · h，占地 1 亩（1 亩 =667m^2）的大棚，年均发电量可达 2.7 万 kW · h。在河北省保定市保定天威风电科技有限公司建成 318kW 光伏建筑一体化示范项目，采用其自有产品，共计 3344 块非晶硅单节薄膜组件形成光伏幕墙，分布于两侧厂房的东、西、南三面，用于供给厂房内部用电。

（2）威海中玻光电　威海中玻光电有限公司承建的 BIPV 光电幕墙，曾承接亚运会主要转播服务的场地，广州塔、青岛火车站、威海市民文化中心、呼和浩特站、北京奥运会现代五项体育场、蓝星股份办公楼、中玻院内 600kW 光伏建筑一体化、北京天安国汇项目楼等多个国内重点工程中均用到了威海中玻光电的 BIPV 组件。公司先后通过 ISO 9001 质量管理体系认证、CE 认证、ROHS 认证、TUV 认证、UL 认证、金太阳认证等，使公司产品远销德国、西班牙、美国、加拿大、韩国、中东等二十多个国家和地区。

（3）深圳市金刚玻璃光伏建筑科技有限公司　此公司参与了多家国家标准的编制及相关重大科技项目的攻关，是行业内最早设立 BIPV 研究、开发、应用的公司之一。目前该产品已经通过国际权威机构 TUV 认证。获得由德国莱茵技术认证中心（TUV Rheinland）颁发的 PVB 封装双玻璃光伏建筑组件产品认证证书，其采用 PVB 封装的双玻璃建筑组件拥有自主知识产权。金刚 PVB 双玻璃光伏建筑组件采用获省专利优秀奖的低铁高强度单片铯钾防火玻璃作为基片，是集发电、隔音、隔热、防火、安全防护为一体的多功能建材新产品。该产品可作为建筑外围护结构直接应用到建筑物上，能减少以往需在建筑外围护结构上再搭建光伏组件的重复投入，从而降低了应用太阳能方案的成本。EVA 膜（乙烯-聚醋酸乙烯）和

PVB 膜（聚乙烯醇缩丁醛）相比，PVB 膜片经高温高压成形后，对玻璃黏结性良好，其膜抗紫外线能力远远强于 EVA，同时具有更高的抗穿透性和更好的后断裂性能，更能符合玻璃墙面与屋顶的安全防护特性要求。

（4）尤尼索拉津能（天津）能源有限公司　尤尼索拉津能（天津）能源有限公司是天津市津能投资公司和美国联合太阳能（Uni-solar）有限公司合伙组建的有限公司，后者是世界上最大的三结非晶硅柔性太阳能薄膜电池组件制作商，其光伏产物以柔性电池组件为光伏建筑一体化供给解决计划。该柔性光伏薄膜电池主要使用于直属锁边金属屋面和高分子卷材屋面，可以在工场预制，也可以在现场安装。

2011 年 12 月，随着柔性非晶硅光伏太阳电池组件首次铺设在 TPO 和 EPDM 防水卷材屋面上，并成功联网发电，这将成为中国首个获批住建部政府补贴的光伏建筑一体化（BIPV）柔性非晶硅光伏太阳电池组件示范项目。

（5）中国兴业太阳能技术控股有限公司（SYE）　它是一家在香港联交所上市的国家级高新技术企业（股票代码：00750），由珠海兴业幕墙工程有限公司、珠海兴业新能源科技有限公司、威海中玻光电有限公司组成，承接扬州火车站、泰州火车站、北京北站、昆山火车站、郑州火车站、池州火车站、武昌火车站等十六个站房项目。中国建筑金属结构协会正筹备成立光电建筑应用委员会，珠海兴业、深圳金粤公司正在做技术标准的准备工作，组织专人收集并翻译美国、德国、日本三个国家的光电建筑应用标准，为制定国内的光伏建筑标准提供基础。珠海兴业幕墙公司正在做光伏屋顶标准图集、光电幕墙标准图集。

完善、整合相关产业链，建立产业联盟，形成光伏组件企业、施工建筑企业、建筑设计师乃至城市规划者、电力公司的上中下游及相关社会团体的产业大联盟是发展壮大我国BIPV的大势所趋。

第三节　BIPV 的技术要求

一、光伏组件的力学性能

用作幕墙面板和采光顶面板的光伏组件，不仅需要满足光伏组件的性能要求，同时要满足幕墙的三性实验要求和建筑物的安全性能要求。作为普通光伏组件，要通过 IEC 61215 的检测，满足抗 130km/h（2400Pa）风压和抗 25mm 直径冰雹 23m/s 冲击的要求，因此，需要有更高的力学性能和采用不同的结构方式。例如尺寸为 1200mm × 530mm 的普通光伏组件一般采用 3. 2mm 厚的钢化超白玻璃加铝合金边框就能达到使用要求。但同样尺寸的组件用在 BIPV 建筑中，对它的玻璃力学性能要求就可不同了，南玻大厦外循环式双层幕墙采用的组件是两块 6mm 厚的钢化超白玻璃夹胶形成的光伏组件，这是通过力学计算得到的结果。

二、电池和电池组件的技术要求

1）电池要求：效率高，性能稳定，价格低廉，色彩以深蓝色为主。

2）融合建筑电池组件要求：电池组件做成光伏瓦屋顶构件、幕墙构件、透明构件、顶棚构件等，要符合建筑要求，包括强度、寿命、尺寸、外观、连接等，针对不同建筑，对透明度、隔热、隔音、防火、防爆等提出相应的特殊要求。

3）封装材料要求：满足构件的不同功能要求，如前后玻璃、EVA 等。

三、建筑的美学要求

建筑设计和工程设计符合建筑审美要求，美观、高雅，令人赏心悦目；颜色和材料搭配得宜、协调；结构尺寸与建筑总体布局谐和；建筑整体外观与光伏系统匹配、谐和；设计概念创新电池和组件的技术要求太阳能光伏建筑一体化 BIPV 建筑首先是一个建筑，它是建筑师的艺术品，就相当于音乐家的音乐，画家的一幅名画，因此，BIPV 要符合建筑的美学要求。

1. 光线

对于建筑物来说光线就是它的灵魂，因此建筑物对光影要求甚高。如果太阳能光伏建筑一体化 BIPV 组件安装在大楼的观光处，这个位置需要光线通透，这时就要采用光面超白钢化玻璃制作双面玻璃组件，用来满足建筑物的功能。同时为了节约成本，电池板背面的玻璃可以采用普通光面钢化玻璃。一个建筑物的成功与否，关键一点就是建筑物的外观效果，有时候细微的不协调都是不能容忍的。但普通光伏组件的接线盒一般粘在电池板背面，接线盒较大，很容易破坏建筑物的整体协调感，通常不为建筑师所接受，因此 BIPV 建筑中要求将接线盒省去或隐藏起来，这时的旁路二极管没有了接线盒的保护，要考虑采用其他方法来保护它，需要将旁路二极管和连接线隐藏在幕墙结构中。比如将旁路二极管放在幕墙骨架结构中，以防阳光直射和雨水侵蚀。

普通光伏组件的连接线一般外露在组件下方，太阳能光伏建筑一体化 BIPV 建筑中光伏组件的连接线要求全部隐藏在幕墙结构中。

2. 颜色方面

当太阳电池作为南立面的幕墙或天窗时，考虑到电池板的反光而造成光污染的现象，就会对太阳电池的颜色和反光性提出要求，即可采用具有不均匀反光的多晶硅太阳电池组件做幕墙或是安装在人们视角之内的大坡度屋顶。对于晶体硅电池则可以用腐蚀绒面的办法将其表面变成黑色或在蒸镀减反射膜的时候加入一些微量原色来改变太阳电池表面的颜色。

3. 透光要求

当太阳电池用作天窗、遮阳板和幕墙时，对于它的透光性有一定要求。一般选用非晶硅太阳电池，因为它可制作成茶色玻璃一般的效果，透光好而且投影十分均匀柔和。而对于本身不透光的晶体硅太阳电池，需要透光时只能将组件用双层玻璃封装，通过调整电池片之间的空隙来调整透光量。

4. 尺寸和形状的要求

因为考虑到与建筑的结合，一般正规的方形很难满足特殊造型的需求。这方面还有待制作工艺的进一步提高。

四、建筑结构与光伏组件电学性能的配合

在设计太阳能光伏建筑一体化 BIPV 建筑时要考虑电池板本身的电压、电流是否方便光伏系统设备选型，但是建筑物的外立面有可能是由一些大小、形式不一的几何图形组成的，这会造成组件间的电压、电流不同，这个时候可以考虑对建筑立面进行分区及调整分格，使太阳能光伏建筑一体化 BIPV 组件接近标准组件电学性能，也可以采用不同尺寸的电池片来满足分格的要求，以最大限度地满足建筑物外立面效果。另外，还可以将少数边角上的电池片不接入电路，以满足电学要求。

第四节 BIPV 的设计

BIPV 设计首先要明确是离网还是并网；其次要明确是贴合还是融合，贴合设计是在已建成的现有建筑上安装光伏发电系统，合理布置支架，涉及建筑的局部改造，要进行承重量、水密气密性的校核。BIPV 融合设计，即与建筑围护结构浑然一体，不可分割且不影响围护结构的其他功能，如美观性、安全性、采光性、通风性、舒适性、水密气密性等。本节以介绍融合设计为主。设计步骤是，建筑分析→电池阵列安装设计→选择确定电池组件→计算阵列发电量→选择逆变器及其他配套电气装置。主要内容有设计原则、美学设计、结构设计、电气设计。

一、设计原则

光伏建筑一体化是光伏系统依赖或依附于建筑的一种新能源利用形式，其主体是建筑，客体是光伏系统。因此，BIPV 设计应以不损害和影响建筑的效果、结构安全、功能和使用寿命为基本原则，任何对建筑本身产生损害和不良影响的 BIPV 设计都是不合格的设计。BIPV 设计与建筑设计同步进行，在建筑总体设计中完美地加进光伏系统，光伏系统以显要和美丽的方式集成到建筑设计中，对建筑总体外观起到重要的美化作用。

由于建筑是一个复杂的系统，是一个完整的统一体，如果要将新型太阳能技术融入到建筑设计中，同时继续保持建筑的文化特征，光伏建筑一体化并网发电设计需考虑以下几个方面的因素：

1）建筑物的周边环境，尽量避开或远离遮荫物。

2）建筑物的朝向应尽量为东西向或南北向。

3）根据当地的经纬度，确定屋顶的倾斜角度。一般情况下，由于地球在不停地围绕太阳转动，所以屋顶倾斜角度对整体太阳能发电量的影响并不大，一般不超过 5%。相同角度、相同功率的太阳电池，东、西屋面的发电量几乎相等。

4）光伏系统大部分采取垂直设置，晶体硅模板背部因通风较差，温度上升，会导致发电效率降低，将减少约 40% 的发电量。当阴影遮蔽一片模组的一部分时，将减少整片模组及其他串联模组的发电量。这些问题需要在做 BIPV 前进行仔细的研究，从而确定电池类型。

5）根据组件的大小，计算每一个屋面可以安装的组件总数及排列方式。

6）根据逆变器输入直流电压，确定每组可串联的总数，由于每一个屋面的朝向不同，光照量和光照时间都不同，一般一个屋面对应一个逆变器，以提高逆变器的效率。

二、美学设计

建筑是多元的，有时候会存在边角、弧形等与电池板模组数相冲突的特殊地带，如何满足建筑师的要求，如何采用特殊设计制作的太阳电池组件来满足细节的设计，PV 系统颜色与周围其他材料颜色和谐，结构尺寸与建筑总体布局和谐，建筑整体外观与光伏系统匹配、和谐，设计概念有创新。建筑的建造有其特殊的地理位置和独特的建筑风格，建筑物本身位置、设计美感和整体协调性的要求，有时无法完全兼顾组件最佳发电方位的要求。图 18-5 为 BIPV 采光通道。

图 18-6 为 BIPV 倾斜屋顶。



图 18-5　BIPV 采光通道

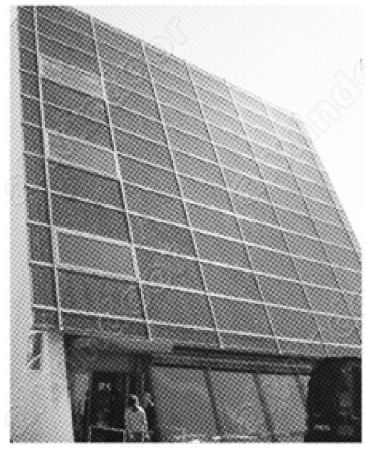


图 18-6　BIPV 倾斜屋顶

为了迎合建筑，BIPV 组件倾斜角不是最好的发电角度。对于透光率、遮阳系数可以通过设计组件电池片占比、电池片的颜色、背板玻璃颜色、中空或夹层等不同的组合达到建筑美学和发电最佳结合点。图 18-7 为各类电池拼图。

普通光伏组件为了提高效率，会将电池片间距缩小到 2～5mm。但在 BIPV 组件中，要考虑到室内的采光要求，这时要调整电池片间距到 25mm 左右，使组件的透光率在 30% 左右。图 18-8 为电池片占比。

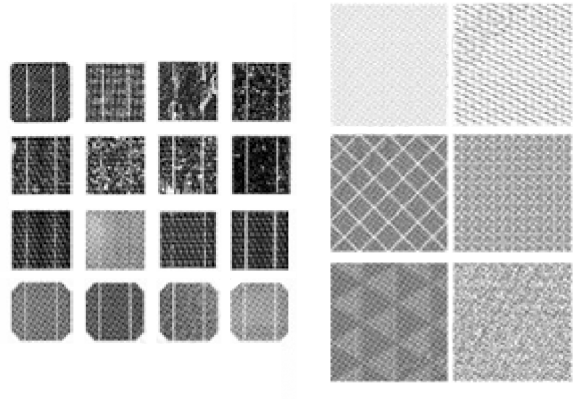


图 18-7　各类电池拼图

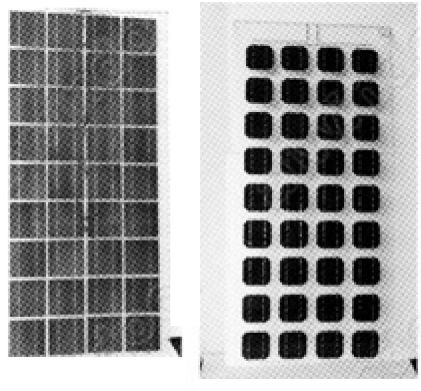


图 18-8　电池片占比

电池片透过的光在房间内形成独特的景象，可以联想成森林中树间间隙透过阳光的雅景。

三、结构设计

1. 建筑设计

BIPV 的设计应从建筑设计入手。

1）对建筑物所处地的地理气候条件及太阳能的资源情况进行分析，这是决定是否选用 BIPV 的先决条件。

2）考虑建筑物的周边环境条件，即选用 BIPV 的建筑部分接受太阳能的具体条件，如

被其他建筑物遮挡，则不必考虑选用 BIPV；另一个关键问题是阴影遮挡问题。产生阴影的原因是多种多样的，阴影的产生有随机的，也有系统的。阴影主要来自于周围建筑物、树木的遮挡、各个光伏组件之间的相互遮挡、云层等。光伏组件的输出特性决定了受到局部遮挡或阴影后，其发电效率将会大大减小，从而对整个系统的发电量产生显著影响。光伏组件的安装涉及光伏组件的安装角度和安装方向问题，安装角度就是光伏组件的倾角问题，倾角的选择直接关系到光伏组件的发电效率。同一块电池板，选择不同的安装角度接收到的辐射量是不一样的，不同安装位置的光伏组件其安装角度和方向不可能完全一致，这就决定了其发电效率、发电的瞬时功率无法保证完全一致。

3）考虑与建筑物外装饰的协调。

4）考虑光伏组件的吸热对建筑热环境的改变。

2. 结构安全性

光伏组件与建筑的结合，结构安全性涉及两方面：

1）组件本身的结构安全，如高层建筑屋顶的风荷载较地面大很多，普通光伏组件的强度能否承受，受风变形时是否会影响到电池片的正常工作等。

2）固定组件的连接方式的安全性。组件的安装固定不是安装空调式的简单固定，而是需对连接件固定点进行相应的结构计算，并充分考虑在使用期内的多种不利情况。建筑的使用寿命一般在 50 年以上，光伏组件的使用寿命也在 20 年以上，BIPV 的结构安全性问题不可小视。

BIPV 组件作为建筑体的一部分，须符合《建筑玻璃应用技术规程》和《玻璃幕墙工程技术规范》。现有的 BIPV 组件在封装材料上有采用 PVB 封装的和采用 EVA 封装的，这两种不同材料封装的 BIPV 组件在建筑安全上的级别是不同的，在 10m 以上部位设计 BIPV 组件时应选择安全性更高的 PVB 封装的 BIPV 组件。

3. 光伏组件与建筑相结合的方式

光伏组件与建筑相结合的形式主要有与屋顶相结合、与墙面相结合、与遮阳装置相结合等方式。

（1）光伏与屋顶相结合　建筑物屋顶安装形式有三种，即可拆卸式、屋顶面板式及隔热式。建筑物屋顶作为吸收太阳光部件有其特有的优势，日照条件好，不易受遮挡，可以充分接收太阳辐射，系统可以紧贴屋顶结构安装，减少风力的不利影响，并且，太阳电池组件可替代保温隔热层遮挡屋面。与屋顶相结合的另外一种光伏系统是太阳能瓦。太阳能瓦是太阳能光电池与屋顶瓦板结合形成一体化的产品，该系统直接铺在屋面上，不需要在屋顶上安装支架，太阳能瓦由光电模块构成，其形状、尺寸、铺装时的构造方法都与平板式的大片屋面瓦一样。

（2）光伏与墙相结合　对于多、高层建筑来说，外墙是与太阳光接触面积最大的外表面。太阳光伏发电系统突破了传统玻璃幕墙单一的围护功能，把以前被当做有害因素而屏蔽在建筑物表面的太阳光，转化为能被人们利用的电能，优美的外观具有特殊的装饰效果，更赋予建筑物鲜明的现代科技和时代特色。

（3）与遮阳装置的一体化设计　将太阳电池组件与遮阳装置如停车棚构成多功能建筑构件，一物多用，既可有效地利用空间，又可以提供能源。风雨棚作为铁路站房建设的一部分，使用 BIPV 有以下优势：

1）覆盖面积大，而且拥有最理想的太阳辐射角。

2）外观形状单一规整，方便太阳能板的自由布设。

3）逆变器布设也非常自由，既可以使用集中式方便控制，又可以使用分散式减少损耗。

4）由于风雨棚的开放式构造，使日后的维护和检修非常方便。

（4）与其他光伏建筑构件一体化设计　光伏系统还可与景观，如路灯、围栏等相组合构成一体化设计。

双面发电太阳能围栏中，双面发电技术采用了正反两面都可以捕捉光线的“PN 结”结构，有效提高了电池的输出功率，这种电池与传统电池的最大不同点就在于它完全突破了太阳电池使用空间和安装区域的限制，可以不必考虑太阳运动对电池发电量的影响，很好地解决了在有限空间保证功率需求的问题。

4. 接线盒形式

BIPV 建筑结构与幕墙结构设计相似，主要有明框式、隐框式、半隐框式、点支式，明框式幕墙 BIPV 组件可设计成藏式接线盒和背面接线盒两种方式，藏式接线盒外观简洁，没有外围的电缆线。隐框式、点支式大多设计为背面接线盒。

5. 清洁

BIPV 建筑的采光顶或倾斜屋面由于容易沉积灰尘和鸟粪等杂物，影响外观、建筑的采光及发电性能，因此需要频繁地进行清洗，但由于人工清洗操作困难，可以考虑在 BIPV 建筑结构中设计专用的太阳能自行清洗装置。图 18-9 为自动清洁装置，它是一个带有蓄电池的独立光伏系统，分定期与不定期清洁。定期指一个月清洁一次，不定期清洁指雨雪、风沙后清洁。

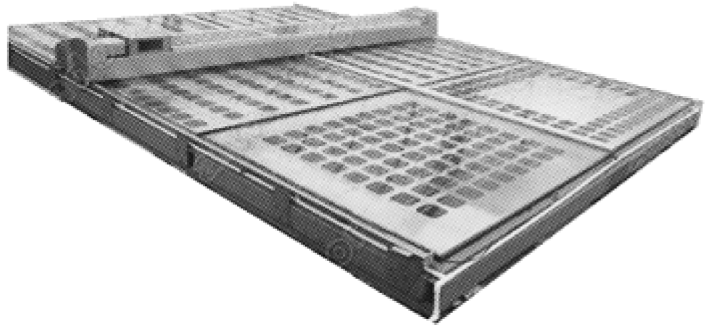


图 18-9　自动清洁装置

大厦屋顶是平的，常常有两种组件安装形式：一是水平安装，二是保持 20°左右的角度。设计者的意图是角度能起到雨水冲洗灰尘的作用。笔者的经验是水平安装好。

1）可以充分利用屋顶有效的宝贵场地。

2）玻璃上沾的灰尘是静电作用沾上的，很牢，用毛刷用力刷洗方能去掉，雨水是冲洗不净的，如能冲洗干净，平时的风力就可以自洁了，水清洗工作不到位，水干了后还会留下污痕、花斑，透光效果反而差了。

3）加上一个角度，不但无法清洁，而且无法进行机械清洁。

4）水平安装时，散射光接收的比有角度的多，总的接收辐照量比有角度的多。

四、电气设计

1）普通光伏组件的接线盒一般粘在电池板背面，接线盒较大，很容易破坏建筑物的整

体协调感，因此 BIPV 建筑中要求将接线盒省去或隐藏起来，这时的旁路二极管没有了接线盒的保护，要考虑采用其他方法来保护它，需要将旁路二极管和连接线隐藏在幕墙结构中。比如将旁路二极管放在幕墙骨架结构中，以防阳光直射和雨水侵蚀。

2）建筑结构与光伏组件电学性能的配合。

建筑物的外立面有可能由一些大小、形式不一的几何图形组成，这会造成组件间的电压、电流不同，这个时候可以考虑对建筑立面进行分区及调整分格，使 BIPV 组件接近标准组件电学性能，也可以采用不同尺寸的电池片来满足分格的要求，以最大限度地满足建筑物外立面效果。另外，还可以将少数边角上的电池片不接入电路，以满足电学要求。

3）太阳电池板供电不足时，由电网向用户供电，相反，若太阳电池板供电大于用户需求，剩余的电可通过逆变器输送到电网，需在连接电网时安装一块双向计量电能表解决电力收费的问题。这种系统特别适合于已有电网供电的用户，不仅可省去蓄电池的设置，减少初投资和运行维护费用，而且有利于因采用空调设备而造成的夏季白天用电高峰，削减用电量的问题。白天，多余的电流将流入电网，计量表会倒转。

4）微逆变器技术。

① 问题提出。集中式系统首先根据设计的电压和功率等级，把大量光伏组件通过串联或并联等方式连接起来，然后经过一个集中式逆变器将光伏阵列输出的直流电能转换为交流电能；系统的最大功率点跟踪是针对整个串进行的，因此无法保证每个组件均运行在最大功率点，也无法获得每个光伏组件的状态信息；另一方面，由于建筑表面各个组件的安装方向和角度不同，各个组件的发电效率彼此各不相同，采用集中式的最大功率点跟踪，将大大降低系统的发电效率；当部分组件受到遮挡时，整个系统的发电效率更会严重降低，以致降低系统的能量转换效率，甚至可能形成热斑。微逆变器技术提出将逆变器直接与单个光伏组件集成，为每个光伏组件单独配备一个具备交直流转换功能和最大功率点跟踪功能的逆变器模块，将光伏组件发出的电能直接转换成交流电能供交流负载使用或传输到电网。

② 采用微逆变器取代传统的集中式逆变器具有以下优点：

a. 保证每个组件均运行在最大功率点，具有很强的抗局部阴影能力。

b. 将逆变器与光伏组件集成，可以实现模块化设计，实现即插即用和热插拔，系统扩展简单方便。

c. 并网逆变器基本不独立占用安装空间，分布式安装便于配置，能够充分利用空间和适应不同安装方向和角度的应用。

d. 系统冗余度高、可靠性高，单个模块失效不会对整个系统造成影响。因此，将微逆变器应用于 BIPV 系统可以完全适应建筑集成光伏发电系统的应用需求，适应不同光伏组件安装角度和方位，避免局部阴影对系统发电效率产生的影响，实现 BIPV 系统发电效率的最大化。

图 18-10 为采用微逆变器的 BIPV 结构图。

如图所示，微逆变器直接与光伏组件相连，将光伏组件发出的电能直接传输到电网或供本地负载使用，多个微逆变器直接并联接入电网，各

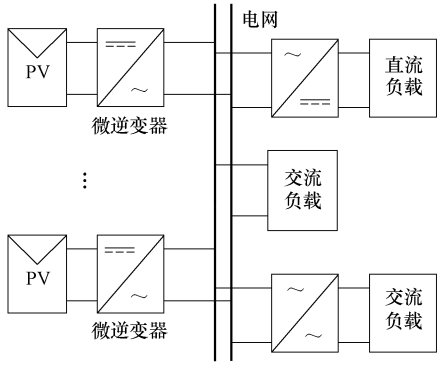


图 18-10　采用微逆变器的 BIPV 结构图

个微逆变器和光伏组件之间相互没有任何影响，单个模块失效也不会对整个系统产生影响。

③ 将微逆变器技术与电力线载波通信技术相结合，通过电网交流母线就可以采集各个微逆变器和光伏组件的输出功率和状态信息，很方便地实现整个系统的监控，同时不需要额外的通信线路，对系统连线没有任何负担，简化了系统结构。

5）BIPV 的发电系统设计与光伏电站的系统设计不同，光伏电站一般是根据负载或功率要求来设计光伏方阵大小并配套系统，BIPV 则是根据光伏方阵大小与建筑采光要求来确定发电的功率并配套系统。光伏方阵设计在与建筑墙面结合或集成时，一方面要考虑建筑效果，如颜色与板块大小；另一方面要考虑其受光条件，如朝向与倾角。光伏组件设计，涉及电池片的选型（综合考虑外观色彩与发电量）与布置（结合板块大小、功率要求、电池片大小进行）；组件的装配设计（组件的密封与安装形式）；光伏发电系统的设计，即系统类型（并网系统或独立系统）确定，控制器、逆变器、蓄电池等的选型，防雷、系统综合布线、显示等环节设计。

6）柔性太阳电池组件

柔性太阳电池可直接安装在屋顶上，以下是几家常见的太阳电池组件产品。

① 联合太阳能奥沃尼克的 Uni-Solar 柔性太阳电池组件。

图 18-11 为 Uni-Solar 柔性太阳电池组件，它可直接安装在屋顶上。与采用晶体硅电池的层压板相比，它的采光面积更大，可吸收更多的阳光。这种柔性组件无需额外的钢架支撑，从而减少成本和屋顶的负荷。每平方英尺（$1ft^2$，$1ft^2 = 0.092m^2$）的重量仅为 11 磅（lb，1lb = 0.454kg）。Uni-Solar 宣称，公司设计的组件产品不仅仅可吸收可见光谱，还可以吸收红外线和紫外线，因此每平方英尺可增加 20% 的能源采集量。

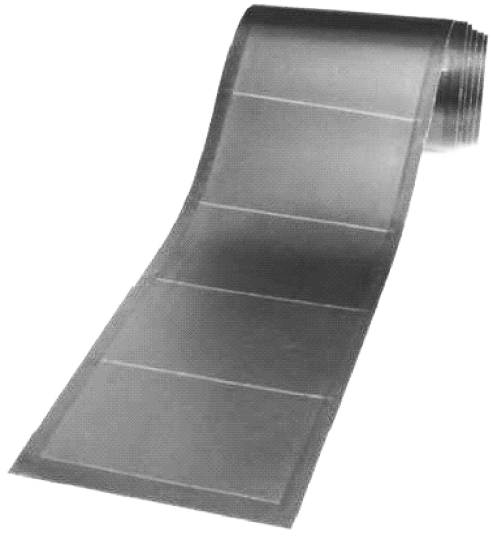


图 18-11　Uni-Solar 柔性太阳电池组件

② Dow Solar Solutions 柔性太阳电池。

Dow Solar Solutions 是美国陶氏化学集团旗下的一个部门，该公司推出了一全新系类的产品，它可安装在传统的屋瓦上，并保有建筑物原有的外观和特性。其安装方法与常规的屋瓦类似，据说与其他同类产品比较可节省 40% 的安装成本。此外，与晶体硅太阳电池板相比，它的转换效率要高出 10%。图 18-12 为 Dow Solar Solutions 柔性太阳电池。

③ Konarka Technologies 公司的半透明彩色有机柔性太阳电池组件。图 18-13 为 Konarka Technologies 柔性太阳电池。

④ Global Solar 公司柔性太阳电池组件。

位于亚利桑那州图森市的 Global Solar 公司表示，其公司生产的薄膜 CIGS 组件转换效率最高可达到 13.2%。这些柔性组件长 19ft（1ft = 0.3048m），宽为 1.5ft，可安装于任何形状或物体的表面，安装成本基本上相当于晶体硅刚性电池片的安装成本。

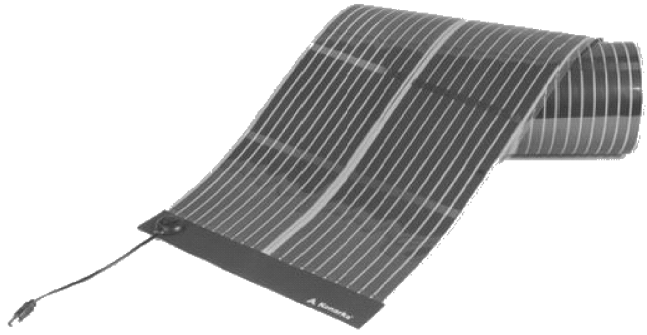


图 18-12　Dow Solar Solutions 柔性太阳电池

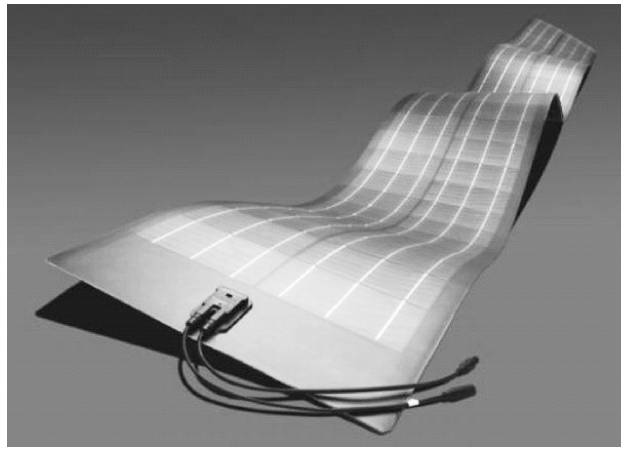


图 18-13　Konarka Technologies 柔性太阳电池

五、BIPV 设计中需注意的几个问题

1. 对树产生阴影的处理

1）仅种植比建筑物矮的树。

2）每年定期对树进行修剪。

3）将树种在北面。

2. 组件的选择

无边框的组件在墙壁上看起来比较一致，整个系统只有电池的颜色，有边框的视觉效果比较特别。

3. 系统融合中的创新

光伏发电技术和建筑结构技术是两种不同的技术，这两种技术形成一个有机的整体，要与建筑材料、建筑设计、建筑施工等相关方面紧密配合，并要求在系统融合中不断创新。比如首都博物馆 BIPV 设计要服从建筑的整体设计理念，太阳能光伏发电系统的安装不能破坏建筑造型，不能破坏装饰性屋面轻盈、通透的艺术风格，不能造成结构的重新返工。以往的太阳能组件安装通常采用平架或者斜撑架安装方式，这种安装方式不仅会破坏建筑物的完整性和建筑外观造型，而且对屋面防水存在不利影响，特别是需要屋面承受空气层流所产生的

风力。综合上述因素，首都博物馆新馆选择了非晶体柔性太阳能发电板，以特种粘合剂直接粘贴在屋面板的技术形式。这样既不会影响建筑造型，也不需要对屋面结构进行重新计算和加固。直接粘贴在屋面板的技术形式不再存在太阳能发电板和屋面之间的空气腔，消除了空气层流作用的产生。采用粘结方式，对粘合剂的性能和粘贴工艺需要注意，所用的粘合剂必须能够经受得住自然气候的变化，不会因为四季变化、日晒和积雪积雨等情况而影响粘结度。电气方面为了解决太阳能光伏系统在低压端并网的切换与自动补偿，采取了两个措施，首先是在负荷设计上采用三台逆变器的情况下保证多运行模式下光伏系统三相输出的平衡，取得三相电压不超过4%的最大不平衡度；另外采用了交流电源跟踪技术。当公共电网供电端的电压和频率等参数在正常范围内变化时，并网光伏发电系统的输出自动跟踪公共电网的电压、频率和相位等的实时参数，随时调整其交流输出功率、交流输出电流、谐波、频率和相位，使之与电网相匹配。

4. 运行安全

从运行安全和维护安全的角度，在太阳能光伏发电系统中设置了三级短路开关，实施过电压和欠电压保护，保证设备和人身安全，防止事故范围的扩大，特别是一旦发生并网光伏发电系统电网失电压时，自控装置将在1s内动作，把光伏系统与公共电网快速断开，主动防止孤岛效应。同时，在建筑智能化系统的实施中，开发并完成了太阳能光伏系统与建筑设备自动化监控系统的接口和集成技术，实现了楼宇自动化系统对太阳能光伏发电系统的二次监控，包括摄像机对太阳能发电板的监视，进一步提高了太阳能光伏发电系统与公共电网之间的安全性。

5. 安装、维修空间的预留

接线盒、微逆变器等安装的空间、电器元件之间的电气安全距离要考虑。安装是按顺序依次进行的，一旦某一块电池组件损坏，要将其拆卸更换是很困难的。因此安装、维修空间要预留够，维修工艺要妥善考虑。

6. 温度影响的处理

不同的太阳电池对温度的承受能力是不同的，如果太阳电池承受能力低，安装场地夏季温度过高，就要考虑电池背面设置通风装置来消除产生的热量。

第五节　BIPV的施工

大型BIPV工程都应报建，经过有关部门审批后，才能施工。BIPV光伏组件作为建筑物的一部分，它的安装要求比普通组件的安装要求高，难度大，安装高度较高，安装空间较小。考虑到安装方便，可以将光伏组件做成方便拆卸的单元式幕墙形式，这样既方便了安装，同时也提高了安装精度。幕墙在我国发展30年以来，各种幕墙形式都具有了比较成熟的设计和安装技术：构件式幕墙施工手段灵活，主体结构适应能力强，工艺成熟，是目前采用最多的结构形式；单元式幕墙在工厂内加工制作，易实现工业化生产，降低人工费用，控制单元质量，缩短施工周期；双层通风幕墙系统具有通风换气、隔热隔声、节能环保等优点，并能够改善BIPV组件的散热情况，降低了电池片温度，减少了组件的效率损失，降低了热量向室内的传递。

普通光伏系统的大部分连接线都敞开在大气中，空气对流充分，温度低。BIPV建筑系

统中的连接线大多都在幕墙立柱、横梁等密闭结构中，其温度远远高于普通光伏系统电线所处的环境温度，这对 BIPV 建筑系统中电线的要求也高很多。普通系统中，一般使用普通的聚氯乙烯铜线就能满足要求。但在 BIPV 系统中，建议使用光伏专用电线——双层交联聚乙烯浸锡铜线。另外考虑到温度对电阻的影响，BIPV 建筑系统中选用的电线直径应该要比普通光伏系统大一些。

建议选择有品牌的连接器。有同事做过对比实验，性能优异的连接器的防水性能和耐老化性能要比一般的连接器好很多，如果连接器的防水性能不好，这可能会导致大楼带电，如果连接器的耐老化性能不佳，这将会导致系统漏电、电线氧化。

第六节　BIPV 的效益

一、光伏幕墙 BIPV 的效益

普通玻璃幕墙的材料有安全玻璃、铝材、胶，全隐式的约需 610 元/m^2，光伏幕墙电池组件 120W/m^2，光伏成套加 2450 元，如果获得国家的 7 元/W 补贴，则实际投资为 1610 元/m^2，平均一天发电 4h，一个 2000m^2 的玻璃幕墙，光伏幕墙 8.7 年可收回投资，而普通幕墙无法明算，因为它与大楼的经济收入捆在一起。表 18-2 为 BIPV 经济分析。

表 18-2　BIPV 经济分析

项　　目	光伏幕墙	普通幕墙
安装面积/m^2	2000	2000
电池组件规格/(W/m^2)	120	/
装机容量/(kW)	240	0
成本/(元/m^2)	2450	610
国家财政补贴/(元/m^2)	7	0
综合每平方米成本/(元/m^2)	1610	610
实际投资/元	3220000	1220000
发电量/(kW·h/年)	276480	0
每度发电收入/[元/(kW·h)]	1.00	0
年度发电收入/(元/年)	276480	0
光伏幕墙回收年限/年	8.7	不明,与大楼经营收入同步

电池寿命为 25 年，8.7 年后的收入将是利润，其利润是显而易见的。如想提前获得利润，可将回收年限延长。

二、全国光伏幕墙 BIPV 的效益

截至 2008 年年底，我国房屋总建筑面积约 500 亿 m^2，其中城市房屋住宅面积 160m^2 以上的约 100 亿 m^2；农村住宅面积大约 160 亿 m^2。城镇住宅屋顶可利用面积 10 亿 m^2，农村住宅屋顶可利用面积 40 亿 m^2，共计 50 亿 m^2。如果目前 20% 安装太阳能光伏发电系统，就会有 100GW 的安装量。到 2020 年和 2050 年可利用面积分别增加 50% 和一倍，太阳电池发电系统的效率分别从现在的 10% 增加到 15% 和 20%，则屋顶资源量从现在的 100GW 分别增加到 220GW 和 390GW。如仍按 1 元/W 计算，到 2028 年的年利润是 2534.4 亿元，到 2058

年的年利润为4492.8亿元，这是较保守的计算。并且，国家将重新改造546个火车站，例如南京南站、杭州东站、广州新火车站、兰州火车站、济南火车站等，太阳能光伏发电是改造的重要内容。

我国建筑节能方面的法律框架已基本构建完成，随着全社会对建筑节能意识的逐步增强以及建筑节能标准的逐步推进，未来3~5年，BIPV会有飞速发展。

第七节　BIPV的检测与调试

一、BIPV的检测

1. 安全检测

1）检查电气系统是否符合《建筑电气工程施工质量验收规范》。

2）检查接地线。系统中设备外部的接地线应采用涂覆裸线或镀锌线，不得采用带有绝缘防护层的导线，接地线应采用单股线径大于2mm的导体，接地线应标志为绿色或黄绿相间的颜色，导线的连接应符合GB 4706.1—2005《家用和类似用途电器的安全　第1部分：通用要求》。

3）检查电气接头。当标准电极电位相差较大的导体，比如铜导线和铝导线相连接时，应注意采取使接触处保持干燥的措施，或在两种金属间设置标准电极电位介于两者之间的第3种金属，如在铜铝接头处铜的表面镀锡。

4）检查接地的连续性。如金属管接头之类的两根构件，没有焊接连接，而是采用机械连接，要检查是否加入了电气互连装置。

5）测量接地电阻。按接地电阻测试仪的说明书测试系统的接地电阻，其值应小于10Ω。

6）检查组件正反表面是否有足够的散热通道。

7）检查作为民用建筑的部件或附着物的光伏组件，按GB 8624—2006《建筑材料及制品燃烧性能分级》所定类别，并符合GB 50016—2006《建筑设计防火规范》的规定。安装系统材料的燃料性分类级别不得低于光伏组件的燃料性分类级别。

8）避雷设置应符合GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》和光伏系统设计要求。

9）检查方阵绝缘电阻，符合Ⅱ级安全设备的要求。

2. 电气检查与测量

1）检查逆变器、汇流箱、变压器等电器设备的完整性以及锈蚀情况，并检查接线端子有无松动、散热情况是否良好。

2）检查光伏系统，保证线路无短路、断路和接触不良，极性接线正确，组件无遮挡，受光面清洁；防反充二极管、旁路二极管均已配备齐全。测量开路电压、短路电流无异常，如发现异常应分段检查，找出问题，解决问题或更换组件。测量时注意组件有电压，要防止电击。对多个组件串，应先测量各组件串，确定其工作正常，然后测量方阵、直流母线交流侧和整个光伏系统。

3）检查逆变器安装方式及周边环境是否符合设计要求，技术参数与说明书是否相符，相应的认证证书是否齐全。

二、BIPV 的调试

调试日应在天气辐射良好的情况下进行，设备投入运行由技术人员连续监测一个工作日，观察并记录设备运行参数。

1. 电能质量测试

图 18-14 为电能质量测试电路。

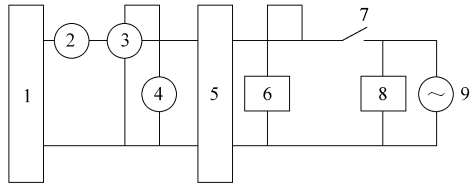


图 18-14　电能质量测试电路

1—太阳电池阵列　2—直流电流表　3—直流功率表　4—直流电压表　5—逆变器　6—电能质量分析仪　7—电网解并列点　8—可变交流负载　9—电网或电压和频率可调的交流净化电源（模拟电网），提供的电流至少应是光伏系统的 5 倍

（1）工作电压和频率　光伏系统并入电网后，现场测量 3 次解并列点处的电压和频率，看是否符合 GB/T 12325—2008《电能质量　供电电压偏差》。

（2）电压波动和闪变　光伏系统并入电网后，现场测量 3 次解并列点处的电压，看是否符合 GB/T 12326—2008《电能质量　电压波动和闪变》。

（3）谐波和波形畸变　在光伏系统并入电网之前，用电能质量分析仪测量电网谐波电流并记录；在光伏系统并入电网后，测量光伏系统的谐波电流，判断是否符合 GB/T 14549—1993《电能质量　公用电网谐波》。

（4）功率因数　并网运行的前后，当光伏系统输出大于逆变器额定功率的 50% 时，调节逆变器的输出和相位，用电能质量分析仪在解并列点处，测量光伏系统的输出功率和功率因数，记录测量结果，判断是否符合该工程技术条件要求。

（5）输出电压不平衡度（指三相输出）　并网前后，用电能质量分析仪在解并列点处，测量三相不平衡度，记录测量结果，判断是否符合 GB/T 15543—2008《电能质量　三相电压不平衡》及当地电力部门的要求。

（6）输出直流分量检测　并网运行时，用电能质量分析仪在 33%、66%、100% 不同输出功率条件下，检测直流电流分量应≤1% 输出电流，当直流分量大于限定值时，光伏系统应自动与电网解列。

2. 电网保护功能测试

图 18-15 为电网保护功能测试电路。

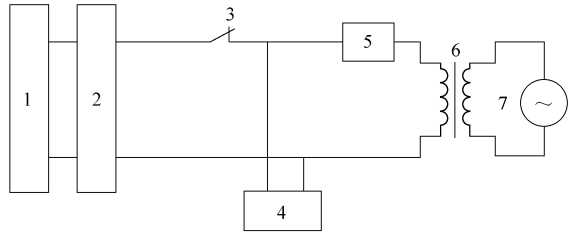


图 18-15　电网保护功能测试电路

1—太阳电池阵列　2—逆变器　3—电网解并列点　4—可变交流负载　5—逆向电流检测装置　6—隔离变压器　7—电网或电压和频率可调的交流净化电源（模拟电网），提供的电流至少应是光伏系统的 5 倍

（1）过/欠电压保护　按照 GB/T 19939—2005《光伏系统并网技术要求》中的指标，逐项改变交流净化电源的电压值，测量并网系统保护装置的动作值和动作时间，应符合标准的要求。

（2）过/欠频率　按照 GB/T 19939—2005《光伏系统并网技术要求》的规定，改变交流净化电源的频率（变化速度不能快于 0.5Hz/s），测量并网系统保护装置的动作值和动作时间，应符合标准的要求。

（3）防孤岛效应　光伏系统并网运

行时，使模拟电网失电压，光伏系统应能在规定的时间内中断电力输出。

（4）电网恢复　在过/欠电压、过/欠频率、防孤岛效应保护检测时，由于模拟电网的指标越限或电网失电压，使得光伏系统与模拟电网断开，恢复模拟电网正常工作范围，应在规定时间内再并网。

（5）短路保护　在解并列点模拟电网短路，测量光伏系统的输出电流及解列时间，应符合 GB/T 19939—2005《光伏系统并网技术要求》的规定。

（6）反向电流保护　光伏系统通过隔离变压器并网运行，由重到轻调节加在变压器光伏系统侧的交流负载或调整光伏系统的输出功率，直到变压器光伏系统侧出现反向电流，记录中断电力输出的动作值和动作时间，应符合设计规定。

第八节　BIPV 存在的问题

一个好的 BIPV 工程应该具备以下几点：

1）自然集成，光伏系统成为建筑物自然逻辑的部分，与建筑物构成一个不可分割的整体。

2）经过美学设计，BIPV 比无光伏系统的更美观、耐看。

3）工程质量良好。

但是实际情况还存在一些问题，具体如下：

1）金太阳示范工程不尽如人意。

金融危机后，承载着启动国内光伏产业市场重任的金太阳示范工程 2009 年启动以来，便以享受 50% 以上国家财政补贴成为各界竞相追逐的热潮。然而，金太阳工程的推进速度低于业界的预期，2009 年批准的一期工程目前已动工建设的不足总规模的一半；2010 年 39 个企业的示范项目被国家取消。金太阳示范工程过去两年启动的近 60 万 kW 示范项目，截至 2011 年底只完成 30 万 kW 左右，其中 90% 的项目为屋顶太阳能电站，屋顶电站除了成本高、不稳定外，还留下了诸多投资回收期长、赢利率低、补贴管理办法不完善等问题。

2）BIPV 发展过程中的管理问题待完善，特别是监督检查和工程验收的技术政策。BIPV 产业链由一系列主体构成，这其中的任何一个环节，都要保证技术可靠、工艺可靠、材料质量可靠。BIPV 是 21 世纪出现的新技术，相应的法规体系还不完整，《建筑法》、《建设工程安全生产管理条例》在内的一些法律法规，并不包括光伏建筑应用方面的内容。

3）从目前光伏市场来看，一些组件厂批量生产势头猛，从而降低成本，使电价急速接近电网价格，这种规模效益策略对于企业的存亡至关重要，但能过此关的组件厂不多。

4）光伏发电组件和建筑外围护结构结合后的维护未能提到日程上。全隐安装的是用胶粘在铝条上的，今后拆卸及重装都没有空间。而且硅胶本身有个衰减的过程。

5）完善、整合相关产业链，建立产业联盟，形成光伏组件企业、施工建筑企业、建筑设计师乃至城市规划者、电力公司的上中下游及相关社会团体的产业大联盟是发展壮大我国 BIPV 的大势所趋。

我国 BIPV 的现状是，行业集中度不高，市场成熟度较低，BIPV 建筑应用较少。大型 BIPV 项目主要应用于公用建筑，有一些小型光电建筑由光伏组件厂家组织兴建，还有一些小型 BIPV 项目由一些大型企业或房地产公司兴建。在实施 BIPV 中最大的瓶颈是投资大、

效益差的问题，其次是并网申请的问题。小型光电建筑技术成熟，没有难点，1MW 以上的项目要考虑到光伏系统对电网的冲击。截至目前，我国的 BIPV 项目仍以示范、低压端并网自用为主，大规模安装和向网上售电期待国家相关政策的出台。

第九节　BIPV 的发展趋势

1）电池组件向大型化、薄型化、高效率发展，超白玻璃被廉价的材料取代，电池组件价格大幅下降。

2）开发出许多适应各种不同屋顶和墙面的快装式光伏瓦片、太阳能瓦、太阳能面墙等，降低了安装费用。

3）BIPV 系统纳入楼宇自动化系统，在实际建筑施工中预留光伏阵列的铺设装置，在综合布线系统中，预设光伏设备的接入端口和线路匣。

4）BIPV 组件不仅满足光伏组件的性能要求，同时满足幕墙的三性试验要求（幕墙的风压变形性能、雨水渗漏性能和空气渗透性能，该三项性能检测简称三性试验）。行业内是这样规定的：1000m^2 以下的幕墙和高度小于 16m 的幕墙一般可以不做三性试验，其余一般均要做三性试验，其试验费应由业主承担，合同约定除外。

5）光线高穿透薄膜型太阳电池上市，此高穿透型太阳电池穿透率增加 10%，更适合应用于农业大棚。

6）50 年后，仅 BIPV 屋顶并网发电就可提供全世界 1/4 的电能。

7）BIPV 组件由白天发电、美化建筑的原始功能，向夜间发光装饰建筑的多媒体化发展。

8）电池组件回收和循环利用技术得到普遍的应用。

9）有机薄膜太阳电池钢材屋顶问世。美国科纳卡技术公司（Konarka Technologies，Inc）是一家开发商，正与钢材供应商德国蒂森克虏伯钢材公司（ThyssenKrupp Steel Europe）合作研发用于 BIPV 的钢结构屋顶和其他建材。天窗和大楼外围采用的传统用料，有多种规格和颜色选择。德国蒂森克虏伯钢材公司大楼也计划应用新的钢结构。

10）在光伏系统方面，开发出带微型逆变器的光伏组件。加利福尼亚焦点材料公司（Focus Materials，Inc）将提供公司主打的 Focus Wall 玻璃铝幕墙，其内置盛产太阳能公司（Abound Solar）生产的半导体薄膜组件以及 eIQ 能源公司（eIQ Energy）生产的恒压逆变器。焦点材料公司把这些组件和电线安装在光伏面板的玻璃支撑结构当中，使它们融为一体，整体外表美观，内部接线盒与整个太阳能系统相连。

随着一系列全新技术和产品的诞生，光伏建筑一体化产业的时代即将来临。当成本不断下降且使用寿命提高后，光伏运用于建筑中将成为司空见惯的事情。这些全新的技术随着自身的发展，将加速光伏建筑一体化的应用，使老旧的建筑焕发新的生命。

第十九章　分布式发电

并网光伏系统按照接入的方式和规模又可以分为集中式光伏电站和分布式光伏电站。集中式光伏电站大多利用荒漠地区丰富和相对稳定的太阳能资源，接入高压输电系统并网，通过特高压、高压输送，供给远距离负荷。分布式光伏电站主要用于就近解决用户的用电问题，通过并网实现供电差额的补偿与外送，分布式发电单个电站容量较小，通常并入低压配电网中。分布式发电非常经济，发电总体效率可以达到80%以上。

第一节　分布式发电概况

一、分布式发电的定义及能源形式

1. 分布式发电的定义

分布式发电（Distributed Generation，简称DG），通常是指发电功率在几千瓦至数百兆瓦（也有的建议限制在30～50MW以下）的小型模块化、分散式、布置在用户附近的高效、可靠的发电单元，不以大规模远距离输送电力为目的，所生产电力除自用外，多余电力送入当地配电网的发电系统或多联供系统。

分布式发电的主要特征是，多用新型发电技术，有利于环保；能源利用效率高，可达60%～90%；电源容量小、电压等级低；接近负荷中心，接入配电网；运行方式灵活，可联网可不联网；用电安全上比集中发电更可靠，停电概率较小；可解决边远地区供电难问题。

2. 分布式发电的能源形式

1）总装机容量5万kW以下的小水电站。

2）接入电网电压一般在35kV（东北地区为66kV）及以下的风能、太阳能、生物质能发电和其他可再生能源发电。

3）除煤炭直接燃烧发电以外的各种废弃物发电、多种能源互补发电、资源综合利用发电。

4）规模较小、分散型的天然气热电联供、冷热电联供。

5）以液体或气体为燃料的内燃机、微型燃气轮机。

3. 分布式发电规划发展的重点领域

1）政府机关和事业单位建筑物等设施。

2）文化体育、医疗、教育、交通枢纽等公共建筑。

3）商场、宾馆、写字楼等商业设施。

4）工农业企业、工业园区、经济开发区。

5）生产过程中产生可利用的剩余物、废弃物的企业。

6）城市居民区、住宅楼及独立的住宅建筑物。

7）农村地区村庄和乡镇。

8）偏远农牧区和海岛。

4. 不能归属为分布式发电的电厂

1）分布式发电非常接近终端用户，容量很小，一般在几十千瓦到几十兆瓦，可以孤立供电也可以并网，可以直接接在 380V 或 10kV，如果超过这个等级，就不再称之为分布式发电。

2）分布式发电大部分是采用洁净的可再生能源，否则不能称之为分布式发电。

3）大的风电厂不能称之为分布式发电。

4）大的热电联产不能属于分布式发电，比如北京热电厂，装机 20 万 kW，不能算是分布式发电。

二、国外分布式发电现状、政策及前景

1. 美国分布式发电现状、政策和前景

（1）美国分布式发电现状　美国分布式发电方式包括天然气多联供、中小水能、太阳能、风能、生物质能、垃圾发电等。2000 年美国商业、公共建筑热电联产 980 座，总装机 490 万 kW；工业热电联产 1016 座，总装机 4550 万 kW，合计超过 5000 万 kW。到 2003 年，热电联产总装机 5600 万 kW，占全美电力装机的 7%，发电量占 9%。2010 年这一类的分布式总装机容量约为 9200 万 kW，占全国发电量的 14%。根据美国能源部规划，2010—2020 年将再新增 9500 万 kW 装机容量，占全国发电装机容量的 29%。美国的分布式发电以天然气热电联供为主，年发电量 1600 亿 kW·h，占总发电量的 4.1%。美国能源部积极促进天然气为燃料的分布式能源系统，利用这些系统为基础，发展微电网，再将微电网连接发展成为智能电网。

2011—2035 年，美国居民以及商业用于购买分布式能源设备、发电系统和建筑节能方面将新增 110 亿美元的投资。分布式能源的应用包括采暖、通风、空调、水、暖气、照明、烹饪、制冷等，分布式能源平均增长率约 0.6%。与 2009 年相比，能源消耗增长了 1.5%，主要是用电和办公室设备耗能，图 19-1 为商业用分布式能源情景预测。美国商业分布式能源系统装机容量将从 2009 年的 190 万 kW 增加到 2035 年的 680 万 kW。在分布式能源系统中微燃机以每年 16% 的速度增长。在税收优惠的政策激励下，风电增长速度达到 11%，预计 2035 年，可再生能源占分布式能源供应的 50%。

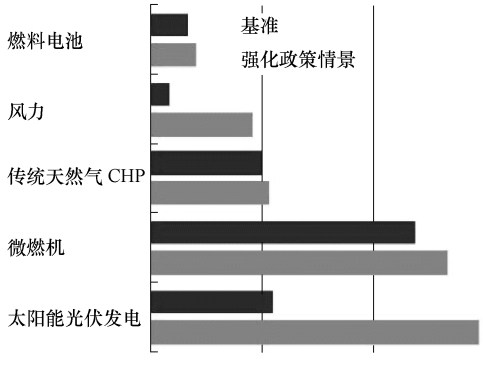


图 19-1　商业用分布式能源情景预测

根据《美国 2011 能源展望》分析，2009—2035 年，制造业企业的能源消耗将从 65% 增长到 71%，但农业、矿业和建筑业等非制造业企业的能源消耗比例将减少 2%。另外，化工产业的能源消耗比例将下降 4%。美国热电联产技术以内燃机、蒸汽轮机、燃气轮机为主，约 46% 的热电联产项目采用小型内燃机，燃气-蒸汽联合循环占项目数量的 8%，占分布式发电总装机容量的 53%。

1）热电联产。据美国能源部数据统计，1998—2006 年，美国分布式热电联产规模翻了一番，装机容量从 4600 万 kW 增加到 8500 万 kW，占全国总装机容量的 7.8%，分布式发电

站数量达到6000多座，年发电量1600亿kW·h，占总发电量的4.1%。其中，以天然气为原料的热电联产装机容量达到6180万kW，占热电联产总装机容量的73%；天然气项目占热电联产总数量的69%。

2）分布式风力发电。装机容量100kW以下的风电机组称为小型风电，主要用于居民用电。美国2008年小型风电新增装机容量为1.73万kW，小型风机装机总量达到8万kW。美国的分布式风力发电主要用于家庭、农场、小企业、工厂、公共设施和学校。

3）分布式光伏发电。自2005年能源政策法提出屋顶光伏发电项目减免30%的初装费后，美国光伏发电市场发展迅速。目前，分布式光伏发电和风力发电都享有为期8年的30%联邦投资税收优惠政策。

4）生物质发电。目前，美国生物质发电主要用于现存配电系统的基本发电量。2003年美国生物质发电装机容量约为970万kW，占可再生能源发电装机容量的10%，发电量约占全国总发电量的1%。2008年美国有350座生物质发电站，生物质发电的总装机容量已超过1000万kW，单机容量达1～2.5万kW，占美国可再生能源发电装机的40%以上。美国能源部生物质发电计划的目标是到2020年实现生物质发电的装机容量为4500万kW，年发电达2250～3000亿kW·h。

（2）美国分布式能源政策　美国支持分布式发电的优惠政策如下：

1）减免分布式发电项目部分投资税。

2）缩短分布式发电项目资产的折旧年限。

3）简化分布式发电项目经营许可证审批程序。

（3）美国分布式能源的发展前景　按照“分布式发电2020年纲领”目标，到2020年，美国分布式发电将成为商用建筑高效使用矿物能源的典范，通过能源系统的调整，将极大地推动经济增长和提高居民生活质量，同时最大限度地降低污染物的排放量。

根据EIA《美国2011能源展望》的分析：在基准政策情景中，商业用分布式发电装机容量从2009年的190万kW增长到2035年的680万kW。在强化政策情况中，2035年分布式发电装机容量将增长至980万kW。基准政策情景中，微型涡轮机是分布式发电技术中增长最快的，年平均增长速度为16%。在强化政策情景中，受税收减免政策影响，商业部分风电装机每年增长11%，比参考情况年增长的2倍还多。图19-2为2009～2035年可再生能源电源结构。在2035年，强化政策情景中可再生能源占所有商业分布式发电的50%，而基准政策情景中可再生能源占比小于35%。

预计可再生能源发电的装机容量从2009年的4700万kW增加到2035年的10000万kW，其中增长幅度最大的是风电装机容量，风电装机容量于2012年达到1820万kW，但2012～2035年增速放缓，新增风电装机容量仅为690万kW。太阳能发电装机容量占可再生能源发电装机的比例将从2009的2%增至2035年的5%，发电量将从2009年的23亿kW·h提高到2035年的168亿kW·h。生物质发电的装机容量将从2009年的700万kW增加到2035年的2020万kW，在可再生能源电力中的占比从15%提高到20%。

目前，美国能源部认为美国分布式发展的潜力还有11000～15000万kW，其中工业领域潜力为7000～9000万kW，商业及民用领域潜力为4000～6000万kW。同时，美国还制定了大力推广热电冷联供技术应用的战略目标。

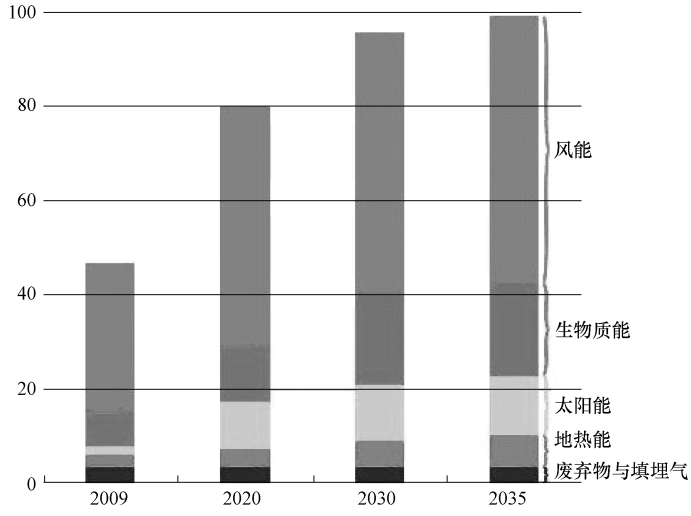


图 19-2　2009 ~ 2035 年可再生能源电源结构

2. 日本分布式发电现状、政策和前景

（1）日本分布式发电现状　日本的分布式发电以热电联产和太阳能光伏发电为主，总装机容量约 3600 万 kW ，占全国发电总装机容量的 13. 4% 。其中商业分布式发电项目 6319 个，主要用于医院、饭店、公共休闲娱乐设施等；工业分布式发电项目 7473 个，主要用于化工、制造业、电力、钢铁等行业。

1）热电联产。近年来，日本分布式能源发展较快，其中热电联产装机容量超过过去 20 年的总和。2006 年，日本热电联产装机容量达到 870 万 kW，占日本电力装机的 4% 。其中，以天然气为原料的热电联产装机容量达到 450 万 kW，占热电联产总装机容量的 51. 2% 。

2）光伏发电。日本光伏分布式发电应用广泛，不仅用于公园、学校、医院、展览馆等公用设施，还开展了居民住宅屋顶光电的应用示范工程。2006 年底，日本光伏发电累计装机容量达到 201. 7 万 kW，其中户用光伏系统安装量 36 万户，累计装机容量达到 125. 4 万 kW。截至 2009 年底，日本光伏发电装机总量达到 297. 7 万 kW，其中户用光伏系统装机容量占比约 80% 。

（2）日本支持分布式发电的相关政策　日本制定了相关的法令和优惠政策保证该项事业的发展，有条件、有限度地允许这些分布式发电系统上网，通过优惠的环保资金支持分布式发电系统的建设。优惠政策包括以下几点：

1）对城市分布式发电单位进行减税或免税。建成分布式发电的项目第一年可享受 30% 安装成本折旧率或 7% 免税；总投资的 40% ~ 70% 部分可享受低息贷款（每年利率为 2. 3% ）；免除供热设施占地的特别土地保有税和设施有关的事业所税；区域供热工程费用、供热的固定资产税、区域供热用折旧资产税等给予优惠。

2）鼓励银行、财团对分布式发电系统出资、融资。针对区域供热系统需要大规模投资，日本有关金融机构长期施行通融资金、低利息等制度。

3）修订《电力事业法》在内的一系列放宽管制的办法出台，允许非公共事业类的供应商对需求大的用户售电，而在以前，该项售电业务通常被电力公司所垄断。规定新建和改建

30000m^2 以上的建筑物必须纳入到城市分布式能源系统中。

（3）日本分布式能源的发展前景　日本政府在2003年出台的《能源总体规划设计》中系统阐述了发展、普及使用分布式能源燃料电池、热电联产、太阳能发电、风力、生物质能和垃圾发电的目标。其中热电联产的目标是到2010年实现装机1000万kW。

2008年3月，日本经济贸易产业省（METI）预计到2030年日本热电联产装机容量将可能达到1630万kW，接近2006年的2倍。据国际分布式能源联盟（WADE）对日本能源供需前景的预测，到2030年日本分布式发电比重将达到总发电量的20%。

3. 欧盟

欧洲各国主要是以小型分散化为主，其规模一般多为小规模光伏电站。欧盟国家的分布式发电以太阳能、风能、生物质能发电为主。例如德国市场以分布式系统为主，德国分布式发电装机容量约2200万kW，占总装机容量的19.8%，其中太阳能发电量达1500万kW，80%以上为住宅用小型太阳能发电系统，平均容量不到100kW，德国还有300多个10MW以下的沼气和其他生物质能发电站。英国只有5000多万人口，而分布式电站就有1000多座。丹麦分布式发电量超过全部发电量的50%，分散接入低电压配电网的风电总装机容量有300多万kW。

三、我国分布式发电的现状、政策及前景

1. 我国分布式发电的现状

（1）我国分布式发电的必要性

1）由于经济发展水平差距等因素，我国大部分地区农村炊事和取暖用能尚处于落后状态，薪柴等传统方式用能还占一半以上，尚未纳入商品能源体系，偏远地区还有几百万人口没有解决基本用电问题。发展分布式发电是解决农村用能，特别是偏远地区用能的重要选择。

2）按中国的能源分布，西北部是能源产出地区，东南部是能源消费地区，在东南沿海需要大量的电力，资源的不均衡，导致了国内出现“北煤南运，南粮北调”等交通方面的难题。内蒙古、新疆、青海、甘肃、宁夏等西北地区新建起一批规模化的光伏发电站。然而，除了光伏外，西北地区也在发展大型风电，同时煤炭、天然气等就地转化发电也将发展起来，届时大量电力由西向东运输，将极大加重“西电东送”电网的输电压力。另外，长距离电力调运，也会引起运输、变电等成本上涨。我国受到计划经济的影响时间久，在电力发展之初仍以集中化、大型化发展为主，这必然造成光伏电站远离用户，需要通过电网输送的瓶颈。分布式发电规模较小，分散布局、就近利用、清洁高效、区域平衡，是对传统能源生产和利用方式的重大变革。

3）从国家安全考虑，华东、华南等经济发达地区过分依靠“西电东送”将存在安全问题，一旦发生自然灾害或者战争，威胁将会很大。福岛核电泄漏事件、国内风电基地脱网事故的出现，使得分布式能源重要性凸显，因此，因地制宜地加快推进华东、华南等地区小规模、分布式太阳能发电建设，将极大减少对西北地区的电力依赖。分布式发电运行灵活，直接面对用电户，在出现因自然灾害等引发的大电网突发事件时，可以协助保证当地小系统安全供电，减缓电力供应对集中供能系统的过分依赖，提高抵御自然灾害等不测事件的能力。

4）进入新世纪以来，我国经济社会发展提速，工业化、城镇化进程加快，能源消费总

量增长较快，资源环境约束加剧，应对气候变化的压力加大，新时期加快发展分布式发电，是推进能源发展方式转变，构筑稳定经济、清洁、安全的能源供应体系，推进能源生产和利用方式变革，合理控制能源消费总量的重大措施。

（2）经济效益　国家电网公司作出了发展坚强智能电网的部署，智能电网被称为“电网2.0”，与传统电网相比，其看起来更像因特网，在智能电网技术研究中，国家电网公司启动了分布式光伏发电及微网运行控制项目，研究分布式光伏电源对配网的影响，掌握分布式发电、储能接入与微网运行控制技术，积累微网运行经验。智能电网可以接入大量的分布式清洁能源，并整合利用电网的各种信息，进行深入分析和优化。

1）如果我国分布式可再生能源发电量达到现有发电量的5%，即可替代7000万t标准煤，相当于少建设64台单机60万kW大型燃煤机组。加快分布式发电，可大幅度减少燃料运输、能量转换以及输送过程中的能源消费，促进合理控制能源消费总量任务的完成，并相应地提高能源系统整体经济性，降低用电户电费负担及整个经济社会运行的电力成本。一座1MW的分布式沼气电站，以年发电量600万kW·h计算，一年可替代2000t标准煤，因减少输变电损失而相应增加约40万kW·h的电力供应，节能减排效果非常明显，大大减少经济运行的环境成本。

2）发展分布式发电是提高能源利用效率，促进节能减排的必然要求。分布式发电实现了能源的梯级合理综合利用，热、电、冷多联供的能源综合利用效率可达60%～90%，远高于常规燃煤机组的能源利用率。

3）我国风能、太阳能、生物质能等可再生能源资源丰富，具有能量密度低、分布不均匀的特点，在继续推进集中规模化发展的同时，可根据当地资源条件，因地制宜，采取合适的可再生能源发电技术，在工农业企业、工业园区、经济开发区、政府机关和事业单位建筑物、文化体育、医疗、教育、交通枢纽等公共建筑或设施、商场、宾馆、写字楼等大力发展可再生能源分布式发电、BIPV等多种发电形式，形成千家万户开发利用可再生能源的新模式，开辟可再生能源发展的新局面，尽快提高可再生能源在消费中的比重。太阳能屋顶电站不占地，据2009年《中国统计年鉴》，我国现有建筑总面积410.2亿m^2，屋顶面积178亿m^2、南墙面积139亿m^2，合计317亿m^2。据住房和城乡建设部（住建部）人居环境中心测算，实际可利用面积185.1亿m^2。按照1m^2安装60W光伏组件，则可安装11.1亿kW；即使只利用20%的可利用面积，安装量也不少于2亿kW，所发电力不仅可满足屋内基本用电需求，电力传输系统消耗几乎为零；太阳能在用电高峰时段发电，可以最大限度满足电力的需求。不与电网争资源，一个独立的太阳能发电系统只需要建立一个自动切换的开关和电网相关联。

4）在发达地区建立商用的屋顶电站，具有重要的经济价值。在中国一些发达地区，一般商业用电比工业用电价格还要高。如果把国家地级以上城市的商业建筑的屋顶面积算下来的话，可以建2000万kW的光伏系统，用五年来完成，在“十二五”期间每年的市场需求就是4GW，市场发展空间巨大。现在江浙一带工业用电已经达到1.2元/(kW·h)，这个价格对于太阳能光伏发电而言即使没有上网补贴，也还是有利润空间的。如果采用EMC合同管理，让节能公司管理，受益也将十分可观。

（3）减排压力　我国已向国际社会郑重承诺，2020年非化石能源占能源消费总量比重达15%，发展分布式发电是加快可再生能源的发展，完成2020年非化石能源发展国家承诺

目标的重要任务。目前我国能源利用率仅有33%，比发达国家低约10个百分点；我国单位GDP能耗是美国的2.5倍、欧盟的5倍、日本的9倍。由此，我国正面临巨大节能减排压力，而扩大分布式能源开发利用正是突破口之一。

2. 我国分布式发电的政策

（1）财政扶持　加快启动国内光伏市场，国家要从政策上加强引导，2009年和2010年中央财政已安排近100亿元支持了1000多兆瓦金太阳和太阳能光电建筑应用示范项目。财政补贴是启动光伏发电市场最直接、最有效的手段。财政部明确，将对关键设备按中标协议价格给予50%补贴，其他费用按不同项目类型分别按4元/W和6元/W给予定额补贴。示范项目得到财政补贴后，投资仅在8元/W左右，按年满发电1100h测算，项目用电价格在0.8元/（kW·h）左右，净资产收益率就能达到10%以上。特别是在北京、上海、浙江、广东等部分地区，目前工商业峰时电价都在0.9元/（kW·h）以上，光伏发电已有一定优势，财政补贴可以快速降低应用成本。同时，大规模示范及财政补贴也有利于促进科技成果产业化和规模化，随着技术的进步和产业化的推广，目前光伏发电组件价格已由前两年的每瓦20多元下降到10元左右，逆变器由5元/W降到1元/W左右，光伏系统投资由每瓦40多元下降到18元左右。

（2）市场扶持　国家将北京经济技术开发区等13个开发区确定为我国首批“光伏发电集中应用示范区”，一期建设规模达到170MW，力争2012年以后每年不低于1000MW，形成持续稳定、不断扩大的光伏发电应用市场。目前我国有100多个国家级经济技术开发区、高新技术开发区，平均每个开发区面积都在几十平方公里，可安装光伏发电规模约为100MW，如果这些区域都实现规模化应用，仅国家级开发区就可以实现1000万kW装机。设立光伏发电集中应用示范区，无疑为大规模启动光伏产业国内应用提供了广阔的市场，也让以出口为主的企业看到了转战国内市场的机遇。

3. 我国分布式发电的前景

1）全部采用新能源及绿色能源，清洁蓄能技术广泛应用，采用光水结合、光风电容结合，光伏发电最终取代火电、核电，火电、核电这些有限的资源将作为人类和国家战略备用电源而存在。

2）柴油发电及铅酸蓄电池储能等冷热电联供形式，将完全被淘汰。

3）分布式发电在全部电力系统占有30%份额以上。

第二节　分布式发电及光伏发电技术

分布式发电技术含有多种能源形式，但都是在低端并网。分布式发电技术主要是光伏发电技术，其关键技术是电力电子技术、先进光伏发电技术与设备、大规模蓄能技术。

一、分布式发电技术

分布式发电技术包括：

1）小水电发、供、用一体化技术。

2）与建筑相结合的用户侧太阳能光伏发电技术。

3）分散并网型风能、太阳能发电技术。

4）风光储等多种能源互补发电技术。

5）工业余热、余压、废气发电及多联供技术。

6）以农村生物废弃物、畜禽养殖废弃物、有机废水和生活垃圾为原料的汽化、直燃和沼气发电及多联供技术。

7）地热能、潮汐能、海洋能发电及多联供技术。

8）天然气、煤层气发电及多联供技术。

9）配电侧智能电网技术和与大电网相对独立运行的微电网技术。

二、低端并网技术要求

分布式发电都是接入低压配电网，IEEE（美国电气和电子工程师协会）对此制定了技术标准。

IEEE（美国电气和电子工程师协会）Std 929—2000 和 IEEE Std 1547—2003 对分布式发电，即低端并入电网的接入点电压、频率、电压闪变、谐波和功率因数、切出时间、孤岛保护等均有严格的规定。

1. 接入点电压

IEEE Std 1547-2003 规定，并网发电单元不可以调节公共连接点电压（Point of Common Coupling，简称 PCC），光伏逆变器并网电压为电网额定电压的 88% ~110%。我国工频低压配电网的单相额定电压为 220V，因此光伏逆变器并网的 PCC 电压范围为 193 ~242V。超出这个范围，光伏逆变器必须从电网中切除（解列）。对于不同的 PCC 电压范围，切出时间见表 19-1。

表 19-1 电压异常，逆变器切出时间限制

电压范围/(% 额定电压)	切出时间/s	电压范围/(% 额定电压)	切出时间/s
<50	0.16	110 ~120	1
50 ~88	2	>120	0.16

2. 电网频率

光伏逆变器并网频率为电网额定频率的 98.8% ~100.8%。我国工频低压配电网的频率为 50Hz，因此光伏逆变器并网的 PCC 频率范围为 49.4 ~50.4V。超出这个范围，光伏逆变器必须从电网中切除（解列）。对于不同的 PCC 频率范围，切出时间见表 19-2。

表 19-2 频率异常，逆变器切出时间限制

逆变器功率等级	频率范围/Hz	切出时间/s
≤30kW	>50.4	0.16
	<49.4	0.16
>30kW	>50.4	0.16
	<49.8 ~47.5	0.16 ~1
	<47.5	0.16

3. 电压闪变

并网逆变器并入电网时造成的 PCC 电压波动不能超过电网电压的 ±5%。

4. 谐波

并网逆变器并入电网时，并网电流谐波应符合 IEEE Std 519-1992 标准规定，逆变器并网电流谐波限制见表 19-3。

表 19-3　逆变器并网电流谐波限制

谐波次数 h（奇次）	$h<11$	$11<h<17$	$17<h<23$	$23<h<35$	$h>35$	总谐波畸变率（*THD*）
百分比(%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

5. 功率因数

在输出功率超过 10% 额定功率的情况下，光伏系统的功率因数应高于 85%。

三、光伏发电关键技术

分布式发电关键技术主要有电力电子技术、先进光伏发电技术与设备、大规模蓄能技术。

1. 电力电子技术

电力电子技术是以电力、电能为研究对象的电子技术，又称为电力电子学。它主要研究各种电力电子半导体器件，以及由这些电力电子器件构成的各式各样的电路及装置，实现对电能的变换和控制。图 19-3 为电力电子装置的功能。电力电子学是横跨电力、电子和控制三个领域的一门新兴工程技术学科。

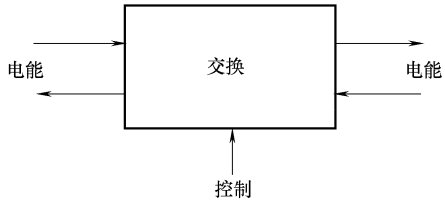


图 19-3　电力电子装置的功能

（1）变换　它既是电子学在电工或强电（高电压、大电流）领域的一个分支，又是电工学在弱电（低电压、小电流）或电子领域的一个分支，或者说是强弱电相结合的新学科。

电有直流（DC）、交流（AC）之分，工程中常常要在直流（DC）和交流（AC）两种电能之间，或者在同种电能之间就一个或多个参数（电压、电流、频率、相位）进行变换，这些变换共有四种基本类型，各通过相应的变流器或变换器来实现。

① 直流电转换成交流电，DC→AC，称为逆变。逆变器（inverter）输出可以是恒频，如不间断供电电源；也可以是变频，如变频器。逆变器常用于各种变频电源、中频感应加热、交流电动机的变频调速、并网型光伏电站等。

② 交流电转换成直流电，AC→DC，称为整流。整流器（rectifier）常用于充电、电镀、电解和直流电动机的速度调节等。

③ 直流电参数转换，DC→DC，称为直流变换。即将恒定直流变成断续脉冲形状，以改变其平均值；或将直流电压幅值变换成另一种固定或可调的直流电压幅值。变流器称为斩波器（chopper）或直流变换器，主要用于直流电压变换、开关电源、直流电动机的牵引、并网型光伏电站等。

④ 交流电参数转换，AC→AC，称为交流变换。交流电压有效值的调节称为交流电压控制，简称交流调压，用于调温、调光、交流电动机的调压调速、并网型光伏电站等；将 50Hz 工频交流电直接转换成其他频率的交流电，称为交交变频，其装置叫做周波变换器，主要用于交流电动机的变频调速。

（2）控制　实现电能转换的控制方式主要有相位控制、通断控制及脉冲宽度控制（PWM）。

2. 先进光伏发电技术与设备

关键技术的突破是今后我国光伏产业推广道路上的重要一环。突破技术瓶颈已成为各方共识。据科技部介绍，我国已经在973、863、科技支撑计划中围绕光伏电池材料、各类光伏电池、电池生产装备及工艺、并网光伏电站及关键装备等方向部署了一系列重大、重点项目，太阳能开发利用技术已被明确列为“十二五”能源领域科技发展重点方向，力争5年内将太阳能发电的成本降低到初步具备与火电等传统能源竞争的水平。

3. 大规模蓄能技术

大规模蓄能技术双电层超级电容器，可以兼具蓄电池，能量密度大、循环寿命长、储能效率高、充放电速度快、高低温性能好、环境友好，具有卓越的储能潜力。

1）超级电容器的充放电效率高达92.5%，所用的MPPT方法具有较好的跟踪速度和精度，系统在光伏发电功率波动和负载功率脉动时，呈现出良好的稳定性。

2）超级电容器蓄电池直接并联储能的等效模型，针对脉动负载、储能系统的性能改善及其影响因素，在有源式混合储能结构中，采用了一种近似恒流放电控制策略，蓄电池只以脉动负载的平均功率输出，放电过程具有明显的优化效果。

3）将超级电容器蓄电池混合储能应用于光伏等分布式发电系统，蓄电池的输出电流峰值远小于负载的脉动电流峰值，可以减少蓄电池组的配置容量，降低安装成本。

4）利用超级电容器的储能能力和并联控制器的变流控制作用，可以减少蓄电池的充放电循环次数，减小放电深度，延长蓄电池的使用寿命，降低运行成本。

5）将超级电容器与系统中的直流母线并联，可以降低源输出阻抗，提高稳定性能及带载能力。

四、光伏发电微型电网（简称微网）技术

为了解决风电、太阳能发电等分布式电源的间歇性、波动性，不能离网运行以及大量分布式能源接入对电网冲击大等问题，可采用微网技术。微网作为分布式发电设备接入和管理的一种有效形式，可以从根本上改变传统的应对负荷增长的方式。

1. 光伏发电微网技术研究

分布式光伏发电及微网运行控制项目是国家电网公司坚强智能电网第二批试点项目之一。在实施过程中，河南公司被选为试点，重点结合河南财政税务高等专科学校光伏发电示范工程开展技术研究。河南省太阳能平均年日照数为2113h，太阳能资源年理论储量每平方米1315kW·h，每年每平方米（m^2/a）地表吸收的太阳能相当于162kg标准煤热量。根据河南省的环境条件，太阳能发电主要以屋顶并网发电为主，接入系统的方式主要为分布式电源接入配电网方式。据预测，河南省总计可用于光伏发电的屋顶面积达20亿m^2，建筑物南立面墙近2.5亿m^2，预计可装机容量超过400万kW。

河南财专位于郑州市郊区，可开展太阳能屋顶利用面积超过4.3万m^2，屋顶开阔平坦，坡度小于3%，且无杂物堆积和其他设备存放，光伏发电装机容量最大峰值可达2000kW，一期项目装机511kW。项目采用分布式发电、储能接入与微网运行控制技术，研究分布式光伏电源对配网规划、网损、潮流、电能质量、继电保护等方面的影响，并将建设200kW·h储能系统和配套微网控制系统。

河南分布式光伏发电及微网运行控制项目，是国内首个完整实现微电网运行状态监控、分布式发电接入微网控制、间歇性能源发电预测、功率分配调度与发电控制、电能平衡和负

载控制的应用平台，为分布式电源发展提供规范化、标准化依据。

项目组在河南财专建立一套微网，供电范围为7栋宿舍楼和学生食堂。河南财专微网中具有相对完备的小型电力系统的基本内容，包括光伏电源、储能电源、用电负荷、控制单元和保护单元等。以光伏、储能和用电负荷作为微网，可以实现并网到离网，离网到并网的平滑过渡。当微网内的光伏发电大于负荷需求时，储能系统将多余光伏发电存储，尽量减少光伏发电向系统的上一层穿透。在用电高峰期，储能系统向微网中的负荷供电，以减少对市电的供电需求；在用电低谷期，储能系统可以自动蓄能充电。储能系统的另一个功能是应对市电停止供应等突发情况，在夜间无光伏发电且出现市电停止供应，这时，储能系统将是保证河南财专学生宿舍照明的关键。该校共有1100间宿舍，每间宿舍照明负荷为40W，总照明负荷约为45kW。应急照明时段按从18～23时计算，再综合考虑其他因素，储能系统需储备200kW·h电能，因此建设200kW·h储能系统完全可以应对上述突发情况。图19-4为教学楼光伏电站。

2. 光伏发电微网实验室

（1）实验室简介　光伏发电微网实验室由国际合作实证研究项目资助，该项目是列入我国政府和日本政府之间的能源科技合作框架的项目之一。2007年9月，由国家发展和改革委员会、浙江省发展和改革委员会以及日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）签订项目基本协定书（Basic Agreement），日本NEDO提供项目建设和实证研究资金，我国提供场地和配套设施，中日双方共同开展项目建设和实证研究。我方承担单位是杭州电子科技大学，日方承担单位是日本清水建设研究所、日本明电舍（株）公司和日本中国电力（株）公司。中日双方就光伏发电微网系统的关键技术开展合作实证研究。



图19-4　教学楼光伏电站

（2）实验系统组成　光伏发电微网实验室是由120kW太阳能光伏发电、120kW柴油机发电、蓄电池储能系统、超级电容（EDLC）补偿系统、电能质量调节器（PQC）、瞬间电压跌落补偿器（DVC）、干扰发生装置和电能供需控制系统（Power Demand & Supply Control System）组成的并网光伏发电微网系统。这是国内第一个光伏发电微型电网实验系统，也是目前国际上唯一的光伏发电比例达50%、电源容量为240kW的实验微型电网，具有国际先进水平，同时具有工程示范性。图19-5为微网结构。

（3）实验项目

1）微网并网运行和独立运行时，供电的稳定性和安全性验证和评价。

2）微网中的供需控制方法研究。

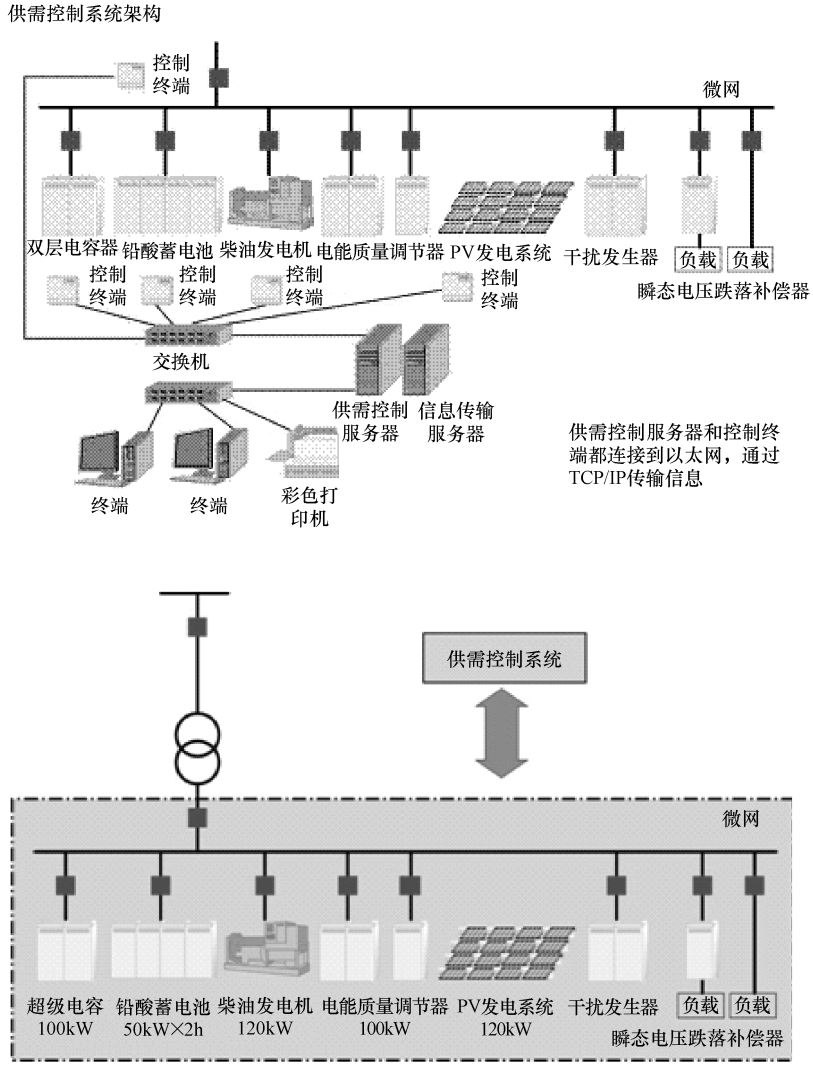


图 19-5　微网结构

3）对瞬时、短周期（数秒时间内）负载变动的追随性能。

4）微网独立运转时，对检测装置的性能实验。

5）最大限度地利用太阳光发电等自然变动能源对配电网电能质量的影响。

6）微网并网运行和微网独立运行，电能供需平衡。

微网整合了分布式发电的优势，降低了分布式发电对电网的冲击和负面影响，提出了一种新的分布式能源组织方式和结构。光伏发电微网系统是以太阳光发电为主要电源，并另需有稳定电源（如微型燃气轮机、大容量蓄能装置等）配合。

3. 分布式光伏发电并网研究

1）国家电网公司及河北省电力公司，组织河北省电力研究院进行“分布式光伏电源接入配电网的规划设计和运行控制技术研究”，对分布式光伏电源的运行特性、对配电网的影响、接纳能力、计量技术、实时监控和信息采集方案、备用电源容量等 12 个专题进行了系

统的研究；研发了可靠性分析、配电网仿真、孤岛检测、广域测量等软硬件，建设了小型屋顶光伏发电系统和实验研究平台；编写了实时监控和信息采集典型方案；制订了分布式光伏电源接入配电网规划设计导则及运行管理规定等。

2）“分布式光伏电源接入配电网的规划设计和运行控制技术研究”项目，由国家电网公司智能电网所属浙江公司承担，系统地建立了分布式光伏电源静态、暂态和可靠性分析等全系列仿真模型，完成了电网消纳光伏电源能力、光伏发电对电网电能质量影响等 10 个方面的专题研究，提出了消弭光伏电源对电网影响的应对法，编制了分布式光伏电源接进配电网典型设计方案、规划设计导则和运行节制导则，标志着分布式光伏发电推广应用实现了重大打破。该项目研究成果已在浙江省 30 多个光伏电源接进配电网的规划设计和运行节制中获得应用，并将在国家财政部、科技部、住房和城乡建设部、国家能源局等四部门确定的首批 13 个光伏发电集中应用示范区中推广。

4. 风电、光伏发电、储能及智能输电“四位一体示范工程”

由国家科技支撑计划和金太阳示范工程重点支持的国家风光储输示范工程（一期），在河北张家口市张北县成功投产。国家风光储输示范工程是由科技部、财政部、国家电网公司和河北省政府于 2009 年实施的重大科技示范工程，由国家电网公司组织实施，旨在解决我国大规模发展新能源面临的技术瓶颈，促进我国新能源技术及产业健康持续发展。一期工程形成了联合发电互补机制及系统集成、全景监测与协调控制、功率预测、源网协调和大规模储能五大关键技术。工程规划建设 500MW 风电场、100MW 光伏发电站和 110MW 储能电站，规划总投资 100 多亿元。一期建设风电 100MW、光伏发电 40MW、储能 20MW，配套建设 1 座 220kV 智能变电站，总占地 2568 亩，总投资约 33 亿元。示范工程重视数据记录、测试工作、管理制度、质量保证体系建设。示范工程以“技术先进性、科技创新性、经济合理性、项目示范性”为总要求，以风光发电控制和储能系统集成技术为重点，加强对风光互补和风光储配比的分析研究，实现新能源的平滑输出、计划跟踪、削峰填谷、调频调压等控制目标，解决新能源大规模并网的技术难题。如在联合控制方面，采用自主研发的联合发电智能全景优化控制系统、风光功率联合预测系统和储能电站监控系统，通过多尺度全天候风光功率预测技术，实现多种运行模式，达到源网友好互动，为风电、光伏发电和储能联合控制及调度提供准确的分析与决策。在风力发电方面，采用许继、金风等国内知名风电厂商产品，小东梁风电场安装 24 台 2MW 双馈风电机组，孟家梁风电场安装 15 台 2.5MW 和 2 台 3MW 永磁直驱风电机组、2 台 1MW 垂直轴永磁风电机组；在光伏发电方面，采用无锡尚德、力诺太阳、福建钧石等国内知名光伏厂商产品，光伏西区采用固定方式布置 28MW 多晶硅组件，光伏东区安装 12MW 多晶硅、单晶硅、非晶薄膜、背接触式组件，跟踪方式涵盖固定式、平单轴、斜单轴和双轴跟踪，成为具有多种比较、多种展示功能的光伏电站，积累多种形式的运行试验数据；在储能技术方面，由比亚迪、中航锂电、浙江万向等多家国内著名电池厂商生产的磷酸铁锂电池组成 14MW 储能系统，首次在国内外实现多种储能系统的统一集成监控、协同配合新能源发电的示范应用。

五、分布式发电技术发展方向

1. 传统配电系统演变

分布式发电具有分散、随机变动等特点，大量分布式电源接入后，原来配电网规划和运行的一些办法就会变化，会对配电系统产生广泛而深远的影响。传统的配电系统被设计成仅

具有分配电能到末端用户的功能，而未来配电系统有望演变成一种功率交换媒体，即它能收集电力并把它们传送到任何地方，同时分配它们。因此将来它可能不是一个配电系统而是一个电力交换系统（Power Delivery System）。传统的配电系统分析方法，如潮流计算、状态估计、可靠性评估、故障分析、供电恢复等，都会因程度不同地受到分布式发电的影响而需要改进和完善。城市大量分散分布建筑光伏电源组成的光伏微电网系统“共网接入”技术推广，实现光伏发电在建筑中自发自用，又可适应目前的电网条件，不影响电网安全。对于光伏发电与建筑的合理融合，各地住房城乡建设部门将光电建筑应用设计列入施工图设计专项审查内容。

2. 并网标准先进

光伏发电并网易产生谐波、三相电流不平衡，输出功率不确定性易造成电网电压波动、闪变，因此需要先进的并网技术标准。2005 年发布的《光伏系统并网技术要求》为推荐性国家标准，《光伏发电站接入电力系统技术规定》为指导性国家标准，且已超使用期限。2009 年，国家电网公司发布了《光伏电站接入电网技术规定》（试行），但该标准对光伏电站分类较为粗放，缺少有针对性的细化条款。千瓦级小型屋顶并网光伏发电系统是我国分布式光伏发电应用的重要发展方向，但该标准并没有对接入 220V 居民电压的技术要求作出相应规定，新的标准将有完善的规定。

3. 新的技术和工艺涌现

随着组件价格的下降，行业也着眼于降低组件安装成本，并出现了一些新的技术和工艺。例如，在德国和美国设有办事处的泽普太阳能，提供技术设计以减少安装成本。地面安装或屋顶安装的第一步，几乎无一例外是安置铝轨，这消耗了大量的时间和自然资源。泽普摒弃了传统的太阳电池板安装使用的铝轨，而是用无轨的、面板安装方式安装电池板，将住宅安装成本削减了 30% ~50%。这种无轨系统消除了在安装时所花费的时间，也降低了铝轨运输成本。也有公司放弃了传统的太阳能组件，直接将太阳能融入建筑构件，比如屋顶瓦，还有澳大利亚 Dyesol 的智能窗，这些技术在未来 5 ~10 年，将变得强大和普遍，追求能源自给的大厦业主对这一趋势的日益关注，将全面推动分布式发电的技术。

第三节　分布式发电管理

国家能源局在广泛征求意见的基础上，制定了《分布式发电管理办法》，将通过资金补贴、多余电量向电网出售、赋予投资方电网设施产权等措施刺激分布式能源的发展。这标志着发展分布式能源最大的障碍将被扫清。《分布式发电管理办法》还针对光伏发电并网缺乏管理规定、技术标准不完善等问题制定了管理办法。

1. 接入电网

国家能源局会同有关部门制定了分布式发电接入低压配电网，以及微电网接入更高等级电网的技术标准、规范和相关管理办法。电网企业应为发电提供便捷、及时、高效的接入电网服务，与项目单位或个人经营者签订并网协议和购售电合同。

允许分布式发电或微电网投资方并网，并拥有接入点用户侧系统设施产权。省级地方行政主管部门应建立分布式发电并网争议解决机制，切实保障分布式发电投资企业、电力用户和电网企业的权益，做好对电网企业公平、开放接入的监管。

2. 运行管理

1）分布式发电有关协议、合同的执行及多余上网电量的收购、调剂等事项，由省级地方行政主管部门负责协调，或委托下设部门负责协调。

2）分布式发电优先自发自用，多余电力上网，电网调剂余缺，双向计量电量，净电量结算电费，并可考虑峰谷电价因素。结算周期在合同中商定，一般不超过3个月。

3）省级地方行政主管部门负责组织、建立分布式发电的监测、统计、信息交换和电力调度设施。

4）发电项目单位和个人经营者，要建立健全运行管理规章制度，保障项目安全可靠运行。

5）经营微电网及使用自发电力设施的用户，应负责在并网接入点安装双向计量装置，满足净电量结算需要。运行过程中应保存完整能量输出和燃料消耗计量数据。

6）拥有分布式发电项目的单位和个人经营者，应接受能源主管部门和电力监管部门的监督和检查，如实提供包括原始数据在内的运行记录。

7）分布式发电应满足有关发电、供电质量要求，运行管理应满足有关技术、管理规定、规程和规范要求。

8）分布式发电在紧急情况下应接受并服从电力运行管理机构的应急调度；电网及电力运行管理机构应保障分布式发电和微电网的正常运行。

3. 政策保障及措施

1）现阶段国家对分布式发电资金的补贴范围为风力发电、太阳能发电、生物质（含垃圾）直燃或汽化发电、沼气发电、地热发电、潮汐发电等。

2）国家对分布式新能源发电的资金补贴，采取单位发电量补贴或建设资金补贴等方式中的一种方式。国家补贴资金的上限通过竞争方式确定。鼓励分布式新能源发电通过采用先进技术和高效率管理、降低成本、增加盈利。

3）对微电网经营企业及电力用户自发用电量部分，国家资金对单位发电量补贴的起点为电力用户实际支付的销售电价水平。对向更高压等级电网供电的多余电量上网部分，国家资金对单位发电量补贴的起点为当地脱硫煤电标杆上网电价。

4）对农村、牧区、偏远地区和海岛的分布式发电及分布式发电的科学研究、标准制定和示范工程，国家予以资金支持。

5）中央和地方财政、税务等部门根据各地实际情况，制定支持分布式发电的财政等政策。

6）省级有关部门可制定支持分布式发电的其他政策措施。

第四节　分布式发电存在的问题

1. 我国天然气要做分布式发电相当困难

1）我国油田、油气田数量有限，天然气发电比烧煤贵。

2）烧天然气比较干净，比烧煤干净，可是烧天然气的分布式发电建在城市里面，有一个大烟囱冒气，会增加污染的排放。另外，北京居民楼里面，超过压力的天然气不能进库。

所以我国天然气要做分布式发电相当困难。

2. 屋顶问题

我国不同于美国，美国每家都有一个房顶，在自己家里建一个太阳能光伏，很好建，也很好核算。但我国一栋高楼几十户人家，谁来装，谁做业主，在高楼安了谁用，白天家里没有人，不用电，电如何出售。这些具体细节都制约着分布式发电的发展。

3. 表计问题

表计是双向流动，而且要分时段，如果屋顶装了太阳能，大量表计要全部换掉。

4. 效率问题

理论上效率可以超过 80%，实际上只能超过 60%。

5. 城市新的环保问题

如果分布式发电都放在城市里面，城市就很拥挤，城市温度会提高。发展分布式能源，已成为国家能源局、企业、社会的共识，家庭和企业屋顶的分布式光伏发电，将成为太阳能产业的基石，应用于我国各个角落，哪里有光，哪里就有太阳能，分布式光伏市场份额将会远大于集中式光伏市场，我国经历十年的分布式能源将迎来爆发式扩展，一个大规模利用太阳能的时代已经开始。

附　　录

附录 A　太阳电池标准

一、国家标准

我国的光伏发电产业经过 20 多年的发展，已经初步形成了相对系统的并网光伏标准体系（GB：国家标准，SJ：中国电子工业标准，GB/T：推荐性国家标准，GB/Z：指导性国家标准）。

1. GB 6495—1986《地面用太阳电池电性能测试方法》（已作废）

2. GB 9535—1988《地面用硅太阳电池组件环境试验方法》（已作废）

3. GB 11011—1989《非晶硅太阳电池电性能测试的一般规定》

4. GB 12632—1990《单晶硅太阳电池总规范 》（已作废）

5. GB 50364—2005《民用建筑太阳能热水系统应用技术规范》

6. GB/T 2296—2001《太阳电池型号命名方法》

7. GB/T 2297—1989《太阳光伏能源系统术语》

8. GB/T 5137. 4—2001《汽车安全玻璃太阳能透射比测定方法》

9. GB/T 2680—1994《建筑玻璃可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》

10. GB/T 6492—1986《航天用标准太阳电池》

11. GB/T 6494—1986《航天用太阳电池电性能测试方法》

12. GB/T 6495. 1—1996《光伏器件　第 1 部分：光伏电流—电压特性的测量》

13. GB/T 6495. 2—1996《光伏器件　第 2 部分：标准太阳电池的要求》

14. GB/T 6495. 3—1996《光伏器件　第 3 部分：地面用光伏器件的测量原理及标准光谱辐照度数据》

15. GB/T 6495. 4—1996《晶体硅光伏器件的Ⅰ-Ⅴ实测特性的温度和辐照度修正方法》

16. GB/T 6495. 5—1997《光伏器件　第 5 部分：用开路电压法确定光伏（PV）器件的等效电池温度（ECT)》

17. GB/T 6495. 7—2006《光伏器件　第 7 部分：光伏器件测量过程中引起的光谱失配误差的计算》（等同采用 IEC 60904-7：1998）

18. GB/T 6495. 8—2002《光伏器件　第 8 部分：光伏器件光谱响应的测量》（等同采用 IEC 60904-8：1998）

19. GB/T 6495. 9—2006《光伏器件　第 9 部分：太阳模拟器性能要求》（等同采用 IEC 60904-9：1995）

20. GB/T 6497—1986《地面用太阳电池标定的一般规定》

21. GB/T 9535—1998《地面用晶体硅光伏组件-设计鉴定和定型》（该标准等效采用 IEC

61215（1993），对 IEC 标准中错误已经前后矛盾的章节进行了修改，目前 IEC/TC82 正在对该标准进行修改，对原标准中的一些试验方法进行了相应的增删，并且更改了一些参数。

22. GB 11010—1989《光谱标准太阳电池》

23. GB 11012—1989《太阳电池电性能测试设备检验方法》（已作废）

24. GB/T 12637—1990《太阳模拟器通用规范》

在该标准中规定的 AM1.5 太阳模拟器已经被新的国家标准（等同采用 IEC 904—0）替代，AM0 主要用于空间太阳电池的测量，在标准复审中建议应制定一个新标准或制定相应的 GJB。

25. GB/T 12936.1—1991《太阳能热利用术语　第 1 部分》（已作废）

26. GB/T 12936.2—1991《太阳能热利用术语　第 2 部分》（已作废）

27. GB/T 13877.3—2003《农林拖拉机和自走式机械封闭驾驶室　第 3 部分：太阳能加热系统效率的确定》

28. GB/T 14007—1992《陆地用太阳电池组件总规范》（已作废）

29. GB/T 14008—1992《海上用太阳电池组件总规范》（已作废）

30. GB/T 14009—1992《太阳电池组件参数测量方法》（已作废）

31. GB/T 17683.1—1999《太阳能在地面不同接收条件下的太阳光谱辐照度标准　第 1 部分：大气质量 1.5 的法向直接日射辐照度和半球向日射辐照度》

32. GB/T 18210—2000《晶体硅光伏（PV）方阵Ⅰ-Ⅴ特性的现场测量》（等同采用 IEC 61829：1995）

33. GB/T 18479—2001《地面用光伏（PV）发电系统　概述和导则》（等同采用 IEC 61277：1995）

34. GB/T 18911—2002《地面用薄膜光伏组件　设计鉴定和定型》（等同采用 IEC 61646：1996）

35. GB/T 18912—2002《光伏组件盐雾腐蚀试验》

36. GB/T 19813—2005《太阳能突起路标》

37. GB/T 19064—2003《家用太阳能光伏电源系统技术条件和试验方法》

38. GB/T 19393—2003《直接耦合光伏（PV）扬水系统的评估》（等同采用 IEC 61702：1995）

39. GB/T 19394—2003《光伏（PV）组件紫外试验》（等同采用 IEC 61345：1998）

40. GB/T 19939—2005《光伏系统并网技术要求》

41. GB/T 20046—2006《光伏（PV）系统电网接口特性》

42. GB/T 20047.1—2006《光伏（PV）组件安全鉴定　第 1 部分：结构要求》

43. GB/T 20321.1—2006《离网型风能、太阳能发电系统用逆变器　第 1 部分：技术条件》

44. GB/T 20513—2006《光伏系统性能监测　测量、数据交换和分析导则》

45. GB/T 20514—2006《光伏系统功率调节器效率测量程序》

46. GB/Z 19964—2005《光伏发电站接入电力系统技术规定》

47. SJ/T 10460—1993《太阳光伏能源系统图用图形符号》

48. SJ/T 11209—1999《光伏器件　第 6 部分：标准太阳电池组件的要求》

49. SJ 2197—1982《地面用标准硅太阳电池的标定》（已作废）

50. SJ 2196—1982《地面用硅太阳电池电性能测试方法》（已作废）

51. SJ/T 9550.29—1993《地面用晶体硅太阳电池单体质量分等标准》（已作废）

52. SJ/T 9550.30—1993《地面用晶体硅太阳电池组件质量分等标准》（已作废）

53. SJ/T 10698—1996《非晶硅标准太阳电池》（已作废）

54. SJ/T 11061—1996《太阳电池电性能测试设备检验方法》

55. SJ/T 10459—1993《太阳电池温度系数测试方法》（已作废）

56. SJ/T 11127—1997《光伏（PV）发电系统的过电压保护—导则》（等同采用 IEC 61173：1992）（已作废）

57. SJ/T 11209—1999《光伏器件　第 6 部分：标准太阳电池组件的要求》（等同采用 IEC 60904-6：1994）

二、国际标准

（一）国际电工委员会（IEC）标准

为与国际检测标准接轨，同时也为我国光伏产品早日走向国际市场，质量检测中心完全采用国际电工委员会 IEC 标准进行各种校准和检测。采用标准部分摘录如下：

1. IEC 60364-7-712：2002　建筑物电气装置第 7-712 部分

2. IEC 60891：1987　晶体硅光伏器件的Ⅰ-Ⅴ实测特性的温度和辐照度修正方法（GB/T 6495.4—1996）

3. IEC 60904-1：1987　光伏电流-电压特性的测量（GB/T 6495.1—1996）

4. IEC 60904-2：1989　光伏器件　第 2 部分：标准太阳电池的要求（GB/T 6495.2—1996）

5. IEC 60904-2AMD 1：1998　光伏器件　第 2 部分：标准太阳电池的要求（修订件 1）

6. IEC 60904-3：1989　光伏器件　第 3 部分：地面用光伏器件的测量原理及标准光谱辐照度数据（GB/T 6495.3—1996）

7. IEC 60904-4：2009　光伏器件　第 4 部分：标准太阳器件—建立校准跟踪能力的程序

8. IEC 60904-5：2011　光伏器件　第 5 部分：用开路电压法测定光伏器件的等效电池温度

9. IEC 60904-6：1994　光伏器件　第 6 部分：标准太阳能量参数要求

10. IEC 60904-6AMD 1：1998　光伏器件　第 6 部分：标准太阳能量参数要求（修订件 1）

11. IEC 60904-7：2008　光伏器件　第 7 部分：光伏器件测量用光谱失配修正的计算

12. IEC 60904-8：1998　光伏器件　第 8 部分：光伏器件光谱响应的测量

13. IEC 60904-9：2007　光伏器件　第 9 部分：太阳模拟器的性能要求

14. IEC 60904-10：1998　光伏器件　第 10 部分：线性测量方法

15. IEC 61173：1992　光伏（PV）发电系统的过电压保护导则

16. IEC 61194：1992　独立光伏系统的特性参数

17. IEC 61215：1993　地面用晶体硅光伏组件　设计鉴定和定型（GB/T 9535—1998）

18. IEC 61277：1995　地面用光伏（PV）发电系统—概述及导则

19. IEC 61345：1998　光伏组件紫外试验

20. IEC 61646：1996 地面用薄膜光伏组件 设计鉴定和定型
21. IEC 61683：1999 光伏系统 功率调节器 效率测量程序
22. IEC 61701：1995 光伏组件盐雾腐蚀试验
23. IEC 61702：1995 直接耦合光伏扬水系统的评估
24. IEC 61721：1995 光伏组件对意外碰撞的承受能力
25. IEC 61724：1998 光伏系统性能监测 测量、数据交换和分析指南
26. IEC 61725：1997 日太阳辐射分析表达式
27. IEC 61727：2004 光伏（PV）系统—电网接口的特性
28. IEC 61730-1：2004 光伏系统安全鉴定—第一部分结构要求
29. IEC 61730-2：2004 光伏系统安全鉴定—第二部分测试要求
30. IEC 61829：1995 晶体硅光伏方阵Ⅰ-Ⅴ特性的实地测量
31. IEC 61836：1997 太阳光伏能量系统术语和符号
32. IEC 61853 地面光伏组件性能测试和能量额定
33. IEC 62093：2005 BOS 部件—环境可靠性试验—设计鉴定和定型
34. IEC 62108 聚光光伏接收器和组件—设计鉴定和定型
35. IEC 62109 用于光伏电源系统的静态逆变器和充电控制器的电安全
36. IEC 62111：1999 在偏远地区分散电气化中可重复使用的能源使用规范
37. IEC 62116 试验步骤—并网光伏发电系统功率调节器的隔离保护测量
38. IEC 62116：2008 并网光伏逆变器防孤岛测试标准
39. IEC 62124 独立光伏系统—设计检验
40. IEC 62145 单晶硅地面组件—空白详细规范
41. IEC 62234 附设于建筑物与电网接驳光伏系统安全指引
42. IEC 62253 直接耦合光伏扬水系统—设计鉴定和定型申请
43. IEC 62257-1 偏远地区电气化的小型再生能源系统和混合系统的建议—偏远地区电气化概述
44. IEC 62257-2 偏远地区电气化的小型再生能源系统和混合系统的建议—对电气系统分布的要求
45. IEC 62257-3 偏远地区电气化的小型再生能源系统和混合系统的建议—发展计划和管理
46. PNW 82-304 Ed. 1.0 光伏组件安全条件 第 1 部分：建设施工要求
47. PNW 82-306 Ed. 1.0 光伏组件安全条件 第 2 部分：测试要求
48. PNW 82-314 Ed. 1.0 建立光伏相关设备校准回溯的程序
49. PWI 82-1 Ed. 1.0 光电存储系统

（二）美国材料与试验协会（ASTM）标准

1. ASTM E 424-1971 薄板材料的太阳能传播和反射的试验方法 Test Methods for Solar Energy Transmittance and Reflectance (Terrestrial) of Sheet Materials
2. ASTM E 490a-2000 标准太阳能常数和气团起始阳光能光谱辐照表 Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables
3. ASTM E 683-1991 一家和两家住房用太阳能空间加热系统的安装和维护 Installation

and Service of Solar Space Heating Systems for One-and Two-Family Dwellings

4. ASTM E 712-1980　太阳能加热和制冷系统中贮存液体用金属容器材料的实验室遮蔽 Laboratory Screening of Metallic Containment Materials for Use with Liquids in Solar Heating and Cooling Systems

5. ASTM E 744-1985　加热设备用太阳能吸收材料的评定 Evaluating Solar Absorptive Materials for Thermal Applications

6. ASTM E 745-1980　太阳能加热和制冷系统中用传热液体的金属容器材料的腐蚀模拟维护试验 Simulated Service Testing for Corrosion of Metallic Containment Materials for Use with Heat-Transfer Fluids in Solar Heating and Cooling Systems

7. ASTM E 772-1987　有关太阳能转换的标准术语（Standard Terminology Relating to Solar Energy Conversion）

8. ASTM E 781-1986　暴露在有盖板的太阳能收集器中模拟滞流的条件下太阳能内存材料的吸收性评定 Evaluating Absorptive Solar Receiver Materials When Exposed to Conditions Simulating Stagnation in Solar Collectors with Cover Plates

9. ASTM E 782-1995　在模拟操作模式下暴露于自然气候中的太阳能收集器覆盖材料的标准实施规程 Standard Practice for Exposure of Cover Materials for Solar Collectors to Natural Weathering Under Conditions Simulating Operational Mode

10. ASTM E 816-1995　校准参考太阳热量计及现场热量计的标准方法 Standard test method for calibration of secondary reference pyrheliometers and pyrheliometers for field use

11. ASTM E 824-1994　对参考辐射计及现场辐射计校准的转换方法 Standard test method for transfer of calibration from reference to field radiometers

12. ASTM E 822-1992　用发射冰球法测定太阳能收集器覆盖材料对冰雹冲击抗力的标准实施规程 Standard Practice for Determining Resistance of Solar Collector Covers to Hail by Impact With Propelled Ice Balls

13. ASTM E 823-1981　太阳能收集器非操作暴露和检验 Nonoperational Exposure and Inspection of a Solar Collector

14. ASTM E 861-1994　太阳能收集器用绝热材料评定的标准实施规程 Standard Practice for Evaluating Thermal Insulation Materials for Use in Solar Collectors

15. ASTM E 881-1992　在模拟滞留模式下暴露于自然气候下的太阳能收集器挡盖材料的标准实施规程 Standard Practice for Exposure of Solar Collector Cover Materials to Natural Weathering Under Conditions Simulating Stagnation Mode

16. ASTM E 904-1987　太阳能收集器用全天热性能数据的形成 Generating All-Day Thermal Performance Data for Solar Collectors

17. ASTM E 905-1987　追踪强化太阳能收集器热性能的试验方法 Test Method for Determining Thermal Performance of Tracking Concentrating Solar Collectors

18. ASTM E 913-1982（1999）　通过明暗处理校准带垂直轴的日射强度计的标准方法 Standard method for calibration of reference pyranometers with axis vertical by the shading method

19. ASTM E 927-1991（1997）　地面光伏测试时对日光模拟的标准规范 Standard specification for solar simulation for terrestrial photovoltaic testing

20. ASTM E 941-1983（1999） 通过明暗处理校准带倾斜轴的日射强度计的标准方法 Standard test method for calibration of reference pyranometers with axis tilted by the shading method

21. ASTM E 948-1995（2001） 模拟太阳光下采用参考电池测定光伏电池电性能的标准试验方法 Standard test method for electrical performance of photovoltaic cells using reference cells under simulated sunlight

22. ASTM E 971-1988 材料对太阳能辐射的光度透射比及反射比计算的标准实施规程 Standard Practice for Calculation of Photometric Transmittance and Reflectance of Materials to Solar Radiation

23. ASTM E 972-1996 用阳光对薄板材料的太阳能光度透射比的测试方法 Standard Test Method for Solar Photometric Transmittance of Sheet Materials Using Sunlight

24. ASTM E 973-2002 光伏装置与光伏标准电池之间光谱失配参数的标准试验方法 Standard test method for determination of the spectral mismatch parameter between a photovoltaic device and a photovoltaic reference cell

25. ASTM E 973M-1996 光伏装置和光伏标准电池间光谱错配参数参订的标准试验方法 Standard test method for determination of the spectral mismatch parameter between a photovoltaic device and a photovoltaic reference cell [metric]

26. ASTM E 1021-1995（2001） 光伏电池光谱响应的标准测试方法 Standard test method for measuring spectral response of photovoltaic cells

27. ASTM E 1036-2002 使用基准电池测量非聚光是地面光伏组件和阵列电性能的标准测试方法 Standard test method for electrical performance of nonconcentrator terrestrial photovoltaic modules and arrays using reference cells

28. ASTM E 1036M-96e2 用标准电池测定非聚能地面光伏电池组件及其各种阵列（固体电路）电气性能的标准试验方法 Standard test method for electrical performance of nonconcentrator terrestrial photovoltaic modules and arrays using reference cells

29. ASTM E 1038-1998 通过推动冰球法撞击测定光伏电池组件抗冰雹能力的试验方法 Standard test method for determining resistance of photovoltaic modules to hail by impact with propelled ice balls

30. ASTM E 1039-1999 球面辐射下非聚能硅光伏基准电池的标准校准测试方法 Standard test method for calibration of silicon non-concentrator photovoltaic primary reference cells under global irradiation

31. ASTM E 1040-1998 非聚能地面光伏标准电池的物理特性 Standard specification for physical characteristics of nonconcentrator terresrial photovoltaic reference cells

32. ASTM E 1056-1985 一家和两家住房用太阳能家用热水设备的安装和维护 Installation and Service of Solar Domestic Water Heating Systems for One-and Two-Family Dwellings

33. ASTM E 1084-1986 用阳光测试薄板材料的太阳能传递性（地面上）的试验方法 Test Method for Solar Transmittance (Terrestrial) of Sheet Materials Using Sunlight

34. ASTM E 1089-1986 均匀的静气压差下平板太阳能收集器的透水性的试验方法 Test Method for Water Penetration of Flat Plate Solar Collectors by Uniform Static Air Pressure Difference

35. ASTM E 1125-1999 用平面光谱法校准初级非聚能式的地面光电基准电池的标准试

验方法 Standard test method for calibration of Primary Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Reference Cells Using a Tabular Spectrum

36. ASTM E 1143-1999　根据测试参数测定光伏设备参数线性度的测试方法 Standard test method for determining the linearity of a photovoltaic device parameter with respect to a test parameter

37. ASTM E 1160-1987　太阳能家用热水系统的现场检查和操作验证 On-Site Inspection and Verification of Operation of Solar Domestic Hot Water Systems

38. ASTM E 1171-2001　交变温度和湿度环境下光伏组件的标准测试方法 Standard test method for photovoltaic modules in cyclic temperature and humidity environments

39. ASTM E 1175-1987　用大直径积分球测定材料的太阳能或光反射性、透明性和吸收性的试验方法 Test Method for Determining Solar or Photopic Reflectance, Transmittance and Absorptance of Materials Using a Large Diameter Integrating Sphere

40. ASTM E 1328-2003　与光电太阳能转换相关的标准术语 Standard Terminology Relating to Photovoltaic Solar Energy Conversion

41. ASTM E 1328-1999　太阳能和光伏转换的标准术语 Standard terminology relating to photovoltaic solar energy conversion

42. ASTM E 1362-1999　非聚能式的辅助参考光伏电池的标准校准方法 Standard test method for calibration of Non-Concentrator Photovoltaic Secondary Reference Cells

43. ASTM E 1462-2000　光伏组件绝缘的完整性和地面通路连续性的标准测试方法 Standard test method for insulation integrity and ground path continuity of photovoltaic modules

44. ASTM E 1524-1998　海洋环境下盐水对光伏组件的侵蚀和沉浸的标准测试方法 Standard test method for saltwater immersion and corrosion testing of photovoltaic modules for marine environments

45. ASTM E 1596-1999　太阳辐射对光伏组件侵蚀的标准测试方法 Standard test method for solar radiation weathering of photovoltaic modules

46. ASTM E 1597-1999　对海洋环境下盐水对光伏组件的沉浸及温度测试的标准测试方法 Standard test method for saltwater pressure immersion and temperature testing of photovoltaic modules for marine environments

47. ASTM E 1799-2002　目测光伏组件的标准方法 Standard practice for visual inspections of photovoltaic modules

48. ASTM E 1802-2001　光伏组件隔湿性能的标准测试方法 Standard test method for wet insulation integrity testing of photovoltaic modules

49. ASTM E 1830-2001　测定光伏组件整体力学性能的标准方法 Standard test method for determining mechanical integrity of photovoltaic modules

50. ASTM E 2236-2002　测定非聚光式多结光电单元和模块的电性能和光谱响应的试验方法 Standard test method for measurement of electrical performance and spectral response of non-concentrator multijunction photovoltaic cells and modules

51. ASTM E 2047-1999　光伏阵列的湿绝缘整体性试验的试验方法 Standard test method for wet insulation integrity testing of photovoltaic arrays

52. ASTM D 3667-1985 平板太阳能集热器用橡胶密封件 Rubber Seals Used in Flat-Plate Solar Collectors

53. ASTM D 3771-2003 聚集型太阳能加热器用橡胶密封件的标准规范 Standard Specification for Rubber Seals Used in Concentrating Solar Collectors

54. ASTM D 3832-1979 太阳能系统中同液体接触的橡胶密封件规格 Rubber Seals Contacting Liquids in Solar Energy Systems

55. ASTM D 3903-2003 太阳能系统的热空气传递用橡胶密封件的标准规范 Standard Specification for Rubber Seals Used in Air-Heat Transport of Solar Energy Systems

56. ASTM D 3952-1987 太阳能系统用橡胶软管 Rubber Hose Used in Solar Energy Systems

57. ASTM G 113-2001 自然和人工气候条件下对非金属测试的标准术语 Standard terminology relating to natural and artificial weathering tests of nonmetallic materials

58. ASTM G 130-1995 使用光谱辐射计校准窄带和宽带紫外辐射计的标准试验方法 Standard test method for calibration of narrow-and broad-band ultraviolet radiometers using a spectroradiometer

59. ASTM G 138-1996 用标准辐射源校准分光辐射谱仪的标准试验方法 Standard test method for calibration of a spectroradiometer using a standard source of irradiance

60. ASTM G 159-1998 垂直半球的 37°倾斜面在 1.5 大气质量中的辐照度参照表格 Standard tables for references solar spectral irradiance at air mass1.5: direct normal and hemispherical for a 37° tilted surface

（三）电气和电子工程师协会（IEEE）标准

1. IEEE Std 929-2000 光伏系统与电网的接口 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic（PV）systems

2. IEEE Std 937-2000 光伏系统用铅酸电池的安装与维护方法 IEEE recommended practice for installation and maintenance of lead-acid batteries for photovoltaic（PV）systems

3. IEEE Std 1013-2000 光伏系统用铅酸电池的容量估算方法 IEEE recommended practice for sizing lead-acid batteries for photovoltaic（PV）systems

4. IEEE Std 1144-1996 光伏系统用镍镉电池的容量估算方法 IEEE recommended practice for sizing nickel-cadmium batteries for photovoltaic（PV）systems

5. IEEE Std 1145-1990 光伏系统用镍镉电池的安装与维护方法 IEEE recommended practice for installation and maintenance of nickel-cadmium batteries for photovoltaic（PV）systems

6. IEEE Std 1262-1995 光伏组件的测试认证规范 IEEE recommended practice for qualification of photovoltaic（PV）modules

7. IEEE Std 1373-1999 并网光伏系统测试方法和规程

8. IEEE Std 1374-1998 地面光伏系统安全导则 IEEE guide for terrestrial photovoltaic power system safety

9. IEEE Std 1513-2001 聚光式光伏接收器部件及组件的鉴定方法 IEEE recommended practice for qualification of concentrator photovoltaic（PV）receiver sections and modules

10. IEEE 1547-2003 分布式电源并网接口标准

（四）欧洲标准草案

1. prEN 50312-1：1999 家庭太阳能系统　第 1 部分：安全测试要求及程序 Photovoltaic systems-Solar home systems-Part 1：Safety-Test requirements and procedures

2. prEN 50312-2：1999　家庭太阳能系统　第 2 部分：性能测试要求及程序 Photovoltaic systems-Solar home systems-Part 2：Performance-Test requirements and procedures

3. prEN 50313-1：1999 太阳能组件　第 1 部分：安全测试要求及程序 Photovoltaic systems-Solar modules-Part 1：Safety-Test requirements and procedures

4. prEN 50313-2：1999　太阳能组件　第 2 部分：性能测试要求及程序 Photovoltaic systems-Solar modules-Part 2：Performance-Test requirements and procedures

5. prEN 50314-1：1999　充电控制器　第 1 部分：安全测试要求及程序 Photovoltaic systems-Charge regulators-Part 1：Safety-Test requirements and procedures

6. prEN 50314-2：1999　充电控制器　第 2 部分：电磁兼容性测试要求及程序 Photovoltaic systems-Charge regulators-Part 2：EMC-Test requirements and procedures

7. prEN 50314-3：1999　充电控制器　第 3 部分：性能测试要求及程序 Photovoltaic systems-Charge regulators-Part 3：Performance-Test requirements and procedures

8. prEN 50315-1：1999　光伏系统用蓄能器　第 1 部分：安全测试要求及程序 Accumulators for use in photovoltaic systems-Part 1：Safety-Test requirements and procedures

9. prEN 50315-2：1999 光伏系统用蓄能器　第 2 部分：性能测试要求及程序 Accumulators for use in photovoltaic systems-Part 2：Performance-Test requirements and procedures

10. prEN 50316-1：1999　光伏照明系统　第 1 部分：安全测试要求及程序 Photovoltaic lighting systems-Part 1：Safety-Test requirements and procedures

11. prEN 50316-2：1999 光伏照明系统　第 2 部分：电磁兼容性测试要求及程序 Photovoltaic lighting systems-Part 2：EMC-Test requirements and procedures

12. prEN 50316-3：1999　光伏照明系统　第 3 部分：性能测试要求及程序 Photovoltaic lighting systems-Part 3：Performance-Test requirements and procedures

13. prEN 50322-1：1999　光伏系统　第 1 部分：光伏驱动泵系统电磁兼容性要求 Photovoltaic systems-Part 1：Electromagnetic compatibility（EMC）-Requirements for Photovoltaic pumping systems

14. prEN 50330-1：1999　光电半导体转换器　第 1 部分：PV 线换向转换器的实用交互式故障自动保护接口　设计质量与型式 Photovoltaic semiconductor convertors-Part1：Utility interactive fail safe protective interface for PV-line commutated converters-Design qualification and type approval

15. prEN 50331-1：1999 建筑光伏系统　第 1 部分：安全要求 Photovoltaic systems in buildings-Part 1：Safety requirements

16. prEN 50380：2001 光伏组件的铭牌和数据表 Datasheet and nameplate information for Photovoltaic modules

（五）欧盟标准

1. EN 12975-1-2000　太阳能系统及构件太阳能收集器　第 1 部分：一般要求 Thermal solar systems and components-Solar collectors-Part 1：General requirements

2. EN 12975-2-2001 太阳能系统及构件 太阳能收集器 第2部分：试验方法（Thermal solar systems and components-Solar collectors-Part 2：Test methods）

3. EN 12976-1-2000 太阳能系统及构件 工厂预制系统 第1部分：一般要求（Thermal solar systems and components-Factory made systems-Part 1：General requirements）

4. EN 12976-2-2000 太阳能系统及构件 工厂预制系统 第2部分：试验方法（Thermal solar systems and components-Factory made systems-Part 2：Test methods ）

5. EN 60904-2-1993 + A1-1998 光伏器件 第2部分：基准太阳电池的要求（Photovoltaic devices-Part 2：requirements for reference solar cells）［IEC 60904-2：1989］

6. EN ISO 9488-1999 太阳能词汇（Solar energy-Vocabulary）［ISO 9488：1999］

7. ENV 12977-1-2001 太阳能系统及构件 定制系统 第1部分：一般要求（Thermal solar systems and components-Custom built systems-Part 1：General requirements）

8. ENV 12977-2-2001 太阳能系统及构件 定制系统 第2部分：试验方法（Thermal solar systems and components-Custom built systems-Part 2：Test methods）

9. ENV 12977-3-2001 太阳能系统及构件 定制系统 第3部分：太阳能供暖系统用内存性能（Thermal solar systems and components-Custom built systems-Part 3：Performance characterisation of stores for solar heating systems）

（六）英国标准

1. BS 5918-1989 家用热水太阳能加热系统的实用规程（Code of practice for solar heating systems for domestic hot water）

2. BS 6785-1986 游泳池用太阳能加热装置实用规程（Code of practice for solar heating systems for swimming pools）

3. BS 6912-22. 6-1996 土方机械安全 第22部分：操作者的密封环境 操作者用密封驾驶室太阳能加热效果的测定（Safety of earth-moving machinery-Part 22：Operator enclosure environment-Determination of the effect of solar heating on the operator enclosure）

4. BS 7431-1991 太阳能热水器评定法 过滤器、连接管和配件用弹塑性材料（Method for assessing solar water heaters-Elastomeric materials for absorbers，connecting pipes and fittings）

5. BS EN ISO 9488-2000 太阳能 词汇（Solar energy-Vocabulary）

6. BS ISO 14269-3-1998 农业和林业用拖拉机和自驱动机械 驾驶室环境 太阳能加热效果测定（Tractors and self-propelled machines for agriculture and forestry-Operator enclosure environment-Determination of effect of solar heating）

7. BS EN 12975-1-2000 太阳能系统和组件 太阳能收集器 一般要求（Thermal solar systems and components-Solar collectors-General requirements）

8. BS EN 12975-2-2001 太阳能系统和组件 太阳能收集器 试验方法（Thermal solar systems and components-Solar collectors-Test methods）

9. BS EN 12976-1-2001 太阳能系统和组件 工厂制造系统 一般要求（Thermal solar systems and components-Factory made systems-General requirements）

10. BS EN 12976-2-2001 太阳能系统和组件 工厂制造系统 试验方法（Thermal solar systems and components-Factory made systems-Test methods）

11. BS DD ENV 12977-1-2001　太阳能系统和组件　客户建立系统　一般要求（Thermal solar systems and components-Custom built systems-General requirements）

12. BS DD ENV 12977-2-2001　太阳能系统和组件　客户建立系统　试验方法（Thermal solar systems and components-Custom built systems-Test methods）

13. BS DD ENV 12977-3-2001　太阳能系统和组件　客户建立系统　太阳能加热系统集热箱性能特征（Thermal solar systems and components-Custom built systems-Performance characterisation of stores for solar heating systems）

14. BS ISO 14269-3-1998　农业和林业用拖拉机和自驱动机械　驾驶室环境　太阳能加热效果测定（Tractors and self-propelled machines for agriculture and forestry-Operator enclosure environment-Determination of effect of solar heating）

15. BS EN 60904-2-1993　光伏器件　第2部分：基准太阳电池的要求（Photovoltaic devices-Part 2：Requirements for reference solar cells）

16. BS EN 60904-3-1993　光伏器件　第3部分：带基准光谱辐照资料的地球光伏器件的测量原理（Photovoltaic devices-Part 3：Measurement principles for terrestrial photovoltaic（PV）solar devices with reference spectral irradiance data）

17. BS EN 60904-6-1995　光伏器件　太阳能模式参数要求（Photovoltaic devices-Requirements for reference solar modules）

（七）其他标准

1. CNS13059-1　光伏器件　第1部分：光伏电流—电压特性量测［IEC 60904-1］Photovoltaic Devices-Part 1：Measurement of Photovoltaic Current—Voltage Characteristics

2. CNS13059-2　光伏器件　第2部分：基准太阳电池之要求［IEC 60904-2］Photovoltaic devices-Part 2：Requirements for reference solar cells

3. CNS13059-3　光伏器件　第3部分：具光谱照射光参考数据之陆上光伏太阳组件量测原理［IEC 60904-3］（Photovoltaic Devices-Part 3：75Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic Solar Devices With Reference Spectral Irradiance Data

4. CNS13059-5　光伏器件　第5部分：利用开路电压法决定光伏器件之等效电池温度［IEC 60904-5］Photovoltaic devices-Part 5：Determination of the equivalent cell temperature（ECT）of photovoltaic（PV）devices by the open circuit voltage method

5. CNS13059-6　光伏器件　第6部分：基准太阳电池模块之要求［IEC 60904-6］Photovoltaic devices-Par 6：Requirements for reference solar modules

6. CNS13059-7　光伏器件　第7部分：光电伏打组件测试中所产生光谱不匹配误差之计算［IEC 60904-7］Photovoltaic devices-Part 7：Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device

7. CNS13059-8　光伏器件　第8部分：光伏器件光谱响应之量测［IEC 60904-8］Photovoltaic devices-Part 8：Measurement of spectral response of a photovoltaic（PV）device

8. CNS13059-9　光伏器件　第9部分：太阳仿真器之性能要求［IEC 60904-9］Photovoltaic devices-Part 9：Solar simulator performance requirements

9. CNS13059-10　光伏器件　第10部分：线性量测法［IEC 60904-10］Photovoltaic devices-Part 10：Methods of linearity measurement

10. CNS15011 太阳能 词汇（太阳热能）Solar energy-Vocabulary（Solar thermal）

11. CNS15032 太阳能 比较参考日射强度计校正各种场日射强度计［ISO 9059］Solar energy-Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer

12. CNS15033 太阳能 量测半球太阳辐射与直接太阳辐射仪器之规格及分级［ISO 9060］Solar energy-Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation

13. CNS15064-1 太阳能 在不同地球表面接收状况下之参考太阳光谱照射度 第1部分：大气光程1.5下之直接垂直与半球太阳照射度［ISO 9845-1］Solar energy-Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions-Part 1：Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1.5

14. CNS15065 太阳能 使用一个日射强度计校正全天空辐射计［ISO 9846］Solar energy-Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer

15. CNS15066 太阳能 比较参考全天空辐射计校正场全天空辐射计［ISO 9847］Solar energy-Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer

16. CNS15113 太阳光电能源系统 名词与符号［IEC 61836］Solar photovoltaic energy systems-Terms and symbols

17. CNS15114 结晶硅陆上太阳光电模块 设计确认和型式认可［IEC61215］Crystalline silicon terrestrial photovoltaic（PV）modules-Design qualification and type approval

18. CNS15115 薄膜硅陆上太阳光电模块 设计确认和型式认可［IEC 61646］Thin-film terrestrial photovoltaic（PV）modules-Design qualification and type approval

19. CNS15116 太阳光电模块紫外线测试［IEC 61345］UV test for photovoltaic（PV）modules

20. CNS15117 太阳光电系统 电力调节器 量测效率之程序［IEC 61683］Photovoltaic system-Power conditioner-Procedure for measuring efficiency

21. CNS15118-1 太阳光电模块之安全确认 第1部分：构造要求［IEC 61730-1］Photovoltaic（PV）module safety qualification-Part 1：Requirements for construction

22. CNS15118-2 太阳光电模块之安全确认 第2部分：测试要求［IEC 61730-1］Photovoltaic（PV）module safety qualification-Part 2：Requirements for testing

23. CNS15119 太阳光电系统之性能监测 量测、数据交换与分析指南［IEC 61724］Photovoltaic system performance monitoring-Guidelines for measurement, data exchange and analysis

24. CNS15120 太阳光电发电系统用之二次电池 一般要求与测试方法［IEC 61427］Secondary cells and batteries for solar photovoltaic energy systems-General requirements and methods of test

25. CNS15166 太阳能 场全天空辐射计 使用实务建议［ISO 9901］Solar Energy-Field Pyranometers-Recommended practice for use

26. CNS15195 陆上太阳光电发电系统 概述与指南［IEC 61277］Terrestrial photovoltaic（PV）power generating systems-General and guide

27. CNS15196 太阳光电模块之盐雾腐蚀试验［IEC 61701］Salt mist corrosion testing of photovoltaic（PV）modules

28. CNS15197　太阳光电模块抗撞击损坏能力之测试（撞击抵抗力测试）［IEC61721］Susceptibility of a photovoltaic（PV）module to accidental impact damage（Resistance to impact test）

29. CNS15198　结晶硅太阳光伏阵列之Ⅰ-Ⅴ特性现场量测［IEC61829］Crystalline silicon photovoltaic（PV）array-On-site measurement of Ⅰ-Ⅴ characteristics

30. CNS15199　建筑物之电力安装　第7-712部：特别设立或地点之要求　太阳光电电力供应系统［IEC60364］Electrical installations of buildings-Part 7-712：Requirements for special installations or locations-Solar photovoltaic（PV）power supply systems

31. ANSI/ASAE S 423-1993 太阳能环境加热器的热性能试验 Thermal Performance Testing of Solar Ambient Air Heaters

32. ANSI/ASTM E424-2002　片材的太阳能量传输性和反射性（陆地上）的试验方法 Test Methods for Solar Energy Transmittance and Reflectance（Terrestrial）of Sheet Materials

33. ANSI/ASHRAE 93-1986　测定太阳能采集器热性能的试验方法 Method of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors

34. ANSI/ASHRAE 96-1980　测定无釉平板液体型太阳能收集器的热性能的试验方法 Methods of Testing to Determine Thermal Performance of Unglazed, Flat-Plate, Liquid-Type Solar Collectors

35. ANSI/ASHRAE 109-1986　测定含有沸液的平板太阳能收集器热性能的测试方法 Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Flat Plate Solar Collectors Containing a Boiling Liquid

36. UL 1741-2001　应用于电力系统的逆变器、控制器标准

附录B　太阳能光伏产业“十二五”发展规划

工信部2010年2月24日发布

前　言

太阳能资源丰富、分布广泛，是最具发展潜力的可再生能源。随着全球能源短缺和环境污染等问题日益突出，太阳能光伏发电因其清洁、安全、便利、高效等特点，已成为世界各国普遍关注和重点发展的新兴产业。

在此背景下，近年来全球光伏产业增长迅猛，产业规模不断扩大，产品成本持续下降。2009年全球太阳电池产量为10.66GW，多晶硅产量为11万t，2010年分别达到20.5GW、16万t，组件价格则从2000年的4.5美元/W下降到2010年的1.7美元/W。

“十一五”期间，我国太阳能光伏产业发展迅速，已成为我国为数不多的、可以同步参与国际竞争、并有望达到国际领先水平的行业。加快我国太阳能光伏产业的发展，对于实现工业转型升级、调整能源结构、发展社会经济、推进节能减排均具有重要意义。国务院发布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，已将太阳能光伏产业列入我国未来发展的战略性新兴产业重要领域。

根据《工业转型升级规划（2011—2015年）》、《信息产业“十二五”发展规划》以及

《电子信息制造业“十二五”发展规划》的要求，在全面调研、深入研究、广泛座谈的基础上，编制太阳能光伏产业“十二五”发展规划，作为我国“十二五”光伏产业发展的指导性文件。

一、“十一五”发展回顾

（一）我国光伏产业概况

1. 产业规模迅速提高，市场占有率稳居世界前列

“十一五”期间，我国太阳电池产量以超过100%的年均增长率快速发展。2007—2010年连续四年产量世界第一，2010年太阳电池产量约为10GW，占全球总产量的50%。我国太阳电池产品90%以上用于出口，2010年出口额达到202亿美元。

2. 掌握关键材料生产技术，产业基础逐步牢固

“十一五”期间，我国投产的多晶硅年产量从两三百吨发展至4.5万t，光伏产业原材料自给率由几乎为零提高至50%左右，已形成数百亿元级的产值规模。国内多晶硅骨干企业已掌握改良西门子法千吨级规模化生产关键技术，规模化生产的稳定性逐步提升。

3. 主流产品技术与世界同步，产品质量稳步提高

“十一五”末期，我国晶硅电池占太阳电池总产量的95%以上。太阳电池产品质量逐年提升，尤其是在转换效率方面，骨干企业产品性能增长较快，单晶硅太阳电池转换效率达到17%～19%，多晶硅太阳电池转换效率为15%～17%，薄膜等新型电池转换效率为6%～8%。

4. 节能减排成效明显，资源利用率大幅提升

光伏产业节能减排取得显著成效，副产物综合利用水平稳步提高，资源利用率整体取得大幅提升。2006年每生产1kg多晶硅的平均单耗水平为：工业硅1.8～2.0kg、液氯1.8kg、综合电耗300～350kW·h，到2010年分别下降为：工业硅1.3～1.4kg、液氯1.0kg、综合电耗160～180kW·h，部分骨干企业达到130～150kW·h/kg。生产晶硅太阳电池的多晶硅用量从2006年的11g/W下降到2010年的7～8g/W。

5. 生产设备不断取得突破，本土化水平不断提高

国产单晶炉、多晶硅铸锭炉、开方机等设备逐步进入产业化，占据国内较大市场份额。晶硅太阳电池专用设备除全自动印刷机和切割设备外基本实现了本土化并具备生产线“交钥匙”的能力。硅基薄膜电池生产设备初步形成小尺寸整线生产能力。2010年我国光伏专用制造设备销售收入超过40亿元人民币，出口交货值达到1亿元人民币。

6. 国内光伏市场逐步启动，装机量快速增长

我国已相继出台了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行方法》和《关于实施金太阳示范工程的通知》等政策，并先后启动了两批总计290MW的光伏电站特许权招标项目。截至2010年，我国累计光伏装机量达到800MW，当年新增装机容量达到500MW，同比增长166%。

（二）我国光伏产业发展特点

1. 充分利用国内外市场要素，产业发展国际化程度高

我国光伏产业充分运用国内外资金、人才两大市场要素，“十一五”末期，已有数十家企业实现海外及国内上市，产品广销国际市场。国内光伏企业以民营企业为主，主要企业实力不断增强，有4家企业太阳电池产量位居全球前十，成为国际知名企业。

2. 自主创新与引进吸收相结合，形成自主特色产业体系

通过自主创新与引进消化吸收再创新相结合，初步形成了具有我国自主特色的光伏产业体系，多晶硅、电池组件及控制器等制造水平不断提高，制造设备的本土化率已经超过50%，太阳电池的质量和技术水平也逐步走向世界前列。

3. 产业链上下游协同发展，推动光伏发电成本下降

“十一五”期间，我国光伏产业突破材料、市场以及人才等发展瓶颈，产业规模迅速壮大，上下游完整产业链基本成形。我国光伏产业的崛起带动了世界光伏产业的发展，有效地推动了技术进步，降低了光伏产品成本，加快了全球光伏产业应用步伐。

4. 产业呈现集群化发展，有效提高区域竞争力

我国光伏产业区域集群化发展态势初步显现，依托区域资源优势和产业基础，国内已形成了江苏、河北、浙江、江西、河南、四川、内蒙古等区域产业中心，并涌现出一批国内外知名且具有代表性的企业，主要企业初步完成垂直一体化布局，加快海外并购和设厂，向国际化企业发展。

二、“十二五”面临形势

目前，各主要发达国家均从战略角度出发大力扶持光伏产业发展，通过制定上网电价法或实施“太阳能屋顶”计划等推动市场应用和产业发展。国际各方资本也普遍看好光伏产业：一方面，光伏行业内众多大型企业纷纷宣布新的投资计划，不断扩大生产规模；另一方面，其他领域如半导体企业、显示企业携多种市场资本正在或即将进入光伏行业。

从我国未来社会经济发展战略路径看，发展太阳能光伏产业是我国保障能源供应、建设低碳社会、推动经济结构调整、培育战略性新兴产业的重要方向。“十二五”期间，我国光伏产业将继续处于快速发展阶段，同时面临着大好机遇和严峻挑战。

（一）我国光伏产业面临广阔发展空间

世界常规能源供应短缺危机日益严重，化石能源的大量开发利用已成为造成自然环境污染和人类生存环境恶化的主要原因之一，寻找新兴能源已成为世界热点问题。在各种新能源中，太阳能光伏发电具有无污染、可持续、总量大、分布广、应用形式多样等优点，受到世界各国的高度重视。我国光伏产业在制造水平、产业体系、技术研发等方面具有良好的发展基础，国内外市场前景总体看好，只要抓住发展机遇，加快转型升级，后期必将迎来更加广阔的发展空间。

（二）光伏产业、政策及市场亟待加强互动

从全球来看，光伏发电在价格上具备市场竞争力尚需一段时间，太阳电池需求的近期成长动力主要来自于各国政府对光伏产业的政策扶持和价格补贴；市场的持续增长也将推动产业规模扩大和产品成本下降，进而促进光伏产业的健康发展。目前国内支持光伏应用的政策体系和促进光伏发电持续发展的长效互动机制正在建立过程中，太阳电池产品多数出口海外市场，产业发展受金融危机和海外市场变化影响很大，对外部市场的依存度过高，不利于持续健康发展。

（三）面临国际经济动荡和贸易保护的严峻挑战

近年来全球经济发展存在动荡形势，一些国家的新能源政策出现调整，相关补贴纷纷下调，对我国光伏产业发展有较大影响。同时，欧美等国已发生多起针对我国光伏产业的贸易纠纷，类似纠纷今后仍将出现，主要原因有：一是我国太阳电池成本优势明显，对国外产品

造成压力；二是国内光伏市场尚未大规模启动，产品主要外销，可能引发倾销疑虑；三是我国相关标准体系尚不完善，存在产品质量水平参差不齐等问题。

（四）新工艺、新技术快速演进，国际竞争不断加剧

全球光伏产业技术发展日新月异：晶体硅电池转换效率年均增长一个百分点；薄膜电池技术水平不断提高；纳米材料电池等新兴技术发展迅速；太阳电池生产和测试设备不断升级。而国内光伏产业在很多方面仍存在较大差距，国际竞争压力不断升级：多晶硅关键技术仍落后于国际先进水平，晶硅电池生产用高档设备仍需进口，薄膜电池工艺及装备水平明显落后。

（五）市场应用不断拓展，降低成本仍是产业主题

太阳能光伏市场应用将呈现宽领域、多样化的趋势，适应各种需求的光伏产品将不断问世，除了大型并网光伏电站外，与建筑相结合的光伏发电系统、小型光伏系统、离网光伏系统等也将快速兴起。太阳电池及光伏系统的成本持续下降并逼近常规发电成本，仍将是光伏产业发展的主题，从硅料到组件以及配套部件等均将面临快速降价的市场压力，太阳电池将不断向高效率、低成本方向发展。

三、指导思想、基本原则与发展目标

（一）指导思想

深入贯彻落实科学发展观，抓住当前全球大力发展新能源的大好机遇，紧紧围绕降低光伏发电成本、提升光伏产品性能、做优做强我国光伏产业的宗旨，着力推动关键技术创新、提升生产工艺水平、突破装备研发瓶颈、促进市场规模应用，使我国光伏产业的整体竞争力得到显著提升。

（二）基本原则

1. 立足统筹规划，坚持扶优扶强

加强国家宏观政策引导，坚持做好行业统筹规划和产业合理布局，规范光伏产业健康发展。集中力量支持优势企业做优做强，鼓励重点光伏企业推进资源整合和兼并重组。

2. 支持技术创新，降低发电成本

以企业为技术创新和产业发展的主体，强化关键技术研发，提升生产工艺水平，从高纯硅材料规模化生产、电池转换效率提高、生产装备国产化、新型电池和原辅材料研发、系统集成等多方面入手，努力降低光伏发电成本。

3. 优化产业环境，扩大光伏市场

推动各项光伏扶持政策的落实，调动各方面的资源优势，优化产业发展环境。充分发挥市场机制的作用，巩固国际市场，扩大国内多样化应用，使我国光伏产业的发展有稳定的市场依托。

4. 加强服务体系建设，推动产业健康发展

加强公共服务平台建设，建立健全光伏标准及产品质量检测认证体系，严格遵守环境保护和安全生产规定，推进节能减排、资源循环利用，实现清洁生产和安全生产。

（三）发展目标

1. 经济目标

“十二五”期间，光伏产业保持平稳较快增长，多晶硅、太阳电池等产品适应国家可再生能源发展规划确定的装机容量要求，同时积极满足国际市场发展需要。支持骨干企业做优

做强，到2015年形成：多晶硅领先企业达到5万吨级，骨干企业达到万吨级水平；太阳电池领先企业达到5GW级，骨干企业达到GW级水平；1家年销售收入过千亿元的光伏企业，3～5家年销售收入过500亿元的光伏企业；3～4家年销售收入过10亿元的光伏专用设备企业。

2. 技术目标

多晶硅生产实现产业规模、产品质量和环保水平的同步提高，还原尾气中四氯化硅、氯化氢、氢气回收利用率不低于98.5%、99%、99%，到2015年平均综合电耗低于120kW·h/kg。单晶硅电池的产业化转换效率达到21%，多晶硅电池达到19%，非晶硅薄膜电池达到12%，新型薄膜太阳电池实现产业化。光伏电池生产设备和辅助材料本土化率达到80%，掌握光伏并网、储能设备生产及系统集成关键技术。

3. 创新目标

到2015年，企业创新能力显著增强，涌现出一批具有掌握先进核心技术的品牌企业，掌握光伏产业各项关键技术和生产工艺。技术成果转化率显著提高，标准体系建设逐步完善，国际影响力大大增强。充分利用已有基础，建立光伏产业国家重点实验室及检测平台。

4. 光伏发电成本目标

到2015年，光伏组件成本下降到7000元/kW，光伏系统成本下降到1.3万元/kW，发电成本下降到0.8元/(kW·h)，光伏发电具有一定经济竞争力；到2020年，光伏组件成本下降到5000元/kW，光伏系统成本下降到1万元/kW，发电成本下降到0.6元/(kW·h)，在主要电力市场实现有效竞争。

四、“十二五”主要任务

（一）推动工艺技术进步，实现转型升级

发展清洁、安全、低能耗、高纯度、规模化的多晶硅生产技术，提高副产物综合利用率，缩小与国际先进生产水平的差距。实现太阳电池生产技术的创新发展，鼓励规模化生产，提高光伏产业的核心竞争力。推动行业节能减排，密切关注清洁、环保的新型光伏电池及材料技术进展，加强技术研发。

（二）提高国产设备和集成技术的研发及应用水平

以提高产品质量和光电转换效率、降低生产能耗为目标，支持多晶硅、硅锭/硅片、电池片及组件、薄膜电池用关键生产设备以及发电应用设备研发与产业化，加强本地化设备的应用。推动设备企业与光伏产品企业加强技术合作与交流。

（三）提高太阳电池的性能，不断降低产品成本

大力支持低成本、高转换效率和长寿命的晶硅太阳电池研发及产业化，降低电池产品成本和最终发电成本，力争尽快实现平价上网。推动硅基薄膜、铜铟镓锡薄膜等电池的技术进步及产业化进程，提高薄膜电池的转换效率。

（四）促进光伏产品应用，扩大光伏发电市场

积极推动上网电价政策的制定和落实，并在农业、交通、建筑等行业加强光伏产品的研发和应用力度，支持建立一批分布式光伏电站、离网应用系统、光伏建筑一体化（BIPV）系统、小型光伏系统及以光伏为主的多能互补系统，鼓励大型光伏并网电站的建设与应用，推动完善适应光伏发电特点的技术体系和管理体制。

（五）完善光伏产业配套服务体系建设

建立健全标准、专利、检测、认证等配套服务体系，加强光伏行业管理与服务，支持行业自律协作。积极参与国际标准制定，建立完善符合我国国情的光伏国家/行业标准体系，包括多晶硅材料、电池/组件的产品标准，光伏生产设备标准和光伏系统的验收标准等。加快建设国内认证、检测等公共服务平台。

五、“十二五”发展重点

（一）高纯多晶硅

支持低能耗、低成本的太阳能级多晶硅生产技术。在现有的基础上，通过进一步的研究、系统改进及完善，支持研发稳定的电子级多晶硅生产技术，并建立千吨级电子级多晶硅生产线。突破高效节能的大型提纯、高效氢气回收净化、高效化学气相沉积、多晶硅副产物综合利用等装置及工艺技术，建设万吨级高纯多晶硅生产线，综合能耗小于120kW · h/kg。

（二）硅锭/硅片

支持高效率、低成本、大尺寸铸锭技术，重点发展准单晶铸锭技术。突破 150 ~ 160μm 以下新型切片关键技术，如金刚砂、钢线切割技术，提高硅片质量和单位硅材料出片率，减少硅料切割损耗。

（三）晶硅电池

大力发展高转换率、长寿命晶硅电池技术的研发与产业化。重点支持低反射率的绒面制备技术、选择性发射极技术及后续的电极对准技术、等离子体钝化技术、低温电极技术、全背结技术的研究及应用。关注薄膜硅/晶体硅异质结等新型太阳电池成套关键技术。

（四）薄膜电池

重点发展非晶与微晶相结合的叠层和多结薄膜电池。降低薄膜电池的光致衰减，鼓励企业研发 5. 5 代以上大面积高效率硅薄膜电池，开发柔性硅基薄膜太阳电池卷对卷连续生产工艺等。及时跟进铜铟镓硒和有机薄膜电池的产业化进程，开发并掌握低成本非真空铜铟镓锡薄膜电池制备技术，磁控溅射电池制备技术，真空共蒸法电池制备技术，规模化制造关键工艺。

（五）高效聚光太阳电池

重点发展高倍聚光化合物太阳电池产业化生产技术，聚光倍数达到 500 倍以上，产业化生产的电池在非聚光条件下效率超过 35%，聚光条件下效率超过 40%，衬底剥离型高倍聚光电池转化效率在非聚光条件下效率超过 25%。突破高倍聚光太阳电池衬底玻璃技术、高效率高倍聚光化合物太阳电池技术、高倍率聚光电池测试分析和稳定性控制技术等，及时发展菲涅尔和抛物镜等配套设备。

（六）BIPV 组件

重点发展 BIPV 组件生产技术，包括可直接与建筑相结合的建材，应用于厂房屋顶、农业大棚及幕墙上的双玻璃 BIPV 组件，中空玻璃组件等，解决 BIPV 组件的透光、隔热等问题，设计出美观、实用、可直接作为建材和构件用的 BIPV 组件。扩大建筑附着光伏（BAPV）组件应用范围。

（七）光伏生产专用设备

支持还原、氢化等多晶硅生产设备，大尺寸、低能耗、全自动单晶炉，吨级多晶硅铸锭炉，大尺寸、超薄硅片多线切割机，硅片自动分选机等关键生产设备。支持多槽制绒清洗设备、全自动平板式等离子体增强化学气相沉积（PECVD）、激光刻蚀机、干法刻蚀机、离子注入机、全自动印刷机、快速烧结炉等晶硅太阳电池片生产线设备和 PECVD 等薄膜太阳电池生产设备。促进光伏生产装备的低能耗、高效率、自动化和生产工艺一体化。

（八）配套辅料

在关键配套辅料方面，实现坩埚、高纯石墨、高纯石英砂、碳碳复合材料、玻璃、乙烯-醋酸乙烯共聚物（EVA）胶、背板、电子浆料、线切割液等国产化。

（九）并网及储能系统

掌握太阳能光伏发电系统集成技术、百万千瓦光伏发电基地的设计集成和工程技术，开发大功率光伏并网逆变器、储能电池及系统、光伏自动跟踪装置、数据采集与监控系统、风光互补系统等。

（十）公共服务平台建设

支持有能力的企事业单位建设国家级光伏应用系统检测、认证等公共服务平台，包括多晶硅、电池片和组件、薄膜电池的检测，光伏系统工程的验收等。支持相关服务平台开展行业共性问题研究，制订和推广行业标准，研发关键共性技术等。

六、政策措施

（一）提升光伏能源地位，加强产业战略部署

光伏能源是一种可持续、无污染、总量大的绿色新能源，应当充分认识太阳能光伏发电的战略价值和重要意义，切实在国家能源经济和社会可持续发展的总体部署中予以统筹考虑，提升太阳能光伏产业在国民经济发展中的战略地位。通过实施工业转型升级和可再生能源等相关规划，统筹制订产业、财税、金融、人才等扶持政策，积极促进我国光伏产业健康发展。

（二）加强行业管理，规范光伏产业发展

根据产业政策要求和行业发展实际需要，切实加强行业管理，推动行业节能减排，规范我国光伏产业发展，建立健全光伏行业准入标准，引导地方政府坚决遏制低水平重复建设，避免一哄而上和市场恶性竞争。推动相关职能部门联合加强产品检查，对于不达环保标准、出售劣质产品、扰乱正常市场竞争秩序的企业，依照相关规定给予处罚和整顿。

（三）着力实施统筹规划，推进产业合理布局

加强行业统筹规划，推动企业转型升级，坚持市场主导与政府引导相结合，扶持产业链完备、已具有品牌知名度的骨干企业做优做强。鼓励实力领先的光伏企业依靠技术进步、优化存量、扩大发展规模，实施“走出去”战略，积极参与国际产业竞争。实施差异化政策，引导多晶硅等产业向西部地区转移。推动资源整合，鼓励企业集约化开发经营，支持生产成本低、竞争力强的企业兼并改造生产经营不佳的光伏企业。

（四）积极培育多样化市场，促进产业健康发展

推动制订和落实上网电价实施细则，继续实施“金太阳工程”等扶持措施，鼓励光伏企业与电力系统等加强沟通合作，加快启动国内光伏市场。坚持并网发电与离网应用相结

合，以“下乡、富民、支边、治荒”为目标，支持小型光伏系统、离网应用系统、与建筑相结合的光伏发电系统等应用，开发多样化的光伏产品。通过合理的电价标准、适度的财政补贴和积极的金融扶持，积极扩大国内光伏市场。

（五）支持企业自主创新，增强产业核心竞争力

支持光伏企业转型升级，通过技术改造等手段扶持掌握自主技术的骨干企业，巩固和提高核心竞争力。加大对光伏产业技术创新的扶持力度，重点支持多晶硅节能降耗、副产物综合利用、太阳电池高效高质和低成本新工艺技术的研发和产业化项目。加强产学研结合，支持关键共性技术研发，全面提升本土化光伏设备技术水平。加大人才培养力度，支持建立企业技术研发中心与博士后科研流动站。

（六）完善标准体系，推动检测认证、监测制度建设

重视光伏产品和系统标准体系建设，以我国自主知识产权为基础，结合国内产业技术实际水平，推动制定多晶硅、硅锭/硅片、太阳电池等产品和光伏系统相关标准，积极参与制订国际标准，建立健全产品检测认证、监测制度，促进行业的规范化、标准化发展。加强对光伏产品质量标准符合性的行业管理，避免劣质产品流入市场。推动企业加强光伏产品回收。

（七）加强行业组织建设，积极参与国际竞争

建立健全光伏行业组织，推动行业自律管理，加强行业交流与协作，集中反映产业发展愿景，打造国内光伏产业合作创新平台。充分发挥市场机制作用，以行业组织为纽带，以企业为主体，以市场为导向，提高产业应对国际竞争和市场风险的能力。加强国际交流和合作，优化产业发展环境，完善出口风险保障机制，鼓励企业积极争取海外资金，巩固和拓展国际市场。

附录 C　防孤岛效应保护方案的选取

基于并网逆变器的防孤岛效应保护方案分为主动式防孤岛保护方案和被动式防孤岛保护方案。被动式方案通过检测逆变器交流输出端电压或频率的异常来检测孤岛效应。由于被动式方案的检测范围有限，因此为了满足并网逆变器防孤岛保护安全标准的要求，必须采用主动式方案。主动式方案通过有意地引入扰动信号来监控系统中电压、频率以及阻抗的相应变化，以确定电网的存在与否。

主动式防孤岛效应保护方案主要有频率偏移、电流脉冲注入引起的阻抗变动、电力线载波通信等。

被动式防孤岛效应保护方案主要有电压相位跳变、3 次电压谐波变动、频率变化率检测、有功功率变动、无功功率变动等。

防孤岛效应保护方案的选取应考虑以下规则：

1）要兼顾考虑检测性能、输出电能质量以及对整个系统暂态响应的影响。

2）如果一个简单且成本低的防孤岛效应保护方案将孤岛效应带来的危害降低到其他的电力危害以下，那么该方案即为适当的；

具有较好检测性能而成本较高的方案的必要性还存在争议。

附录 D　并网光伏发电专用逆变器技术参数

制造厂家		
型号		
直流输入	推荐最大光伏方阵功率/kWp	
	最大直流输入功率/kW	
	最大方阵开路电压/V	
	最大方阵输入电流/A	
	直流输入电压范围/V	
	MPPT 范围/V	
交流输出	额定交流输出功率/kW	
	最大交流输出功率/kW	
	工作电压范围(V ± %)	
	工作频率范围(Hz ± %)	
	最大逆变效率(%)	
	功率因数	
	电流总谐波畸变率 THD(%)	
	夜间自耗电/W	
	噪声/dB	
保护功能	过/欠电压保护(有/无)	
	过/欠频保护(有/无)	
	防孤岛效应保护(有/无)	
	过电流保护(有/无)	
	防反放电保护(有/无)	
	极性反接保护(有/无)	
	过载保护(有/无)	
安全要求	绝缘电阻	
	绝缘强度	
	外壳防护等级	
通信接口		
电磁兼容	电压波动和闪烁	
	发射	
	静电放电抗扰度	
	射频电磁场辐射抗扰度	
	电快速瞬变脉冲群抗扰度	
	浪涌(冲击)辐射抗扰度	
	射频场感应的传导骚扰抗扰度	
	电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度	

（续）

电磁兼容	长 × 宽 × 高/（mm × mm × mm）	
	重量/kg	
文件要求	产品说明书（有/无）	
	用户手册（有/无）	
	产品合格证（有/无）	
	保修卡（有/无）	
测试认证机构（附测试认证报告复印件）		

附录 E　逆变器设计、制造相关标准

1. GB/T 191—2008　包装储运图示标志

2. GB/T 2423. 1—2008　电工电子产品环境试验　第 1 部分：试验方法　试验 A：低温

3. GB/T 2423. 2—2008　电工电子产品环境试验　第 2 部分：试验方法　试验 B：高温

4. GB/T 2423. 3—2006　电工电子产品环境试验　第 2 部分：试验方法　试验 Cab：恒定湿热方法

5. GB/T 2423. 10—2008　电工电子产品环境试验　第 2 部分：试验方法　试验 Fc：振动（正弦）

6. GB/T 2829—2002　周期检验计数抽样程序及表（适用于对过程稳定性的检验）

7. GB/T 3859. 1—1993　半导体变流器基本要求的规定

8. GB/T 3859. 2—1993　半导体变流器　应用导则

9. GB/T 3873—1983　通信设备产品包装通用技术条件

10. GB 4208—2008　外壳防护等级（IP 代码）

11. GB/T 12325—2008　电能质量　供电电压偏差

12. GB/T 14549—1993　电能质量　公用电网谐波

13. GB/T 15543—2008　电能质量　三相电压不平衡

14. GB/T 15945—2008　电能质量　电力系统频率偏差

15. GB 17625. 2—2007　电磁兼容　限值　对每相额定电流≤16A 且无条件接入的设备在公用低压供电系统中产生的电压变化、电压波动和闪烁的限制

16. GB/Z 17625. 3—2000　电磁兼容　限值　对额定电流大于 16A 的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制

17. GB/T 17626. 2—2006　电磁兼容　试验和测量技术　静电放电抗扰度试验

18. GB/T 17626. 3—2006　电磁兼容　试验和测量技术　射频电磁场辐射抗扰度试验

19. GB/T 17626. 4—2008　电磁兼容　试验和测量技术　电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

20. GB/T 17626. 5—2008　电磁兼容　试验和测量技术　浪涌（冲击）抗扰度试验

21. GB/T 17626. 6—2008　电磁兼容　试验和测量技术　射频场感应的传导骚扰抗扰度

22. GB/T 17626.11—2008　电磁兼容　试验和测量技术　电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验

23. GB 17799.3—2001　电磁兼容　通用标准　居住、商业和轻工业环境中的发射标准

24. GB 17799.4—2001　电磁兼容　通用标准　工业环境中的发射标准

25. GB/Z 19964—2005　光伏发电站接入电力系统技术规定

参 考 文 献

[1] Martin A Green. 太阳能电池工作原理、技术和系统应用［M］. 狄大卫，曹昭阳，李季文，等译. 上海：上海交通大学出版社，2010.

[2] Stefan Krauter. 太阳能发电-光伏能源系统［M］. 王宾，董新洲，译. 北京：机械工业出版社，2008.

[3] 刘恩科，朱秉升，罗晋生. 半导体物理学［M］. 7 版. 北京：电子工业出版社，2011.

[4] 施钰川. 太阳能原理与技术［M］. 西安：西安交通大学出版社，2009.

[5] 毕克允，胡先发，王长河，等. 微电子技术［M］. 北京：国防工业出版社，2008.

[6] 滨川圭弘. 太阳能光伏电池及其应用［M］. 张红梅，崔晓华，译. 北京：科学出版社，2008.

[7] Tom Markvart，Luis Castaner. 太阳电池：材料、制备工艺及检测［M］. 梁骏吾，译. 北京：机械工业出版社，2009.

[8] 王长贵，王斯成. 太阳能光伏发电实用技术［M］. 2 版. 北京：化学工业出版社，2009.

[9] 熊绍珍，朱美芳. 太阳能电池基础与应用［M］. 北京：科学出版社，2009.

[10] 崔容强，赵春江，吴达成. 并网型太阳能光伏发电系统［M］. 北京：化学工业出版社，2007.

[11] 吴财福，张健轩，陈裕恺，等. 太阳能光伏并网发电及照明系统［M］. 北京：科学出版社，2009.

[12] 冯垛生，张森，赵慧，等. 太阳能发电技术与应用［M］. 北京：人民邮电出版社，2009.

[13] 沈辉，曾祖勤. 太阳能光伏发电技术［M］. 北京：化学工业出版社，2005.

[14] 赵争鸣，刘建政，孙晓瑛，等. 太阳能光伏发电及其应用［M］. 北京：科学出版社，2005.

[15] 李钟实. 太阳能光伏发电系统设计施工与维护［M］. 北京：人民邮电出版社，2010.

[16] 刘宏，吴达成，杨志刚，等. 家用太阳能光伏电源系统［M］. 北京：化学工业出版社，2007.

[17] 任新兵. 太阳能光伏发电工程技术［M］. 北京：化学工业出版社，2011.

[18] Mario Pagliaro，Giovanni Palmisano，Rosaria Ciriminna. 柔性太阳能电池［M］. 高扬，译. 上海：上海交通大学出版社，2010.

[19] 王东. 太阳能光伏发电技术与系统集成［M］. 北京：化学工业出版社，2011.

[20] 杨金焕，于化丛，葛亮. 太阳能光伏发电应用技术［M］. 北京：电子工业出版社，2009.

[21] 李德恒. 太阳能工程设计与施工［M］. 杭州：浙江科学技术出版社，2009.

[22] 刘寄声. 太阳电池加工技术问答［M］. 北京：化学工业出版社，2010.

[23] 杨德仁. 太阳电池材料［M］. 北京：化学工业出版社，2006.

[24] 艾德生，高喆. 新能源材料-基础与应用［M］. 北京：化学工业出版社，2009.

[25] 麻蒔立男. 薄膜制备技术基础［M］. 陈国荣，刘晓萌，莫晓亮，译. 北京：化学工业出版社，2009.

[26] L B Freund，S Suresh. 薄膜材料：应力、缺陷的形成和表面演化［M］. 卢磊，等译. 北京：科学出版社，2007.

[27] 戴达煌，刘敏，余志明，等. 薄膜与涂层现代表面技术［M］. 长沙：中南大学出版社，2008.

[28] 张济忠，胡平，杨思泽，等. 现代薄膜技术［M］. 北京：冶金工业出版社，2009.

[29] 徐庭栋. 非平衡晶界偏聚动力学和晶间脆性断裂［M］. 北京：科学出版社，2006.

[30] 冷增祥，徐以荣. 电力电子技术基础［M］. 南京：东南大学出版社，2006.

[31] 蒋建民，冯志勇，刘美仪. 电力网电压无功功率自动控制系统［M］. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2010.

[32] 于志坚. 航天测控系统工程［M］. 北京：国防工业出版社，2008.

[33] 传奇书系编委会. 太空移民［M］. 北京：北京理工大学出版社，2009.

[34] 何光宇，孙英云. 智能电网基础［M］. 北京：中国电力出版社，2010.

[35] 中国标准出版社第四编辑室. 电池标准汇编：太阳电池、燃料电池卷［G］. 北京：中国标准出版社，2008.
[36] R Strzelecki，G Benysek. 智能电网中的电力电子技术［M］. 徐政，译. 北京：机械工业出版社，2010.
[37] 粟时平，刘桂英. 现代电能质量检测技术［M］. 北京：中国电力出版社，2008.
[38] 水野文夫，鹰野致和. 图解半导体基础［M］. 彭军，译. 北京：科学出版社，2007.
[39] 杨树人，王宗昌，王兢. 半导体材料［M］. 北京：科学出版社，2004.
[40] 薛晨阳，张文栋. 半导体薄膜光谱学［M］. 北京：科学出版社，2008.
[41] 毛承雄，王丹，范澍，等. 电力电子变压器［M］. 北京：中国电力出版社，2010.
[42] 栗书贤. 电力电子技术实验［M］. 北京：机械工业出版社，2009.
[43] 赵丽华. 半导体芯片制造职业技能鉴定指南［M］. 北京：中国科学技术出版社，2004.
[44] 王立乔，孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术［M］. 北京：机械工业出版社，2010.
[45] 赵青，刘述章，童洪辉. 等离子体技术及应用［M］. 北京：国防工业出版社，2009.
[46] 刘燕. 供配电技术［M］. 西安：西安电子科技大学出版社，2007.
[47] 尹建华，李志伟. 半导体硅材料基础［M］. 北京：化学工业出版社，2009.
[48] 王吉坤，何蔼平. 现代锗冶金［M］. 北京：冶金工业出版社，2005.
[49] 翟秀静，吕子剑. 镓冶金［M］. 北京：冶金工业出版社，2010.
[50] 吴川生. 到太空中行走［M］. 北京：解放军出版社，2008.
[51] 赵欣，孔丹丹，骆中钊. 钢结构［M］. 北京：化学工业出版社，2008.
[52] 康伟超，王丽. 硅材料检测技术［M］. 北京：化学工业出版社，2009.
[53] 余辉，蒙林青. 电气工程造价员［M］. 北京：中国计划出版社，2010.
[54] 陈菊芳，沈辉，李军勇，等. 广州地区空气洁净度对光伏电站的影响［J］. 太阳能学报，2011(4)：9.
[55] 孙晓光，王新北，左艳飞. 太阳能在建设领域推广与应用［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2009.
[56] Cor Claeys，Eddy Simoen. 半导体锗材料与器件［M］. 屠海令，译. 北京：冶金工业出版社，2010.
[57] 朱星彬. 地基与基础工程施工［M］. 北京：高等教育出版社，2008.

龙象光伏科技有限公司

公司性质：民营企业，光伏电池商、光伏发电商及光伏工程商。

承揽工程：

1、多晶硅、非晶硅、铜铟镓硒、砷化镓、碲化镉太阳电池设计、制造、安装、调试。

2、光伏建筑一体化、大型沙焰光伏电站设计、安装、调试。

3、光伏逆变器设计、制造、销售。

4、太阳电池制造厂技术改造，提高太阳电池光电转换效率。

5、电池板清洁机。

联系人：段光复

电话：13825191998

E-mail：dgf0813@126.com，1030381607@qq.com

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

ISBN 978-7-111-41872-6
策划编辑◎曲彩云/ 封面设计◎赵颖喆

ISBN 978-7-111-41872-6
9 787111 418726 >

定价：98.00元