

易学易懂自动化技术丛书

# 图解传感器与 仪表应用

第2版

TUJIE CHUANGANQI YU  
YIBIAO YINGYONG

李方园 等编著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



易学易懂自动化技术丛书

# 图解传感器与 仪表应用 第2版

TUJIE CHUANGANQI YU  
YIBIAO YINGYONG

李方园 等编著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

传感器与仪表是利用各种物理效应、化学效应（或反应）以及生物效应实现非电量到电量转换的装置或者器件。传感器与仪表在现代化的科学技术、工农业生产和人类日常生活中都起着不可替代的作用，在国民经济中具有极其重要的作用。本书按照热工类、机械类、化学类和光电类等4个方面介绍了传感器与仪表的基本工作原理、特性参数及应用案例。

本书可供传感器与仪表等相关领域的工程、技术、管理、维护人员阅读，也可以作为自动化、电子、电气工程、计算机、机电一体化等专业师生的辅导用书。

## 图书在版编目（CIP）数据

图解传感器与仪表应用/李方园等编著. —2版. —北京：机械工业出版社，2013.2

（易学易懂自动化技术丛书）

ISBN 978-7-111-41172-7

I. ①图… II. ①李… III. ①传感器—图解 IV. ①TP212-64

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第008913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：林春泉 责任编辑：赵任

版式设计：霍永明 责任校对：申春香 肖琳

封面设计：路恩中 责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2015年7月第2版第2次印刷

184mm×260mm·12.5印张·307千字

3001—5 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-41172-7

定价：33.00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 封面防伪标均为盗版

# 前 言

现在的传感器与仪表不仅充当着计算机、机器人、自动化设备的感觉器官及机电装置的接口，而且已经渗透到了军事和人类生活的各个领域。因此，在各行各业中，使用者都有必要了解常用传感器与仪表的工作原理以及测量电路的基本知识，以便更好地为生产或生活服务。

众所周知，传感器与仪表是获取物质世界信息的重要工具，是信息系统的源头。信息时代使传感器与仪表的应用领域越来越广泛，同时也促进了传感器与仪表技术有了长足的进步，并受到各行各业的广泛重视。

本书从热工类、机械类、化学类和光电类等4个方面介绍了传感器与仪表的基本工作原理、特性参数及应用案例。

本书第2版与第1版相比，删除了原来第6章“无线传感器技术与物联网”部分内容，调整了第3章“机械传感器与仪表应用”的传感器类型，以及删减了第4章“化学传感器与仪表应用”的部分传感器，使得本书的核心主要集中在“传感器与仪表”的核心主题内。本版还新增加了“练习与思考”，方便读者根据所学内容进行自我测试，从而进一步提高应用水平和能力。

本书共分5章，第1章对传感器与仪表进行了概述，介绍了传感器与仪表的定义、应用，并简要地介绍了电阻式传感器、电感式传感器与电容式传感器的基本知识，为后面章节奠定了必要的理论知识。第2章~第5章，将传感器与仪表按照生产实际进行分类介绍，包括热工传感器与仪表、机械传感器与仪表、化学传感器与仪表、光电传感器与仪表等，对目前最流行的传感器与仪表进行了讲述，特别是侧重其在工程实践中的设计与应用。

本书正是基于传感器快速增长的前景，希望能够为各行业传感器与仪表的用户、传感器生产者、自动化研究所和设计院、高校架起一个产、学、用、研四方相互沟通的桥梁；通过作者十几年的工程实践，总结行业使用经验，为传感器与仪表使用者、高校学生提供传感器的选型和使用指南，力图避免传感器与仪表在应用中的行业误区，通过“图解”的方式来提高自动化技术的应用水平。

在本书编写过程中，得到了柳桂国博士的大力支持，杨帆、钟晓强、乐斌、陈亚玲、叶明、陈贤富、沈阿宝、陈亚珠、李伟庄、章富科、方定桂、刘军毅、戴琴、王永行、刘伟红等参与了编写工作。在收集资料的过程中，中国传动网和中国自动化网给予了很大帮助，美国邦纳、日本欧姆龙、美国贺利氏、深圳亚特克等厂家的技术人

员一如既往地给予帮助，并提供了相当多的典型案例和调试经验。同时在编写中曾参考了国内外许多专家、学者、工程技术人员最新发表的论文、著作等资料，作者在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足和错误，希望广大读者能够给予更多的批评、指正，作者将不胜感激。

作 者

2012年12月

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 传感器与仪表概述····· 1

- 1.1 传感器与仪表功能····· 1
  - 1.1.1 传感器的定义与作用····· 1
  - 1.1.2 传感器的数学模型、特性与技术指标····· 4
  - 1.1.3 仪表的定义····· 6
  - 1.1.4 传感器与仪表的关系····· 8
- 1.2 电阻式传感器的工作原理····· 9
  - 1.2.1 电阻式传感器的定义····· 9
  - 1.2.2 应变式传感器的工作原理····· 9
  - 1.2.3 应变片的直流电桥测量电路····· 10
- 1.3 电感式传感器的工作原理····· 11
  - 1.3.1 电感式传感器····· 11
  - 1.3.2 自感式传感器····· 12
  - 1.3.3 互感式传感器(差动变压器)····· 12
  - 1.3.4 电涡流传感器····· 13
  - 1.3.5 压磁式传感器····· 14
- 1.4 电容式传感器的工作原理····· 15
  - 1.4.1 电容式传感器的定义····· 15
  - 1.4.2 改变极板遮盖面积的电容式传感器····· 15
  - 1.4.3 改变介质介电常数的电容式传感器····· 16
  - 1.4.4 改变极板间距离的电容式传感器····· 17
- 1.5 传感器与仪表的接口电路····· 18
  - 1.5.1 传感器输出信号的特点····· 18
  - 1.5.2 常见传感器接口电路····· 19

- 1.5.3 抗干扰技术····· 20

## 思考与练习····· 21

## 第 2 章 热工传感器与仪表应用····· 23

- 2.1 流量传感器与仪表····· 23
  - 2.1.1 流量计量的概念····· 23
  - 2.1.2 电磁流量计的工作原理、选型与安装····· 27
  - 2.1.3 弯管流量计在小流量计量中的应用····· 33
  - 2.1.4 玻璃转子流量计的选型与刻度修正····· 35
- 2.2 温度传感器与仪表····· 37
  - 2.2.1 温度传感器与仪表的基本概念····· 37
  - 2.2.2 热敏电阻的种类及其应用····· 39
  - 2.2.3 热电阻传感器及其应用····· 42
  - 2.2.4 热电偶传感器及其应用····· 45
  - 2.2.5 集成温度传感器及其应用····· 48
- 2.3 压力传感器与仪表····· 50
  - 2.3.1 流体压力的概念····· 50
  - 2.3.2 压阻式传感器及其应用····· 51
  - 2.3.3 压力传感器的选型····· 54
  - 2.3.4 1151 系列电容式压力、差压变送器的测试与维修····· 57
  - 2.3.5 双法兰智能差压变送器的安装、调试与故障处理····· 59
- 2.4 液位传感器与仪表····· 66
  - 2.4.1 液位与液位传感器的概念····· 66
  - 2.4.2 锅炉电极式液位传感器····· 67
  - 2.4.3 超声波液位传感器····· 69

思考与练习 .....	71	4.4 pH 传感器 .....	136
<b>第3章 机械传感器与仪表应用 .....</b>	<b>73</b>	4.4.1 pH 概念及传感器 .....	136
3.1 霍尔传感器 .....	73	4.4.2 在线 pH 传感器 .....	137
3.1.1 霍尔传感器的概念 .....	73	思考与练习 .....	141
3.1.2 霍尔元件的测量电路 .....	75	<b>第5章 光电传感器与仪表应用 .....</b>	<b>142</b>
3.1.3 霍尔传感器在机械设备上的应用 .....	77	5.1 光电传感器与光电开关 .....	142
3.2 角度编码器 .....	80	5.1.1 光电传感器与光电开关概述 .....	142
3.2.1 角度编码器的分类 .....	80	5.1.2 光敏器件的应用 .....	147
3.2.2 编码器在数字测速中的应用 .....	82	5.1.3 光电开关的接线方式 .....	149
3.2.3 编码器在测量位移中的应用 .....	83	5.1.4 光电开关的具体应用 .....	151
3.2.4 编码器的其他应用 .....	87	5.2 光纤传感器 .....	156
3.2.5 编码器的安装方式 .....	89	5.2.1 光纤传感器的工作原理 .....	156
3.3 振动传感器 .....	91	5.2.2 光纤传感器的分类 .....	157
3.3.1 振动测试与振动传感器概念 .....	91	5.2.3 光纤传感器在各行业中的应用 .....	159
3.3.2 电涡流传感器 .....	93	5.3 激光传感器 .....	161
3.3.3 压电式传感器 .....	95	5.3.1 激光传感器原理 .....	161
3.3.4 VT800 动平衡仪 .....	99	5.3.2 激光传感器在工业中的应用 .....	165
3.4 张力传感器 .....	102	5.4 视觉传感器 .....	171
3.4.1 典型的张力控制系统 .....	102	5.4.1 视觉传感器原理 .....	171
3.4.2 张力传感器和张力的信号 .....	103	5.4.2 线阵 CCD 扫描实现零件二维尺寸的高精度测量 .....	174
3.4.3 TC818 张力控制器的应用 .....	105	5.4.3 视觉检测系统的结构与工作原理 .....	176
思考与练习 .....	117	5.4.4 一种机器人视觉系统模块的设计 .....	177
<b>第4章 化学传感器与仪表应用 .....</b>	<b>120</b>	5.4.5 iVu 系列视觉传感器在标签喷码检测上的应用 .....	179
4.1 气体传感器 .....	120	思考与练习 .....	180
4.1.1 气体传感器的概念及工作原理 .....	120	<b>附录 .....</b>	<b>182</b>
4.1.2 可燃性气体的气体传感器 .....	124	附录 A 工业热电阻分度表 .....	182
4.1.3 气体传感器的应用 .....	127	附录 B 镍-镍硅(镍铝) K 型热电偶分度表(自由端温度为 0℃) .....	184
4.2 烟雾传感器 .....	129	附录 C Banner 公司部分光纤及传感器资料 .....	185
4.2.1 基本概念 .....	129	<b>参考文献 .....</b>	<b>193</b>
4.2.2 烟雾传感器在宾馆火灾自动报警系统中的应用 .....	130		
4.3 湿度与水分传感器 .....	131		
4.3.1 湿度与湿度传感器 .....	131		
4.3.2 含水量检测方法 .....	134		
4.3.3 湿度传感器的应用 .....	135		



### 导读

传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器的输出信号多为易于处理的电量，如电压、电流、频率等。仪表在自动化中应用非常广泛，但是仪表的定义却没有被规范化，在日常工作中经常有一次仪表、二次仪表和控制仪表等称呼。传感器与仪表关系密切，在很多时候指的是同一种产品。

常见的传感器主要有三种类型，包括由弹性敏感元件、电阻应变计、补偿电阻和外壳组成的电阻式传感器；用电磁感应把被测的物理量如位移、压力、流量、振动等转换成线圈自感系数和互感系数而变化的电感式传感器；利用力学量变化使电容器中的一个参数发生变化来实现信号变换的电容传感器。

## 1.1 传感器与仪表功能

### 1.1.1 传感器的定义与作用

#### 1. 传感器的定义

国家标准 GB 7665—2005《传感器通用术语》对传感器的定义是：“能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成”。

传感器的定义包含了以下几方面的意思：①传感器是测量装置，能完成检测任务；②它的输出量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；③它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量；④输出与输入有对应关系，且应有一定的精确程度。

关于传感器，我国曾出现过多种名称，如发送器、传送器、变送器等，它们的内涵相同或相似，所以近来已逐渐趋向统一，大都使用“传感器”这一名称了，但是由于行业的习

惯问题，有些传感器还是被称呼为“变送器”，因此在本书的部分章节中也会出现“变送器”等字样，以便能更贴近行业应用。

传感器从字面上可以作如下解释：传感器的功用是一感二传，即感受被测信息，并传出去。

传感器组成框图如图 1-1 所示。

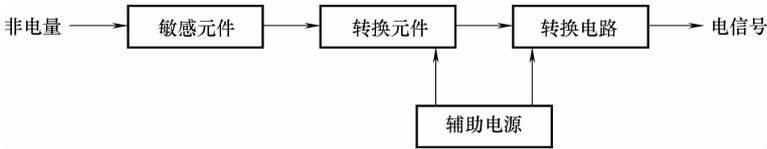


图 1-1 传感器组成框图

传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器的输出信号多为易于处理的电量，如电压、电流、频率等。图 1-1 中敏感元件是在传感器中直接感受被测量的元件。即被测量通过传感器的敏感元件转换成一个与之有确定关系、更易于转换的非电量。这一非电量通过转换元件被转换成电参量。转换电路的作用是将转换元件输出的电参量转换成易于处理的电压、电流或频率量。

图 1-2 是一种气体压力传感器的示意图，膜盒 2 的下半部与壳体 1 固接，上半部通过连杆与磁心 4 相连，磁心 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入转换电路 5。

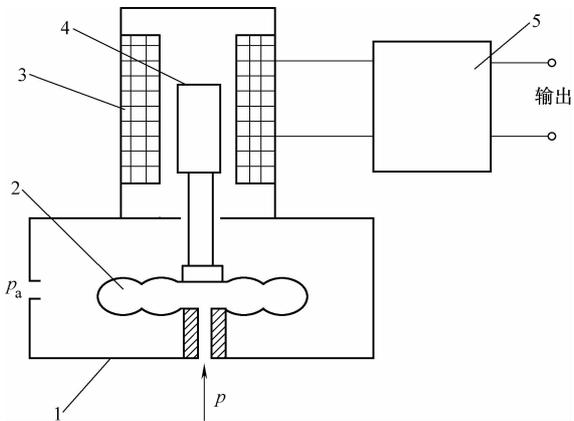


图 1-2 气体压力传感器

这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力相通，内部感受被测压力，当压力变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

转换元件：敏感元件的输出就是它的输入，它把输入转换成电路参量。在图 1-2 中，转换元件是可变电感线圈 3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

实际上，有些传感器很简单，如采用开环系统；有些则较复杂，如采用带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶就是这样，如图 1-3 所示（具体原理将在第 2 章介绍）。

有些传感器由敏感元件和转换元件组成；有些传感器，转换元件不只一个，要经过若干次转换。

敏感元件与转换元件在结构上常是装在一起

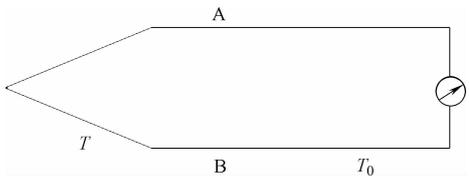


图 1-3 热电偶

的，而转换电路为了减小外界的影响也希望和它们装在一起，不过由于空间的限制或者其他原因，转换电路常装入别的电箱中。尽管如此，因为不少传感器要在通过转换电路后才能输出电量信号，从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。

## 2. 传感器的作用

人们为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官。而单靠人们自身的感觉器官，在研究自然现象和规律以及生产活动中它们的功能就远远不够了。为了适应这种情况，就需要传感器，因此可以说，传感器是人类五官的延长，又称之为电五官。

新技术革命的到来，世界开始进入信息时代。在利用信息的过程中，首先要解决的就是要获取准确、可靠的信息，而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。图 1-4 为用于食品包装传输线上的食品到位检测的光电传感器。因此可以说，没有众多的优良的传感器，现代化生产也就失去了基础。

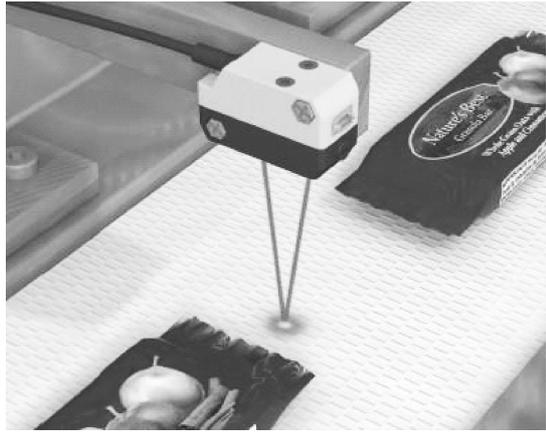


图 1-4 食品包装传输线上的食品到位检测用光电传感器

在基础学科研究中，传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展，进入了许多新领域：例如在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙，微观上要观察小到 cm 的粒子世界，纵向上要观察长达数十万年的天体演化，短到秒的瞬间反应。此外，还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术的研究，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然，要获取大量人类感官无法直接获取的信息，没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍，首先就在于对象信息的获取存在困难，而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现，往往会带动该领域内的突破。一些传感器的发展，往往是一些边缘学科开发的先驱。

总而言之，传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程、甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说，从茫茫的太空，到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。图 1-5 所示就是用于卫星的 CCD 视觉传感器。

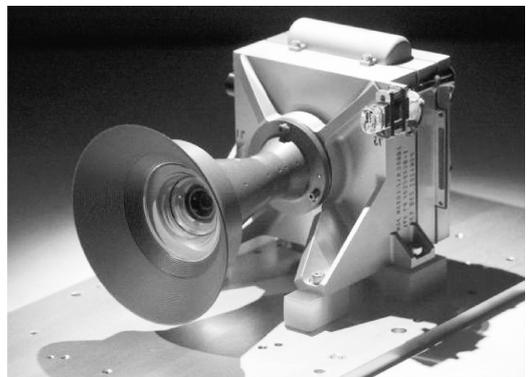


图 1-5 用于卫星的 CCD 视觉传感器

由此可见，传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用是十分明显的。

世界各国都十分重视这一领域的发展。相信不久的将来，传感器技术将会出现一个飞跃，达到与其重要地位相匹配的新水平。

### 3. 传感器分类

根据某种原理设计的传感器可以同时检测多种物理量，而有时一种物理量又可以用几种传感器测量。传感器有很多种分类方法。但目前对传感器尚无一个统一的分类方法，比较常用的有如下四种：

1) 按传感器的物理量分类，可分为位移、力、速度、温度、湿度、流量、气体成分等传感器。

2) 按传感器工作原理分类，可分为电阻、电容、电感、电压、霍尔、光电、光栅、热电偶等传感器。

3) 按传感器输出信号的性质分类，可分为输出为开关量（“1”和“0”或“开”和“关”）的开关型传感器；输出为模拟量的模拟式传感器；输出为脉冲或代码的数字式传感器。

4) 根据传感器的能量转换情况，可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

① 能量控制型传感器：在信息变化过程中，其能量需要外电源供给。如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类传感器。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器也属于此类传感器。

② 能量转换型传感器：主要由能量变换元件构成，它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电动势效应等的传感器都属于此类传感器。

## 1.1.2 传感器的数学模型、特性与技术指标

### 1. 传感器数学模型

传感器检测被测量，应该按照规律输出有用信号，因此需要研究其输出和输入量之间的关系及特性，理论上用数学模型来表示输出和输入量之间的关系和特性。

传感器可以检测静态量和动态量，输入信号的不同，传感器表现出来的关系和特性也不尽相同。在这里，将传感器的数学模型分为动态和静态两种，本书只研究静态数学模型。

静态数学模型是指在静态信号作用下，传感器输出与输入量之间的一种函数关系。表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中， $x$  为输入量； $y$  为输出量； $a_0$  为零输入时的输出，也称零位误差； $a_1$  为传感器的线性灵敏度，用  $K$  表示； $a_2 \cdots a_n$  为非线性项系数。

根据传感器的数学模型一般把传感器分为三种：

1) 理想传感器，静态数学模型表现为

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

2) 线性传感器，静态数学模型表现为

$$y = a_0 + a_1x \quad (1-3)$$

3) 非线性传感器，静态数学模型表现为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (a_2 \cdots a_n \text{ 中至少有一个不为零}) \quad (1-4)$$

## 2. 传感器的特性与技术指标

传感器的静态特性是指对静态的输入信号，传感器的输出量与输入量之间的关系。因为输入量和输出量都和时间无关，它们之间的关系，即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程，或以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、分辨率、重复性和迟滞等，传感器的参数指标决定了传感器的性能以及选用传感器的原则。

(1) 传感器的灵敏度 灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出量变化 $\Delta y$ 对输入量变化 $\Delta x$ 的比值。它是输出-输入特性曲线的斜率。

$$K = dy/dx \quad (1-5)$$

如果传感器的输出和输入之间为线性关系，则灵敏度 $K$ 是一个常数，即特性曲线的斜率（见图1-6a）。否则，它将随输入量的变化而变化（见图1-6b）。图1-6中，输入量为 $F$ ，输出量为 $U$ 。从数学角度看，输出信号曲线越陡， $dy/dx$ 的数值越大，其灵敏度越高。

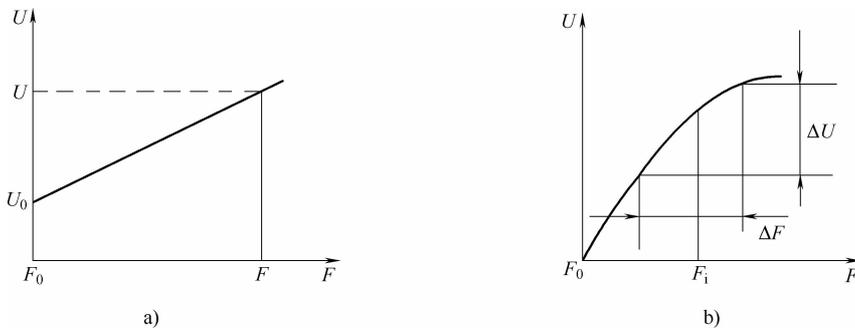


图1-6 灵敏度

a) 非线性灵敏度 b) 线性灵敏度

灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。

例如，某位移传感器，在位移变化1mm时，输出电压变化为200mV，则其灵敏度应表示为200mV/mm。当传感器的输出、输入量的量纲相同时，灵敏度可理解为放大倍数。

通过提高灵敏度，可得到较高的测量精度。但灵敏度越高，测量范围越窄，稳定性也往往越差。

(2) 传感器的线性度 在通常情况下，传感器的实际静态特性输出是一条曲线而非直线。在实际工作中，为使仪表具有均匀刻度的读数，常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线，线性度（非线性误差）就是这个近似程度的一个性能指标。拟合直线的选取有多种方法。如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线；或将与特性曲线上各点偏差的二次方和为最小的理论直线作为拟合直线，此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

图1-7所示的线性度误差的计算公式为

$$E = +\Delta_{\max}/Y_m \times 100\% \quad (1-6)$$

式中， $\Delta_{\max}$ 是实际曲线和拟合直线之间的最大差值； $Y_m$ 为量程。

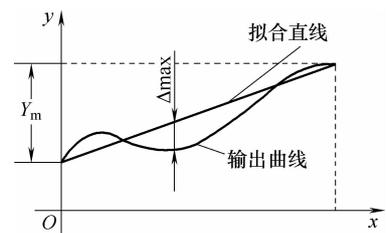


图1-7 线性度

(3) 传感器的分辨率 分辨率是指传感器可能感受到的被测量的最小变化的能力。也就是说,如果输入量从某一非零值缓慢地变化,当输入变化值未超过某一数值时,传感器的输出不会发生变化,即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。只有当输入量的变化超过分辨率时,其输出才会发生变化。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨率并不相同,因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨率的指标,上述指标若用满量程的百分比表示,则称为分辨率。

(4) 重复性 传感器在输入量按同一方向做全量程多次测试时,所得特性曲线不一致的程度(见图1-8)。重复性误差的计算公式为

$$E_z = +\Delta_{\max}/Y_m \times 100\% \quad (1-7)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 是多次测量曲线之间的最大差值(如图1-8中取 $\Delta_{\max 1}$ 和 $\Delta_{\max 2}$ 中的最大值); $Y_m$ 是传感器的量程。

(5) 迟滞现象 传感器在正向行程(输入量增大)和反向行程(输入量减小)期间,特性曲线不一致的程度。闭合路径称为滞环。图1-9所示为迟滞性。迟滞性误差的计算公式为

$$E_{\max} = +\Delta_{\max}/Y_m \times 100\% \quad (1-8)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 是正向曲线与反向曲线之间的最大差值; $Y_m$ 是传感器的量程。

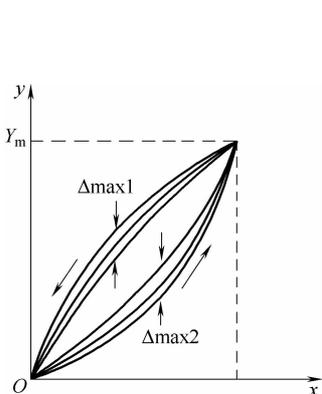


图 1-8 重复性

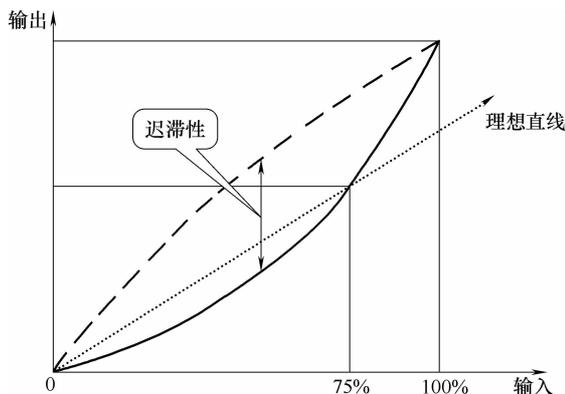


图 1-9 迟滞性

### 1.1.3 仪表的定义

仪表在自动化中应用非常广泛,但是仪表的定义却没有规范化,在日常工作中经常有以下几种称呼:

#### 1. 一次仪表

一次仪表是自动检测装置的部件(元件)之一,又称测量仪表。它带有感受元件,用以感受被测介质参数的变化;或具有标尺,指示读数;或没有标尺,本身不指示读数。图1-10所示为一次仪表(液位计)。

在生产过程中,对测量仪表往往采用按换能次数来定性的称呼,能量转换一次的称一次仪表,转换两次的称二次仪表。以热电偶测量温度为例,热电偶本身将热能转换成电能,故

称一次仪表，若再将电能用电位计（或毫伏计）转换成指针移动的机械能时，进行第二次能量转换就称为二次仪表。换能的次数超过两次的往往都按两次称呼，如孔板测量流量，孔板本身为一次仪表，差压变送器没有称呼，而指示仪表则叫做二次仪表。

## 2. 二次仪表

二次仪表是自动检测装置的部件之一，用以指示、记录或计算来自一次仪表的测量结果（见图 1-11）。二次仪表接受的标准信号一般有三种：

- ① 气动信号，0.02 ~ 0.10kPa；
- ② II 型电动单元仪表信号，DC 0 ~ 10mA；
- ③ III 型电动单元仪表信号，DC 4 ~ 20mA。

也有个别的不用标准信号，一次仪表发出电信号，二次仪表直接指示，如远传压力表等。二次仪表通常安装在仪表盘上，按安装位置又可分为盘装仪表和架装仪表。

## 3. 控制仪表

控制仪表是自动控制被控变量的仪表。它将测量信号与给定值比较后，对偏差信号按一定的控制规律进行运算，并将运行结果以规定的信号输出。工程上将构成一个过程控制系统的各个仪表统称为控制仪表。而在化工生产中，又称为控制器或调节仪表，它是将被控变量按一定精确度自动控制在设定值附近的化工仪表。它把需要控制的被控变量的测量值与要求的设定值进行比较，得出偏差，按照一定的函数关系（称为控制规律）发生控制作用，操纵控制阀或其他执行器以实现对生产过程的控制。在化工生产中常见的被控变量有温度、流量、压力、液位和成分等。图 1-12 所示为控制仪表的一种——PID 温控仪。

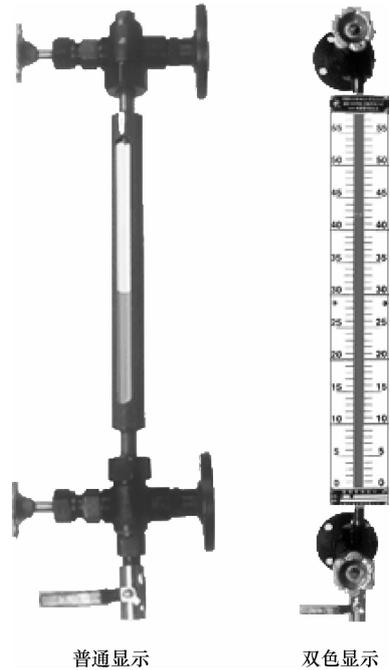


图 1-10 一次仪表（液位计）



图 1-11 二次仪表



图 1-12 控制仪表（PID 温控仪）

控制仪表的分类有以下三种：

1) 常规的控制仪表内部用模拟信号联系和运算，故称模拟控制仪表，也称调节器。控制仪表内部用数字信号联系和运算的，称为数字式控制仪表，也称数字调节器。

2) 按控制仪表使用能源可分为电动、气动和液动三种。

3) 按结构又可分为基地式和单元组合式两种。基地式的特点在于仪表的所有部件之间,以不可分离的机械结构相连接,装在一个箱壳之内,利用一台仪表就能解决一个简单自动化系统的测量、记录、控制等全部问题,如温度控制器、压力控制器、流量控制器、液位控制器等。单元组合式控制器包括变送、调节、运算、显示、执行等单元,其特点在于仪表由各种独立的单元组合而成,单元之间采用统一化标准的电信号(4~20mA或0~10mA)或气压信号(0.02~0.1MPa)联络。根据不同要求,可把单元以任意数量组成各种简单的或复杂的控制系统。常用的有电动单元组合式和气动单元组合式控制仪表。

### 1.1.4 传感器与仪表的关系

从以上的分析可以看出,传感器与仪表关系密切,在很多时候还是类指同一种产品,因此本书为了符合生产实际,将传感器与仪表放在一起。

传感器与仪表应用领域广泛,覆盖了工业、农业、交通、科技、环保、国防、文教卫生、人民生活等各方面,在国民经济建设各行各业的运行过程中承担着把关者和指导者的任务。由于其地位特殊、作用大,对国民经济有巨大倍增和拉动作用,因此有着良好的市场需求和巨大的发展潜力。

(1) 在人类社会进入知识经济时代、信息技术高速发展的背景下,传感器与仪表及其测量控制技术得到日益广泛应用,给传感器与仪表行业的快速发展提供了良好契机。

传感器与仪表是信息产业的源头和组成部分,是信息技术的重要基础。钱学森院士对新技术革命有如下论述:新技术革命的关键技术是信息技术,信息技术是由测量技术、计算机技术、通信技术三部分组成,测量技术则是关键和基础。国际上也将信息技术生产行业定性为计算机、通信、传感器与仪表3个行业。

(2) 传感器与仪表广泛应用于装备、改造传统产业的工艺流程的测量和控制,是现代化大型重点成套装备的重要组成部分,是信息化带动工业化的重要纽带。

据有关资料显示,随着装备水平的提高,传感器与仪表在工程设备总投资中的比重已达到18%左右;在宝钢的现代化技术装备投资中,有1/3的经费用于购置仪器和自控系统。

(3) 高水平科学研究和高新技术产业的发展迅速提高了对传感器与仪表的需求,传感器与仪表在实施科教兴国、知识创新和技术创新的过程中,正发挥着十分重要的作用。

各项高水平的科学实验是不能离开科学仪器的,现代科学的进步也越来越依靠尖端仪器的发展。现代生物、医学、生态环境保护、新材料(纳米材料等)、现代农业的发展等,同样是建立在尖端精密仪器科技的发展基础上。

(4) 传感器与仪表已成为现代国防建设技术装备的重要组成部分,我国航天工业的固定资产1/3是传感器与仪表和计算机;运载火箭的仪器开支占全部研制经费的1/2左右;导弹的高精度制导、控制,航天经纬测量和红外成像、专用高温实验设备等都是国防装备中的重点产品。

(5) 传感器与仪表在探索人类社会可持续发展、抵御自然灾害、依法治国并在实施有关法律(质量、商检、计量、环保等)的过程中作为重要实施手段和保障工业被普遍采用。

## 1.2 电阻式传感器的工作原理

### 1.2.1 电阻式传感器的定义

电阻式传感器是以电阻应变计为转换元件，主要由弹性敏感元件、电阻应变计、补偿电阻和外壳组成，可根据具体测量要求设计成多种结构形式。弹性敏感元件受到所测量的力而产生变形，并使附着其上的电阻应变计一起变形。电阻应变计再将变形转换为电阻值的变化，从而可以测量力、压力、扭矩、位移、加速度和温度等多种物理量。图 1-13 所示为电阻应变式位移传感器。

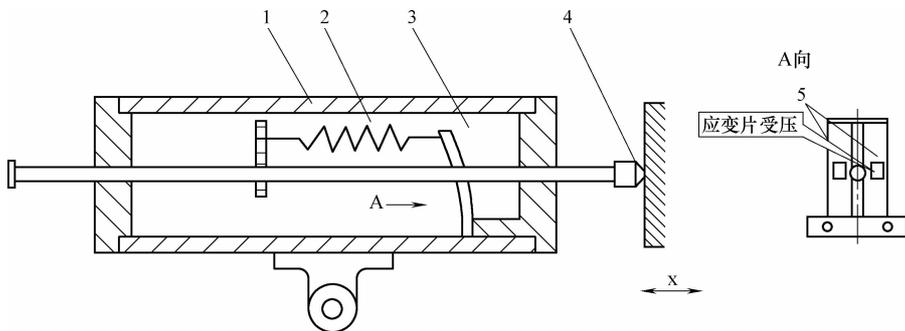


图 1-13 电阻应变式位移传感器

1—壳体 2—拉簧 3—悬臂架 4—测杆 5—应变片

电阻应变式传感器的优点是精度高、测量范围广、寿命长、结构简单、频响特性好，能在恶劣条件下工作，易于实现小型化、整体化和品种多样化等。它的缺点是对于大应变有较大的非线性、输出信号较弱，但可采取一定的补偿措施。因此，它广泛应用于自动测试和控制技术中。

### 1.2.2 应变式传感器的工作原理

传感器中的电阻应变片具有金属的应变效应，即在外力作用下产生机械形变，从而使电阻值随之发生相应的变化。电阻应变片主要有金属和半导体两类，金属应变片有金属丝式、箔式、薄膜式之分。半导体应变片具有灵敏度高（通常是丝式、箔式的几十倍）、横向效应小等优点。

图 1-14 为金属丝应变效应示意。

电阻丝的电阻公式为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-9)$$

式中， $\rho$  是电阻率，是比例常数，它与导体的材料有关，是一个反映材料导电性能的物理量； $L$  为长度； $S$  为截面积。

求  $R$  的全微分得

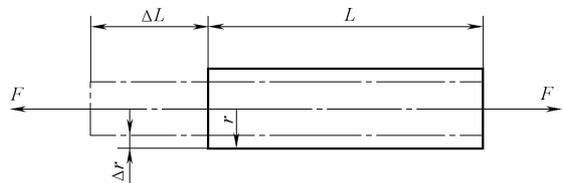


图 1-14 金属丝应变效应

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-10)$$

式中,  $\frac{\Delta L}{L}$  是长度相对变化, 即应变  $\varepsilon$ 。

金属丝的变形公式为

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r} = -2\mu \frac{\Delta L}{L} \quad (1-11)$$

式中,  $\mu$  为泊松比, 对于钢,  $\mu = 0.285$ 。

故应变效应数学表达式为

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-12)$$

灵敏度系数为

$$k = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon} \quad (1-13)$$

因此应变片的应变效应原理可以用公式表达为

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon_x \quad (1-14)$$

式中,  $K$  为电阻应变片的灵敏系数。

### 1.2.3 应变片的直流电桥测量电路

单臂、半桥、全桥是指在电桥组成工作时, 有 1 个桥臂、2 个桥臂、全部 4 个桥臂 (用应变片) 阻值都随被测物理量而变化。如图 1-15 所示是直流电桥转换电路, 它的 4 个桥臂由电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  组成,  $E$  是供桥电压, 当  $R_L = \infty$  时, 输出电压为

$$U_0 = E \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (1-15)$$

#### 1. 电桥平衡条件

直流电桥平衡的条件为

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (1-16)$$

#### 2. 电压灵敏度

电桥的输出电压 (或输出电流) 与被测应变在电桥的一个桥臂上引起的电阻变化率之间的比值, 称为电桥的灵敏度。

##### (1) 单臂电桥

当  $R_1$  为应变片时组成了单臂电桥, 其电压输出为

$$U_0 = \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = E \frac{\frac{R_4}{R_3} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left( 1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right)} \quad (1-17)$$

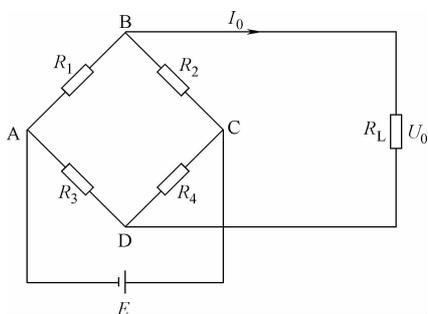


图 1-15 直流电桥转换电路

当  $R_2 = R_3 = R_4$  时, 且考虑到  $\Delta R_1 \ll R_1$ , 则可以进一步化简为

$$U_0 \approx \frac{E}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (1-18)$$

根据式 (1-5) 传感器的灵敏度公式可以推导出单臂电桥的灵敏度为

$$K_U = \frac{E}{4} C \quad (1-19)$$

式中,  $C$  为常数。

(2) 半桥

当  $R_1$  和  $R_2$  为应变片时, 则组成了半桥电路。令  $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , 其电压输出为

$$U_0 = \frac{E}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (1-20)$$

同样根据式 (1-5) 传感器的灵敏度公式可以推导出半桥的灵敏度为

$$K_U = \frac{E}{2} C \quad (1-21)$$

式中,  $C$  为常数。

(3) 全桥

全桥电路为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  都为应变片, 则当 4 个电阻相等时, 其电压输出为

$$U_0 = E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (1-22)$$

其灵敏度为

$$K_U = EC \quad (1-23)$$

式中,  $C$  为常数。

## 1.3 电感式传感器的工作原理

### 1.3.1 电感式传感器

电感式传感器是利用电磁感应把被测的物理量如位移、压力、流量、振动等转换成线圈的自感系数和互感系数的变化, 再由电路转换为电压或电流的变化量输出, 实现非电量到电量的转换。

电感式传感器具有以下特点:

- 1) 结构简单, 传感器无活动触点, 因此工作可靠、寿命长。
- 2) 灵敏度和分辨率高, 能测出  $0.01 \mu\text{m}$  的位移变化。传感器的输出信号强, 电压灵敏度一般每毫米的位移可达数百毫伏的输出。
- 3) 线性度和重复性都比较好, 在一定位移范围 (几十微米至数毫米) 内, 传感器非线性误差可达  $0.05\% \sim 0.1\%$ 。

同时, 这种传感器能实现信息的远距离传输、记录、显示和控制, 它在工业自动控制系统中被广泛采用。但不足的是, 它有频率响应较低、不适合快速动态测控等缺点。

### 1.3.2 自感式传感器

由铁心和线圈构成的将直线或角位移的变化转换为线圈电感量变化的传感器，又称电感式位移传感器。这种传感器的线圈匝数和材料磁导率都是一定的，其电感量的变化是由于位移输入量导致线圈磁路的几何尺寸变化而引起的。当把线圈接入测量电路并接通激励电源时，就可获得正比于位移输入量的电压或电流输出。电感式传感器的特点是：①无活动触点、可靠度高、寿命长；②分辨率高；③灵敏度高；④线性度高、重复性好；⑤测量范围宽（测量范围大时分辨率低）；⑥无输入时有零位输出电压，引起测量误差；⑦对激励电源的频率和幅值稳定性要求较高；⑧不适用于高频动态测量。电感式传感器主要用于位移测量和可以转换成位移变化的机械量（如力、张力、压力、压差、加速度、振动、应变、流量、厚度、液位、比重、转矩等）的测量。常用电感式传感器有变间隙型、变面积型和螺线管插铁型。在实际应用中，这三种传感器多制成差动式，以便提高线性度和减小电磁吸力所造成的附加误差。

(1) 变间隙型电感式传感器 这种传感器的气隙  $\delta$  随被测量的变化而改变，从而改变磁阻（见图 1-16）。它的灵敏度和非线性都随气隙的增大而减小，因此常常要考虑两者兼顾。 $\delta$  一般取 0.1 ~ 0.5 mm。

(2) 变面积型电感式传感器 这种传感器的铁心和衔铁之间的相对覆盖面积（即磁通截面）随被测量的变化而改变，从而改变磁阻（见图 1-17）。它的灵敏度为常数，线性度也很好。

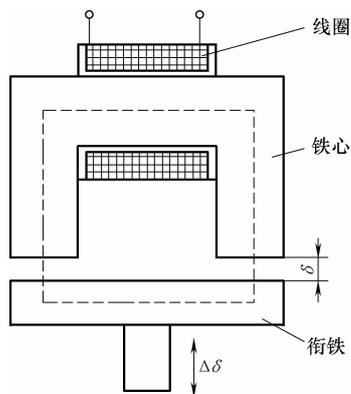


图 1-16 变间隙型电感式传感器

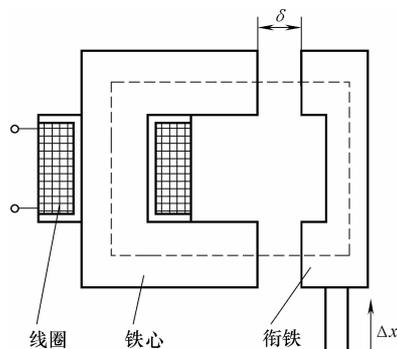


图 1-17 变面积型电感式传感器

(3) 螺线管插铁型电感式传感器 它由螺线管线圈和与被测物体相连的柱型衔铁构成。其工作原理基于线圈磁力线泄漏路径上磁阻的变化。衔铁随被测物体移动时改变了线圈的电感量。这种传感器的量程大，灵敏度低，结构简单，便于制作。

### 1.3.3 互感式传感器（差动变压器）

它是一种广泛用于电子技术和非电量检测中的变压装置。用于测量位移、压力、振动等非电量参量。它既可用于静态测量，也可用于动态测量。

差动变压器的基本组成部分包括一个线框和一个铁心。在线框上设置一个原绕组和两个对称的副绕组，铁心放在线框中央的圆柱形孔中。在原绕组中施加交流电压时，两个副绕组中就会产生感应电动势  $e_1$  和  $e_2$ 。如果两个副绕组按反向串联（见图 1-18），则它的总输出

电压为

$$u_2 = u_{21} - u_{22} \approx e_1 - e_2 \quad (1-24)$$

当铁心处在中央位置时，由于对称关系， $e_1 = e_2$ ，输出电压  $u_2$  为零。如果铁心向右移动，则穿过副绕组 2 的磁通将比穿过副绕组 1 的磁通多，于是感应电动势  $e_2 > e_1$ ，差动变压器输出电压  $u_2$  不等于零，而且输出电压的大小与铁心位移  $x$  之间基本成线性关系，并呈 V 字形。用适当的测量电路测量，可以得到差动变压器输出与位移  $x$  成比例的线性读数。最常用的测量电路是差动整流电路，它把两个二次侧电压分别整流后，以它们的差作为输出。差动整流电路有电流输出型和电压输出型，前者用于连接低阻抗负载的场合；后者则用于连接高阻抗负载的场合。

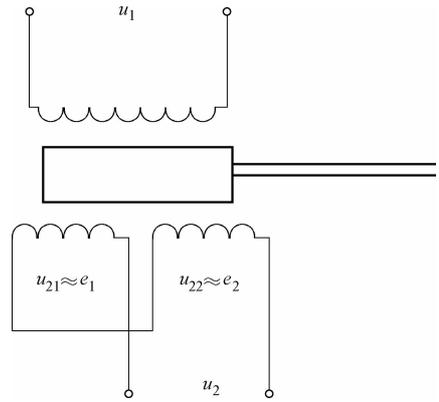


图 1-18 差动变压器原理示意

图 1-19 所示分别是互感式传感器类别，其中图 1-19a、图 b、图 c 为变气隙型互感式传感器；图 1-19d、图 e 为变面积型互感式传感器；图 1-19f 为螺线管型互感式传感器。

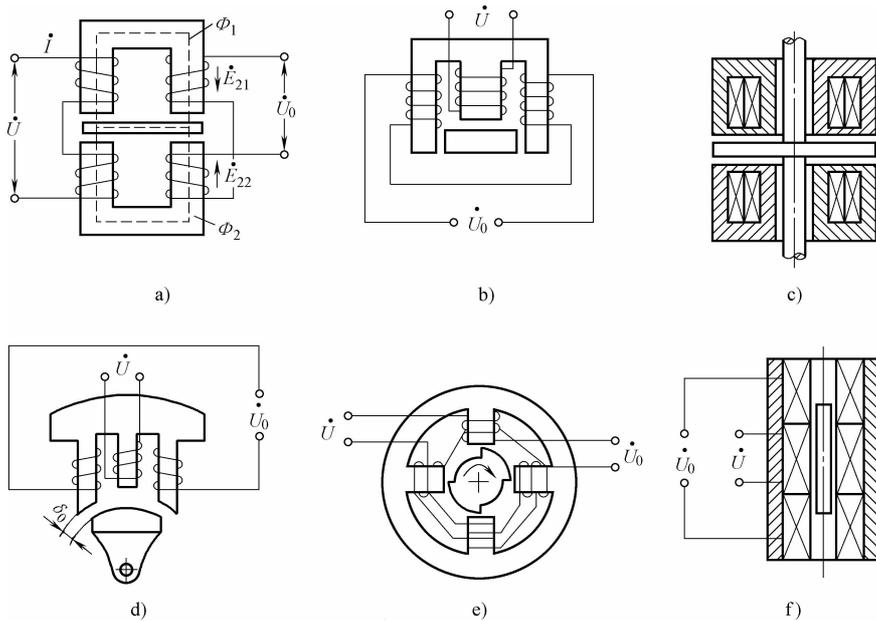


图 1-19 互感式传感器类别

- a) 变气隙型互感式传感器    b) 变气隙型互感式传感器    c) 变气隙型互感式传感器  
d) 变面积型互感式传感器    e) 变面积型互感式传感器    f) 螺线管型互感式传感器

### 1.3.4 电涡流传感器

电涡流传感器能静态和动态地测量被测金属导体距探头表面的距离，具有非接触、高线性度、高分辨率等特点。它是一种非接触式的线性化计量工具。电涡流传感器能准确测量被测体（必须是金属导体）与探头端面之间静态和动态的相对位移变化（见图 1-20）。

根据法拉第电磁感应原理，块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中做切割磁力线运动时，导体内将产生呈涡旋状的感应电流，此电流叫电涡流，以上现象称为电涡流效应。而根据电涡流效应制成的传感器称为电涡流式传感器。

前置器中，高频振荡电流通过延伸电缆流入探头线圈，在探头头部的线圈中产生交变的磁场。当被测金属体靠近这一磁场，则在此金属表面产生感应电流，与此同时该电涡流场也产生一个方向与头部线圈方向相反的交变磁场，由于其反作用，使头部线圈高频电流的幅度和相位得到改变（线圈的有效阻抗），这一变化与金属体磁导率、电导率、线圈的几何形状、几何尺寸、电流频率以及头部线圈到金属导体表面的距离等参数有关。输出信号的大小随探头到被测体表面之间的间距而变化，电涡流传感器就是根据这一原理实现对金属物体的位移、振动等参数的测量（见图 1-21）。

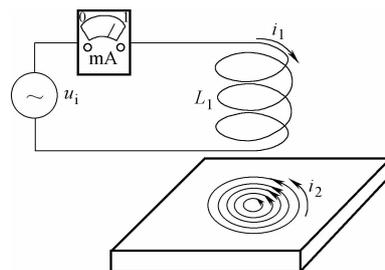


图 1-20 电涡流传感器

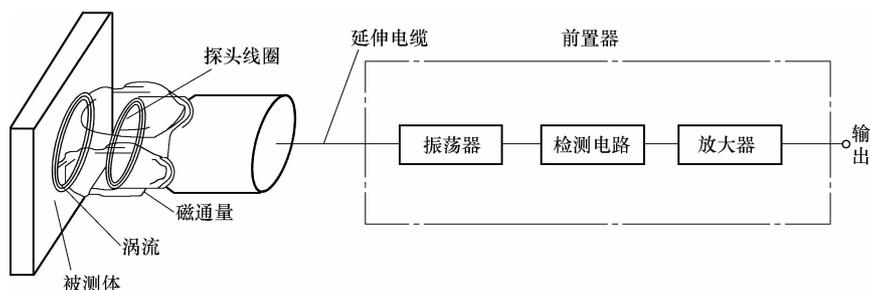


图 1-21 电涡流传感器工作原理

电涡流传感器的具体功能与原理将在第 3 章中进行详细的介绍。

### 1.3.5 压磁式传感器

压磁式传感器是电感式传感器的一种，也称为磁弹性传感器，是一种新型传感器。它的工作原理是建立在磁弹性效应基础之上的，即利用这种传感器将作用力（如弹性应力、残余应力等）的变化转化成传感器导磁体的磁导率变化并输出电信号。压磁式传感器的优点很多，如输出功率大、信号强、结构简单、牢固可靠、抗干扰性能好、过载能力强、便于制造、经济实用，可用在给定参数的自动控制电路中，但测量精度一般，频响较低。近年来，压磁式传感器不仅在自动控制上得到越来越多的应用，而且在对机械力（弹性应力、残余应力）的无损测量方面，也为人们所重视，并得到相当成功的应用。在生物医学领域对骨科及运动医学的测试也正在应用该类传感器。压磁式传感器是一种有发展前途的传感器。

压磁式传感器是一种有源传感器，它的工作原理是基于材料的压磁效应。所谓压磁效应就是在外力作用下，铁磁材料内部发生应变，产生应力，使各磁畴之间的界限发生移动，从而使磁畴磁化强度矢量转动，因而铁磁材料的磁化强度也发生相应的变化，这种由于应力使铁磁材料磁化强度变化的现象，称为压磁效应。

若某一铁磁材料上绕有线圈，在外力的作用下，铁磁材料的磁导率发生变化，则会引起线圈的电感和阻抗变化。当铁磁材料上同时绕有励磁绕组和测量绕组时，磁导率的变化将导致绕组间耦合系数的变化，从而使输出电动势发生变化。通过相应的测量电路，就可以根据输出的量值来衡量外力的作用。

图 1-22 为压磁式传感器的工作原理。T1 为供给压磁元件 P 的一次绕组励磁电压的降压变压器，T2 为外压变压器，Z1 和 Z2 为滤波器，U 为整流器，电路 A 是零电压补偿电路。

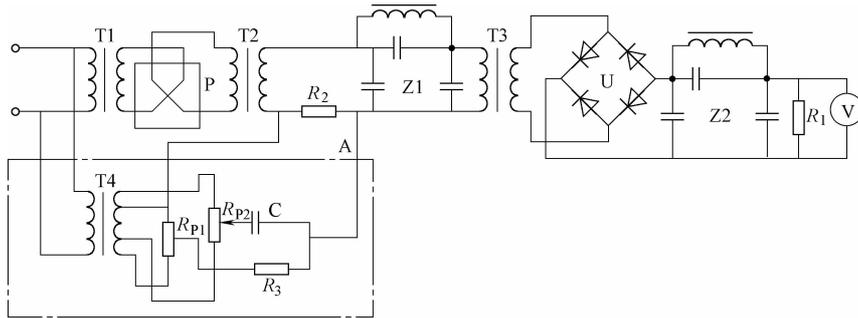


图 1-22 压磁式传感器的工作原理

## 1.4 电容式传感器的工作原理

### 1.4.1 电容式传感器的定义

电容式传感器的工作原理是利用力学量变化使电容器中的一个参数发生变化来实现信号变换的。

根据改变电容器的参数不同，电容式传感器可分为改变极板遮盖面积的电容式传感器、改变介质介电常数的电容式传感器和改变极板间距离的电容式传感器三类。

### 1.4.2 改变极板遮盖面积的电容式传感器

#### 1. 角位移型

如图 1-23 所示的角位移型电容，其电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon r^2 \theta}{2\delta} \quad (1-25)$$

式中， $\epsilon_0$  为真空介电常数， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ； $\epsilon$  为两极板间介质的介电常数。

显然，若旋转动板 1，改变圆心角  $\theta$ ，就会使电容量发生改变。

此时，传感器灵敏度为

$$S = \frac{dC}{d\theta} = \frac{\epsilon_0 \epsilon r^2}{2\delta} \quad (1-26)$$

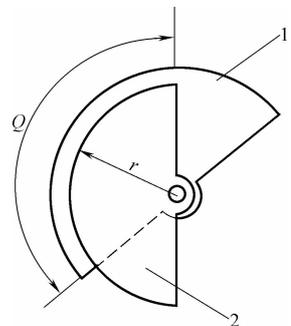


图 1-23 角位移型电容  
1—动板 2—定板

## 2. 平面线位移型

如图 1-24 所示为平面线位移型电容，则其电容量为

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon b x}{\delta} \quad (1-27)$$

电容量的大小随可变的覆盖长度  $x$  而线性变化，它的灵敏度为

$$S = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon b}{\delta} = \text{常数} \quad (1-28)$$

## 3. 圆柱体线位移型

如图 1-25 所示为柱体线位移型电容，其电容为

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon x}{\ln(D/d)} \quad (1-29)$$

当覆盖长度  $x$  变化时，电容量  $C$  发生变化。可知，它的灵敏度为

$$S = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}{\ln(D/d)} = \text{常数} \quad (1-30)$$

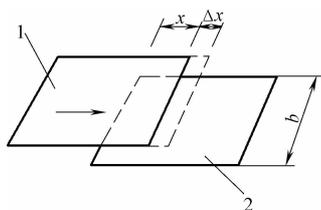


图 1-24 平面线位移型电容  
1—动板 2—定板

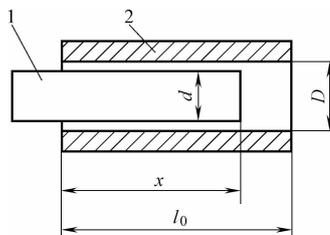


图 1-25 柱体线位移型电容  
1—动板 2—定板

### 1.4.3 改变介质介电常数的电容式传感器

图 1-26 是两种改变介质介电常数的电容式传感器的原理图。图 1-26a 常用来检测液位的高度；图 1-26b 常用来检测片状材料的厚度和介电常数。

图 1-26a 中由圆筒 1 和圆柱 2 构成电容器两极，假定部分浸入被测量液体中（液体应不能导电，若能导电，则电极需作绝缘处理）。这样，极板间的介质由两部分组成：空气介质和液体介质。由此而形成的电容式料位传感器，由于液体介质的液面发生变化，从而导致电容器的电容量  $C$  也发生变化。这种方法测量的精度很高，且不受周围环境的影响。总电容量  $C$  由液体介质部分电容  $C_1$  和空气介质部分电容量  $C_2$  两部分组成：

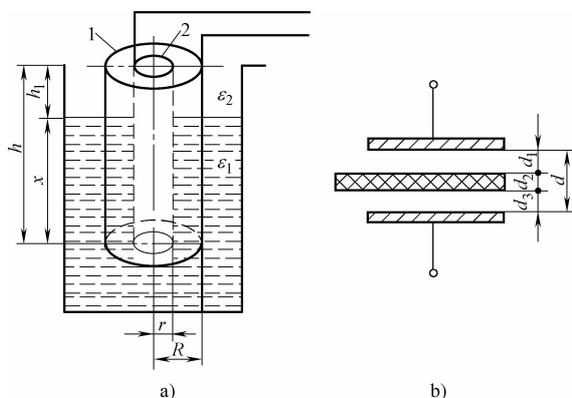


图 1-26 改变介质介电常数的电容式传感器的原理图

$$C_1 = \frac{2\pi x \varepsilon_1}{\ln R/r} \quad C_2 = \frac{2\pi(h-x) \varepsilon_2}{\ln R/r}$$

所以总电容量  $C$  为

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 = \frac{2\pi x \varepsilon_1}{\ln R/r} + \frac{2\pi(h-x) \varepsilon_2}{\ln R/r} x \\ &= \frac{2\pi h \varepsilon_1}{\ln R/r} + \frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \varepsilon_2}{\ln R/r} x \end{aligned} \quad (1-31)$$

式中,  $h$  为电容器的总高度;  $x$  为电容器浸入液体中的深度;  $R$  为同心圆电极的外半径;  $r$  为同心圆电极的内半径;  $\varepsilon_1$  为被测液体的介电常数;  $\varepsilon_2$  为空气的介电常数。

当容器的尺寸和被测介质确定后, 则  $h$ 、 $R$ 、 $r$ 、 $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  均为常数, 令

$$a_0 = \frac{2\pi h \varepsilon_1}{\ln R/r}, \quad b_0 = \frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \varepsilon_2}{\ln R/r}$$

则有

$$C = a_0 + b_0 x \quad (1-32)$$

这说明, 电容量  $C$  的大小与电容器浸入液体的深度  $x$  成正比。

图 1-26b 是在一个固定电容器的极板之间放入被测片状材料, 则它的电容量为

$$C = \frac{S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \frac{d_3}{\varepsilon_3}} \quad (1-33)$$

式中,  $S$  为电容器的遮盖面积;  $d_1$  为被测物体上侧至电极之间的距离;  $d_2$  为被测物体的厚度;  $d_3$  为被测物体下侧至电极之间的距离;  $\varepsilon_1$  为被测物体上侧至电极之间介质的介电常数;  $\varepsilon_2$  为被测物体的介电常数;  $\varepsilon_3$  为被测物体下侧至电极之间介质的介电常数。

由于  $d_1 + d_3 = d - d_2$ , 且当  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$  时, 式 (1-33) 还可写为

$$C = \frac{S}{\frac{d - d_2}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}} \quad (1-34)$$

式中,  $d$  为两极板之间的距离。

显然, 在电容器极板的遮盖面积  $S$ , 两极板之间的距离  $d$ , 被测物体上下侧至电极之间介质的介电常数  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_3$  确定时, 电容量的大小就和被测材料的厚度  $d_2$  及介电常数  $\varepsilon_2$  有关。如被测材料介电常数  $\varepsilon_2$  已知, 就可以测量材料的厚度  $d_2$ ; 或者被测材料的厚度  $d_2$  已知, 就可测量其介电常数  $\varepsilon_2$ 。这就是电容式测厚仪和电容式介电常数测量仪的工作原理。

#### 1.4.4 改变极板间距离的电容式传感器

图 1-27 是这类传感器的原理图, 图 1-27a 由两块极板构成, 其中极板 2 为固定极板, 极板 1 为与被测物体相连的活动极板, 可上下移动。当极板间的遮盖面积为  $S$ , 极板间介质的介电常数为  $\varepsilon$ , 初始极板间距为  $d_0$  时, 则初始电容  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{\varepsilon S}{d_0} \quad (1-35)$$

当活动极板 1 在被测物体的作用下向固定极板 2 位移  $\Delta d$  时, 此时电容  $C$  为

$$C = \frac{\varepsilon S}{d_0 - \Delta d} = \frac{\varepsilon S}{d_0 \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0}\right)} = C_0 \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}}$$

电容的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta C &= C - C_0 = C_0 \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} - C_0 \\ &= C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0}\right)^{-1} \end{aligned}$$

当电容器的活动极板 1 移动极小时, 即  $\Delta d \ll d_0$  时, 上式按泰勒级数展开为

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \left[ 1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \dots \right]$$

电容器电容变化量与位移  $\Delta d$  之间表现为

非线性关系, 只有当  $\frac{\Delta d}{d_0} \ll 1$  时 (通常取  $\frac{\Delta d}{d_0} = 0.02 \sim 0.1$ ), 可去除高次项得

$$C \approx C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \quad (1-36)$$

这时电容器的变化量  $\Delta C$  才近似地和位移  $\Delta d$  成正比。其相对非线性误差为

$$\delta = \frac{\left| \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \right|}{\left| \frac{\Delta d}{d_0} \right|} \times 100\% = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right| \times 100\% \quad (1-37)$$

显然, 这种单边活动的电容式传感器随着测量范围的增大, 相应的误差也增大。在实际应用中, 为了提高这类传感器的灵敏度、提高测量范围和减小非线性误差, 常将其做成差动式电容器及互感器电桥组合结构, 如图 1-27b 所示。两边是固定的电极板 1 和 2, 中间是由弹簧片支承的活动极板 3。两个固定极板与互感器两端及交流电源  $U$  相连接, 活动极板连接端子和互感器中间抽头端子为传感器的输出端, 该输出端电压  $\Delta U$  随着活动极板运动而变化。

## 1.5 传感器与仪表的接口电路

### 1.5.1 传感器输出信号的特点

传感器接口电路完成传感器输出信号的处理, 是传感器与后续电路的连接环节, 其性能直接影响到整个系统。随着自动测控系统智能化程度的越来越高, 对接口电路提出了更高的要求, 这里介绍几个应用广泛的接口电路。

由于传感器种类繁多, 其输出信号也各不相同。所以了解传感器输出信号的特点对于接

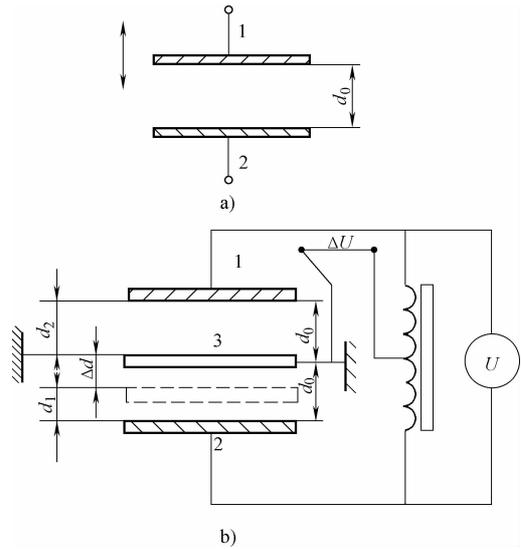


图 1-27 改变极板间距离的电容式传感器原理图

口电路尤其重要。传感器接口电路的特点主要表现为

- 1) 传感器输出信号的形式多样化, 有电阻、电感、电荷、电压等。
- 2) 传感器输出信号微弱, 不易于检测。
- 3) 传感器的输出阻抗较高, 会产生较大的信号衰减。
- 4) 传感器输出信号动态范围宽, 输出信号会受到环境因素的影响, 影响到测量的准确度。

### 1.5.2 常见传感器接口电路

根据传感器输出信号的不同特点, 要采取不同的处理方法。传感器输出信号的处理主要由接口电路来完成, 典型的接口电路主要有以下几种。

#### 1. 放大电路

传感器输出信号一般比较微弱, 因此在大多数情况下需要使用放大电路。放大电路主要将传感器输出的微弱直流信号或交流信号放大到合适的程度。放大电路一般采用运算放大器构成。

(1) 反相放大器 图 1-28 是反相放大器的基本电路。输入电压加到运算放大器的反相输入端, 输出电压经  $R_F$  反馈到反相输入端。

输出电压为

$$U_O = -U_I \times (R_F/R_1) \quad (1-38)$$

反相放大器的放大倍数取决于  $R_F$  与  $R_1$  的比值, 负号表示输出电压与输入电压反相。该放大电路应用广泛。

(2) 同相放大器 图 1-29 是同相放大器的基本电路。输入电压加到运算放大器的同相输入端, 输出电压经  $R_F$  反馈到反相输入端。

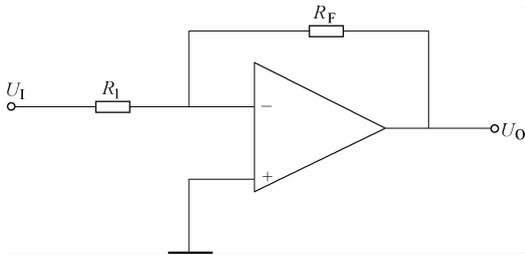


图 1-28 反相放大器基本电路

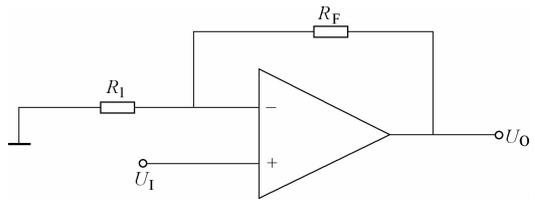


图 1-29 同相放大器基本电路

输出电压为

$$U_O = (1 + R_F/R_1) \times U_I \quad (1-39)$$

同相放大器的放大倍数取决于  $R_F$  与  $R_1$  的比值, 输出电压与输入电压同相。

#### (3) 差动放大器

图 1-30 为差动放大器的基本电路。两个输入信号分别加到运算放大器的同相输入端和反相输入端, 输出电压经  $R_F$  反馈

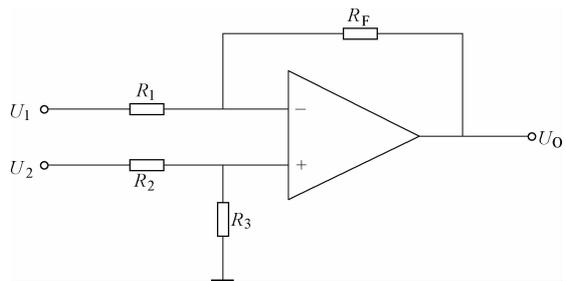


图 1-30 差动放大器基本电路

到反相输入端。

若  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_F$ , 则输出电压为

$$U_o = R_F/R_1 \times (U_2 - U_1) \quad (1-40)$$

差动放大器的优点是具有抑制共模信号的能力和抗干扰能力。

## 2. 阻抗匹配器

传感器输出阻抗都比较高, 比一般电压放大电路的输入阻抗要大得多, 若将传感器直接与放大电路进行连接, 则信号衰减很大, 甚至不能正常工作。常常使用高输入阻抗低输出阻抗的阻抗匹配器。常用的阻抗匹配器是半导体阻抗匹配器、场效应晶体管阻抗匹配器及集成电路阻抗匹配器等。

半导体阻抗匹配器, 实际上是共集电极放大电路, 又称为射极输出器。射极输出器的输出相位与输入相位相同, 放大倍数略小于 1, 输入阻抗高, 输出阻抗低。

场效应晶体管阻抗匹配器的输入阻抗高达  $10^{12}\Omega$  以上, 而且其结构简单、体积小, 得到了广泛的应用。

## 3. 电桥电路

电桥电路是传感器系统中经常使用的转换电路, 主要用来把电阻、电容、电感的变化转换为电压或电流。根据其供电电源性质的不同, 可分为直流电桥和交流电桥。直流电桥主要用于电阻式传感器, 交流电桥可用于电阻、电容及电感式传感器。

电桥的基本电路如图 1-31 所示, 阻抗  $Z$  构成电桥电路的桥臂, 桥路的一对角线接工作电源, 另一对角线是输出端。

当电桥的 4 个桥臂的阻抗由于被测量引起变化时, 电桥平衡被打破, 此时电桥的输出与被测量有直接对应关系。

## 4. 电荷放大器

有些传感器输出的信号是电荷量的变化, 要将其转换成电压信号, 可采用电荷放大器。电荷放大器是一种带电容负反馈的高输入阻抗、高放大倍数的运算放大器。图 1-32 所示是一种常见的电荷放大器电路。

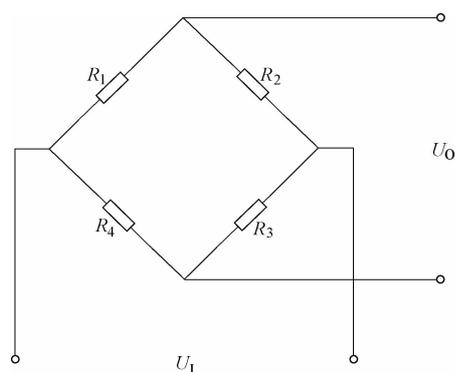


图 1-31 电桥基本电路

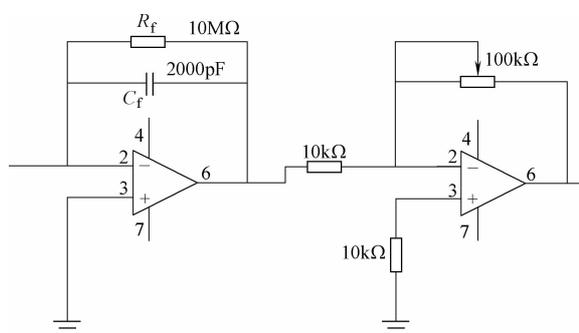


图 1-32 电荷放大器电路

### 1.5.3 抗干扰技术

在实际检测系统中, 传感器的工作环境是比较复杂和恶劣的, 它的输出信号微弱,

并且与电路之间的连接具有一定的距离，这时传送信号的电缆电阻和传感器的内阻以及放大电路等产生的干扰，再加上环境噪声，周围磁场、电场都会对电路造成干扰，影响其正常工作。

### 1. 干扰的根源

干扰又称噪声，是传感器系统中混入的无用信号。主要分为内部噪声和外部噪声，内部噪声是由传感器内部元件所产生的；外部噪声是由外部人为因素或自然干扰产生的。而把消除或削弱各种干扰的方法，称为抗干扰技术。

### 2. 抗干扰方法

为了保证传感器电路能最精确的工作，必须削弱或防止干扰的影响，下面介绍几种常见的抗干扰技术。

(1) 屏蔽技术 利用低电阻材料制成容器状，将需要防护的部分包起来，割断电场、磁场的耦合通道，防止静电或电磁的相互感应。主要有静电屏蔽、电磁屏蔽、磁屏蔽、驱动屏蔽等。

(2) 接地技术 接地是保证安全的一种方法，一般情况，接地技术是与屏蔽相关联的，如果接地不当，可能会引起更大的干扰。

接地主要有信号接地和负载接地。在强电技术中，一般将设备外壳和电网零线接大地；弱电技术中，把电信号的基准电位点称为“地”，依据“一点接地”原则，将电路中不同的地线接入同一点。

#### (3) 其他抗干扰技术

1) 选用质量好的元器件。

2) 浮置：又称浮空，是指电路的公共线不接机壳也不接大地的一种抗干扰技术。

3) 滤波：滤除无用的频率信号。分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器。

## 【思考与练习】

### 1. 选择题

- (1) 弹性元件是一种利用 ( ) 把感受到的非电量转换为电量的 ( ) 元件。
  - a. 变形
  - b. 发热
  - c. 敏感
  - d. 转换
- (2) 将被测试件的变形转换成 ( ) 变换量的 ( ) 元件，称为电阻应变片。
  - a. 电阻
  - b. 力
  - c. 位移
  - d. 敏感
  - e. 转换
- (3) 应变式电阻传感器是 ( ) 测量。
  - a. 接触
  - b. 非接触
- (4) 应变式电阻传感器的测量电路中，( ) 电路的灵敏度最高。
  - a. 单臂
  - b. 双臂
  - c. 全桥
- (5) 金属应变片的应变效应是基于 ( ) 的变化而产生的。
  - a. 几何形状
  - b. 材料的电阻率
- (6) 通常用电感式传感器测量 ( )。
  - a. 电压
  - b. 磁场强度
  - c. 位移
  - d. 压力
- (7) 差动变压器的测量电路常采用 ( )。

- a. 直流电桥
  - b. 交流电桥
  - c. 差分相敏检波电路和差分整流电路
  - d. 运算放大器电路
- (8) 电感式接近开关能够检测 ( ) 的位置。
- a. 金属物体
  - b. 塑料
  - c. 磁性物体
- (9) 由于电涡流传感器结构简单, 又可实现 ( ) 的测量, 因此得到了广泛应用。
- a. 接触
  - b. 非接触
- (10) 电涡流接近开关可以利用电涡流原理检测出 ( ) 的接近程度。
- a. 人体
  - b. 水
  - c. 黑色金属零件
  - d. 塑料零件
- (11) 电容式传感器是将被测物理量的变化转化为 ( ) 量变化的一种传感器。
- a. 电阻
  - b. 电容
  - c. 电感
- (12) 使用 ( ) 可测量液体中的成分含量。
- a. 电阻式传感器
  - b. 电容式传感器
- (13) 采用 ( ) 电容式传感器可测量物体的振动量。
- a. 变隙式
  - b. 变面积式
  - c. 变介电常数式
- (14) 电容直线位移传感器是把 ( ) 转变为 ( ) 来进行测量的。
- a. 位移
  - b. 电容
  - c. 面积
  - d. 电压
2. 什么是电阻的应变效应? 利用应变效应解释金属应变式电阻传感器的工作原理。

3. 用于测量起吊重量的拉力传感器如图 1-33 所示。应变片  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  贴在等截面轴上, 它们组合的电桥电路如图 1-33b 所示。试由图简述拉力传感器的工作原理。

4. 电感式传感器测量电路的主要任务是什么? 简述电感式传感器的应用。

5. 什么是电涡流效应? 简述电涡流式传感器的基本结构与工作原理。

6. 简述电容式传感器的工作原理。

7. 如果盛放液体的容器为金属圆筒形, 则只需用一根裸导线即可完成液位的检测 (见图 1-34), 请阐述其工作原理。

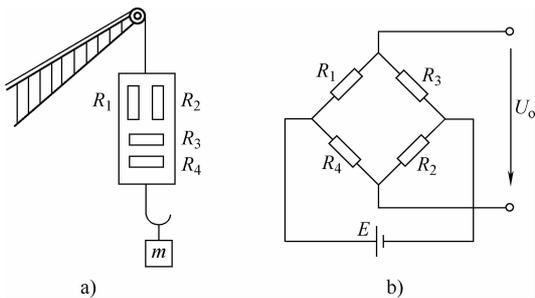


图 1-33 题 3 图

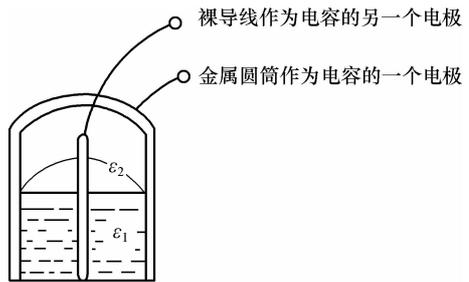


图 1-34 题 7 图

## 热工传感器与仪表应用



### 导读

热工行业主要是指对锅炉、汽机及其辅助设备运转的自动控制行业。而热工传感器与仪表技术是一种运用控制理论、热能工程技术、智能仪器仪表、计算机技术和其他信息技术，对热力学相关参数进行检测与控制，从而对生产过程实现检测、控制、优化、调度、管理、决策，达到确保安全、增加产量、提高质量、降低消耗、减员增效等目的综合性高新技术。一般来说，热工控制系统是由测量装置（或传感器）、执行机构和中央控制器（或仪表）三大部分组成。

本章侧重对流量、压力、温度和液位等传感器与仪表的应用进行了详细介绍。其中，流量传感器是测量管道或明沟中液体、气体或蒸气等流体流量的工业自动化仪表；温度传感器则包括热电偶、热电阻和热敏电阻等；利用单晶硅材料的压阻效应和集成电路技术等制成的压力传感器；液位传感器则包括电容式液位传感器、浮子自动平衡式液位传感器、压力式液位传感器和超声波液位传感器等。

## 2.1 流量传感器与仪表

### 2.1.1 流量计量的概念

#### 1. 流量计量的重要性

流量计量与国民经济、国防建设、科学研究有着密切的关系，做好这一工作对保证产品质量、提高生产效率、科学发展都具有重要的作用。特别是在工业生产自动化程度越来越高的今天，流量计量在国民经济中的地位与作用更加明显。

流量的定义是流经管道界面的流体数量与该流体数量通过该界面所花费的时间之商，通常用质量流量和体积流量来表示。质量流量是指流体数量用质量来表示的流量，而体积流量则是流体数量用体积来表示的流量。

流量计量的应用非常广泛，如热工流量计量是应用在热工行业的任何一个环节，否则将

无法保证正常生产和贸易交往。比如在化工行业，流量计量不准确会造成化学成分分配比例失调，无法保证产品质量，严重的还会发生生产安全事故；而在电力行业中对液体、气体、蒸气等介质流量的测量和调解占有重要地位，流量的准确与否不仅对保证发电厂在最佳参数下运行具有很大的经济意义，而且随着高温、高压、大容量机组的发展，流量测量已成为保证发电厂安全运行的重要环节……这些都要求热工流量测量装置不仅要做到准确计量，而且还要及时地发出报警信号。

## 2. 流量计的种类

流量计是测量流量的传感器与仪表，它是测量管道或明沟中液体、气体或蒸气等流体流量的工业自动化仪表，是工业测量中重要的仪表之一。随着工业生产的发展，对流量测量的准确度和范围的要求越来越高，流量测量技术日新月异。为了适应各种用途，各种类型的流量计相继问世。目前，已投入使用的流量计已超过 100 种。

从不同的角度出发，流量计有不同的分类方法。常用的分类方法有两种：一是按流量计的结构原理进行分类；二是按流量计采用的测量原理进行归纳分类。

(1) 按流量计结构原理分类 按当前流量计产品的实际情况，根据流量计的结构原理，大致上可归纳为以下几种类型。

1) 容积式流量计：容积式流量计相当于一个标准容积的容器，它接连不断地对流动介质进行度量。流量越大，度量的次数越多，输出的频率越高。容积式流量计的原理比较简单，适于测量高黏度、低雷诺数的流体。根据回转体形状的不同，目前生产的产品分为：适于测量液体流量的椭圆齿轮流量计、腰轮流量计（罗茨流量计）、旋转活塞和刮板式流量计；适于测量气体流量的伺服式容积流量计、皮膜式和转筒流量计等（见图 2-1）。

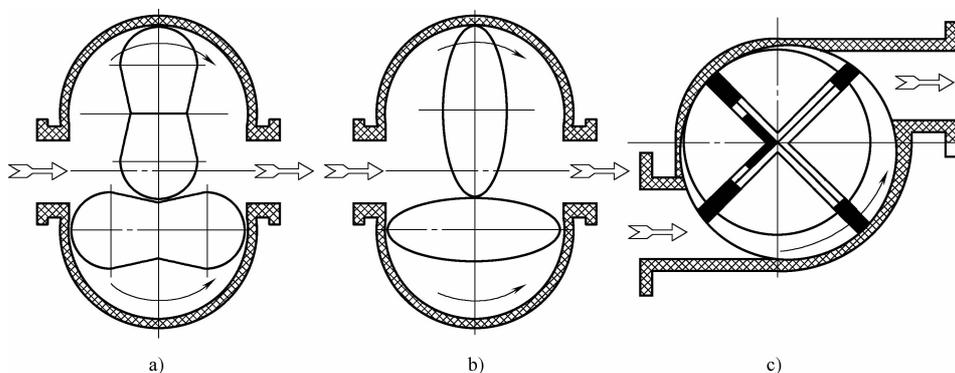


图 2-1 容积式流量计

a) 腰轮流量计 b) 椭圆齿轮流量计 c) 内凸轮叶片流量计

2) 叶轮式流量计：叶轮式流量计的工作原理是将叶轮置于被测流体中，受流体流动的冲击而旋转，以叶轮旋转的快慢来反映流量的大小。典型的叶轮式流量计是水表和涡轮流量计，其结构可以是机械传动输出式或电脉冲输出式。

图 2-2 所示为主要由法兰、前导向架、叶轮、后导向架、压紧圈和带放大器的磁电感应转换器等组成的蜗轮流量计。当被测流体流经传感器时，传感器内的叶轮借助于流体的动能而产生旋转，叶轮即周期性地改变磁电感应系统中的磁电阻，使通过线圈的磁通量周期性地发生变化而产生电脉冲信号，经放大器放大后传送至相应的流量积算仪表，进行流量或总量

的测量。

3) 差压式流量计(变压降式流量计):如图2-3所示的差压式流量计由一次装置和二次装置组成,一次装置称为流量测量元件,它安装在被测流体的管道中,产生与流量(流速)成比例的压力差,供二次装置进行流量显示;二次装置称为显示仪表,它接收测量元件产生的差压信号,并将其转换为相应的流量进行显示。差压流量计的一次装置常为节流装置或动压测定装置(皮托管、均速管等)。二次装置为各种机械式、电子式、组合式差压计配以流量显示仪表。差压计的差压敏感元件多为弹性元件。由于差压和流量呈二次方根关系,故流量显示仪表都配有开二次方装置,以使流量刻度线性化。多数仪表还设有流量计算装置,以显示累积流量,以便经济核算。发电厂主蒸气、给水、凝结水等的流量测量都采用这种传感器。

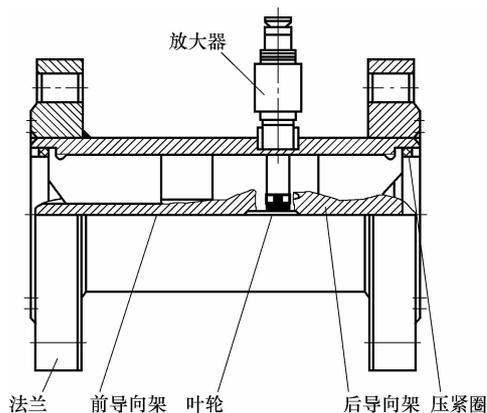


图 2-2 蜗轮流量计

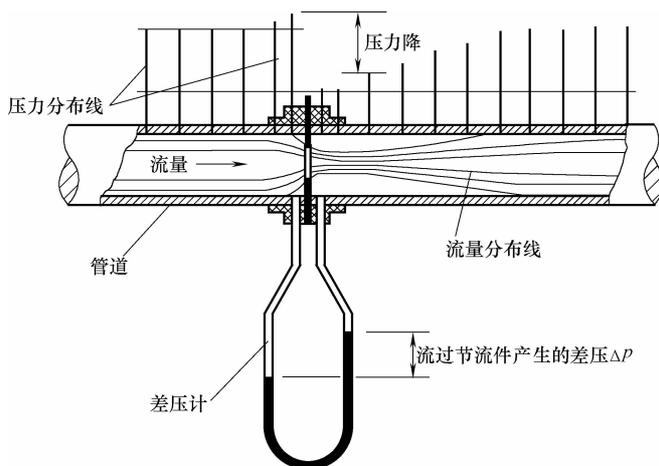


图 2-3 差压式流量计

4) 变面积式流量计(等压降式流量计):放在上大下小的锥形流道中的浮子受到自下而上流动的流体作用力而移动。当此作用力与浮子的“显示重量”(浮子本身的重量减去它所受流体的浮力)相平衡时,浮子即静止。浮子静止的高度可作为流量大小的量度。由于流量计的通流截面积随浮子高度不同而异,而浮子稳定不动时上下部分的压力差相等,因此该种流量计称为变面积式流量计或等压降式流量计。这种流量计的典型

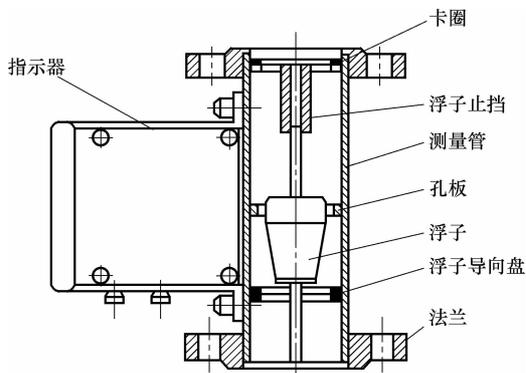


图 2-4 转子流量计

仪表如图 2-4 所示的转子（浮子）流量计。

5) 动量式流量计：利用测量流体的动量来反映流量大小的流量计称为动量式流量计。这种流量计的典型仪表是靶式和转动翼板式流量计。

6) 冲量式流量计：利用冲量定理测量流量的流量计称为冲量式流量计，多用于测量颗粒状固体介质的流量，还用来测量泥浆、结晶型液体和研磨料等的流量。流量测量范围从每小时几公斤到近万吨。

7) 电磁流量计：图 2-5 所示的电磁流量计是根据导体在磁场中运动产生感应电动势，而感应电动势又和流量大小成正比，通过测量电动势来反映管道流量的原理而制成的。其测量精度和灵敏度都较高。工业上多用电磁流量计来测量水、矿浆等介质的流量，其可测最大管径达 2m，且压损极小。

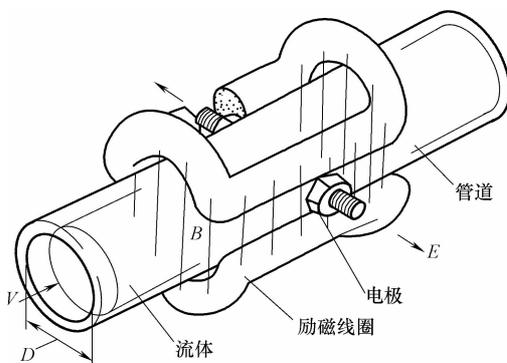


图 2-5 电磁流量计

8) 超声波流量计：超声波流量计是基于超声波在流动介质中传播的速度等于被测介质的平均流速和声波本身速度的几何和的原理而设计的。它是由测量流速来反映流量大小的。超声波流量计虽然在 1970 年才出现，但由于它可以制成非接触形式，并可与超声波水位计联动进行开口流量测量，对流体又不产生扰动和阻力，所以很受欢迎，是一种很有发展前途的流量计。

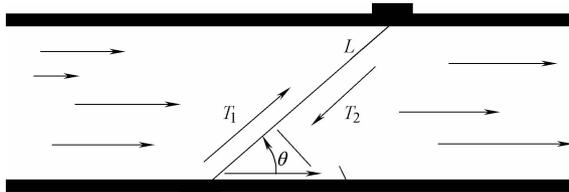


图 2-6 超声波流量计

图 2-6 所示的超声波流量计是利用时差法进行工作的，具体计算公式为

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{L}{C_0 + V \cos \theta} \\ T_2 &= \frac{L}{C_0 - V \cos \theta} \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中， $C_0$  为零流量时声速； $V$  为流速； $L$  为换能器之间的距离。

9) 流体振荡式流量计：流体振荡式流量计是利用流体在特定流道条件下流动时将产生振荡，且振荡的频率与流速成比例这一原理设计的。当通流截面一定时，流速与流量成正比。因此，测量振荡频率即可测得流量。这种流量计是 1970 年开发和发展起来的，由于它兼有无转动部件和脉冲数字输出的优点，很有发展前途。目前，典型的产品有涡街流量计（见图 2-7）、旋进旋涡流量计。

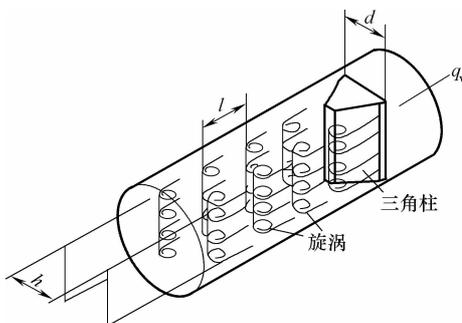


图 2-7 涡街流量计

10) 质量流量计：由于流体的容积受温度、

压力等参数的影响，用容积流量表示流量大小时需给出介质的参数。在介质参数不断变化的情况下，往往难以达到这一要求，而造成仪表显示值失真。因此，质量流量计就得到广泛的应用和重视。质量流量计分直接式和间接式两种。直接式质量流量计利用与质量流量直接有关的原理进行测量，目前常用的有量热式、角动量式、振动陀螺式、马格努斯效应式、科里奥利力和动量矩式等质量流量计。间接式质量流量计是用密度计与容积流量直接相乘求得质量流量的。

图 2-8 所示为动量矩式质量流量计，仪表壳体两个叶轮分别装在两短轴上，中间有一隔离盘，在两叶轮的轮缘上有若干直叶片作为流体的通道。电动机以恒定角速度驱动主动叶轮，使流体具有与主动叶轮相同的角速度，并产生与质量流量成比例的动量矩，作用在从动叶轮上。从动叶轮因被弹簧限制不能旋转而吸收动量矩。因此，测出弹簧的制动力矩就可知道动量矩的变化，也即测得质量流量。

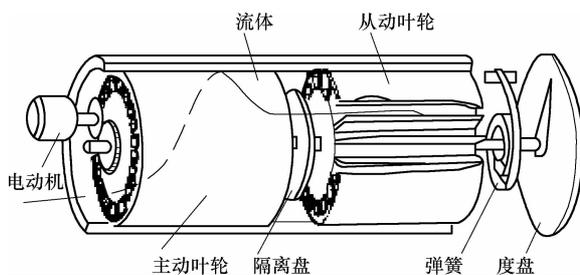


图 2-8 质量流量计

除了上述常用结构原理的流量计外，其他各种结构的流量计还有很多，如适用于明渠测流的各种堰式流量计、槽式流量计；适于大口径测流的插入式流量计；测量层流流量的层流流量计；适于二相流测量的相关法流量计；激光法、核磁共振法流量计以及多种示踪法、稀释法流量计等。随着科技的发展和实际应用需要，新型流量计将不断涌现，流量计的类型将更为齐全。

## (2) 按测量原理分类

1) 力学原理：属于此类原理的仪表有利用伯努利定理的差压式、转子式；利用动量定理的冲量式、可动管式；利用牛顿第二定律的直接质量式；利用流体动量原理的靶式；利用角动量定理的蜗轮式；利用流体振荡原理的旋涡式和涡街式；利用总静压力差的皮托管式以及容积式和堰、槽式等。

2) 电学原理：用于此类原理的仪表有电磁式、差动电容式、电感式和应变电阻式等。

3) 声学原理：利用声学原理进行流量测量的有超声波式和声学式（冲击波式）等。

4) 热学原理：利用热学原理测量流量的有热量式、直接量热式和间接量热式等。

5) 光学原理：激光式和光电式等是属于此类原理的仪表。

6) 物理原理：核磁共振式和核辐射式等是属于此类原理的仪表。

7) 其他原理：有标记原理（示踪原理、核磁共振原理）、相关原理等。

## 2.1.2 电磁流量计的工作原理、选型与安装

### 1. 工作原理

电磁流量计的工作原理基于法拉第电磁感应定律。当一个导体在磁场内运动时，在与磁场方向、运动方向相互垂直方向的导体两端，会有感应电动势产生。电动势的大小与导体运动速度和磁感应强度大小成正比。

在图 2-9 中，当导电流体以平均流速  $v$  (m/s) 通过装有一对测量电极的一根内径为

$D(m)$  的绝缘管子流动时，并且该管子处于一个均匀的磁感应强度为  $B(T)$  的磁场中，那么在—对电极上就会感应出垂直于磁场方向和流动方向的电动势  $E(V)$ 。由电磁感应定律可得

$$E = BDv \quad (2-2)$$

通常，体积流量  $q_v(m^3/s)$  可以写作

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (2-3)$$

由式 (2-2) 和式 (2-3) 可得

$$q_v = \frac{\pi D}{4} \frac{E}{B} \quad (2-4)$$

因此电动势可表示为

$$E = \frac{4B}{\pi D} q_v \quad (2-5)$$

当  $B$  是个常数时，式 (2-4) 中令  $\frac{\pi D}{4} \frac{1}{B} = k$ ,

式 (2-4) 改写为

$$q_v = kE \quad (2-6)$$

可见，流量  $q_v$  与电动势  $E$  成正比。

电磁流量转换器一方面向电磁流量传感器励磁线圈提供稳定的励磁电流，以达到图 2-9 中的  $B$  是个常量；同时把传感器感应的电动势放大、转换成标准的电流信号或频率信号，便于流量的显示、控制与调节。图 2-10 所示为转换器电路结构。

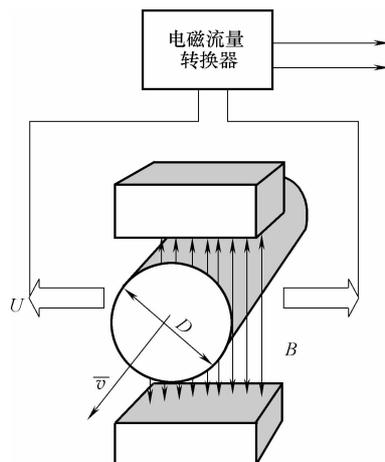


图 2-9 电磁流量计工作原理

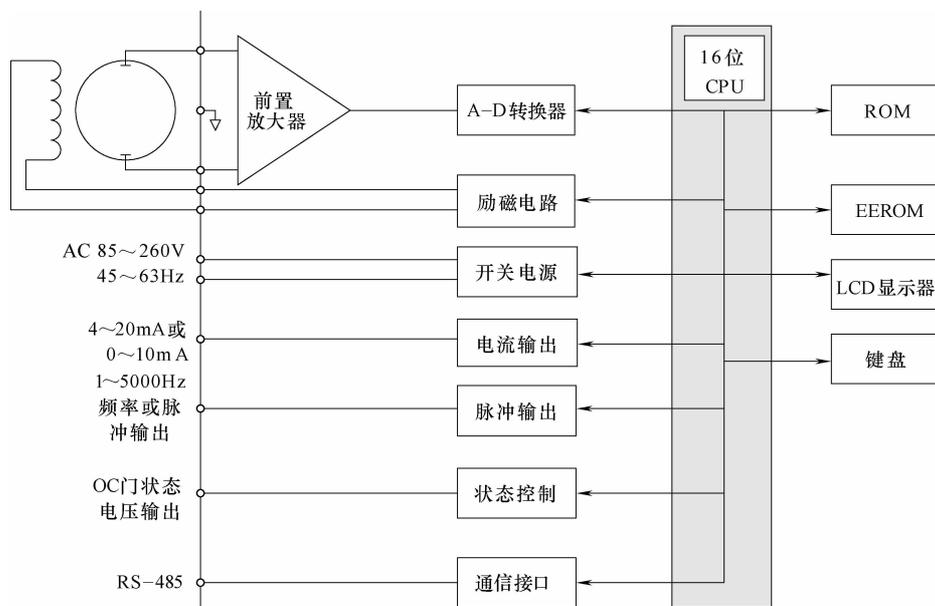


图 2-10 转换器电路结构

电磁流量转换器与不同型号的电磁流量传感器配套组成电磁流量计系统，用来测量封闭管道中导电液体的体积流量。它广泛地适用于石油化工、钢铁冶金、给水排水、水利灌溉、水处理、环保污水总量控制、造纸、医药、食品等工、农业部门的生产工艺过程流量测量和控制；适用于导电液体的总量计量。

## 2. 电磁流量计的选型

据有关资料表明，流量计仪表在实际应用中有 2/3 的故障是由于错误的选型和错误的安装而造成的，因此需要在选型时特别注意。

以下是电磁流量计的选型步骤：

第一步：收集数据。

- 1) 被测流体名称；
- 2) 最大流量和最小流量；
- 3) 最高工作压力；
- 4) 最高温度和最低温度。

其中最大流量和最小流量必须符合表 2-1。

表 2-1 流量计的最大流量与最小流量

内径/mm	10	15	20	25	32	40	50	65
$Q_{\min}/(\text{m}^3/\text{h})$	0.0848	0.1908	0.3391	0.5299	0.8681	1.3565	2.1195	3.5820
$Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{h})$	3.39	7.63	13.56	21.20	34.73	54.26	84.78	143.28
内径/mm	80	100	125	150	200	250	300	350
$Q_{\min}/(\text{m}^3/\text{h})$	5.4259	8.478	13.2469	19.0755	33.912	52.9875	76.302	103.8555
$Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{h})$	217.04	339.12	529.88	763.02	1356.48	2119.5	3052.08	4154.22
内径/mm	400	450	500	550	600	700	800	900
$Q_{\min}/(\text{m}^3/\text{h})$	135.648	171.6795	211.95	256.46	305.208	415.422	542.592	686.718
$Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{h})$	5425.96	6867.18	8478	10258.38	12208.22	16616.88	21703.68	27468.82
内径/mm	1000	1100	1200	1400	1600	1800	2000	2200
$Q_{\min}/(\text{m}^3/\text{h})$	847.80	1025.838	1220.832	1660.688	2170.368	2746.872	3391.20	4103.352
$Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{h})$	33912	41033.52	48833.28	66467.52	86814.72	109874.88	135648	164134.08

流量计算公式为

$$Q = V\pi (D/2)^2 \quad (2-7)$$

式中， $Q$  为液体流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )； $V$  为液体流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )，(流速范围一般为  $0.1 \sim 15\text{m}/\text{s}$ )； $D$  为管道内径 ( $\text{mm}$ )。

在收集数据中必须注意以下几点：

- 1) 实际最高工作压力必须小于流量计的额定工作压力。
- 2) 最高工作温度和最低工作温度必须符合流量计规定的温度要求。
- 3) 确定是否有负压情况存在。

4) 用户可以根据流量范围表中的流量选择相应的电磁流量计，若所选择的电磁流量计的内径与现在工艺管道的内径不符，应进行缩管或扩管。若管道进行缩管，应考虑由于缩管引起的压力损失是否会影响工艺流程。

5) 从产品价格上考虑, 可以选择较小口径的电磁流量计, 相对减少投资。

6) 测量洁净水时, 经济流速是  $1.5 \sim 3\text{m/s}$ ; 测量易结晶的溶液时, 应适当地提高流速,  $3 \sim 4\text{m/s}$  为宜, 起到自清扫、防止粘附沉积等作用; 测量矿浆等磨损性流体时, 应适当降低流速,  $1.0 \sim 2\text{m/s}$  为宜, 以降低对内衬和电极的磨损。

第二步: 电极材料的选择。

应根据被测流体的腐蚀性来选择电极的材料 (见表 2-2), 也可以查有关腐蚀手册, 而对于特殊流体应做实验。

表 2-2 电极材料及其耐腐蚀性能

材 料	耐腐蚀性能
含钼不锈钢 ( $\text{OCr}_{18}\text{Ni}_{12}\text{Mo}_2\text{Ti}$ )	硝酸、温室下 $<5\%$ 硫酸、沸腾的磷酸、蚁酸、碱溶液、在一定压力下的亚硫酸、海水、醋酸
哈氏合金 C (HC) 哈氏合金 B (HB)	耐氧化性酸、氧化性盐、耐海水、耐非氧化性酸、非氧化性盐、碱、常温硫酸
钛 (Ti)	海水、各种氯化物和次氯酸盐、氯化性酸 (包括发烟硝酸)、有机酸、碱
钽 (Ta)	除氢氟酸、发烟硫酸、碱外的其余化学介质, 包括沸点的盐酸、硝酸和 $<175^\circ\text{C}$ 硫酸
铂 (Pt)	各种酸、碱、盐, 不包括王水

第三步: 衬里材料选择。

应根据被测介质的腐蚀性、磨损性和温度来选择衬里材料 (见表 2-3)。

表 2-3 衬里材料选择

内衬材料	名 称	符 号	性 能	最高工作温度/ $^\circ\text{C}$	适用液体	适用口径 /mm
橡胶	氯丁橡胶	CR	耐磨性中等, 耐一般低浓度的酸碱盐的腐蚀	$<80$	自来水、工业用水、海水	DN50 ~ 2200
	聚氨酯橡胶	PU	极好的耐磨性能, 耐酸碱性能较差	$<60$	纸浆、矿浆等浆液	DN25 ~ 500
氟塑料	聚四氟乙烯	$\text{F}_4$ 或 PTFE	化学性能很稳定, 耐沸腾的盐酸、硫酸、王水、浓碱的腐蚀	$<180$	腐蚀性强的酸碱盐液体	DN25 ~ 1200
	聚全氟乙丙烯译名: 特氟隆 FEP	$\text{F}_{46}$ 或 FEP	化学性能略逊于 $\text{F}_4$	$<120$	腐蚀性的酸碱盐液体	DN15 ~ 200
	乙烯四氟乙炔共聚物	$\text{F}_{40}$ 或 ETFE	化学性能略逊于 $\text{F}_4$	$<120$	腐蚀性的酸碱盐液体	DN250 ~ 2200
塑料	聚乙烯	PE	化学性能稳定	$<60$	污水	DN50 ~ 2200
	聚苯硫醚	PPS		$<110$	热水	DN50 ~ 2200

第四步: 防护等级的选择。

电磁流量计的防护等级一般有以下三种:

IP65: 防喷水型, 允许水龙头从任何方向对传感器喷水, 喷水压力为  $30\text{kPa}$ , 出水量为

12.5L/s，距离为3m，外壳进水量不致达有害程度，仪表不受影响。

IP67：防短时间浸水型，传感器浸入水中，短时间内外壳进水量不致达有害程度，仪表不受影响。

IP68：潜水型，传感器浸入水中1m，持续潜水后，外壳进水量不致达有害程度，仪表不受影响。

### 3. 电磁流量计的机械与电气安装

正确地选择安装点和正确安装电磁流量计都是非常重要的环节，若在安装环节失误，轻者影响测量准确度，重者会影响电磁流量计的使用寿命，甚至会损坏电磁流量计。

(1) 机械安装 选择安装位置时需特别注意：

1) 测量电极的轴线必须近似于水平方向，测量管道内必须完全充满液体，流量计前方最少要有 $5D$ （ $D$ 为流量计内径）长度的直管段，后方最少要有 $3D$ （ $D$ 为流量计内径）长度的直管段（见图2-11）。

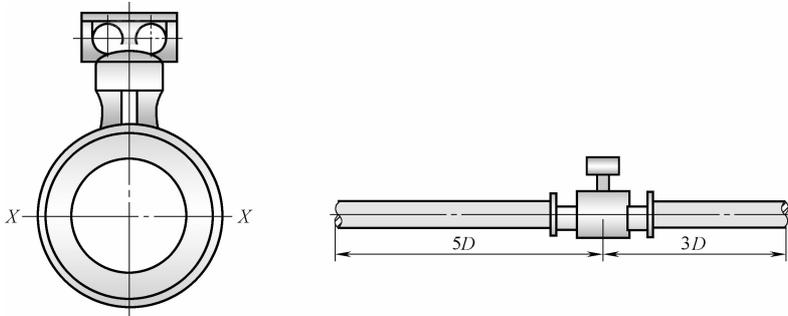


图2-11 电磁流量计的机械安装

2) 流体的流动方向和流量计的箭头方向一致；如果管道内要有真空，会损坏流量计的内衬，需特别注意；在流量计附近应无强电磁场；在流量计附近应有充裕的空间，以便安装和维护；安装聚四氟乙烯内衬的流量计时，连接两法兰的螺栓应注意均匀拧紧，否则容易压坏聚四氟乙烯内衬，最好用力矩扳手。

3) 应安装在水平管道较低处和垂直向上处（见图2-12），避免安装在管道的最高点和垂直向下处（见图2-13）；应安装在管道的上升处（见图2-14）。

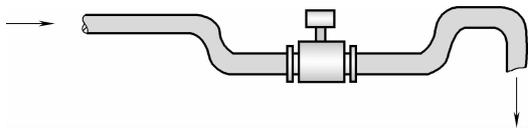


图2-12 安装在水平管道较低处

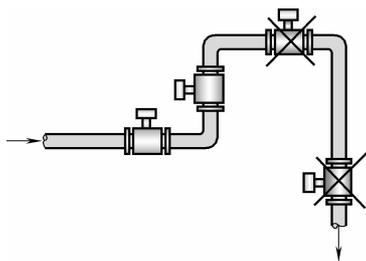


图2-13 避免安装在管道的最高点和垂直向下处



图2-14 安装在管道的上升处

在开口排放管道安装时，应安装在管道的较低处。

4) 若管道落差超过5m，在传感器的下游安装排气阀（见图2-15）；应在传感器的下游安装控制阀和切断阀，而不应安装在传感器上游（见图2-16）；传感器绝对不能安装在泵的进口处，应安装在泵的出口处（见图2-17）。

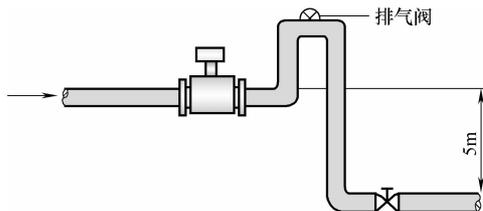


图2-15 在传感器的下游安装排气阀

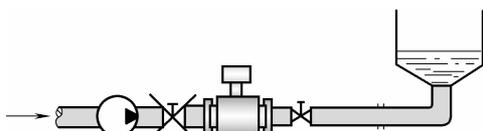


图2-16 传感器的下游安装控制阀和切断阀

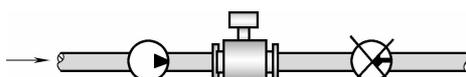


图2-17 传感器与泵的安装位置

5) 测量井内安装流量计的方式如图2-18所示。

(2) 电气接地 如图2-19所示，为了很好地防止外界干扰，电磁流量计要求被测介质、用户管道和仪表外壳三者必须处于一个同电位即接“地”，仪表必须接至一个独立的接地点，其他电气设备不允许连接到同一接地线上，接地电阻应小于 $10\Omega$ 。接地方式分外接地和内接地两种，所谓外接地是采用接地环，所谓内接地是采用多电极中的接地电极。

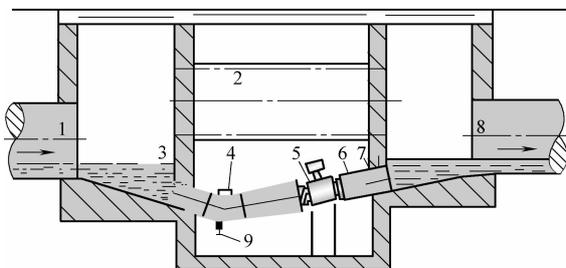


图2-18 测量井内安装流量计的方式

1—入口 2—溢流管 3—入口栅 4—清洗孔 5—流量计  
6—短管 7—出口 8—排放阀 9—排污阀

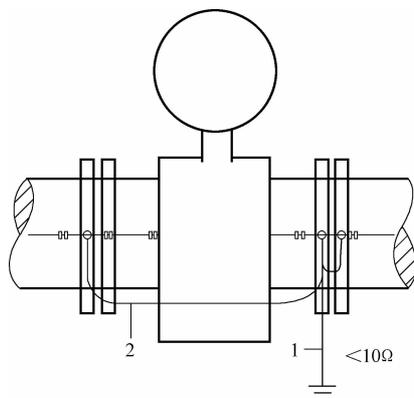


图2-19 流量计的接地

1—测量接地 2—接地导线（ $16\text{mm}^2$ 铜线）

1) 仪表安装在内部无漆或没有衬里的金属管道上时，可将接地导线接到两个管道法兰上，因而形成管道与液体的可靠接触。

2) 仪表安装在塑料管道或内壁绝缘的管道上时，在传感器的出口和入口要安装接地环，或采用内部接地电极使测量接地与液体接通。

3) 仪表安装在阴极保护管道上，带有电蚀保护的管道通常里外绝缘，以使液体对地无导电性接地。安装时必须注意以下几点：传感器的两端面要装配合适的接地环，它是依靠密封件与管道法兰的传感器法兰绝缘的；接地环必须由截面积为 $16\text{mm}^2$ 的铜线连接到传感器和测量接地线上（见图2-20）；与仪表连接的两管道法兰必须用一根截面积为 $16\text{mm}^2$ 的铜导

线连接起来（见图 2-21）；采用绝缘材料的轴套和垫圈，使法兰连接螺栓与法兰绝缘。

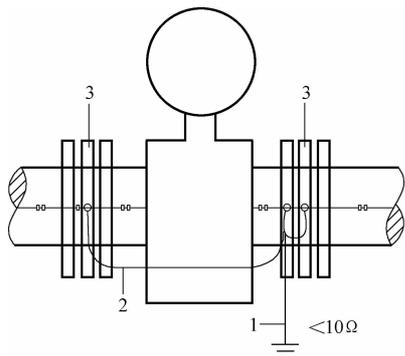


图 2-20 接地环

1—测量接地 2—接地导线（ $16\text{mm}^2$  铜线）  
3—接地环

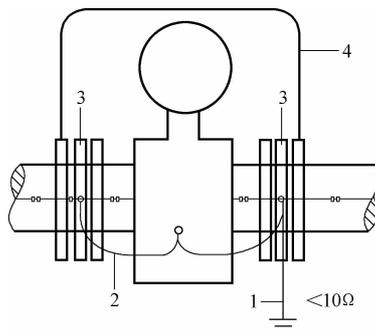


图 2-21 连接导线

1—测量接地 2—接地导线（ $16\text{mm}^2$  铜线）  
3—接地环 4—连接导线（ $16\text{mm}^2$  铜线）

(3) 电气接线 若采用分体式安装，连接的信号电缆采用定制的专用电缆线，电缆线越短越好；励磁电缆可选用 YZ 中型橡套电缆，其长度与信号电缆一样；信号电缆和动力电源电缆必须严格分开，不能敷设在同一根管子内，不能平行敷设，不能绞合在一起，应分别单独穿在钢管内；信号电缆和励磁电缆尽可能短，不能将多余的电缆卷在一起，应将多余电缆剪掉，并重新焊好接头，电缆进入传感器电气接口时，在端口处做成 U 型，这样可以防止雨水渗透到传感器中。

### 2.1.3 弯管流量计在小流量计量中的应用

弯管流量计与传统的孔板流量计一样同属于差压式流量计的范畴，只是弯管流量计产生差压的方式与孔板流量计不同，孔板是利用流体的缩放原理产生差压的，而弯管传感器是利用流体的惯性原理产生差压的。

小流量计量是所有流量计共同的难题。但是在工业现场由于设计、工艺等环节的问题，小流量计量的出现又是会经常发生的。

弯管流量计在低于流量测量下限的小流量中工作时会发生：①测量精度低；②流量时有时无（小信号切除大和差压变送器零点偏低）；③管道阀门关闭后会依然有流量显示（小信号切除小和差压变送器零点偏高）等现象发生。

究其原因是由于弯管传感器管径选择阶段对小流量运行工况估计不足，而选择流量计管径偏大造成的。在新建工程中由于考虑扩容（如供热的热水和蒸汽管道）和在压损要求很严的场合（如钢铁厂的煤气管道），往往选择大的管道管径，流体流速低，而弯管传感器的管径按照管道的相同管径选择，这样就造成了流速低于弯管流量计允许使用的下限流速（通常液体为  $0.3\text{m/s}$  和气体为  $7\text{m/s}$ ）。

方法一：局部缩颈。根据流体介质类别、最小流量、工作温度、工作压力和弯管流量计最小流速要求，来确定弯管传感器管径。如果确定的传感器管径显著小于工艺管道的管径，则应局部做缩径处理，如图 2-22 所示。

例如：某公司现场，测量介质为煤气，原管道管径为 DN600，工艺最小流速为  $2.71\text{m/s}$ ；

局部缩颈后弯管传感器管径为 DN350，最小流速为 7.95m/s，缩径处理后既可以满足弯管流量计测量要求，同时经计算也满足工艺压损要求。

方法二：双套差压配置（见图 2-23）。有些工艺管道的实际需求是，流量大小变化频繁，且没有固定的规律。最大流量和最小流量的比值远远大于 10（最大流量时，压损大，但工艺允许）。这种情况下可采用双差压变送器技术，即一台弯管传感器配接两台差压变送器，其中一台量程大，另外一台量程小，流量大时采用大量程的，流量小时采用小量程的，两台差压变送器同时在线测量，二次表根据采集结果自动判断当前差压值，这样既可以发挥弯管传感器大量程的优点，又可以避免由于差压变送器测量误差造成系统超差的现象。

方法三：双套传感器配置。最大流量和最小流量的比值远远大于 10，但大流量和小流量分时段运行，有固定的规律（采用既照顾大流量又照顾小流量的折中方案不是最优方案）。例如：某企业是热电厂的热用户，蒸汽管道夏季时只满足生产需要，冬季时既满足生产需要，同时还要满足供暖需要。这种情况下可以采用双弯管传感器技术（见图 2-24），大流量测量时，打开 3、5，关断 4、6，相应的在二次表中设定弯管传感器管径为大口径值，此时大口径弯管传感器投入计量使用；小流量测量时，操作相反。在经济允许的情况下，可以配置两台差压变送器，同时进入二次表中，减少二次表参数的更改以及弯管传感器一次阀的开和关等操作；再进一步，如果管道阀门为电动阀，二次表控制，系统可实现全自动计量。

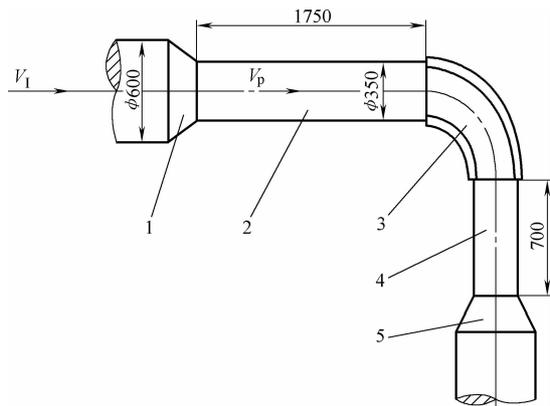


图 2-22 弯管传感器缩径安装示意图  
1—缩径管（渐缩管） 2—前直管段， $L=5D$   
3—弯管传感器 4—后直管段， $L=2D$   
5—扩径管（渐扩管）

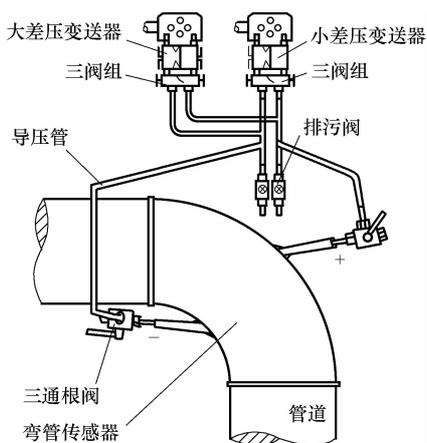


图 2-23 双套差压配置

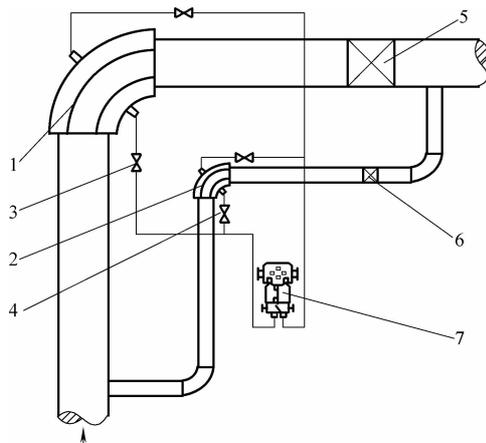


图 2-24 双弯管传感器安装示意图  
1—大口径弯管传感器 2—小口径弯管传感器 3—大口径弯管传感器一次阀 4—小口径弯管传感器一次阀 5—大口径管道阀门 6—小口径管道阀门 7—差压变送器

## 2.1.4 玻璃转子流量计的选型与刻度修正

### 1. 玻璃转子流量计的品种及选用

图 2-25 所示为玻璃转子流量计。根据它的用途和适应范围可分为普通型、带筋维管型、微小流量及小外形型、耐腐型、实验室型、保温型、报警型和耐高压型 8 个系列。按照国家制订的仪表系列型谱，不论哪个系列，最多包括从 1 ~ 100mm 共 12 个口径数，可测量的流量范围是：液体（水）为 0.1mL/min ~ 40m<sup>3</sup>/h，气体（空气）为 1mL/min ~ 1000m<sup>3</sup>/h。用于环保仪器配套的玻璃转子流量计一般口径不超过 10mm，测量的流量属小流量范围。

玻璃转子流量计的选用可从以下几个方面考虑。

1) 测量的对象，即测量介质种类、压力大小、化学性质。如液体介质、气体介质，对具腐蚀性的介质则应选择耐腐流量计。

2) 流量计本身性能。上述条件确定后一般讲，若价格没有大的变化，可优先选用针阀置于流量计上部的；有较大流通孔的，是直接流量刻度的；结构简单的；外部尺寸较小的等。如是小流量范围，则可选用球浮子式，因为它测量时稳定、不易积尘、精度较高、互换性好。

3) 根据价格选用。一般讲，精度高的价格高。要根据测量目的选用仪表精度等级，如只需控制测量介质通过量，经试运行调整，以后需始终稳定这个通过量，那么精度就是次要的。

### 2. 玻璃转子流量计的刻度修正

玻璃转子流量计的刻度，是生产厂在该厂条件下用近于理想流体的水和干燥空气作介质标定得到的。但在流量计的使用现场，有两种情形不能直接使用它的刻度值：一是测量介质不是水和空气；二是测量介质虽为水和空气，但其状态（温度和压力）与刻度状态有别。这样，在使用流量计时，为获得正确的测量结果，就出现了需要把刻度值进行修正的问题。因而，解决好玻璃转子流量计的刻度修正，是用好这种仪表的关键。

这里以气体介质测量时的密度修正进行讨论，由于气体介质的黏度很小，故而讨论时略去黏度影响。实践证明，这不影响修正后的精度。

下面是转子流量计流量一般表达式

$$Q = a\Delta A \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{A_f\rho}} \quad (2-8)$$

式中， $a$  为流量系数，无量纲； $\Delta A$  为由锥管内壁与浮子读数边间构成的环隙面积，随浮子高度而变（m<sup>2</sup>）； $V_f$  为浮子体积（m<sup>3</sup>）； $A_f$  为浮子最大截面积（m<sup>2</sup>）； $\rho_f$  为浮子密度（kg/m<sup>3</sup>）； $\rho$  为被测介质密度（kg/m<sup>3</sup>）； $g$  为重力加速度（9.81m/s<sup>2</sup>——海平面）。

式（2-8）是不考虑介质黏度影响的计算式。从式（2-8）可明显得出：当一台流量计浮子位置高度确定后，被测介质密度  $\rho$  是唯一的变数，如果被测介质密度不同，则介质通过



图 2-25 玻璃转子流量计

流量计的流量也不同。因此，刻度修正实际上也就是流量修正。

如果两种不同密度  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  的介质分别通过同台转子流量计，若浮子平衡在同一位置上，由式 (2-8) 得转子流量计密度换算的基本公式为

$$Q_1 = Q_2 \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_1)\rho_2}{(\rho_f - \rho_2)\rho_1}} \quad (2-9)$$

对气体而言，因为  $\rho_f \gg \rho_1$ 、 $\rho_2$ ，所以式 (2-9) 可简化为

$$Q_1 = Q_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (2-10)$$

利用理想气体定律，式 (2-10) 可转化为

$$Q_1 = Q_2 \sqrt{\frac{\rho_2 T_1}{\rho_1 T_2}} \quad (2-11)$$

式中， $\rho_1$ 、 $T_1$  和  $\rho_2$ 、 $T_2$  是同一介质的两种状态，分别用压力和温度两个参数表示。可见，对同种气体介质而言，其密度换算完全可以转化为不同状态下的温度、压力换算。这样，对于测量同种气体介质流量的刻度修正，最终变成了温度、压力的状态修正（实质上是密度修正），显而易见，这是一般使用人员极易实现的修正方法。

### 3. 在使用现场从流量计刻度读数如何求取实际流量值

现场使用流量计的目的只有一个：即检测被测介质的实际流量。但是，不少用户忽略了现场状态与流量计刻度状态（即标准状态）的不同，直接以流量计刻度读数作为被测介质的实际流量值，十分明显，这个实际流量是不真实的，它会给流量计的测量带来误差，从而给配套仪器最后的检测结果造成谬误。

在现场，从流量计刻度读数求取实际流量值，实质上是将流量计标准状态下的流量值换算成现场工况下的流量值。假设现场工况有关参数代号分别为实际流量  $Q$ ，介质压力  $p$  和温度  $T$ ；转子流量计刻度的有关参数代号分别为流量  $Q_N$ ，标准状态的压力  $p_0$  和温度  $T_0$ ，根据式 (2-11) 有

$$Q = Q_N \sqrt{\frac{p_0 T}{p T_0}} \quad (2-12)$$

利用式 (2-12)，可以很方便地在现场由流量计读数求得被测介质的实际流量值。需要特别指出，用式 (2-12) 计算时， $p$ 、 $p_0$ 、 $T$ 、 $T_0$  都应代入绝对值，而  $p$  是表前压，应在流量计上游侧、并紧靠流量计的管路部位测取。

**【实例 2-1】** 使用某空气采样仪，运行时，采样仪上转子流量计读数为 500mL/min，测表前压为 -100mmH<sub>2</sub>O（因使用抽气泵，所以是负压，1mmH<sub>2</sub>O = 9.80665Pa），现场温度为 30℃，求此时空气的实际流量值。

**解：**根据测定的数据，有

$$p = \left( -\frac{100}{13.6} + 760 \right) \text{mmHg} \approx 752.6 \text{mmHg}$$

$$T = (273.16 + 30) \text{K} = 303.16 \text{K}$$

于是

$$Q = 500 \times \sqrt{\frac{760 \times 303.16}{752.6 \times 293.16}} \approx 522 \text{mL/min}$$

这里, 因为  $p$ 。用毫米汞柱作单位 ( $1\text{mmHg} = 133.322\text{Pa}$ ), 所以毫米水柱必须化成毫米汞柱, 计算时, 只需将毫米水柱除以 13.6 即可。

从上例结果看出, 尽管现场状态与标准状态相差不大, 但对测量结果却产生了  $22\text{mL}/\text{min}$  (为标准值的 4.4%) 的差值。换句话说, 如果不修正, 则流量值会产生 4.4% 的误差!

#### 4. 用户根据实际使用流量, 如何选购合适的转子流量计

这个问题恰是上述问题的逆过程, 只需把式 (2-12) 反过来即可:

$$Q_N = Q \sqrt{\frac{pT_0}{p_0T}} \quad (2-13)$$

这里,  $Q$  是实际使用流量;  $p$ 、 $T$ 、 $p_0$ 、 $T_0$  都为已知, 用式 (2-13) 导算出的  $Q_N$  即为将要选购的转子流量计的刻度流量值。注意,  $Q$  应是常用流量。为保证流量计使用时有足够精度和余量, 选购玻璃转子流量计的上限应为  $Q_N$  的 1.5 倍。

这里需要强调此条的重要性, 如果当被测介质压力较大时, 它是绝对不可忽略的。例如, 若被测介质压力为  $3\text{kg}/\text{cm}^2$ , 并假定温度与标准温度相差无几, 则  $p = (3 + 1) \text{kg}/\text{cm}^2$  (绝对单位,  $p_0 = 1\text{kg}/\text{cm}^2$ ), 代入式 (2-13) 后将得到  $Q_N = 2Q$ 。就是说, 若常用流量为  $Q$ , 则流量计上限应为  $1.5 \times 2Q = 3Q$ , 如此时仍按  $Q$  选购流量计, 势必将满足不了使用要求而贻误生产。

## 2.2 温度传感器与仪表

### 2.2.1 温度传感器与仪表的基本概念

#### 1. 温度和温标

温度是表征物体冷热程度的物理量。温度概念是以热平衡为基础的。如果两个相接触的物体的温度不相同, 它们之间就会产生热交换, 热量将从温度高的物体向温度低的物体传递, 直到两个物体达到相同的温度为止。

为了进行温度测量, 需要建立温度标尺, 即温标。它规定了温度读数的起点 (零点) 以及温度的单位。国际上规定的温标有: 摄氏温标、华氏温标、热力学温标、国际实用温标。

(1) 摄氏温标 摄氏温标把在标准大气压下冰的熔点定为  $0^\circ\text{C}$ , 把水的沸点定为  $100^\circ\text{C}$ , 在这两个温度点间划分 100 等份, 每一等份为  $1^\circ\text{C}$ 。国际摄氏温标的符号为  $t$ , 国际摄氏温标的温度单位符号为  $^\circ\text{C}$ 。

(2) 华氏温标 它规定在标准大气压下, 冰的熔点为  $32^\circ\text{F}$ , 水的沸点为  $212^\circ\text{F}$ , 两固定点间划分 180 个等份, 每一等份为  $1^\circ\text{F}$ , 符号为  $\theta$ 。它与摄氏温标的关系式为

$$\theta/^\circ\text{F} = (1.8t/^\circ\text{C} + 32) \quad (2-14)$$

例如,  $20^\circ\text{C}$  时的华氏温度  $\theta = (1.8 \times 20 + 32)^\circ\text{F} = 68^\circ\text{F}$ 。西方国家在日常生活中普遍使用华氏温标。

(3) 热力学温标 国际单位制 (即 SI 制) 中, 以热力学温标作为基本温标。它所定义的温度称为热力学温度  $T$ , 单位为开尔文, 符号为  $\text{K}$ 。热力学温标以水的三相点, 即水的固、液、气三态平衡共存时的温度为基本定点, 并规定其温度为  $273.15\text{K}$ 。用下式进行热力

学温标和摄氏温标的换算，

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15, T/\text{K} = t/^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (2-15)$$

例如，100℃时的热力学温度  $T = (100 + 273.15) \text{ K} = 373.15\text{K}$ 。

热力学温标是纯理论的，人们无法得到开氏零度，因此不能直接根据它的定义来测量物体的热力学温度（又称开氏温度）。因此需要建立一种实用的温标作为测量温度的标准，这就是国际实用温标。

(4) 国际实用温标 它是一个国际协议性温标，与热力学温标基本吻合。它不仅定义了一系列温度的固定点，而且规定了不同温度段的标准测量仪器，因此复现精度高（全世界用相同的方法测量温度，可以得到相同的温度值），使用方便。

国际计量委员会 1990 年开始贯彻实施国际温标 ITS-90。我国自 1994 年 1 月 1 日起全面实施 ITS-90 国际温标。

## 2. 温度的测量方法

常用的各种材料和元器件的性能大都会随着温度的变化而变化，具有一定的温度效应。其中一些稳定性好、温度灵敏度高、能批量生产的材料就可以作为温度传感器。

温度传感器的分类方法很多。按照用途可分为基准温度计和工业温度计；按照测量方法又可分为接触式和非接触式；按工作原理又可分为膨胀式、电阻式、热电式、辐射式等；按输出方式分有自发电型、非电测型等。总之，温度测量的方法很多，而且直到今天，人们仍在不断地研究性能更好的温度传感器。我们可以根据成本、精度、测温范围及被测对象的不同，选择不同的温度传感器。表 2-4 列出了常用测温传感器的工作原理、名称、测温范围和特点。

表 2-4 常用温度传感器的工作原理、名称、测温范围和特点

所利用的物理现象	传感器类型	测温范围/℃	特 点
体积热膨胀	气体温度计 液体压力温度计 玻璃水银温度计 双金属片温度计	-250 ~ 1000 -200 ~ 350 -50 ~ 350 -50 ~ 350	不需要电源，耐用；但感温部件体积较大
接触热电势	钨铼热电偶 铂铑热电偶 其他热电偶	1000 ~ 2100 200 ~ 1800 -200 ~ 1200	自发电型，标准化程度高，品种多，可根据需要选择；须注意冷端温度补偿
电阻的变化	铂热电阻 热敏电阻	-200 ~ 900 -50 ~ 300	标准化程度高；但需要接入桥路才能得到电压输出
PN 结电压	硅半导体二极管 (半导体集成电路温度传感器)	-50 ~ 150	体积小，线性好；但测温范围小
温度-颜色	示温涂料 液晶	-50 ~ 1300 0 ~ 100	面积大，可得到温度图像；但易衰老，精度低
光辐射 热辐射	红外辐射温度计 光学高温温度计 热释电温度计 光子探测器	-50 ~ 1500 500 ~ 3000 0 ~ 1000 0 ~ 3500	非接触式测量，反应快；但易受环境及被测体表面状态影响，标定困难

一般把由金属导体（如铂、铜、银等）制成的测温元件称为热电阻，把由半导体材料制成的测温元件称为热敏电阻。

## 2.2.2 热敏电阻的种类及其应用

### 1. 热敏电阻种类及性能

热敏电阻是利用半导体材料电阻率随温度变化而变化的性质制成的，按其温度特性分成三类，适用于不同的使用场合。

电阻值随温度升高而升高的，称为正温度系数（PTC）热敏电阻；电阻值随温度升高而降低的，称为负温度系数（NTC）热敏电阻；具有正或负温度系数特性，但在某一温度范围电阻值发生巨大变化的，称为突变型温度系数热敏电阻（CTR）。三类热敏电阻温度特性曲线如图 2-26 所示。

### 2. 热敏电阻的主要技术指标

热敏电阻主要技术指标是选用热敏电阻的主要依据，其主要技术指标如下：

- 1) 标称电阻值（ $R_{25}$ ）：热敏电阻在  $25^{\circ}\text{C}$  时的电阻值。多数厂商在热敏电阻出厂时会给出在  $25^{\circ}\text{C}$  时电阻值。
- 2) 温度系数：指温度变化导致电阻的相对变化。温度系数越大，热敏电阻对温度变化反应越灵敏。
- 3) 时间常数：温度变化时，热敏电阻的阻值变化到最终值 63.2% 时所需的时间。
- 4) 额定功率：允许热敏电阻正常工作的最大功率。
- 5) 温度范围：允许热敏电阻正常工作，且输出特性没有变化的温度范围。

### 3. PTC 热敏电阻的经典应用

(1) 晶体管温度补偿电路 晶体管的主要参数，如电流放大倍数、基极-发射极电压、集电极电流等，都与环境温度密切相关。因此，在晶体管电路中需要采取必要的温度补偿措施，才能获得较高的稳定性和较宽的使用环境温度范围。采用 NTC 热敏电阻的晶体管温度补偿电路，普遍存在高温（一般在  $50^{\circ}\text{C}$  以上）补偿不足、输入阻抗随温度升高而下降，功耗较大等缺点。PTC 热敏电阻晶体管温度补偿电路能克服上述缺点，扩大晶体管使用环境温度范围。

图 2-27a、b、c 为三种不同接法的晶体管基本补偿电路，适用于不同的晶体管及工作电流，以求保证在较宽的温度范围内的最佳补偿效果。此外，图 2-27b 和图 2-27c 除有稳定工作电流的作用外，还兼有过热、过电流保护的功能，即当电流或环境温度超过设定值时， $R_T$  阻值剧增，从而使晶体管截止。

图 2-28 所示为采用 PTC 热敏电阻的晶体管放大电路。图中  $R_T$  为  $25^{\circ}\text{C}$  时，阻值为  $180\Omega$  的 PTC 热敏电阻，当环境温度变化时，其阻值随之变化使晶体管发射极电压呈反向变化，从而使集电极电流保持稳定。

(2) 测温控温电路 本测温控温电路适用于家用空调、电热取暖器、恒温箱、温床育苗、

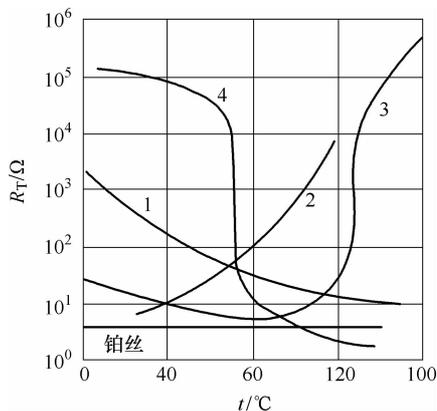


图 2-26 热敏电阻器的温度特性曲线  
1—NTC 2—PTC 3、4—CTR

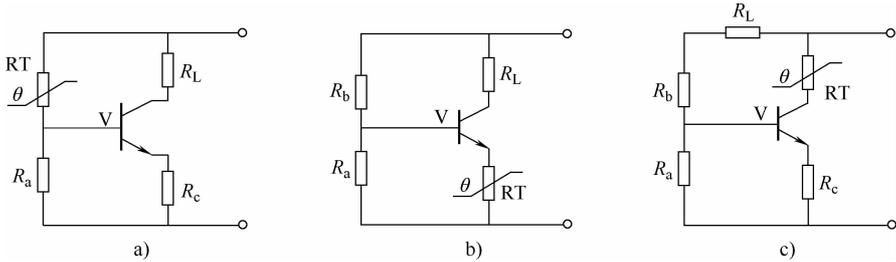


图 2-27 晶体管温度补偿电路

人工孵化、农牧科研等电热设备。其使用温度范围是  $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，测控温精度为  $\pm (0.2 \sim 0.5)^{\circ}\text{C}$ 。

本测温控温电路由温度检测、显示、设定及控制等部分组成，如图 2-29 所示。图中  $D_1 \sim D_4$  为 LM324 单电源四运放器的 4 个单独的运算放大器。 $RT_1 \sim RT_n$  为 PTC 感温探头，其用量取决于被测对象的容积。 $RP_1$  用于对微安表调零， $RP_2$  用于调节  $D_2$  的输出使微安表指满度； $S$  为转换开关。

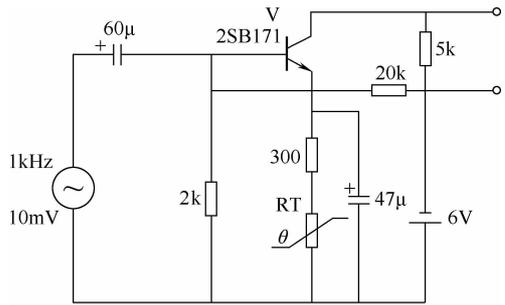


图 2-28 采用 PTC 热敏电阻的晶体管放大电路

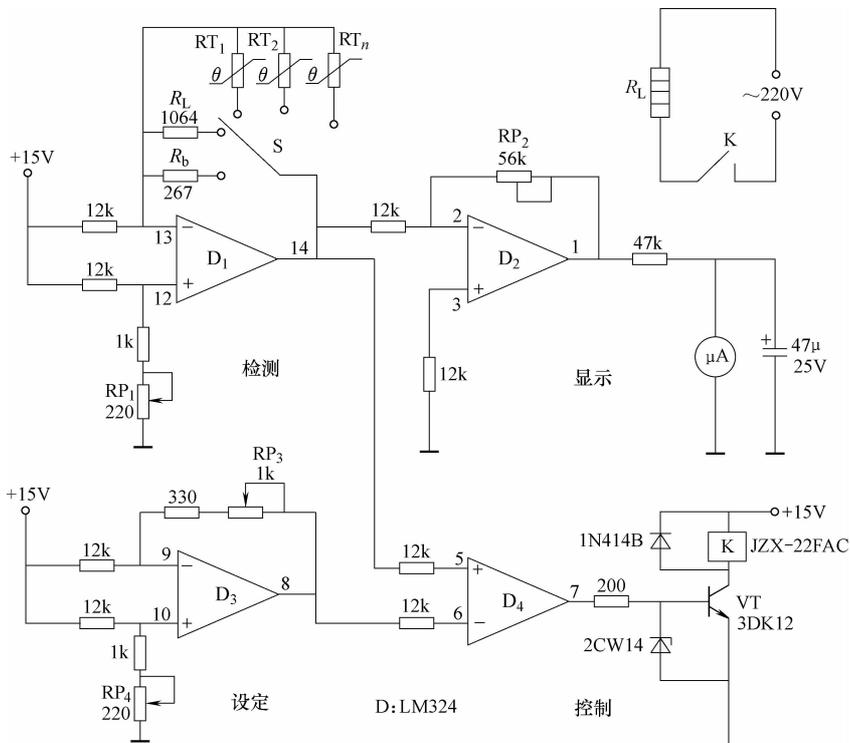


图 2-29 测温控温电路

由 RT 检测到的温度信息，输入  $D_1$  的反馈回路。该信息既作为  $D_2$  的输入信号，经  $D_2$  放大后通过微安表显示被测温度，又作为比较器  $D_4$  的同相输入信号，与  $D_3$  输出的设定基准信号，构成  $D_4$  的差模输入电压。当被控对象的实际温度低于由  $RP_3$  预设的温度时，RT 的阻值较小，此时  $D_4$  同相输入电压的绝对值小于反相输入电压的绝对值，于是  $D_4$  输出为高电位，从而使晶体管 VT 饱和导通，继电器 K 得电吸合常开触点 K，负载  $R_L$  由市电供电，对被控对象进行加热。当被控对象的实际温度升到预设值时， $D_4$  同相输入电压的绝对值大于反相输入电压的绝对值， $D_4$  的输出为低电位，从而导致 VT 截止，K 失电释放触点 K 至常开状态，市电停止向  $R_L$  供电，被控物进入恒温阶段。如此反复运行，达到预设的控温目的。

本测温控温电路选用 PTC 热敏电阻为感温元件，该元件在  $0^\circ\text{C}$  时的电阻值为  $264\Omega$ ，制成温度传感器探头，按图 2-30 线性化处理封装于护套内。

线性化后的 PTC 热敏电阻感温探头具有良好的线性，其平均灵敏度达  $16\Omega/^\circ\text{C}$  左右。如果采用数模转换网络、与非门电路及数码显示器，替代本电路的微安表显示器，很容易实现远距离多点集中的遥测。继电器的选型取决于负载功率。为便于调节， $RP_1 \sim RP_4$  选用线性带锁紧机构的微调电位器。

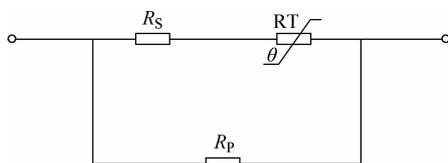


图 2-30 线性化处理

安装与调试：调试工作主要是调整指示器的零点和满度指示。如图 2-29 所示，先将 S 接通  $R_0$ ，调节  $RP_1$  使微安表指零，与此同时，调节  $RP_4$  使其阻值与  $RP_1$  相同，以保持  $D_1$  与  $D_4$  的对称性。然后将 S 接通  $R_1$ ，调节  $RP_2$  使微安表指满度。最后，按 RT 的标准阻-温曲线，将  $RP_3$  调到与设定温度相应的阻值，即可投入使用。

(3) 轴温过热保护电路 长期连续运转的机电设备都离不开轴承、轴瓦。因轴温过热引起的故障时有发生。采用轴温过热保护电路可以有效地防止恶性事故的发生。

图 2-31 是轴温过热保护电路。在正常情况下，调节  $RP_1$  使  $U_i < U_c/3$ ，于是 IC 输出为高电位，K 不动作，常闭触点得到维持。随着轴温的升高，RT 受热阻值增大，导致  $U_i \geq 2U_c/3$ ，位置 7 的输出由高电位翻转为低电位。于是 K 得电拉开常闭触点，切断运转设备的电源，使轴承或轴瓦得到保护。

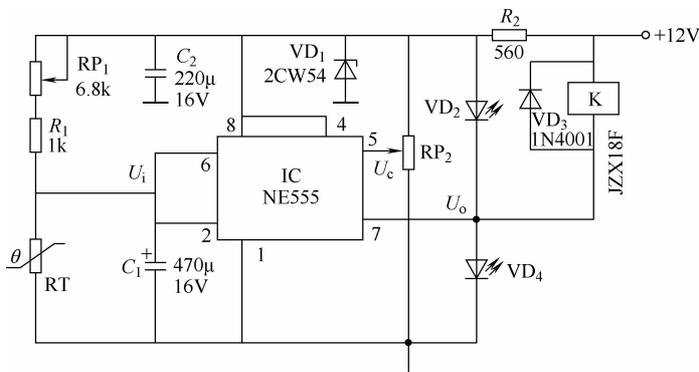


图 2-31 轴温过热保护电路

PTC 热敏电阻 RT 是轴温过热保护电路的关键元件，该元件的常温电阻值  $\leq 500\Omega$ 。PTC 热敏电阻密封在里面，并保证与外壳有良好的热传导及电绝缘。

PTC 热敏电阻探头紧固在易于发热超温的部位，使其头部与被控对象接触良好，建议在空隙处填充导热硅脂，以改善热传导条件。

### 2.2.3 热电阻传感器及其应用

对测温用的热电阻材料要求：电阻值与温度变化具有良好的线性关系；电阻温度系数要大，便于精确测量；电阻率高、热容小、响应速度快；在测温范围内具有稳定的物理和化学性能；材料质量要纯，容易加工复制，价格便宜。目前使用最广泛的热电阻材料是铂和铜。随着低温和超低温测量技术的发展，已开始采用钢、锰、碳等材料。

#### 1. 铂热电阻

铂热电阻主要用于高精度的温度测量和标准测温装置，性能非常稳定，测量精度高，其测温范围为  $-200 \sim 850^\circ\text{C}$ 。

按照 ITS-1990 标准，国内统一设计的最常用的工业用铂电阻为 Pt100 和 Pt1000，即在  $0^\circ\text{C}$  时铂电阻阻值  $R_0$  为  $100\Omega$  和  $1000\Omega$ 。铂电阻的电阻值与温度之间的关系可以查热电阻分度表 Pt100（见相关说明书）或 Pt1000，也可由下式计算得出，

$$\text{在 } -200 \sim 0^\circ\text{C} \text{ 的范围内: } R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (2-16)$$

$$\text{在 } 0 \sim 850^\circ\text{C} \text{ 的范围内: } R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (2-17)$$

式中， $R_t$  和  $R_0$  分别为温度为  $t^\circ\text{C}$  和  $0^\circ\text{C}$  时的电阻值；A、B、C 为常数， $A = 3.96847 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ， $B = -5.847 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$ ， $C = -4.22 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$ 。

在精度要求不高的场合，可以忽略式中的高次项，近似认为  $R_t$  与  $t$  成正比例关系，温度系数为 0.003851。

Pt100 正确的接线方法可以用图 2-32 来说明。图 2-32a 是两线出三线入接法，图 2-32b 是三线出三线入接法。 $R_1$  为铂热电阻， $R_1$ 、 $R_2$  为固定电阻， $R_3$  为可调电阻，A 为检流计。

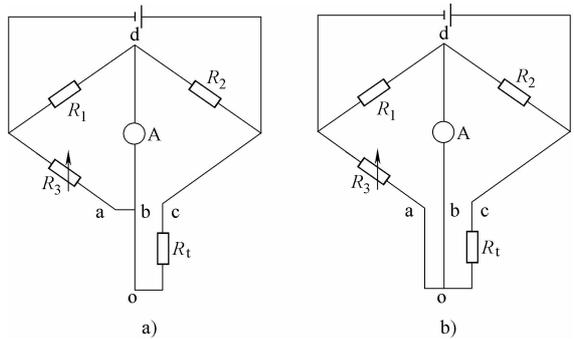


图 2-32 铂热电阻接线方法

在实际工业生产中，铂热电阻和温度巡检仪的距离很大，其间引线很长，会达到几十米甚至几百米。由于使用厂家为了节约信号线，就从铂热电阻端两线出，到温度巡检仪再并出一根线，三线接入温度巡检仪。虽然也是三线接入（见图 2-32a），但是对实测的温度值有很大的影响。

设导线长度  $oa = ob = oc$ ，即  $R_{oa} = R_{ob} = R_{oc} = R_L$ 。

对图 2-32 列电桥平衡式为

图 2-32a	$R_1 (R_1 + R_{oc} + R_{ob}) = R_2 R_3$
图 2-32b	$R_1 (R_1 + R_{ob}) = R_2 (R_3 + R_{oa})$
令	$R_1 = R_2$
图 2-32a	$R_3 = R_1 + R_{ob} + R_{oc} = R_1 + 2R_L$

图 2-32b

$$R_3 = R_1 \quad (2-18)$$

从式(2-18)可以看出,当按照图2-32b接法接时,导线电阻 $R_L$ 对铂热电阻的测量结果无任何影响,能够消除导线线路电阻带来的测量误差。即使是不平衡电桥,虽然不能消除导线的影响,但是也可以大大地减小误差,起到补偿作用。

## 2. 铜热电阻

铜热电阻价格便宜,易于提纯,复制性较好。在 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ 测温范围内,线性较好。电阻温度系数比铂高,但电阻率比铂小,在温度稍高时易于氧化,测温范围较窄,体积较大。所以,铜热电阻适用于对测量精度和敏感元件尺寸要求不是很高的场合。

我国常用的铜电阻为Cu50和Cu100,即在 $0^\circ\text{C}$ 时其阻值 $R_0$ 值为 $50\Omega$ 和 $100\Omega$ ,铜电阻阻值与温度之间的关系可以查热电阻分度表Cu50(见相关说明书)和Cu100,也可由下式计算得出,

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2-19)$$

式中, $\alpha$ 为电阻温度系数,一般取 $\alpha = 4.25 \times 10^{-3} \sim 4.28 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 。

## 3. 热电阻传感器结构

(1) 普通热电阻传感器结构 普通热电阻传感器一般由测温元件(电阻体)、保护套管和接线盒三部分组成,如图2-33所示。铜热电阻的感温元件通常用 $\phi 0.1\text{mm}$ 漆包线或丝包线采用双线并绕在塑料圆柱形骨架上,再浸入酚醛树脂(起保护作用)。铂热电阻的感温元件一般用 $\phi 0.03 \sim \phi 0.07\text{mm}$ 铂丝绕在云母绝缘片上,云母片边缘有锯齿缺口,铂丝绕在齿缝内以防短路。

(2) 铠装热电阻传感器结构 铠装热电阻传感器由金属保护管、绝缘材料和感温元件三部分组成,如图2-34所示。其感温元件用细铂丝绕在陶瓷或玻璃骨架上。这种结构的热电阻传感器,其热惰性小、响应速度快,具有良好的力学性能,可以耐强烈振动和冲击,适合于高压设备测温以及有振动的场合和恶劣环境中使用。

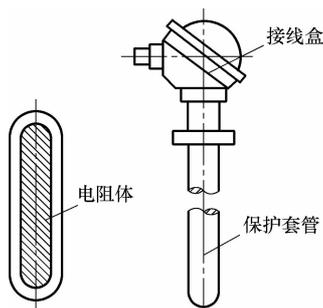


图 2-33 普通热电阻传感器结构示意图

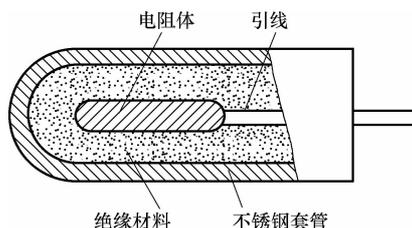


图 2-34 铠装热电阻传感器结构示意图

(3) 薄膜与厚膜型铂热电阻传感器结构 薄膜与厚膜型铂热电阻传感器由感温元件、绝缘基板、接头夹和引线四部分组成,如图2-35所示。这种结构的铂热电阻传感器主要用于平面物体的表面温度和动态温度的检测,也可部分代替线绕型铂热电阻用于测温和控温,其测温范围一般为 $-70 \sim 600^\circ\text{C}$ 。

## 4. 热电阻 Pt100 在测温电路中的应用

常用的Pt电阻接法有三线制和两线制,其中三线制接法的优点是将Pt100的两侧相等

的导线长度分别加在两侧的桥臂上，使得导线电阻得以消除。常用的采样电路有两种：一为桥式测温电路，二为恒流源式测温电路。下面分别对桥式电路和恒流源式电路的原理在设计过程中应注意的事项进行说明。

(1) 桥式测温电路 桥式测温的典型应用电路如图 2-36 和图 2-37 所示（图 2-36 和图 2-37 均为桥式电路，分别画出来是为了说明两线制接法和三线制接法的区别）。

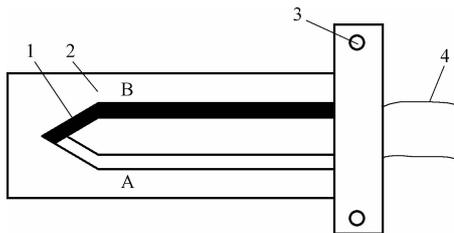


图 2-35 薄膜热电偶示意图

1—工作端 2—绝缘基板 3—接头夹 4—引线

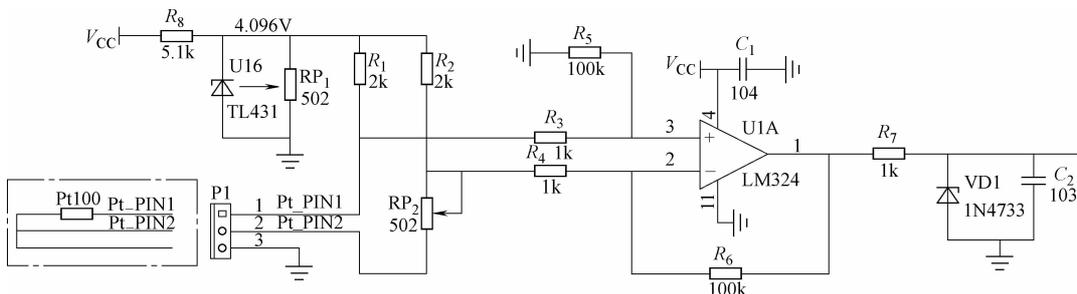


图 2-36 三线制接法桥式测温电路

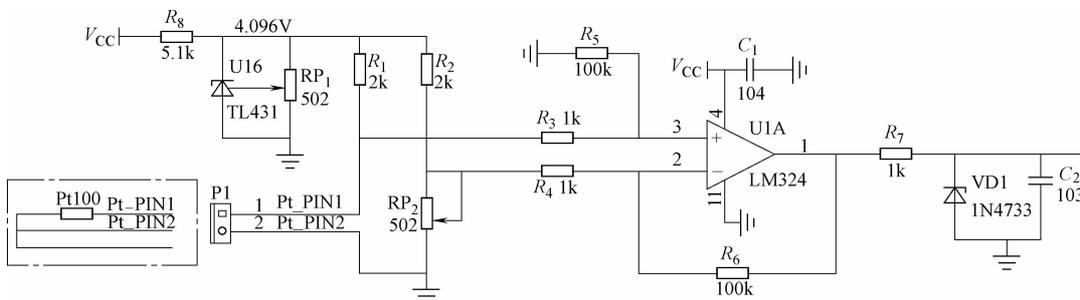


图 2-37 两线制接法桥式测温电路

测温原理：电路采用 TL431 和电位器  $RP_1$  调节产生 4.096V 的参考电源；采用  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $RP_2$ 、Pt100 构成测量电桥（其中  $R_1 = R_2$ ， $RP_2$  为 100Ω 精密电阻），当 Pt100 的电阻值和  $RP_2$  的电阻值不相等时，电桥输出一个 mV 级的压差信号，这个压差信号经过运放 LM324 放大后输出期望大小的电压信号，该信号可直接连 AD 转换芯片。差动放大电路中  $R_3 = R_4$ 、 $R_5 = R_6$ 、放大倍数 =  $R_5/R_3$ ，运放采用单一 5V 供电。

(2) 恒流源式测温电路 恒流源式测温的典型应用电路如图 2-38 所示。

测温原理：通过运放 U1A 将基准电压 4.096V 转换为恒流源，电流流过 Pt100 时在其上产生压降，再通过运放 U1B 将该微弱压降信号放大（图中放大倍数为 10），即输出期望的电压信号，该信号可直接连 AD 转换芯片。

根据虚地概念“工作于线性范围内的理想运放的两个输入端同电位”，运放 U1A 的“+”端和“-”端电位  $V_+ = V_- = 4.096V$ ；假设运放 U1A 的输出脚 1 对地电压为  $V_o$ ，根

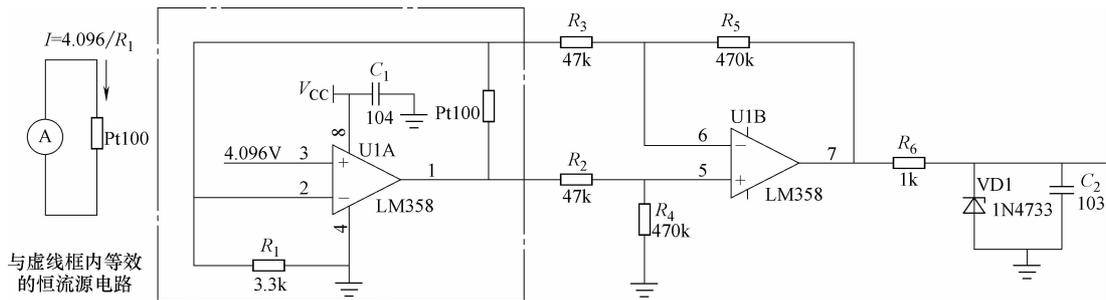


图 2-38 恒流源式测温电路

据虚断概念,  $(0 - V_-) / R_1 + (V_o - V_-) / R_{Pt100} = 0$ , 因此电阻 Pt100 上的压降  $V_{Pt100} = V_o - V_- = V_- R_{Pt100} / R_1$ , 因  $V_-$  和  $R_1$  均不变, 因此图中虚线框内的电路等效为一个恒流源流过一个 Pt100 电阻, 电流大小为  $V_- / R_1$ , Pt100 上的压降仅和其自身变化的电阻值有关。

### 2.2.4 热电偶传感器及其应用

#### 1. 热电效应

在近二百年前, 德国物理学家赛贝克 (T. J. Seebeck) 用两种不同金属组成闭合回路, 并用酒精灯加热其中一个接触点 (称为结点), 发现放在回路中的指南针发生偏转, 如图 2-39a 所示。如果用两盏酒精灯对两个结点同时加热, 指南针的偏转角反而减小。显然, 指南针的偏转说明回路中有电动势产生并有电流在回路中流动, 电流的强弱与两个结点的温差有关。

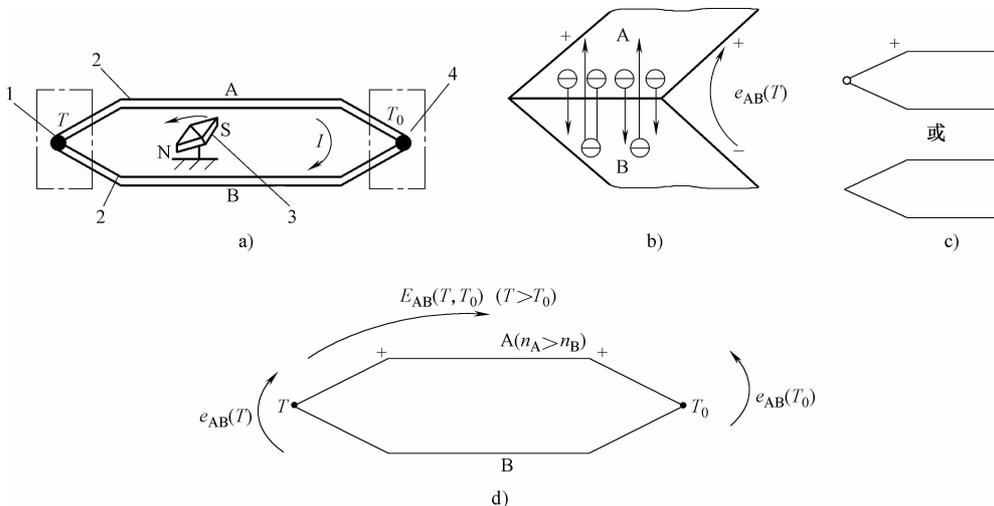


图 2-39 热电偶原理图

a) 热电效应 b) 结点产生热电动势示意 c) 图形符号 d) 热电动势示意  
1—工作端 2—热电极 3—指南针 4—参考端

据此, 赛贝克发现和证明了两种不同材料的导体 A 和 B 组成的闭合回路, 当两个结点温度不相同, 回路中将产生电动势。这种物理现象称为热电效应。两种不同材料的导体所组成的回路称为“热电偶”, 组成热电偶的导体称为“热电极”, 热电偶所产生的电动势称

为热电势。热电偶的两个结点中，置于温度为  $T$  的被测对象中的结点称为测量端，又称为工作端或热端；而置于参考温度为  $T_0$  的另一结点称为参考端，又称为自由端或冷端。

根据电子理论分析表明：热电偶产生的热电势  $E_{AB}(T, T_0)$  主要由接触电动势组成。

将两种不同的金属互相接触，如图 2-39b 所示。由于不同金属内自由电子的密度不同，在两金属 A 和 B 的接触点处会发生自由电子的扩散现象。自由电子将从密度大的金属 A 扩散到密度小的金属 B，使 A 失去电子带正电，B 得到电子带负电，直至在接点处建立起充分强大的电场，能够阻止电子的继续扩散，从而达到动态平衡为止，从而建立起稳定的热电势。这种在两种不同金属的接点处产生的热电动势称为珀尔帖 (Peltier) 电动势，又称为接触电动势。它的数值取决于两种导体的自由电子密度和接触点的温度，而与导体的形状及尺寸无关。

由于热电偶的两个结点均存在珀尔帖电动势，所以热电偶所产生的总的热电动势是两个结点温差  $\Delta t$  的函数  $f_{AB}$  (见图 2-39d)，

$$E_{AB}(T, T_0) = f_{AB}(T, T_0) = f_{AB}\Delta t \quad (2-20)$$

由上式可以得出下列几个结论：

1) 如果热电偶两结点温度相同，则回路总的热电动势必然等于零。两结点温差越大，热电动势越大。

2) 如果热电偶两电极材料相同，即使两端温度不同 ( $t_1 \neq t_0$ )，但总输出热电动势仍为零。因此，必须由两种不同材料才能构成热电偶。

3) 式 (2-20) 中未包含与热电偶的尺寸形状有关的参数，所以，热电动势的大小只与材料和结点温度有关。但热电偶的内阻与其长短、粗细、形状有关，热电偶越细，内阻越大。

如果以摄氏温度为单位， $E_{AB}(T, T_0)$  也可以写成  $E_{AB}(t, t_0)$ ，其物理意义略有不同，但电动势的数值是相同的。

## 2. 中间导体定律

在热电偶回路中接入中间导体 (第三导体)，只要中间导体两端温度相同，中间导体的引入对热电偶回路总电动势没有影响，这就是中间导体定律。

依据中间导体定律，在热电偶实际测温应用中，常采用热端焊接、冷端开路的形式，冷端经连接导线与显示仪表连接构成测温系统。

有人担心用铜导线连接热电偶冷端到仪表读取 mV 值，在导线与热电偶连接处产生的接触电动势会使测量产生附加误差。根据这个定律，是没有这个误差的！利用热电偶来实际测温时，连接导线、显示仪表和接插件等均可看成是中间导体，只要保证这些中间导体两端的温度各自相同，则对热电偶的热电动势没有影响。因此中间导体定律对热电偶的实际应用是十分重要的。在使用热电偶时，应尽量使上述元器件两端的温度相同，才能减少测量误差。

## 3. 热电偶的种类

我国从 1991 年开始采用国际计量委员会规定的“1990 年国际温标” (简称 ITS-90) 的新标准。按此标准，共有 8 种标准化了的通用热电偶，见表 2-5。表 2-5 所列热电偶中，写在前面的热极为正极，写在后面的为负极。对于每一种热电偶，还制定了相应的分度表，并且有相应的线性化集成电路与之对应。所谓分度表就是热电偶自由端 (冷端) 温度为  $0^\circ\text{C}$  时，反映热电偶工作端 (热端) 温度与输出热电动势之间的对应关系的表格。

表 2-5 8 种国际通用热电偶特性表

名称	分度号	测温范围 / $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$ 时的热电动势 /mV	1000 $^{\circ}\text{C}$ 时的热电动势 /mV	特点
铂铑 <sub>30</sub> -铂铑 <sub>6</sub>	B	50 ~ 1820	0.033	4.834	熔点高, 测温上限高, 性能稳定, 精度高, 100 $^{\circ}\text{C}$ 以下热电动势极小, 所以可不必考虑冷端温度补偿; 价昂, 热电动势小, 线性差; 只适用于高温域的测量
铂铑 <sub>13</sub> -铂	R	-50 ~ 1768	0.647	10.506	使用上限较高, 精度高, 性能稳定, 复现性好; 但热电动势较小, 不能在金属蒸气 and 还原性气体中使用, 在高温下连续使用时特性会逐渐变坏, 价昂; 多用于精密测量
铂铑 <sub>10</sub> -铂	S	-50 ~ 1768	0.646	9.587	优点同上; 但性能不如 R 热电偶; 长期以来曾经作为国际温标的法定标准热电偶
镍铬-镍硅	K	-270 ~ 1370	4.096	41.276	热电动势大, 线性好, 稳定性好, 价廉; 但材质较硬, 在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上长期使用会引起热电动势漂移; 多用于工业测量
镍铬硅-镍硅	N	-270 ~ 1300	2.744	36.256	是一种新型热电偶, 各项性能均比 K 热电偶好, 适宜于工业测量
镍铬-铜镍 (康铜)	E	-270 ~ 800	6.319	—	热电动势比 K 热电偶大 50% 左右, 线性好, 耐高温, 价廉; 但不能用于还原性气体; 多用于工业测量
铁-铜镍 (康铜)	J	-210 ~ 760	5.269	—	价格低廉, 在还原性气体中较稳定; 但纯铁易被腐蚀和氧化; 多用于工业测量
铜-铜镍 (康铜)	T	-270 ~ 400	4.279	—	价廉, 加工性能好, 离散性小, 性能稳定, 线性好, 精度高; 铜在高温时易被氧化, 测温上限低; 多用于低温域测量。可作 (-200 ~ 0) $^{\circ}\text{C}$ 温域的计量标准

从表 2-5 所列热电偶可以看出, 热电偶的种类是由热电极材料决定的。热电极材料很多, 因此热电偶种类也很多。图 2-41 示出了几种常用热电偶的热电动势与温度的关系曲线。从图 2-40 中可以看到, 在 0 $^{\circ}\text{C}$ 时它们的热电动势均为零, 这是因为绘制热电动势-温度曲线或制定分度表时, 总是将冷端置于 0 $^{\circ}\text{C}$ 这一规定环境中的缘故。

从图 2-40 中还可以看出, B、R、S 及 WRe5-WRe26 (钨铼<sub>5</sub>-钨铼<sub>26</sub>) 等热电偶在 100 $^{\circ}\text{C}$ 时的热电

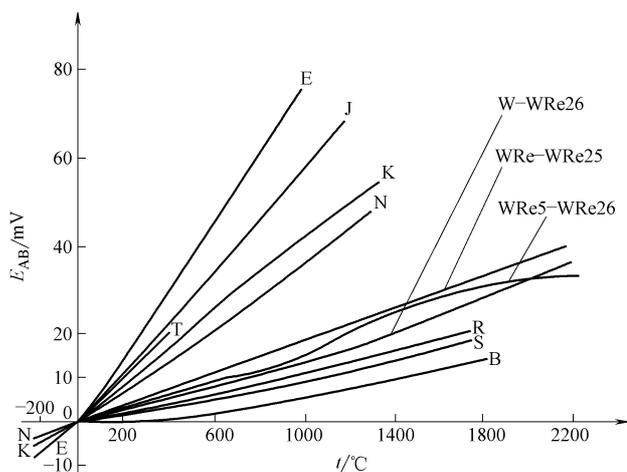


图 2-40 常用热电偶的热电动势与温度的关系曲线

动势几乎为零，只适合于高温测量。

从图 2-40 中还可以看到，多数热电偶的输出都是非线性（斜率  $K_{AB}$  不为常数）的，但国际计量委员会已对这些热电偶的每一度的热电动势做了非常精密的测试，并向全世界公布了它们的分度表（ $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ）。使用前，只要将这些分度表输入到计算机中，由计算机根据测得的热电动势自动查表就可获得被测温度值。

## 2.2.5 集成温度传感器及其应用

### 1. 概述

在研究二极管温度特性的同时，人们发现晶体管发射极的温度特性与二极管温度特性相似，但比二极管有更好的线性和互换性。晶体管温度传感器在 1970 年就已实用化，集成温度传感器是 1980 年问世的半导体集成器件，它是把热敏晶体管和放大器、偏置电源及线性电路制作在同一芯片上，可以完成温度测量及模拟信号输出的专用 IC 器件。

集成温度传感器实质上是一种半导体集成电路。集成温度传感器具有线性好、精度适中、灵敏度高、体积小、使用方便等优点，得到了广泛应用。集成温度传感器的输出形式分为电压输出和电流输出两种。电压输出型的灵敏度一般为  $10\text{mV/K}$ ，温度  $0^\circ\text{C}$  时输出为 0，温度  $25^\circ\text{C}$  时输出  $2.982\text{V}$ 。电流输出型的灵敏度一般为  $1\mu\text{A/K}$ 。集成温度传感器有 AD590、AD592、TMP17、LM15 等；模拟可编程的集成温度控制开关模块有 LM56、AD22105 等。

### 2. AD590 简介

AD590 是美国模拟器件公司生产的单片集成两端感温电流源。它的主要特性如下：

- 1) 流过器件的电流（ $\mu\text{A}$ ）等于器件所处环境的热力学温度（K）度数，即

$$\frac{I_T}{T} = 1\mu\text{A/K} \quad (2-21)$$

式中， $I_T$  为流过器件（AD590）的电流，单位为  $\mu\text{A}$ ； $T$  为热力学温度，单位为 K。

- 2) AD590 的测温范围为  $-55 \sim +150^\circ\text{C}$ 。

3) AD590 的电源电压范围为  $4 \sim 30\text{V}$ 。电源电压可在  $4 \sim 6\text{V}$  范围变化，电流  $I_T$  变化  $1\mu\text{A}$ ，相当于温度变化  $1\text{K}$ 。AD590 可以承受  $44\text{V}$  正向电压和  $20\text{V}$  反向电压，因而器件反接也不会被损坏。

- 4) 输出电阻为  $710\text{M}\Omega$ 。

5) 精度高。AD590 共有 I、J、K、L、M 五档，其中 M 档精度最高，在  $-55 \sim +150^\circ\text{C}$  范围内，非线性误差为  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。

### 3. AD590 基本应用电路

图 2-41a 是 AD590 的封装形式，图 2-41b 是 AD590 用于测量热力学温度的基本应用电路。因为流过 AD590 的电流与热力学温度成正比，当电阻  $R_1$  和电位器  $R_2$  的电阻之和为  $1\text{k}\Omega$  时，输出电压  $V_0$  随温度的变化为  $1\text{mV/K}$ 。但由于 AD590 的增益有偏差，电阻也有误差，因此应对电路进行调整。调整的方法为：把 AD590 放于冰水混合

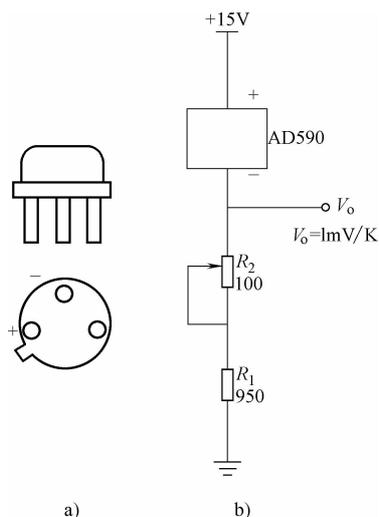


图 2-41 AD590 的封装形式与基本应用电路  
a) 封装形式 b) 基本应用电路

物中，调整电位器  $R_2$ ，使  $V_0 = 273.2\text{mV}$ 。或在室温（ $25^\circ\text{C}$ ）条件下调整电位器，使  $V_0 = 273.2 + 25 = 298.2$ （ $\text{mV}$ ）。但这样调整只可保证在  $0^\circ\text{C}$  或  $25^\circ\text{C}$  附近有较高精度。

如图 2-41 所示，电位器  $R_2$  用于调整零点， $R_4$  用于调整运放 LF355 的增益。调整方法如下：在  $0^\circ\text{C}$  时调整  $R_2$ ，使输出  $V_0 = 0$ ，然后在  $100^\circ\text{C}$  时调整  $R_4$  使  $V_0 = 100\text{mV}$ 。如此反复调整多次，直至  $0^\circ\text{C}$  时， $V_0 = 0\text{mV}$ ， $100^\circ\text{C}$  时  $V_0 = 100\text{mV}$  为止。最后在室温下进行校验。例如，若室温为  $25^\circ\text{C}$ ，那么  $V_0$  应为  $25\text{mV}$ 。冰水混合物是  $0^\circ\text{C}$  环境，沸水为  $100^\circ\text{C}$  环境。

要使图 2-42 中的输出为  $200\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，可通过增大反馈电阻（图中反馈电阻由  $R_3$  与电位器  $R_4$  串联而成）来实现。另外，测量华氏温度（符号为  $^\circ\text{F}$ ）时，因华氏温度等于热力学温度减去  $255.4$  再乘以  $9/5$ ，故若要求输出为  $1\text{mV}/^\circ\text{F}$ ，则调整反馈电阻约为  $180\text{k}\Omega$ ，使得温度为  $0^\circ\text{C}$  时， $V_0 = 17.8\text{mV}$ ；温度为  $100^\circ\text{C}$  时， $V_0 = 197.8\text{mV}$ 。AD581 是高精度集成稳压器，输入电压最大为  $40\text{V}$ ，输出  $10\text{V}$ 。

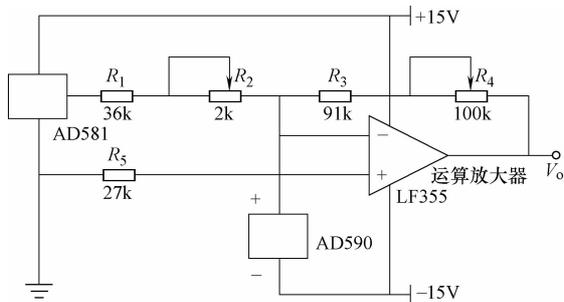


图 2-42 摄氏温度测量电路

#### 4. AD590 测量两点温度差的电路

图 2-43 是利用两个 AD590 测量两点温度差的电路。在反馈电阻为  $100\text{k}\Omega$  的情况下，设 1#和 2 #AD590 处的温度分别为  $t_1$ （ $^\circ\text{C}$ ）和  $t_2$ （ $^\circ\text{C}$ ），则输出电压为  $(t_1 - t_2) 100\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。图中电位器  $R_2$  用于调零。电位器  $R_4$  用于调整运放 LF355 的增益。

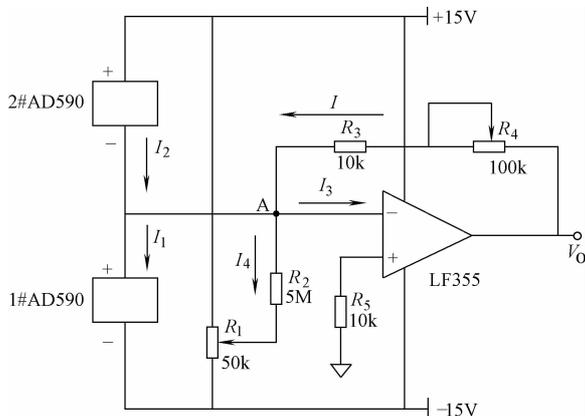


图 2-43 测量两点温度差的电路

由基尔霍夫电流定律

$$I + I_2 = I_1 + I_3 + I_4 \tag{2-22}$$

由运算放大器的特性知： $I_2 = 0$ ， $V_A \approx 0$

调节调零电位器  $R_2$  使： $I_4 = 0$

由以上条件可得： $I = I_1 - I_2$

设  $R_4 = 90\text{k}\Omega$

$$\begin{aligned} \text{则有:} \quad V_0 &= I (R_3 + R_4) = (I_1 - I_2) (R_3 + R_4) \\ &= (t_1 - t_2) 100\text{mV}/^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2-23)$$

式中,  $(t_1 - t_2)$  为温度差, 单位为 $^\circ\text{C}$ 。

由式(2-22)知, 改变 $(R_3 + R_4)$ 的值可以改变 $V_0$ 的大小。

## 2.3 压力传感器与仪表

### 2.3.1 流体压力的概念

流体压力是流体工业生产过程中重要的工艺参数之一, 正确的测量和控制流体压力是保证流体工业生产过程良好地运行并达到高产、优质、低耗及安全生产的重要环节。一般来说, 我们把垂直并且均匀作用在单位面积上的力定义为流体的压力。因此, 压力的计算公式为

$$P = F/A \quad (2-24)$$

式中,  $P$  为流体作用压力;  $F$  为作用力;  $A$  为作用面积。

而在实际生活和生产中有不同的压力概念:

1) 大气压力: 大气压力是地球表面上空气柱的重量所产生的压力。用符号 $P_B$ 表示, 大气压力值随气象情况、海拔高度和地理纬度等不同而改变。

2) 表压力: 测压仪表所指示的压力称为表压力, 它是以太气压力为零起算的压力。用符号 $P_G$ 表示。表压力是通常工程中的实用压力。

3) 绝对压力: 是指不附带任何条件起算的全压力。即液体、气体和蒸气所处空间的全部压力。它等于大气压力和表压力之和。用符号 $P'_A$ 表示:  $P'_A = P_G + P_B$

4) 疏空压力: 当绝对压力小于大气压力时, 大气压力与绝对压力之差称为疏空压力, 又叫真空压力、负压力。用符号 $P_H$ 表示:  $P_H = P_B - P'_A$

5) 差压(压力): 两个相关压力之差, 常用符号 $\Delta P$ 表示。

绝对压力、表压力、大气压力、真空压力和差压之间的关系可用图2-44表示。

除上述压力概念外, 流量计量中还常使用静压、动压的概念:

6) 静压: 静压是指在流体中不受流速影响而测得的表压力值。例如: 对于管道流动由管壁处所测压力, 均为静压值。过去把用液柱高度表示的静压称为压头, 因此静压又称为静水头。

7) 动压: 动压是指流体单位体积所具有的动能大小。通常用 $0.5\rho v^2$ 计算(其中,  $\rho$ ——流体密度;  $v$ ——流体运动速度)。动压又称动压头。

流体的压力是流量计量中一个极为重要的参数。在国际单位制中, 作用力 $F$ 的单位是

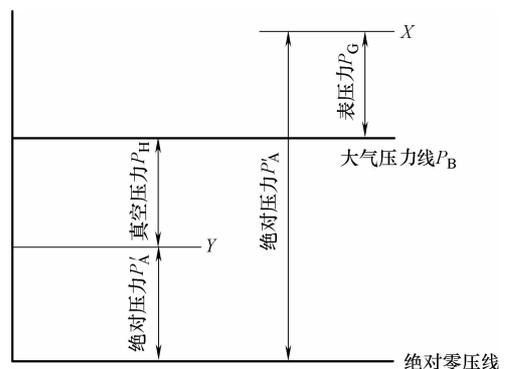


图 2-44 绝对压力、表压力、大气压力、真空压力和差压之间的关系

N, 作用面积  $A$  的单位是  $\text{m}^2$ , 压力  $P$  的单位是 Pa。

由于历史发展的原因、单位制的不同以及使用场合的差异, 压力还有多种不同的单位。目前工程技术部门仍在使用的压力单位有工程大气压、物理大气压、巴、毫米水柱、毫米汞柱等, 因此熟悉他们之间的换算也是工程实践的重要内容, 各种压力单位间的换算关系列于表 2-6 中。

表 2-6 压力单位之间的换算

压力单位	Pa	$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	atm	bar	mmHg
Pa	1	$1.019716 \times 10^{-2}$	$0.9869236 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$7.5006 \times 10^{-3}$
$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	$9.800665 \times 10^{-4}$	1	0.967841	0.980665	753.559
atm	$1.01325 \times 10^5$	1.03323	1	1.01325	760.0
bar	$1 \times 10^5$	1.019716	6.986923	1	750.062
mmHg	133.3224	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.3157895 \times 10^{-3}$	$1.33322 \times 10^{-3}$	1

### 2.3.2 压阻式传感器及其应用

压阻式传感器是利用单晶硅材料的压阻效应和集成电路技术制成的传感器, 单晶硅材料在受到力的作用后, 电阻率发生变化, 通过测量电路就可得到正比于力变化的电信号输出。压阻式传感器用于压力、拉力、压力差和可以转变为力的变化的其他物理量(如液位、加速度、重量、应变、流量、真空度)的测量和控制。它较之传统的膜盒电位计式、力平衡式、变电感式、变电容式、金属应变片式及半导体应变片式传感器, 技术上先进得多, 目前是压力测量领域最新一代的传感器。

#### 1. 压阻效应

半导体单晶硅材料在某一方向上受到外力作用, 产生肉眼根本察觉不到的极微小应变时, 原子结构内部的电子能级状态发生变化, 导致其电阻率剧烈的变化, 由此材料制成的电阻也就出现极大变化, 这种物理效应叫压阻效应。

压阻式传感器有两种类型: 一种是利用半导体材料的体电阻做成粘贴式应变片, 称为半导体应变片, 用此应变片制成的传感器称为半导体应变式传感器; 另一种是在半导体材料的基片上用集成电路工艺制成的扩散电阻, 以此扩散电阻的传感器称为扩散型压阻传感器。

(1) 半导体应变式传感器 半导体应变式传感器的结构形式基本上与电阻应变片传感器相同, 也是由弹性敏感元件等三部分组成, 所不同的是应变片的敏感栅是用半导体材料制成。图 2-45 所示为半导体应变片典型结构。半导体敏感条 1 粘贴在由胶膜制成的基底 2 上, 并有引线 5 将其与连接片 4 相接, 便于焊接外部引线 3。

半导体应变片与金属应变片相比, 最突出的优点是它的体积小而灵敏度高。它的灵敏系数比后者要大几十倍甚至上百倍, 输出信号有时不必放大即可直接进行测量记录。此外, 半导体应变片横向效应非常小, 蠕变和滞后也小, 频率响应范围亦很宽, 从静态应变至高频动

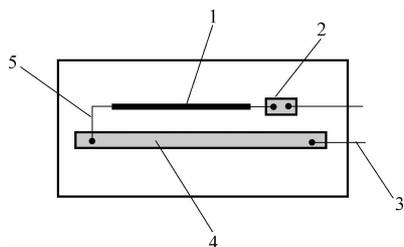


图 2-45 半导体应变片典型结构

1—半导体敏感条 2—基底  
3、5—引线 4—连接片

态应变都能测量。由于半导体集成化制造工艺的发展,用此技术与半导体应变片相结合,可以直接制成各种小型和超小型半导体应变式传感器,使测量系统大为简化。

但是半导体应变片也存在着很大的缺点,它的电阻温度系统要比金属电阻变化大一个数量级,灵敏系数随温度变化较大,它的应变—电阻特性曲线线性较大,它的电阻值和灵敏系数分散性较大,不利于选配组合电桥等。

利用半导体压阻效应,可设计成多种类型传感器,其中压力传感器和加速度传感器为压阻式传感器的基本形式。图 2-46 为压阻式压力传感器结构示意图。

## (2) 扩散型压阻传感器

1) 单晶硅:扩散型压阻传感器的基片是半导体单晶硅。单晶硅是各向异性材料,取向不同时特性不一样。因此必须根据传感器受力变形情况来加工制作扩散硅敏感电阻膜片。

硅压阻式压力传感器由外壳、硅膜片(硅杯)和引线等组成。硅膜片是核心部分,其外形状像杯,故名硅杯,在硅膜片上,用半导体工艺中的扩散掺杂法做成 4 个相等的电阻,经蒸镀金属电极及连线,接成惠斯顿电桥再用压焊法与外引线相连。膜片的一侧是和被测系数相连接的高压腔,另一侧是低压腔,通常和大气相连,也有做成真空的。当膜片两边存在压力差时,膜片发生变形,产生应力应变,从而使扩散电阻的电阻值发生变化,电桥失去平衡,输出相对应的电压,其大小就反映了膜片所受压力差值。

2) 多晶硅:多晶硅技术已经在 Gems Sensors 公司实现,它将先进的传感技术与高度自动化的生产工艺相结合,为用户提供最稳定的压力传感器。这种由硅、不锈钢、玻璃和其他金属在分子级别上相结合的压力变送器不受使用时间的影 响。图 2-47 所示为 GemsSensors 公司的 Psibar 多晶硅压力变送器。

## 2. 压阻式传感器结构、原理及测量电路

压阻式传感器主要由外壳、硅膜片(硅杯)、引线、底座等组成,其内部结构如图 2-48a 所示,压力转换元件是硅膜片,硅膜片是用单晶硅制成的,也称为硅杯;一般设计为中间薄、四周厚的圆形杯状,中间圆膜片直径与厚度比值为 20~60。在薄膜片表面的圆周上,采用集成电路加工技术和扩散技术,将 P 型杂质扩散到一片 N 型硅底层上,形成一层极薄的导电 P 型层,装上引线接点,制作成具有四只阻值相等的扩散型半导体力敏电阻,如图 2-48b 所示;并利用低阻扩散层(P 型扩散层)将四只电阻连接成电桥电路,如图 2-48c 所示。

硅杯设计时,取 4 个扩散型电阻  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ,当不受压力作用时,电桥处于平衡状态,桥路无电压输出;当外界有压力时,硅膜片就会产生机械形变,力敏电阻的阻值在膜片应力的作用下发生变化,电桥上电阻值的平衡被打破。由于 4 个电阻中两个设置在受拉应变区,另两个设置在受压应变区,使得两应变区电阻变化量相等、方向相反,即  $\Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R$ ,  $\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R$ ,这时桥路失去平衡,输出电压信号为

$$U_o = \frac{\Delta R}{R} U_{sc} \quad (2-25)$$

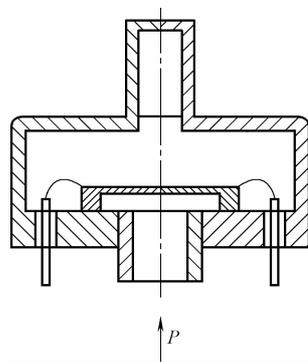


图 2-46 压阻式压力传感器结构

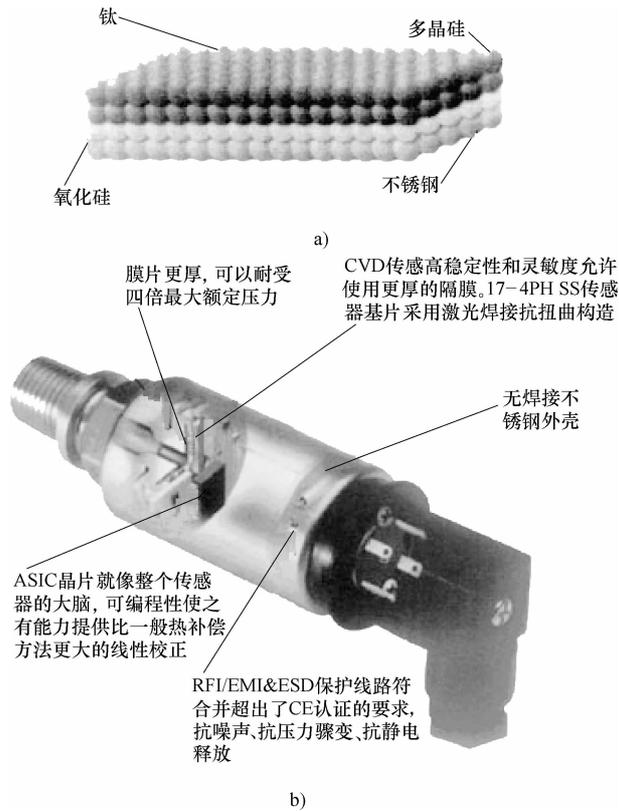


图 2-47 GemsSensors 公司的 Psibar 多晶硅压力变送器

a) 多晶硅 b) 压力变送器剖面

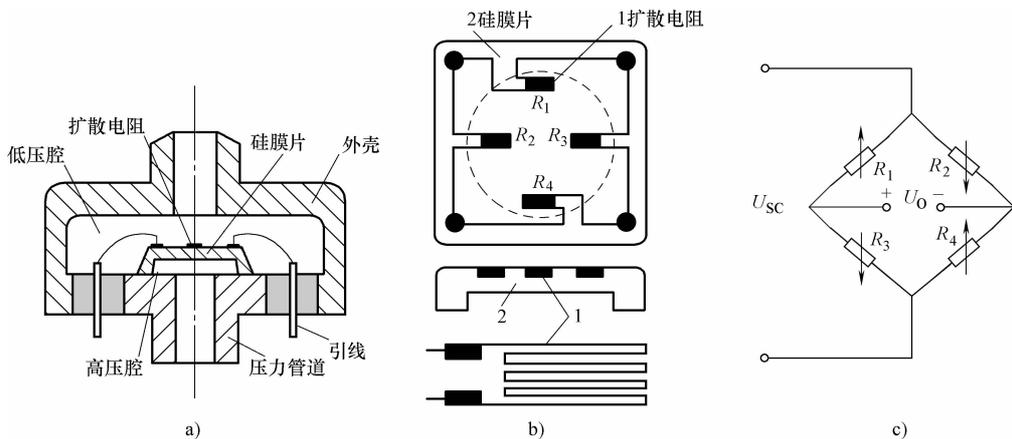


图 2-48 压阻式传感器

a) 内部结构 b) 半导体力敏电阻 c) 电桥电路

上式表明，桥路的输出电压与应变电阻的变化量成正比。当电桥的输入端输入一定的电压或电流时，在电桥的输出端就可得到变化的信号电压或信号电流。这个信号再经放大和转换，变成 4 ~ 20mA 直流电流信号作为显示和调节仪表的输入，其大小就反映了膜片所受的

压力值。

### 3. 压阻式集成压力传感器

压阻式集成压力传感器电路如图 2-49 所示，将敏感元件与传感器内部的温度补偿电阻，和信号放大电路以及恒流供电电路等都集成在同一芯片，制成硅压阻芯片，实现硅杯型压力传感器的单片集成。

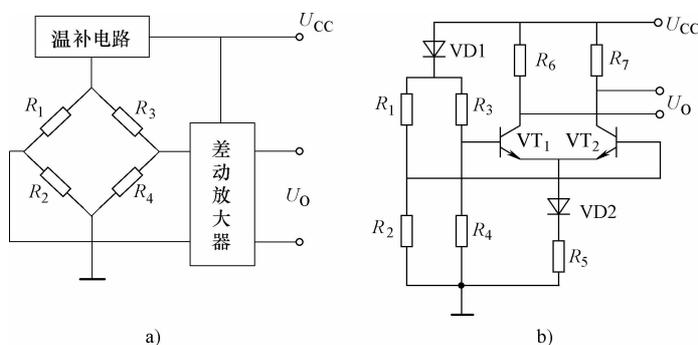


图 2-49 压阻式集成压力传感器电路

a) 框图 b) 电路

该集成传感器具有以下优点：频率响应高，如有的产品固有频率达 1.5MHz，适于动态测量；体积小，如有的产品外径可达 0.25mm，适于微型化；精度高，可达 0.1% ~ 0.01%；灵敏度高，有些应用场合可不加放大器；无活动部件，可靠性高，能工作于振动、冲击、腐蚀、强干扰等恶劣环境。其缺点是温度影响较大，需进行温度补偿、工艺较复杂和造价高等。压阻式集成压力传感器广泛应用于航天、航空、航海、石油化工、动力机械、生物医学工程、气象、地质、地震测量各个领域。例如在飞机喷气发动机中心压力的测量中，使用专门设计的硅压力传感器，其工作温度达 500℃ 以上。在波音客机的大气数据测量系统中，采用了精度高达 0.05% 的配套硅压力传感器。在生物医学方面，压阻式传感器也是理想的检测工具。已制成扩散硅膜厚 10μm、外径为 0.5mm 的注射针型压阻式压力传感器，和能测量心血管、眼球内压力的传感器。随着微电子技术和计算机的进一步发展，压阻式传感器的应用还将迅速发展。

### 2.3.3 压力传感器的选型

#### 1. 通用选型原则

为了保证所选产品符合使用要求，在选型时应着重注意以下几点：

1) 确认被测压力的种类。压力形式主要有表压力、差压、绝压模式。测量液位时，依据液位上方是自由大气压或密封气压选择表压或差压模式，例如密封带压力容器内的液位测量就应该选择差压模式。

2) 确认需要测量压力的范围。一般测量的压力值应是所选压力变送器的标准量程的 60% ~ 100%，常选 70%。

3) 确认所需要的过载能力。系统中最大可能出现的过载压力。包括脉动、振动、冲击等异常情况导致的压力峰值。一般系统的最高峰值压力不应超过产品允许的最大过载。

4) 确认测量的测量精度, 即准确度。一般提供的准确度为综合指标, 包含三项指标, 即线性、重复性和迟滞。一般有 1.0 级、0.5 级、0.25 级和 0.1 级四种等级。准确度等级确定应根据测量系统分配给传感器的最大误差选取。实际应用中有时还应该考虑零位漂移, 零位和灵敏度温度系统带入的附加误差。

5) 确认使用的温度范围。用户应用现场的介质温度应在压力变送器的补偿范围内, 这样才可能保证产品应用过程中的稳定性和精度。对于使用温度超过补偿范围但在工作温度范围内的情况, 传感器仍可以工作, 但是其测量精度和使用寿命将受到极大的影响。对于使用温度范围宽, 而要求准确度高的用户, 可选择智能型产品。

6) 确认使用场所介质是否具有腐蚀性。根据使用介质的腐蚀性, 压力变送器的敏感元件和壳体将会采用不同的和介质兼容的材料, 有时要做特殊的工艺处理, 这些都与产品的价格和供货周期密切相关。需要提前进行考虑, 并在订货时提出。

7) 确认压力接口形式。一般提供的压力变送器产品, 均具有标准的接口形式, 若用户需要特殊的接口形式, 可以特殊提出进行定制, 保证和现场接口顺利连接。

8) 确认供电形式和输出形式。产品提供标准的供电形式, 并提供四种输出形式: 有 DC4 ~ 20mA、DC0 ~ 10V、DC0 ~ 5V、DC1 ~ 5V, 用户需要确认所选型号和现场应用要求是否相符。

9) 判断安装现场是否有干扰或振动。如有, 请在选型的时候提出, 应该根据具体情况对产品进行抗干扰处理。

10) 判断安装现场是否有压力冲击。瞬时的压力冲击会引起流体以高速度运动冲击压力感应膜片, 过大的动能冲击附加压力造成大的压力过载。

11) 普通型和隔离型。从压力和差压变送器制作的结构上来分有普通型和隔离型。普通型的测量膜盒为一个, 它直接感受被测介质的压力和差压; 隔离型的测量膜盒接受到的是一种稳定液(一般为硅油)的压力, 而这种稳定液是被密封在两个膜片中间, 接受被测压力的膜片为外膜片。原普通型膜盒的膜片为内膜片, 当外膜片上接受压力信号时通过硅油的传递原封不动的将外膜片的压力传递到了普通膜盒上, 测出了外膜片所感受的压力。

隔离型变送器主要是针对特殊的被测量介质使用的, 如被测介质离开设备后会产生结晶, 而使用普通型变送器需要取出介质, 会将导压管和膜盒室堵塞使其不能正常工作, 所以必须选用隔离型。隔离型通常作成法兰式安装, 即在被测设备上开口加法兰使变送器安装后它的感应膜片是设备壁的一部分, 这样它不会取出被测介质, 一般不会造成结晶堵塞。

当被测介质需求结晶温度较高时, 可选用将膜片凸出的结构, 这样可将传感膜片插入到设备内部, 从而感应到的介质温度不会降低, 这样测量是有保障的, 即选用插入式法兰变送器。

隔离型变送器有远传型和一体型。远传型即外膜盒与测量膜盒之间用加强毛细管连接, 一般毛细管为 3 ~ 5m, 这样外膜盒装在设备上, 内膜盒及变送器可以安装在便于维护的支架上; 另一种形式是外膜盒与变送器作成一体直接由法兰安装在设备上。对于隔离型压力变送器它还可以作成螺纹连接型, 即外膜盒或外弹性元件可在安装螺纹的前面, 只要在被测设备上焊接上内螺纹凸台, 便可将变送器直接拧到设备上, 安装非常方便。

隔离型压力/差压变送器的制作复杂, 材质要求高, 所以它的价格通常是普通型的 3 倍。

## 2. JBY-K 型供水压力传感器选型与安装实例

1) 安装前请仔细阅读产品使用说明书, 并核对产品的相关信息(见表 2-7)。

表 2-7 JYB-K 型供水压力传感器技术参数

量 程	0 ~ 1 ~ 5MPa (5MPa < 量程 ≤ 10MPa 可订制)
输出	DC4 ~ 20mA
供电	DC + (10 ~ 32) V 通常 DC + 24V
准确度	≤ ±0.5% FS [ (23 ± 2) °C ] ≤ ±1% FS (0 ~ 60 °C)
工作温度	- 20 ~ 85 °C
温度补偿范围	0 ~ 60 °C
负载能力	≤ (V <sub>DD</sub> - 10V) × 40Ω
长期稳定性	≤ ±0.5% FS/年
响应时间	≤ 200ms
最大工作压力	3 × FS
爆破压力	5 × FS
过程连接	M20 × 1.5 或 1/4 NPT 或非标
电气连接	赫斯曼接头/M12 × 1 航空插头
外部零件的材料	普通不锈钢
介质	与 316 不锈钢兼容介质
本质安全防爆	Exib II BT4
防护等级	IP67 (M12 × 1 航空插头)
	IP65 (赫斯曼接头)

2) 变送器应安装于通风、干燥、无蚀、阴凉处，如露天安装应加防护罩，避免阳光照射和雨淋，避免变送器性能降低或出现故障。确认现场工作环境情况及其他。需了解是否存在振动以及电磁干扰等，并在选型时提供相关信息，以便采取相应处理；在选型时，其他如电气连接方式等也应根据情况予以考虑。

3) 确认压力接口形式，该产品以螺纹连接 (M20 × 1.5) 为标准接口形式 (见图 2-50)。

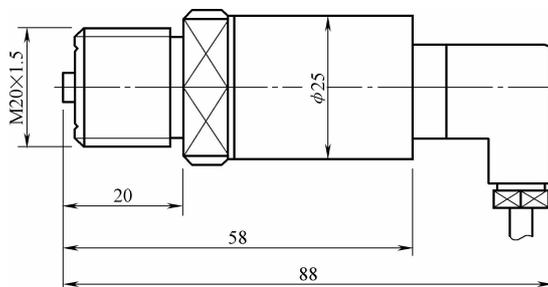


图 2-50 压力传感器的压力接口形式

4) 变送器属精密仪器，安装时忌强力冲击、摔打。

5) 接线按图 2-51 和图 2-52 正确连接。

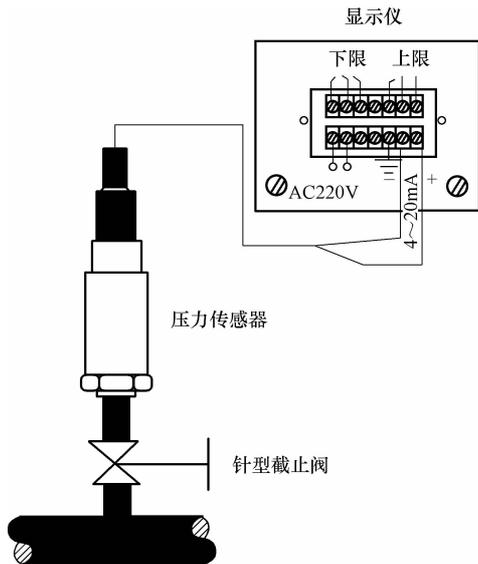


图 2-51 压力传感器的安装

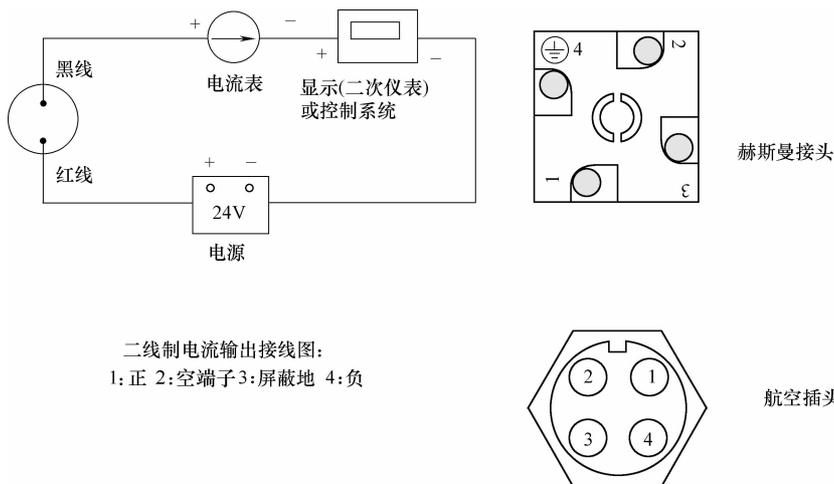


图 2-52 接线图

6) 注意保护变送器引出电缆。在工业现场使用时，建议使用金属管保护或者架空。切勿松动电缆引出端的密封螺帽，避免潮气进入。

7) 清洁变送器压力接口和引压孔时，应使用三氯乙烯或酒精注入引压孔中，并轻轻晃动，再将液体倒出，如此反复多次。禁止使用任何器具伸入引压孔中，以避免损伤敏感芯体。

8) 通电运行，可以通过显示仪的参数来进行，具体可以参考所接显示仪的说明书。

### 2.3.4 1151 系列电容式压力、差压变送器的测试与维修

#### 1. 1151 系列电容式压力、差压变送器的原理

1151 系列电容式变送器有一个可变电容的传感组件，且完全封闭。过程压力、差压通过隔离膜片和灌注液硅油传到传感膜片引起位移，传感膜片和两电容极板之间的电容差由电

子部件转换成 4 ~ 20mA 的两线制输出的电信号。

该系列变送器的电子放大电路由解调器、振荡器、振荡控制放大器、电流检测器、电流控制放大器、电流限制控制器、基准电压、稳压器等组成。通过它们对电容信号进行检测，从而控制振荡频率，再将其转换为电流输出。

### 2. 传感器组件的测试

1151 系列电容式变送器有故障时，一般不能在现场修理，只有更换。如果没有发现诸如隔离膜片损坏、漏油等现象，则对传感器组件可按下列步骤来检测：

1) 小心地从插头座上拔出传感器组件引出线插座。

2) 检查内部二极管电路的正、反向偏置：一个回路是红线与黄线，另一个回路是绿线与蓝线，其原理如图 2-53 所示。

用万用表正极接红线，负极接黄线，其串联回路  $VD_1$ 、 $VD_2$ 、 $VD_5$ 、 $VD_6$ 、 $R_4$  阻值之和应与测绿线与蓝线的串联回路  $VD_3$ 、 $VD_4$ 、 $VD_7$ 、 $VD_8$ 、 $R_5$  的阻值之和接近或相等。

3) 检查传感器组件外壳和此四线的电阻，也就是检查电容极板和接外壳的传感膜片之间的电阻，其阻值应大于  $10M\Omega$ 。

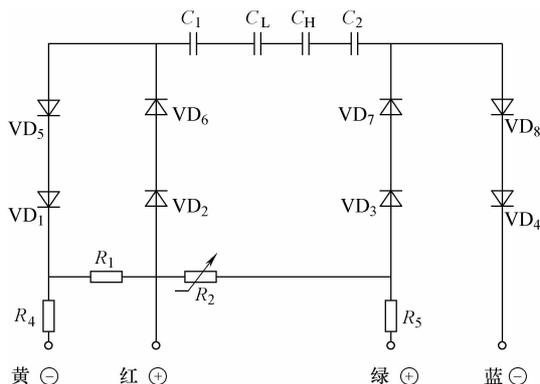


图 2-53 传感器组件测试原理图

### 3. 故障检修

1151 电容式变送器的故障部位一般分为两类：传感器故障和电子检测及放大转换故障。传感器一般不易出现问题，在按上述方法检测正常的情况下，一般不用怀疑。应重点检测电路部分。1151 电容式变送器的故障现象主要有以下几种：

(1) 输出过大 在没有压力（差压）的情况下，变送器输出电流（mA）过大，有时超量程，调整零点及量程电位器不起作用。出现此故障的电路较多，且经常损坏的是电路的后极，即电流控制放大器到电流控制输出部分。其结构如图 2-54 所示。

IC3 为电压放大器经  $VT_{17}$  转换为 mA 输出。用万用表直流电压档测 IC3 的 3 脚电位值，调节量程或零点，3 脚电压应有变化，说明前极回路正常。同时测量 6 脚输出应有放大的电压信号输出。从而判断 IC3 及外围偏置回路是否正常。若 6 脚电压始终很高（接近电源电压），则可判断为 IC3 损坏，更换同型号 LM308 即可。若 IC3 正常，则用万用表测量  $VT_{17}$ 、 $VT_{18}$  是否击穿。在实际检测中，经常遇到  $VT_{17}$ 、 $VT_{18}$  击穿致使输出过大。

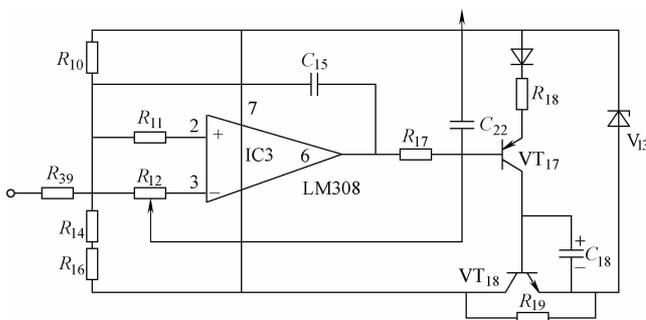


图 2-54 输出过大造成的电路损坏结构图

(2) 输出过小或无输出 检查加到变压器两端的电压是否正常；集成运算放大器两端

电压是否正常；判断振荡电路是否起振；量程、零点、电位器调节电压是否变化及  $15\Omega$  量程负载电阻是否损坏。用检测输出过大的方法检测后极电路，判断后极电路是否正常。

(3) 输出不稳定 检查变压器是否有间歇性的短路、开路和多点接地的现象；检查加到变压器的电压是否稳定正常；稳压电路是否正常；检测各个稳压二极管、测试振荡频率是否稳定；电路板有无虚焊。

(4) 输出非线性 此类故障出现的相对多一些且检测难度大，电路中各个部分参数变差都可能引起此类故障。但其主要出现在非线性调整电路部分。其电路如图 2-55 所示。

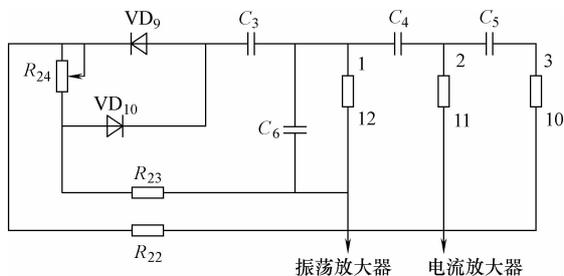


图 2-55 出现输出非线性故障电路

用万用表电阻档检测二极管  $VD_9$ 、 $VD_{10}$ 、线形电位器  $R_{24}$ 、电阻  $R_{23}$ 、 $R_{22}$  及  $C_3$ 、 $C_6$ 、 $C_4$  是否正常，调节  $R_{24}$  输出是否有相应变化，以上元件的损坏经常引起线性不好。

### 2.3.5 双法兰智能差压变送器的安装、调试与故障处理

#### 1. 双法兰智能差压变送器的概念

图 2-56 所示为双法兰智能差压变送器（以下简称差压变送器），它是一种高精度、小型化智能仪表，采用技术成熟的电容或单晶硅传感器，具有长期稳定性好，可靠性高的特点。通过数字技术，对传感器的温度和非线性进行补偿，大大地提高了传感器的精度和量程比范围。该类仪表通常具有 HART 通信接口，可用组态调试系统在计算上进行测试、组态、标定，也可用专门为之配备的手操器在现场进行组态和校正。它适用于各类液体、气体和蒸气的压力、差压、绝压的测量。常见的差压变送器包括横河公司的 EJA 系列、Rosement 公司的 1151/3051 系列等。



图 2-56 双法兰智能差压变送器

差压变送器具有以下主要特性：

- 1) 输出信号：DC4 ~ 20mA 叠加 HART 协议数字信号。
- 2) 负载特性如图 2-57 所示。

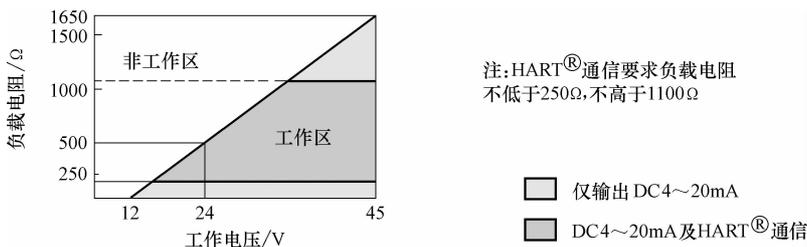


图 2-57 差压变送器的负载特性

3) 迁移特性 (见图 2-58)。

不管输出形式如何, 正负迁移后, 其量程上、下限均不得超过量程的极限; 在最小量程时, 最大正迁移为  $0.975URL$ , 最大负迁移为  $-URL$ , 绝对压力和流量变送器无负迁移, 流量变送器正迁移可调校流量量程的 10%。

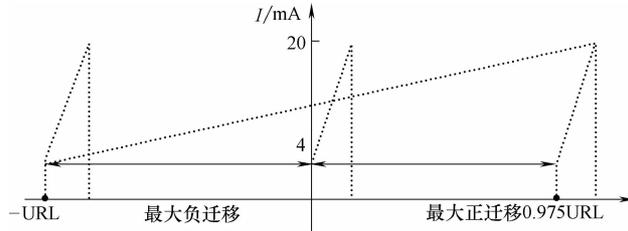


图 2-58 迁移特性  
URL—最大测量范围

2. 工作原理

被测介质的高、低两个压力分别通入高 (H)、低 (L) 压力容室, 作用在  $\delta$  元件 (即敏感元件) 的两侧隔离膜片上, 通过隔离膜片经填充液传送到测量膜片两侧。测量膜片与两侧绝缘体上的电极各组成一个电容器, 在无压力通入或两侧等压时测量膜片处在中间位置, 两侧的电容量相等, 当两侧压力不一致时, 致使测量膜片产生位移, 其位移量和压力差成正比, 这种位移转变在电容极板上形成差动电容, 通过电子线路的检测放大转换, 输出 DC4 ~ 20mA 二线制信号。压力变送器相同, 所不同的是低压室为大气压或真空。

3. 电气连接

这里以某品牌 KFB-3151 双法兰智能差压变送器为例进行电气连接说明。

1) 实验室用 HART 组态软件对变送器组态时的接线 (见图 2-59)。

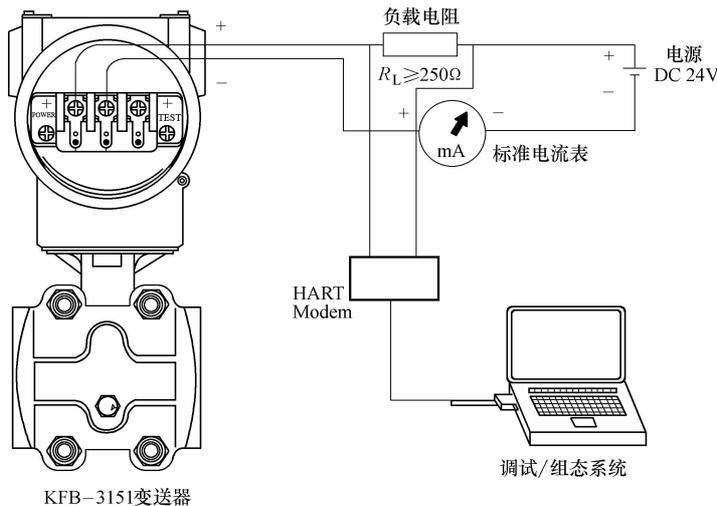
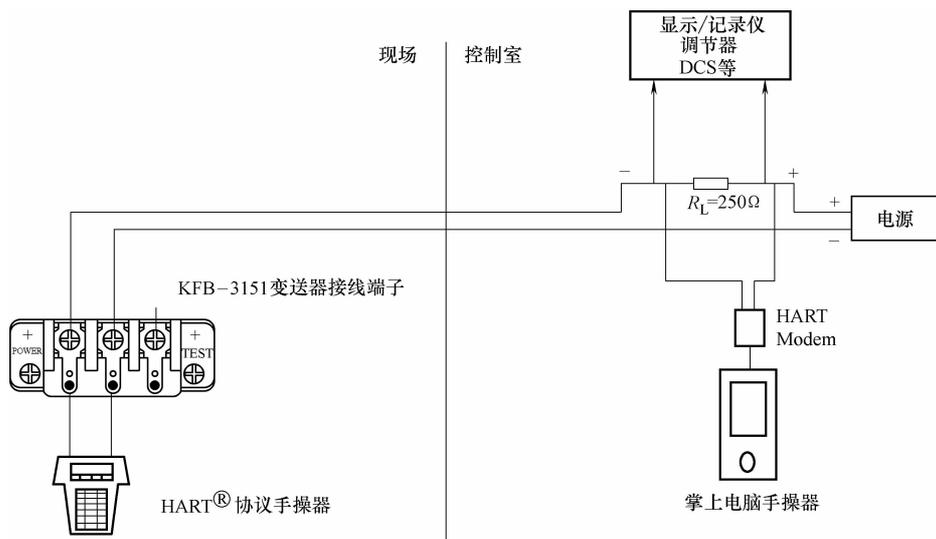


图 2-59 实验室用 HART 组态软件对变送器组态时的接线

2) 对已安装变送器用 HART 手操器或组态软件组态、调试时的接线 (见图 2-60)。



注: 使用 HART<sup>®</sup> 信号通信, 负载电阻  $R_L \geq 250\Omega$

图 2-60 用 HART 手操器或组态软件组态、调试时的接线

3) 变送器由控制室仪表直接供电的接线 (见图 2-61)。

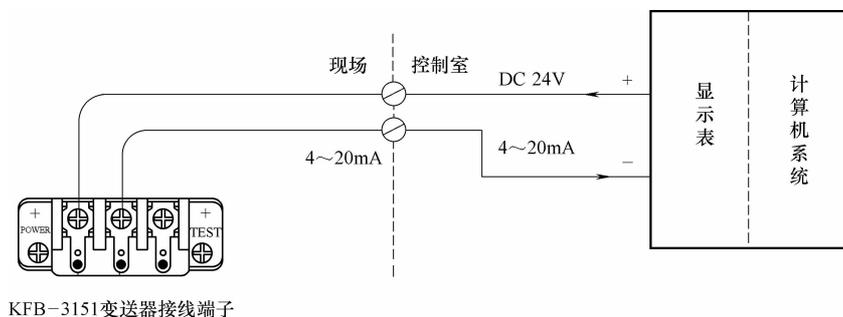


图 2-61 变送器由控制室仪表直接供电的接线

4) 变送器独立供电与接收 4~20mA 电流信号仪表的接线 (见图 2-62)。

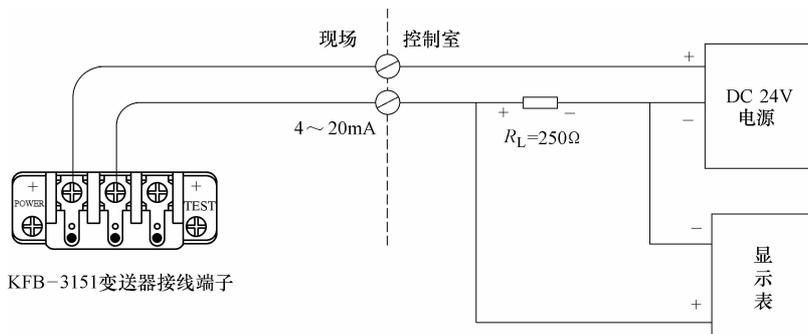


图 2-62 变送器独立供电与接收 4~20mA 电流信号仪表的接线

5) 变送器独立供电与接收 DC1 ~ 5V 电压信号仪表的接线 (见图 2-63)。

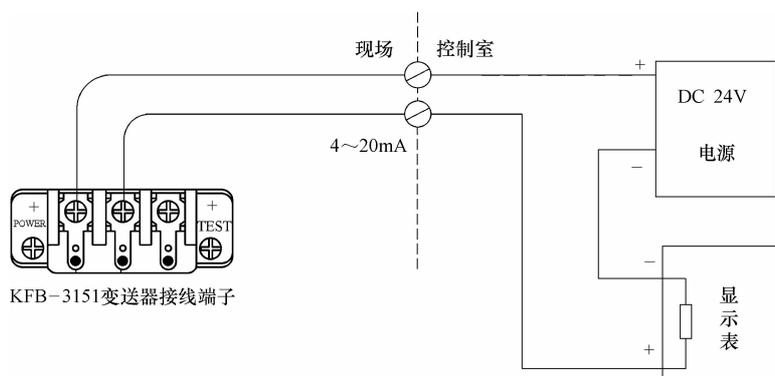


图 2-63 变送器独立供电与接收 DC1 ~ 5V 电压信号仪表的接线

#### 4. 现场安装

变送器和导压管安装得正确与否，直接影响其测量的精确度。因此，掌握变送器和导压管的正确安装是非常重要的。由于工艺流程的需要，变送器经常安装在工作条件较为恶劣的现场。为了尽可能减少工作条件的恶劣程度，变送器应通过适当加长引压管，安装在温度变化小、无冲击、无振动的地方。

为了确保引压管接头的密封，在紧固时应按下面步骤操作：两只紧固螺栓应交替用扳手均匀拧紧，切勿一次拧紧某一只螺栓。

有时为了安装和观察的方便，变送器壳体可在压力容室上转动。如果压力容室水平方向安装时，则由于变送器上液柱压头差的存在，将会产生一个微小的零点变化。重新再调整零点。

根据被测介质的具体情况，变送器在工艺管道上安装时，必须注意下面几点：

- 1) 变送器不要直接接触具有腐蚀性或者炽热的介质。
- 2) 避免被测介质中的沉淀物堵塞导压管和压力容室中堆积。
- 3) 导压管应尽可能短。
- 4) 环境温度波动应小。
- 5) 测量液体时，取压口应开在工艺管道的侧面，以避免渣滓的沉淀。同时变送器应安装在取压口的旁边或下面，以便气泡排入工艺管道之中。
- 6) 测量气体时，取压口应开在工艺管道的顶端或侧面。并且变送器应装在工艺管道的旁边或上面，以便凝结液流入工艺管道之中。
- 7) 测量蒸气时，取压口开在流程管道的侧面。并且变送器安装在取压口的下面，以便冷凝液能停满在导压管里。
- 8) 使用有侧装泄放阀的变送器，取压口要开在流程管道的侧面。被测介质为液体时，泄放阀应处在上面，以便排放气体。被测介质为气体时，变送器的泄放阀应处在下面，以便排放积聚液 (见图 2-64)。压力容室转动 180°，就可使泄放阀上、下变位。

应当特别注意，在测量高温介质时，其温度不应超过变送器的使用极限温度，被测介质为蒸气时，导压管中要充满水，以防止蒸气直接和变送器接触。

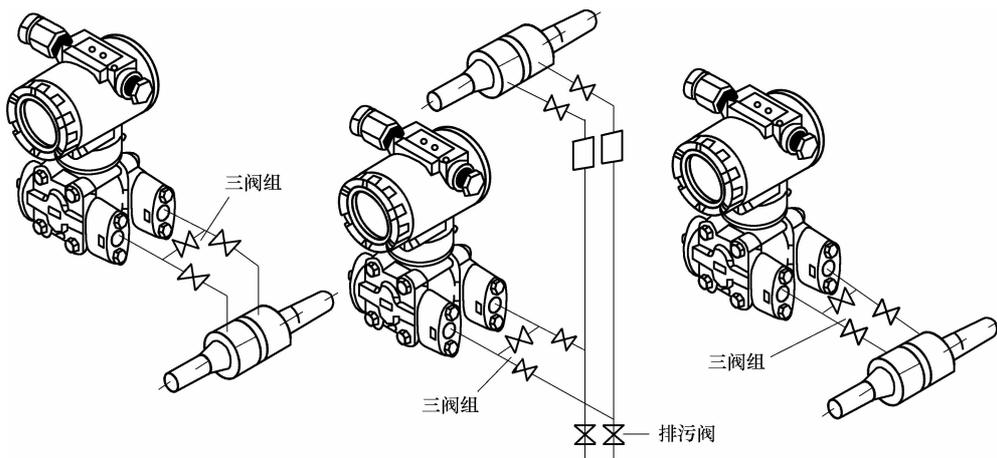


图 2-64 有侧装泄放阀的变送器安装

而对于导压管的安装也应注意以下三点：

- 1) 导压管弯头尽可能少，管子尽可能短。
- 2) 导压管水平敷设时，应有一定的坡度，一般为 1:10 ~ 1:20。管内介质为气体时，从取压口向上倾斜，在管路的最低位置要有排液装置（通常安装排污阀）。管内介质为液体时，从取压口向下倾斜，在管路的最低位置要有排气装置。
- 3) 导压管应予固定，管路支架间距要求水平位置敷设时为 1 ~ 1.5m，垂直敷设时为 1.5 ~ 2m。

### 5. 运行调试与调校

在安装结束后即可进行运行调试，需要注意的是：在运行前应把三阀组高低压阀门关死，平衡阀打开；隔离膜片不能直接接触超出使用温度范围的介质；用户在无标准压力源的情况下不要进行满度的调整、调校和迁移。如果由于运输或安装造成零点误差时可调零点。

以下是具体调校的流程：

- 1) 扫线（使用过的管路可不进行）：仪表使用前，应将通向仪表的导压系统和管道进行扫线，即用被测介质或水、或气冲刷管道，将所有焊渣及污物排除，避免由此而造成仪表的损坏或产生的非正常压力而导致的误差。
- 2) 开表：差压变送器的开表顺序为先打开高压（H）侧的阀，再关闭平衡阀，然后打开低压（L）侧的阀。对于测量蒸气和液位的仪表，开表时不允许有高压（H）阀、低压（L）阀和平衡阀同时打开的现象出现。否则会使低压侧的冷凝液流失，仪表无法正常工作。
- 3) 停表：停表时的顺序与上述相反，既先关闭低压（L）侧的阀，再打开平衡阀，然后再关闭高压（H）阀。
- 4) 按键调零、调满。本步骤跟具体的变送器产品规格有关系，可以参照产品说明书进行。一般情况下“按键调零”是对变送器施加零点压力，等变送器输出 4.00mA 电流后，完成调零操作；“按键调满”则对变送器施加满度压力，等变送器输出 20.00mA 电流，完成调满操作。

需要说明的是：在没有标准压力源的情况下，不能进行满度调整，如果需要量程迁移，请使用组态软件或手操器设定；另外阻尼时间和滤波系数等也需用组态软件或手操器进

行调整。

## 6. 横河 EJA 智能双法兰差压变送器的故障处理办法

图 2-65 所示的 EJA 智能双法兰差压变送器是日本横河电机有限公司的产品，在石油石化等流程工业中，该产品被大量的用于塔、罐、容器的液位测量。

在使用过程中，由于使用方法不当而造成了较多的故障，严重影响了仪表的正常使用，具体故障主要有以下三类：测量超限造成的无显示值；与安全栅不配套，造成回路无测量信号或信号偏低；输出过大、过小或不稳定。

(1) 对测量超限的处理方法 测量超限故障通常与以下因素有关。

1) 仪表操作使用不当：以某厂酮苯装置  $C_{101}$  液位控制系统 (LICA-1201) 为例，如图 2-66 所示，由于仪表始终在高液位 (100% 以上) 运行，或仪表始终在低液位 (5% 以下) 运行，都有可能使仪表指示为超限。因此，要求工艺操作人员应根据工艺流程及工艺控制要求正确判断出是仪表故障还是工艺操作不当。所以，需要工艺人员和仪表维护人员密切配合，保证工艺介质在仪表所能测量范围内，避免使操作人员误认为仪表故障。

2) 仪表量程选择不当：在对该厂酮苯装置中 EJA 智能双法兰变送器测量量程检查时，均发现变送器量程存在设计计算错误，在 DCS 工程师站上检查它们的量程时，发现双法兰量程无迁移，这是造成仪表测量不准及超限的重要原因，如图 2-67 所示。



图 2-65 EJA 智能双法兰差压变送器

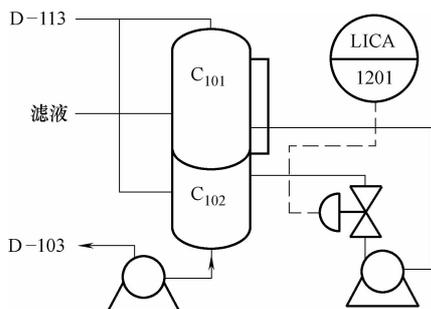


图 2-66  $C_{101}$  液位控制系统工艺图

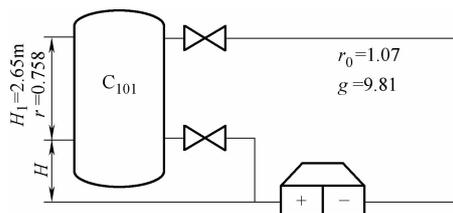


图 2-67  $C_{101}$  量程计算参数图

原设计采用量程为  $0 \sim 19.71\text{kPa}$ ，无量程迁移，因此测量结果在仪表量程之外，出现测量超限情况。实际上对此台仪表应按下面的方法进行量程计算：

已知：仪表可测范围  $H_1 = 2.65\text{m}$ ，介质比重  $r = 0.758\text{kg/m}^3$ ，毛细管硅油比重  $r_0 = 1.07\text{kg/m}^3$ 。

求仪表量程。

求解方法：仪表的量程是指当液位由最低升到最高时，液面计上所受的压力，故量程  $\Delta P$  为

$$\Delta P = H_1 \times r \times g = 2.65 \times 0.758 \times 9.81 \text{kPa} = 19.7 \text{kPa}$$

当液面最低时，液面计正、负压室的受力为

$$P_+ = H \times r_0 \times g = Hr_0g$$

$$P_- = (H_1 + H) \times r_0 \times g = 2.65r_0g + Hr_0g$$

液面计迁移量为

$$\begin{aligned} P_+ - P_- &= Hr_0g - (2.65r_0g + Hr_0g) \\ &= -2.65r_0g = -2.65 \times 1.07 \times 9.81 \text{kPa} \\ &= -27.82 \text{kPa} \end{aligned}$$

$P_+ > P_-$ ，故为负迁移。

按上述计算修改量程后，仪表运行即正常。因此，只有按正确的计算方法及引用迁移量来进行计算才能保证仪表量程的准确。

(2) 安全栅不配套造成仪表无输出及测量不准 由于智能变送器要求使用与之配套的安全栅，当用了未取得与智能变送器配套许可证的安全栅后，大部分都会出现这样那样的问题，其主要故障有：

1) 安全栅电压降过大，整个回路电压低于 16.4V，变送器供电不足，回路无法工作，如图 2-68 所示。

虚线区表示仪表可正常工作的范围，外部电阻应在 250~600Ω 之间。有时测量回路电阻 > 700Ω，因此造成测量偏差，甚至变送器无法工作。

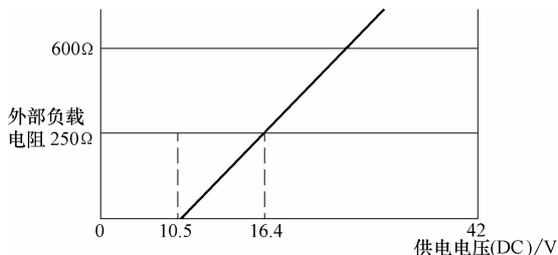


图 2-68 EJA 智能变送器供电电压与负载电阻之间的关系

2) 安全栅没有本安系统接地，造成大的共模干扰信号，引起智能变送器工作不正常。

以酮苯装置现场使用的 P + F 公司的 Z787H 为例，正确的接法如图 2-69 所示，但发现有时安全栅未接地，使得变送器无输出。

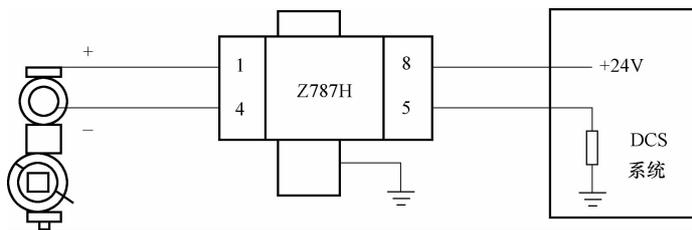


图 2-69 安全栅与智能变送器、DCS 的连接法

3) 虽然仪表间有兼容取证，但在应该选用变压器隔离式安全栅的场合下，却选用了本安型安全栅，使得仪表供电电压不足、无独立电源供电而形成抗干扰能力差，致使变送器不能正常工作。因此，选择一台经过取证的合适的安全栅也是保证变送器能够正常工作的必要条件。

(3) 输出过大、过小或不稳定（见表 2-8）

表 2-8 输出过大、过小或不稳定的可能原因与解决办法

故障原因	可能的原因	解决办法
输出过大故障	1) 导压系统	① 检查导压管是否泄露或堵塞 ② 检查气体导压管内是否存在有液体；液体导管中是否有气体；可打开“H”、“L”腔背后的泄放阀，待介质充分流通，将积存的液体或气体排净后，再将其拧紧，重新开表。注意：测量蒸气时要等导压管内充满冷凝液后方可开表 ③ 检查变送器压力容室内有无沉积物 ④ 检查导压管中的介质比重是否改变 ⑤ 检查节流装置（如孔板）的测量范围
	2) 变送器的电气连接	用备用电路板检查电路板是否有故障
	3) 电源	检查供电电源是否符合所需电压值
输出过小或无输出	1) 接线回路	① 检查回路连接是否发生短路或多点接地 ② 检查回路连接的正负极性和回路阻抗是否符合要求
	2) 导压系统	① 检查管道压力连接是否正确 ② 检查导压管是否泄露或堵塞 ③ 检查液体导压管中是否存在有气体；气体导压管中是否存在液体 ④ 检查变送器的压力容室中是否有沉积物
	3) 变送器的电路故障	用备用电路板检查电路板是否有故障
输出不稳定	1) 接线回路	检查变送器接线回路中是否有间歇性的短路、开路和多点接地的现象
	2) 被测液体波动	调整电路的阻尼作用（用手操器）
	3) 导压系统	① 检查充液导压管内有无气体和气体导压管内有无液体 ② 压力系统中是否有振荡压力
	4) 变送器的电气连接	检查变送器是否有间歇性的短路或电路开路现象
	5) 变送器的电路故障	用备用电路板检查电路板是否有故障

## 2.4 液位传感器与仪表

### 2.4.1 液位与液位传感器的概念

液位是指密封容器（池子）或开口容器（池子）中液平面的高低。通常用 m 作为计量单位。能检测物位到达某一位置并同时发出一个开关信号的装置称为液位开关（见图 2-70），而能实时测量液位信号的则为液位变送器（见图 2-71）。

目前，开关式液位传感器比连续式液位传感器应用得广，它主要用于过程自动控制的门限、溢流和空转防止等。连续式液位传感器主要用于连续控制和仓库管理等方面，有时也可用于多点报警系统中。

以下是几种常见的液位传感器：

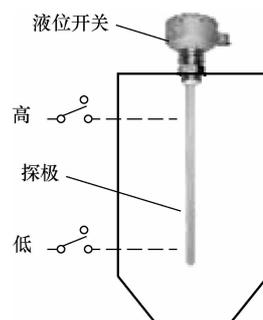


图 2-70 液位开关

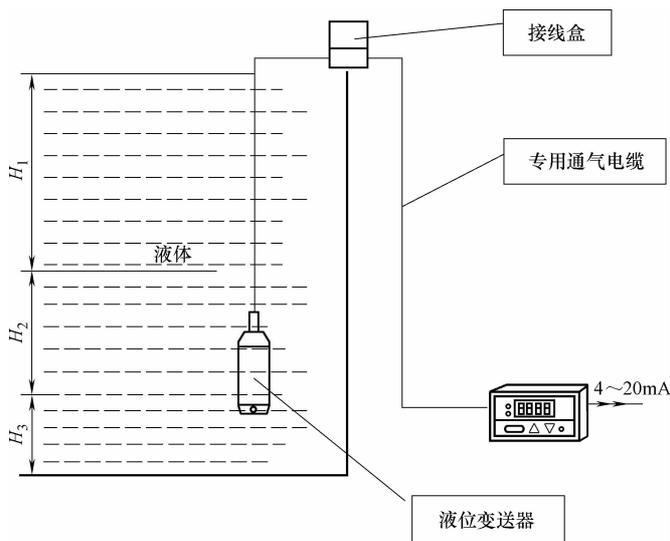


图 2-71 液位变送器

### 1. 电容式液位传感器

电容式液位传感器有两个导体电极（通常把容器壁作为一个电极），由于电极间是气体、流体或固体而导致静电容的变化，因此可以敏感地感应液位。它的敏感元件有三种形式，即棒状、线状和板状，其工作温度、压力主要受绝缘材料的限制。电容式液位传感器可以采用微机控制，实现自动调整灵敏度，并且具有自诊断的功能，同时能够检测敏感元件的破损、绝缘性的降低、电缆和电路的故障等，并可以自动报警，实现高可靠性的信息传递。由于电容式液位传感器无机械可动部分，且敏感元件简单，形状和结构的自由较大，操作方便，因此，它是应用最广的一种液位传感器。

### 2. 浮子自动平衡式液位传感器

这种位传感器通过检测平衡浮子浮力的变化来进行液位的测量。它可以配备微机，使之具有自检、自诊断和远传的功能，利用它可以高精度地测量大跨度的液位。

### 3. 压力式液位传感器

一般采用半导体膜盒结构，利用金属片承受液体压力。通过封入的硅油导压传递给半导体应变片进行液位的测量。由于固态压力传感器（压阻电桥式）性能的提高和微处理技术的发展，压力式液位传感器的应用越来越广。近年来，已经研制出了体积小、温度范围宽、可靠性好、精度高的压力式液位传感器，同时，其应用范围也不断地拓宽。

### 4. 新型液位传感器

新型液位传感器包括超声波液位传感器与激光液位传感器。

## 2.4.2 锅炉电极式液位传感器

### 1. 概述

锅炉电极式液位传感器，也叫电极式水柱器，它是工业锅炉实现液位自动控制必不可少的一次仪表。

它的简单工作原理是：通过无缝钢管筒体内所安装的预先设定的不同长度的不锈钢电极

棒，在锅炉运行过程中与炉水接触或脱离，从而向二次仪表送出不同液位的信号（高水位、正常水位上限、正常水位下限与低水位），最后通过二次仪表（如锅炉水位自控报警器）实现锅炉液位显示、自控、满水、缺水报警、严重缺水时强制停鼓、引风电动机等，达到确保锅炉安全运行，减轻司炉工劳动强度的目的。

## 2. 电极式液位传感器的结构

图 2-72 所示为 DYQ-1 型电极式液位传感器的结构示意图，四根电极装在一个筒体内。它有 260、300、350、400、440 五种规格（见表 2-9）。

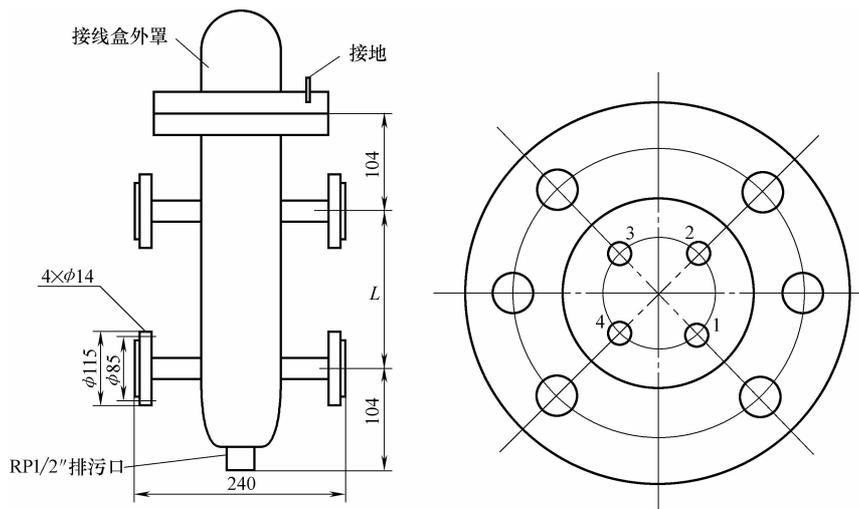


图 2-72 DYQ-1 型电极式液位传感器的结构

表 2-9 水位控制参数表

汽水管法兰距 $L/\text{mm}$	正常水位控制范围 $d_2$ 、 $d_3/\text{mm}$	水位过高间距 $d_1/\text{mm}$	水位过低间距 $d_4/\text{mm}$
260	$\pm 25$	+ 50	- 45
300	$\pm 30$	+ 70	- 60
350	$\pm 35$	+ 80	- 70
400	$\pm 35$	+ 80	- 70
440	$\pm 40$	+ 90	- 80

注：中水位线为“0”，“0”线上为+，“0”线下为-。

## 3. 传感器的安装

安装传感器时，必须停炉，待炉温、压力下降后进行，其位置在炉体与水表之间，下端应加接排污管。使用前要用绝缘电阻表（或万用表  $R \times 10k$  档），使电极脱离水面，测试传感器各极电棒间分别对外壳的绝缘电阻，其电阻值不得小于  $20M\Omega$ （在蒸气或潮湿条件下）如小于此值，一定要找出原因，排除后才能与仪表台接线，接线时要标注传感器端盖上的电极棒编号。

安装过程中还需要注意以下几点：

1) 四根电极的编号用钢印敲在端盖上，接线时与控制台或电控箱号码对号配接。

电极编号：1 号为最高满水危险状态；2 号为正常水位上限；3 号为正常水位下限；4 号为最低缺水危险状态。当水位达到 1 号电极位置或水位离开 4 号电极位置就会自动报警（即

红灯亮，电铃响)。在正常运行中，当水位达到2号位置，水泵电动机自动停止供水；反之，低于3号电极位置，水泵电动机自动供水。

2) 电极引出线应采用耐高温的绝缘线或套上高温的套管(瓷管、玻璃纤维套管等)，以免高温熔化线套而使线路发生故障。

3) 锅炉、传感器、水位表通过法兰安装时要尽量保持传感器与锅炉水平垂直。其不垂直度不大于 $20^\circ$ 。

#### 4. 使用与保养

在安装锅炉电极式液位传感器与自控报警以后，也必须注意玻璃管水位，以防安全装置万一失灵。当水位低于正常水位下限时应及时手动进水，并立即寻找失灵原因：当水位在玻璃管内消失时，应冲洗水位表或采用吊水等方法；当传感器连接法兰低于锅炉法兰而引起假水位时，应严格注意把传感器筒底存水放掉后再吊水，或者连续吊水二次；若发现锅炉系缺水现象，严禁向锅炉给水，防止事故发生。

安装以后，定期做好保养工作，一般3~6个月检查保养一次，保养时放松端盖子六只螺帽，抽出电极棒，用砂纸清理掉电极棒上的水污，按原样装好。

#### 5. 传感器常见故障排除方法

当出现一般故障时，即电控台或电控箱没有按预定水位显示或报警时，可先打开罩壳检修电路：是否短路，接头是否松动，接地线是否遗漏等。一般故障排除后即可恢复正常。

若接线无问题，可用绝缘电阻表检查线路的绝缘性能，1、2、3、4电极接线与外壳法兰的5接地线，五根线应互不导电(检查时应将传感器内的水排掉)，阻抗应在 $20M\Omega$ (在蒸气或潮湿条件下)以上。如出现短路，系绝缘套出现故障，只要停炉降压至零，打开端盖法兰，换去相应的绝缘套即可，绝缘套可向原厂购买，或采用聚四氟乙烯按需自制调换。

若左右水位高低不平，应注意左右传感器在安装时是否有换错位置，若属错位，复位即可排除故障。

### 2.4.3 超声波液位传感器

#### 1. 用途及原理

超声波液位传感器是一种非接触式的液位传感器，应用领域十分广泛。其工作原理是：工作时向液面或粉体表面发射一束超声波，被其反射后，传感器再接收此反射波。设声速一定，根据声波往返的时间就可以计算出传感器到液面(粉体表面)的距离，即测量出液面(粉体表面)位置。其敏感元件有两种：一种是由线圈、磁铁和膜构成的；另一种是由压电式磁致伸缩材料构成的。前者产生的是 $10kHz$ 的超声波，后者产生的是 $20\sim 40kHz$ 的超声波。超声波的频率越低，随着距离的衰减越小，但是反射效率也小。因此，应根据测量范围、液位表面状况和周围环境条件来决定所使用的超声波传感器。高性能的超声波液位传感器由微机控制。以紧凑的硬件进行特性调整和功能检测。它可以准确地区别信号波和噪声，因此，可以在搅拌器工作的任何情况下测量液位。此外，在高温或吹风时也可检测液位，特别是可以检测高黏度液体和粉状体的液位。

图2-73所示为超声波液位传感器的工作示意。

图2-73中的超声波传感器探头固定安装在支架上。用螺杆连接，可以在小范围内调整探头相对于水位=0点的距离，以校正水位。探头向液面发射超声波。利用回声测距法，测

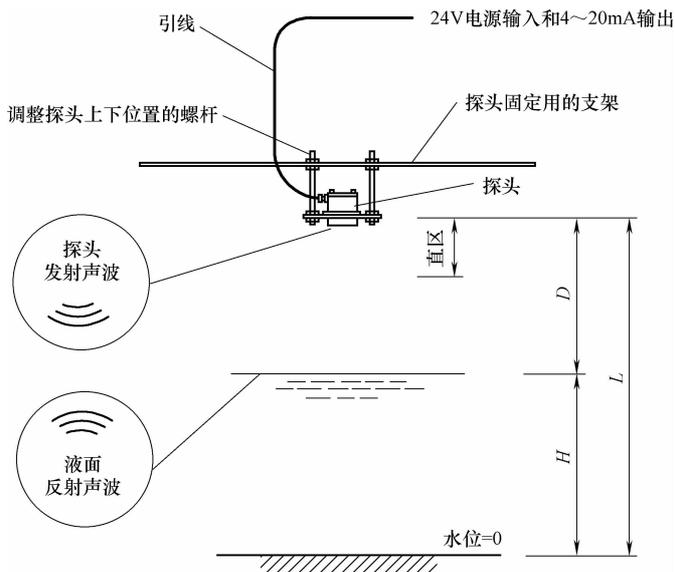


图 2-73 超声波液位传感器的工作示意

量探头到液面的距离“ $D$ ”。探头到“水位=0”点的距离“ $L$ ”已经存储在探头内。探头用“ $L$ ”减去“ $D$ ”得出液面到“水位=0”点的距离，即液位“ $H$ ”。“液位量程”也是预先存储在探头内的。当液位=0时，探头在输出线上输出4mA电流；当液位=“液位量程”时，探头在输出线上输出20mA电流；液位在0与量程之间时，输出线上的电流在4~20mA之间按液位线性比例输出。

## 2. 某型号超声波液位传感器的接线

图 2-74 所示为某型号超声波液位传感器的具体接线。其探头引线型号 RVVP4-0.3，出厂配 5m，应用中可接长，要注意接头的防潮处理。探头引线有四根芯线及屏蔽网。四根芯线用固定的颜色区分功能。

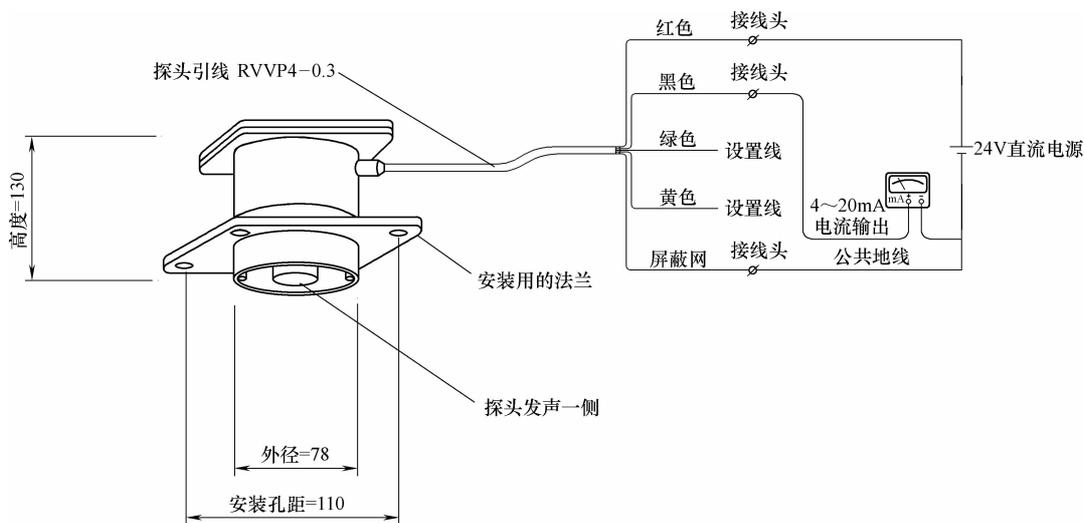


图 2-74 某型号超声波液位传感器的接线

- 1) 屏蔽网是公共地线，接24V直流电源的负极；并做输出4~20mA的负极。
- 2) “红色”线接24V直流电源的正极，向探头供电30~50mA。
- 3) “黑色”线输出4~20mA，正极。
- 4) “绿色”和“黄色”用于设置探头的参数，只限厂家使用，用户需要用绝缘胶布包好，不能与其他线短接。

### 【思考与练习】

#### 1. 判断题

- (1) 就分度值来说， $1^{\circ}\text{C}$ 等于1K。( )
  - (2) 所谓温标，就是温度的数值表示方法，它是借助于随温度变化而变化的物理量来表示温度数值。( )
  - (3) 摄氏温标又叫百分温标。它规定在标准大气压下纯水的冰点为零度，沸点为百度，在此两点间等分100等份，每等份代表一摄氏度。( )
  - (4) 双金属片温度计属于膨胀式温度计。( )
  - (5) 热电偶的热电动势是热电偶两端温度差的函数，是非线性的；在不同温域内，温差相等，热电动势并不相等。( )
  - (6) 使用冷端补偿器必须与热电偶相配套。不同型号的热电偶所使用的冷端补偿器应不同。( )
  - (7) 热电偶分度表是在其冷端温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 条件下制作的，使用时要求其冷端温度为 $0^{\circ}\text{C}$ ，如果冷端温度不为 $0^{\circ}\text{C}$ ，必须将冷端温度修正到 $0^{\circ}\text{C}$ 。( )
  - (8) 热电阻与二次表的连接，一般采用三线制连接法，主要是为了减少线路电阻随环境温度变化带来的测量误差。( )
  - (9) 国际单位制压力的基本单位是MPa。( )
  - (10) 测量管道流量，不仅要有合格的节流元件，而且其前后管直管段应符合要求。( )
  - (11) 利用动压测量管测量流量时，实际上是通过测量流体平均流速，从而间接测量出其流量。( )
  - (12) 玻璃转子流量计是一种非标准化的仪表，制造时是用常温常压下的水标定的，如果实际被测介质的种类、工作状态和物理参数与出厂标定不同，将造成很大的测量误差。( )
  - (13) 热电厂中，空气流量的测量多采用孔板。( )
2. 简述电磁流量计的工作原理和安装注意事项。
  3. 什么是热电效应？比较热电偶与热电阻及热敏电阻的异同点。
  4. 为什么液位检测可以转化为压力检测？请举例说明。
  5. 简述投入式液位计的工作原理，如图2-75所示。

6. 简述超声波传感器的发射和接收原理。

7. 超声波液位计可分为哪几种安装方式？各有什么特点？

8. 图 2-76 所示为采用超声波的汽车倒车防碰装置的示意图。请根据学过的超声波液位传感器知识分析该装置的工作原理。说明该装置还可以有其他哪些用途。

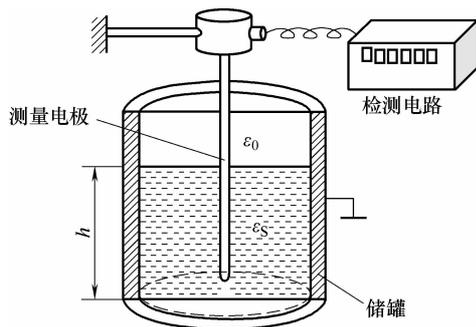


图 2-75 题 5 图

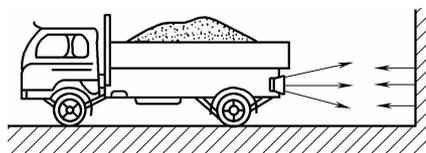


图 2-76 题 8 图

## 机械传感器与仪表应用



### 导读

在机械制造中，传感器技术是实现测试与自动控制的重要环节。在机械制造测试系统中，一次仪表的主要特征是能准确传递和检测出某一形态的信息，并将其转换成另一形态的信息。如位置、速度传感器就是实现检测速度、位置量的机械传感器，具体检测的对象有线位移、角位移等几何量，速度、角速度、加速度等运动量，还有倾斜角、方位角、振动等物理量。

本章主要介绍霍尔传感器、编码器、振动传感器和张力传感器四种最常见的机械传感器。霍尔传感器是由霍尔元件所组成，根据霍尔效应制作的一种磁场传感器；编码器是一种高精度的角位移传感器；振动传感器是将振动机械量接收下来，并转换为与之成比例的电量；张力传感器则能对片材、线材、带材及其他类似产品的张力进行在线连续测量。

## 3.1 霍尔传感器

### 3.1.1 霍尔传感器的概念

霍尔传感器是根据霍尔效应制作的一种磁场传感器，其主要敏感器件是霍尔元件。

霍尔传感器是目前国内外应用最为广泛的一种磁敏传感器，可用来制作特斯拉计、钳形电流表、接近开关、无刷直流电动机等，被广泛应用于机械量控制等领域。

#### 1. 霍尔效应

半导体薄片置于磁感应强度为  $B$  的磁场中，磁场方向垂直于薄片，当有电流  $I$  流过薄片时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势  $E_H$ ，这种现象称为霍尔效应，如图 3-1 所示。作用在半导体薄片上的磁场强度  $B$  越强，霍尔电动势也就越高。

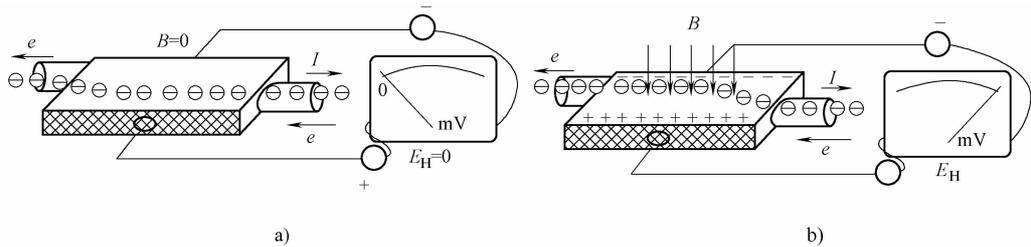


图 3-1 霍尔效应原理图

a)  $B=0$  b)  $B \neq 0$ 

霍尔电动势  $E_H$  可用下式表示:

$$E_H = K_H IB \quad (3-1)$$

式中,  $K_H$  为霍尔元件灵敏度。

## 2. 霍尔元件技术参数

(1) 额定控制电流  $I_C$  与最大控制电流  $I_{CM}$  霍尔元件在空气中产生  $10^\circ\text{C}$  的温升时所施加的控制电流值称为额定控制电流  $I_C$ 。在相同的磁场感应强度下,  $I_C$  值较大则可获得较大的输出电压。在霍尔元件做好之后, 限制  $I_C$  的主要因素是散热条件。一般锗元件最大允许温升为  $\Delta T_M < 80^\circ\text{C}$ , 硅元件  $\Delta T_M < 175^\circ\text{C}$ 。当霍尔元件的温升达到  $\Delta T_M$  时的  $I_C$  就是最大控制电流  $I_{CM}$ 。

(2) 乘积灵敏度  $K_H$  霍尔元件的乘积灵敏度定义为单位控制电流和单位磁感应强度下, 霍尔电动势输出端开路时的电动势值, 其单位为  $\text{V}/(\text{A} \cdot \text{T})$ , 它反映了霍尔元件本身所具有的磁电转换能力, 一般希望它越大越好。公式如下:

$$K_H = \frac{U_H}{IB} \quad (3-2)$$

除  $K_H$  以外, 霍尔元件还有磁灵敏度、电路灵敏度和电动势灵敏度等技术指标。

(3) 输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$  霍尔元件中两个控制电极间的电阻称为输入电阻  $R_i$ , 两个霍尔电极间的电阻称为输出电阻  $R_o$ 。一般  $R_o$ 、 $R_i$  为几欧姆到几百欧姆, 通常  $R_o > R_i$ , 但两者相差不大, 使用时不能搞错。

(4) 不等位电动势  $E_M$  和不等位电阻  $R_M$  当  $I \neq 0$  而  $B = 0$  时, 理论上应有  $E_H = 0$ 。但在实际中由于两个霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位面上, 半导体材料的电阻率不均匀或几何尺寸不均匀, 以及控制电极接触不良等原因, 使得当  $I \neq 0$ 、 $B = 0$  时,  $E_H \neq 0$ 。此时的  $E_H$  值为不等位电动势  $E_M$ 。

不等位电动势  $E_M$  与额定控制电流  $I_C$  之比, 称为不等位电阻  $R_M$ ,

$$R_M = \frac{E_M}{I_C} \quad (3-3)$$

## 3. 霍尔元件与霍尔传感器及其符号

霍尔元件的结构很简单, 它由霍尔片、引线和壳体组成, 如图 3-2a 所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片, 引出 4 个引线。1、1' 两根引线加激励电压或电流, 称为激励电极; 2、2' 引线为霍尔输出引线, 称为霍尔电极。霍尔元件壳体由非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装而成。在电路中霍尔元件可用两种符号表示, 如图 3-2b 所示。

霍尔传感器一般都是指霍尔集成电路, 它是将霍尔元件、放大器、施密特触发器以及输

出电路集成在一块芯片上，为用户提供了一种简化和较完善的器件。霍尔传感器的图形符号如图 3-3 所示。

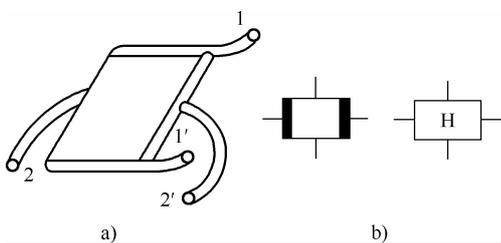


图 3-2 霍尔元件

a) 外形结构示意图 b) 图形符号

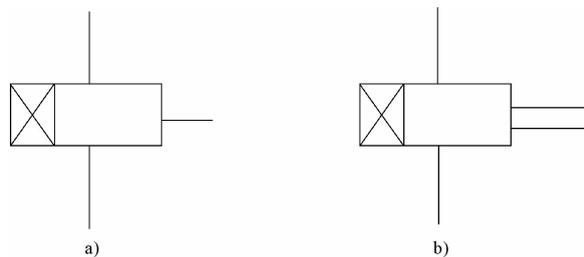


图 3-3 霍尔传感器图形符号

a) 单端输出 b) 双端输出

### 3.1.2 霍尔元件的测量电路

#### 1. 基本测量电路

霍尔元件的基本测量电路如图 3-4 所示。控制电流  $I$  由电源  $E$  提供， $R$  是调节电阻，用以根据要求改变  $I$  的大小，霍尔电动势输出的负载电阻  $R_L$ ，可以是放大器的输入电阻或表头内阻等。所施加的外电场  $B$  一般与霍尔元件的平面垂直。控制电流也可以是交流量。由于建立霍尔效应所需的时间短，所以控制电流的频率可高达  $10^9 \text{ Hz}$  以上。

#### 2. 霍尔电动势基本放大电路

霍尔元件的输出一般为毫伏级，在一般测量与控制场合，输出信号还不满足要求，这时可采用差动放大器进行放大，基本电路如图 3-5 所示。

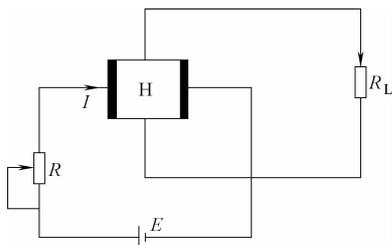


图 3-4 霍尔元件的基本测量电路

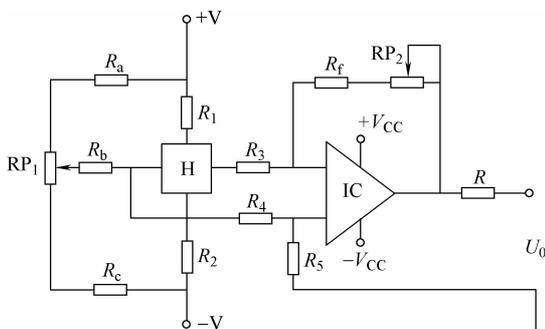


图 3-5 霍尔电动势基本放大电路

#### 3. 霍尔元件常用的连接方式

为了改善霍尔电动势输出特性，常采用图 3-6 所示的连接方式。

图 3-6a 为控制电流并联，输出电动势串联，此时  $E_H = E_{H1} + E_{H2}$ ，调整  $RP_1$  和  $RP_2$  可调整霍尔电动势  $E_{H1}$ 、 $E_{H2}$  的大小。一般使两个元件输出电动势相等，a、d 端电势  $E_H$  等于单个元件的两倍，但输出电阻也增加了一倍。

图 3-6b 是将霍尔输出端并联的电路，输出电动势  $E_H = E_{H1} = E_{H2}$ ，输出电阻降低一半。

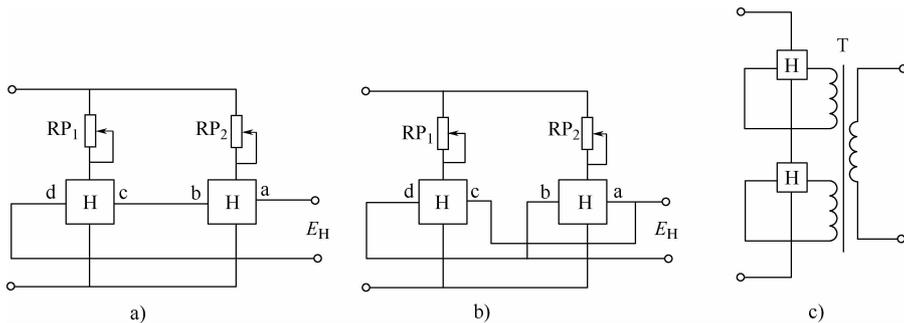


图 3-6 霍尔元件常用的连接方式

- a) 输出电动势串联  $E_H = E_{H1} + E_{H2}$     b) 输出电动势并联  $E_H = E_{H1} = E_{H2}$   
 c) 工作电流采用交流时的电动势  $E_H = E_{H1} + E_{H2}$

图 3-6c 是工作电流采用交流时的电动势叠加电路。元件的控制电流串联，各元件的输出分别接至变压器  $T$  的各一次侧，变压器的二次侧获得叠加的霍尔输出信号。

#### 4. 霍尔元件的温度补偿

霍尔元件对温度的变化很敏感，因此，霍尔元件的输入电阻、输出电阻、乘积灵敏度等将受到温度变化的影响，从而给测量带来较大的误差。为了减少测量中的温度变化造成的误差，除了选用温度系数小的霍尔元件或采取一些恒温措施外，也可使用以下的温度补偿办法。

(1) 恒流源供电 恒流源温度补偿电路如图 3-7 所示。

(2) 采用热敏元件 对于由温度系数较大的半导体材料制成的霍尔元件，采用图 3-8 所示的温度补偿电路，图中  $R_t$  是热敏元件（热电阻或热敏电阻）。图 3-8a 是在输入电路进行温度补偿的电路，即当温度变化时，用  $R_t$  的变化来抵消霍尔元件的乘积灵敏度  $K_H$  和输入电阻  $R_i$  变化对霍尔输出电动势的  $E_H$  影响；图 3-8b 则是在输出电路进行温度补偿的电路，即当温度变化时，用  $R_t$  的变化来抵消霍尔电动势  $E_H$  和输出电阻  $R_o$  变化对负载电阻  $R_L$  上的电压  $U_L$  的影响。在安装测量电路时，热敏元件最好和霍尔元件封装在一起或尽量靠近，以使两者的温度变化一致。

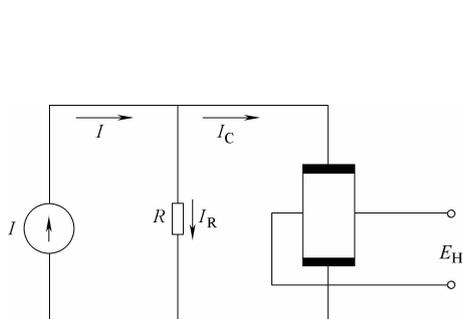


图 3-7 恒流源温度补偿电路

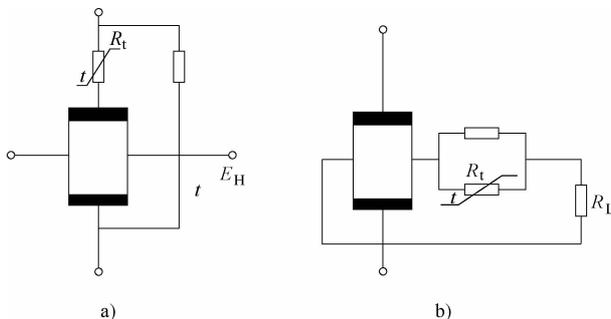


图 3-8 采用热敏元件的温度补偿电路

- a) 在输入电路进行补偿    b) 在输出电路进行补偿

(3) 不等位电动势的补偿 在分析不等位电动势时，可将霍尔元件等效为一个电桥，如图 3-9 所示。既然产生  $E_M$  的原因可归结为等效电桥的 4 个桥臂电阻不相等，则任何能够

使电桥达到平衡的方法都可作为不等位电动势的补偿方法。

1) 基本补偿电路：霍尔元件的不等位电动势补偿电路有多种形式，图 3-10 为两种常见电路，其中 RP 是调节电位器。图 3-10a 是在造成电桥不平衡的电阻值较大的一个桥臂上并联 RP，通过调节 RP 使电桥达到平衡状态，称为不对称补偿电路；图 3-10b 则相当于在两个电桥臂上并联调节电阻，称为对称补偿电路。

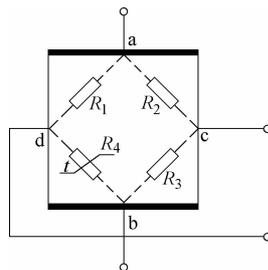


图 3-9 霍尔元件等效为一个电桥

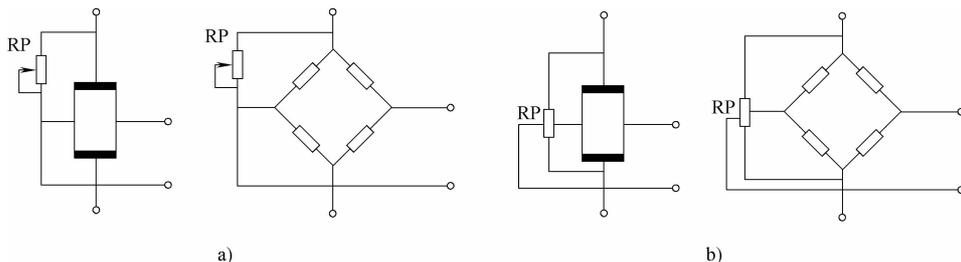


图 3-10 不等位电动势的基本补偿电路

a) 不对称补偿 b) 对称补偿

2) 具有温度补偿的补偿电路：图 3-11 是一种常见的具有温度补偿的不等位电动势补偿电路。其中一个桥臂为热敏电阻  $R_1$ ，并且  $R_1$  与霍尔元件的等效电阻的温度特性相同。在磁感应强度  $B$  为零时调节  $RP_1$  和  $RP_2$ ，使补偿电压抵消霍尔元件，此时输出不等位电动势，从而使  $B = 0$  时的总输出电压为零。

在霍尔元件的工作温度下限  $T_1$  时，通过调节电位器  $RP_1$  来调节补偿电桥的工作电压  $U_{ML}$ 。当工作温度由  $T_1$  升高到  $T_1 + \Delta T$  时，热敏电阻的阻值为  $R_1(T_1 + \Delta T)$ 。 $RP_1$  保持不变，通过调节  $RP_2$ ，使补偿电压抵消此时的不等位电动势  $U_{ML} + \Delta M$ 。

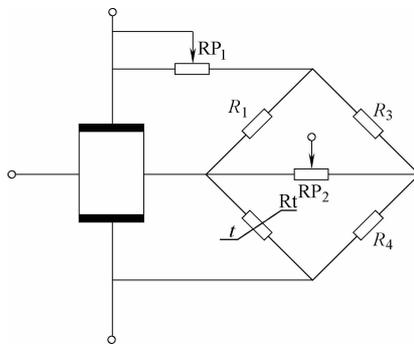


图 3-11 不等位电动势的桥式补偿电路

### 3.1.3 霍尔传感器在机械设备上的应用

#### 1. 常见的霍尔传感器 UGN3040 及其应用

UGN3040 是一种常见的霍尔传感器，其外观和原理如图 3-12 所示，其供电范围  $V_{CC}$  可以在 4.5 ~ 24V 内选择。

(1) 霍尔接近开关 霍尔接近开关电路如图 3-13 所示。它是一个无接触磁控开关。当磁铁靠近时，开关接通；当磁铁离开后，开关断开。

(2) 霍尔式转速传感器 图 3-14 是几种不同结构的霍尔式转速传感器。转盘的输入轴与被测转轴相连，当被测转轴转动时，转盘随之转动，固定在转盘附近的霍尔传感器便可在每一个小磁铁通过时产生一个相应的脉冲，检测出单位时间的脉冲数，便可知道被测转速。

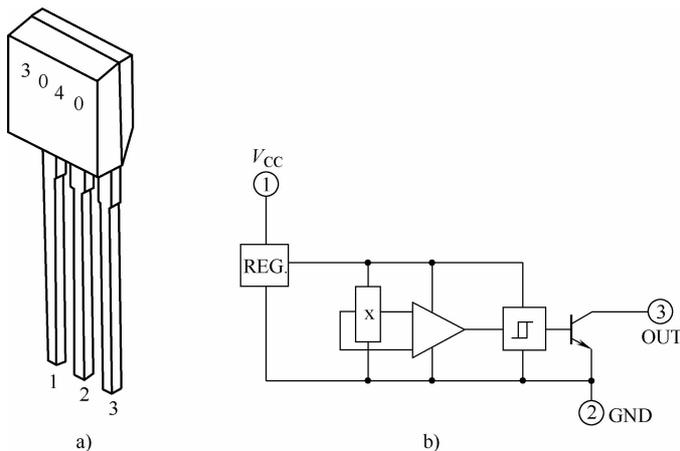


图 3-12 UGN3040 外观和原理

a) 外观 b) 原理

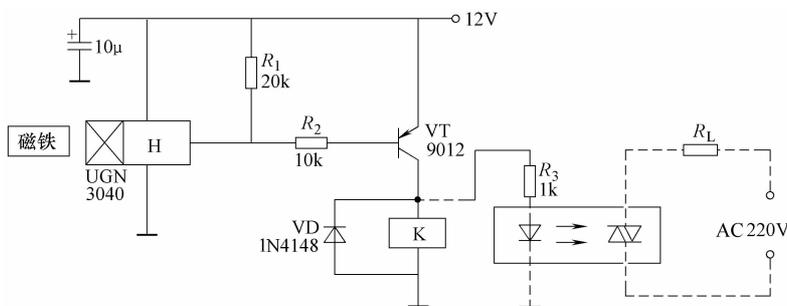


图 3-13 霍尔接近开关电路

根据磁性转盘上小磁铁的数目就可确定传感器测量转速的分辨率。

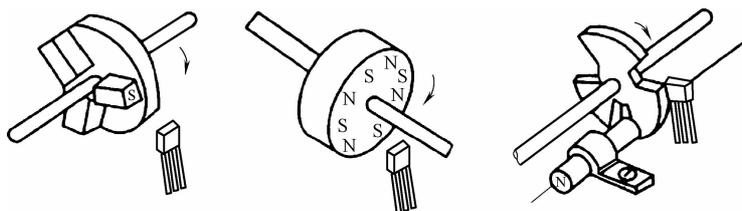


图 3-14 霍尔式转速传感器

图 3-15 所示为电动机转速检测电路，其中霍尔传感器采用 UGN3040，输出端接入一个小功率 PNP 型晶体管 VT。VT 输出端 B 的信号极性与 UGN3040 输出端 A 的反相，因此，该电路可以获得相位相反的两种信号 A 与 B。将 A、B 信号接入到转速表即可获得电动机的实际转速值。

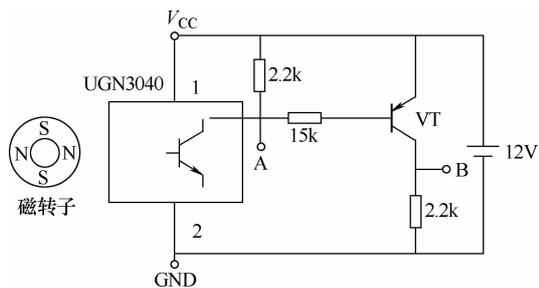


图 3-15 电动机转速检测电路

## 2. 其他霍尔传感器的应用电路

(1) 钢球计数 霍尔开关传感器 SL3501 具有较高灵敏度的集成霍尔元件，能感受到很小的磁场变化，因而可对金属零件进行计数检测。

图 3-16 是对钢球进行计数的工作示意图和电路。当钢球通过霍尔开关传感器时，传感器可输出峰值 20mV 的负脉冲电压，该电压经运算放大器 ( $\mu\text{A}741$ ) 放大后，驱动晶体管 VT (2N5812) 工作，VT 输出端便可接计数器进行计数，并由显示器显示检测数值。

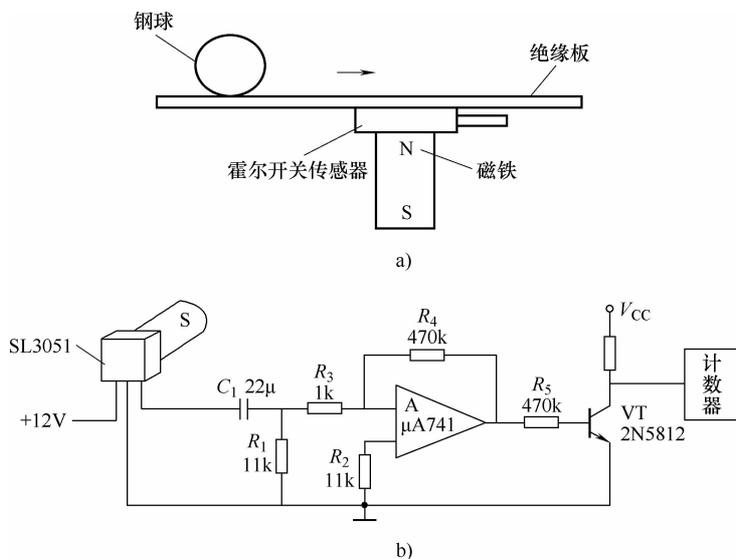


图 3-16 霍尔计数装置工作示意图及电路

(2) 电动机停转报警器 电动机停转报警电路如图 3-17 所示，该电路主要由霍尔检测、报警电路两大部分组成。

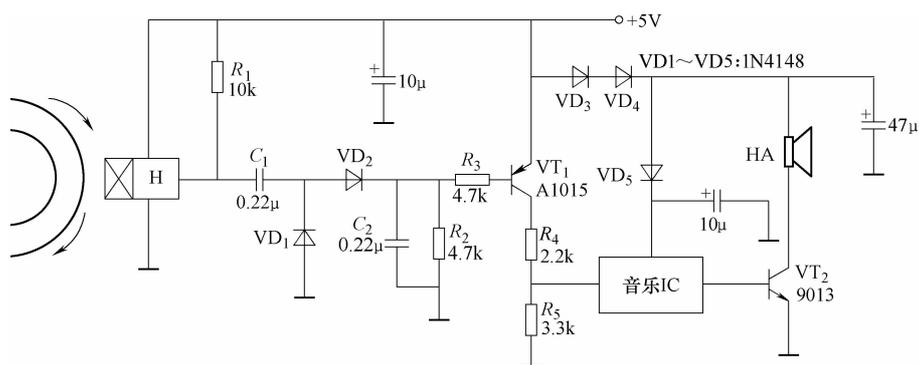


图 3-17 电动机停转报警电路

当电动机转动时，安装在电动机转轴上的磁铁以一定的频率经过霍尔传感器，霍尔传感器不断地输出脉冲信号，该信号经  $C_1$  耦合，二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  整流，在  $C_2$  上形成直流高电平，晶体管  $VT_1$  截止；音乐 IC 无触发信号，无声音输出。当电动机停止转动时，霍尔传感器无脉冲信号输出。 $C_2$  为低电平， $VT_1$  导通，音乐 IC 触发，扬声器 HA 发出声音。 $VD_3 \sim$

VD<sub>5</sub> 起降压作用（因为音乐 IC 的电源电压一般为 3V）。

## 3.2 角度编码器

### 3.2.1 角度编码器的分类

角度编码器是一种高精度的角位移传感器，因其具有直接输出数字量、响应快、精度高、抗干扰能力强、分辨率高、输出稳定等特点。

角度编码器有两种基本类型：绝对式编码器和增量式编码器。

#### 1. 绝对式编码器

绝对式编码器是按照角度直接进行编码的传感器，可直接把被测转角用数字代码表示出来。根据内部结构和检测方式有接触式、光电式等形式。

(1) 接触式编码器 图 3-18 所示为一个 4 位二进制接触式码盘。它在一个不导电基体上做成许多有规律的导电金属区，其中阴影部分为导电区，用“1”表示，其他部分为绝缘区，用“0”表示。码盘分成 4 个码道，在每个码道上都有一个电刷，电刷经取样电阻接地，信号从电阻上取出。这样，无论码盘处在哪个角度上，该角度均有 4 个码道上的“1”和“0”组成 4 位二进制编码与之对应。码盘最里面一圈轨道是公用的，它和各码道所有导电部分连在一起，接激励电源  $E$  的正极。

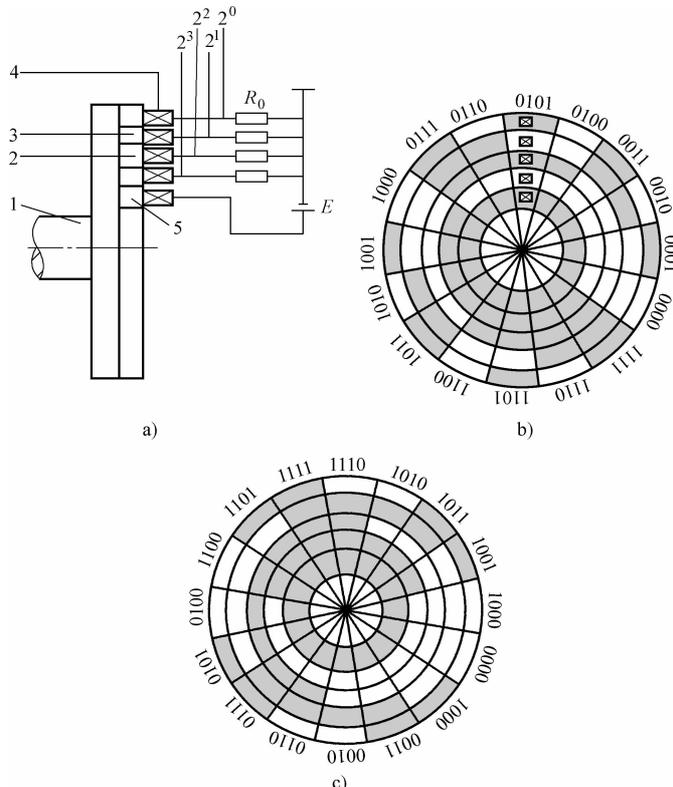


图 3-18 4 位二进制接触式码盘

a) 电刷在码盘上的位置 b) 4 位二进制码盘 c) 4 位格雷码码盘  
1—码盘 2—导体 3—绝缘体 4—电刷 5—激励公用轨道

由于码盘是与被测转轴连在一起的，而电刷位置是固定的，当码盘随被测轴一起转动时，电刷和码盘的位置就发生相对变化。若电刷接触到导电区域，则该回路中的取样电阻上有电流流过，产生压降，输出为“1”；反之，若电刷接触的是绝缘区域，则不能形成回路，取样电阻上无电流流过，输出为“0”，由此可根据电刷的位置得到由“1”、“0”组成的4位二进制码。例如，在图3-18b中可以看到，此时的输出为0101。

从以上分析可知，码道的圈数（不包括最里面的公用码道）就是二进制的位数，且高位在内，低位在外。由此可以推断出，若是 $n$ 位二进制码盘，就有 $n$ 圈码道，且圆周均分 $2^n$ 个数据来分别表示其不同位置，所能分辨的角度 $\alpha$ 和分辨率为

$$\alpha = 360^\circ / 2^n \quad (3-4)$$

$$\text{分辨率} = 1/2^n \quad (3-5)$$

显然，位数 $n$ 越大，所能分辨的角度 $\alpha$ 就越小，测量精度就越高。所以，若要提高分辨率，就必须增加码道数，即二进制位数。例如，某12码道的绝对式角编码器，其每圈的位置数为 $2^{12} = 4096$ ，分辨角度为 $\alpha = 360^\circ / 2^{12} = 5.27'$ ；若为13码道，则每转位置数为 $2^{13} = 8192$ ，分辨角度为 $\alpha = 360^\circ / 2^{13} = 2.67'$ 。

另外，在实际应用中，对码盘制作和电刷安装要求十分严格，否则就会产生非单值性误差。例如，当电刷由位置(0111)向位置(1000)过渡时，若电刷安装位置不准或接触不良，可能会出现8~15之间的任意十进制数。为了消除这种非单值性误差，可采用二进制循环码盘（格雷码盘）。

图3-18c为一个4位格雷码盘，与图3-18b所示的BCD码盘相比，不同之处在于，码盘旋转时，任何两个相邻数码间只有一位是变化的，所以每次只切换一位数，可把误差控制在最小单位内。

(2) 绝对式光电编码器 绝对式光电编码器与接触式编码器结构相似，只是其中的黑白区域不表示导电区和绝缘区，而是表示透光或不透光区。其中黑的区域为不透光区，用“0”表示；白的区域为透光区，用“1”表示。这样，在任意角度都有对应的二进制编码。与接触式编码盘不同的是，不必在最里面一圈设置公用码道，同时取代电刷的，是在每一码道上都有一组光电元件，如图3-19所示。

由于径向各码道的透光和不透光，使各光敏元件中，受光的输出“1”电平，不受光的输出“0”电平，由此而组成 $n$ 位二进制编码。

光电码盘的特点是没有接触磨损，码盘寿命长，允许转速高，精度也较高。就码盘材料而言，不锈钢薄板所制成的光电码盘要比玻璃码盘抗振性好、耐不洁环境，但由于槽数受限，所以分辨率较玻璃码盘低。

## 2. 增量式编码器

增量式编码器通常为光电码盘，结构形式如图3-20所示。

光电码盘与转轴连在一起。码盘可用玻璃材料制成，表面镀上一层不透光的金属铬，然

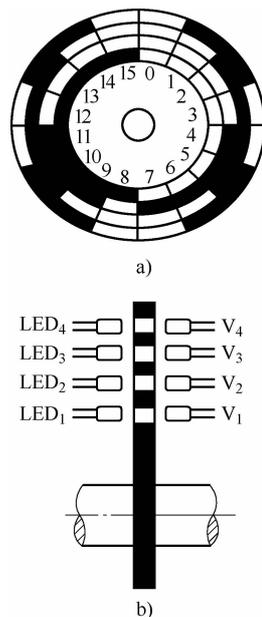


图3-19 绝对式光电码盘  
a) 光电编码器的平面结构  
b) 光电码盘与光源、光敏元件的对应关系（4码道）

后在边缘制成向心透光狭缝。透光狭缝在码盘圆周上等分，数量从几百条到几千条不等。这样，整个码盘圆周上就等分成  $n$  个透光的槽。除此之外，增量式光电码盘也可用不锈钢薄板制成，然后在圆周边缘切割出均匀分布的透光狭缝，其余部分均不透光。

光电码盘的光源最常用的是自身有聚光效果的 LED。当光电码盘随工作轴一起转动时，在光源的照射下，透过光电码盘和光栅板狭缝形成忽明忽暗的光信号，光敏元件把此光信号转换成电脉冲信号，通过信号处理电路的整形、放冲信号，通过信号处理电路的整形、放大、细分、辨向后，输出脉冲信号。

光电编码器的测量精度取决于它所能分辨的最小角度，而这与码盘圆周上的狭缝条纹数  $n$  有关，即分辨角度为

$$\alpha = 360^\circ/n \quad (3-6)$$

$$\text{分辨率} = 1/n \quad (3-7)$$

**【实例 3-1】** 已知增量式光电编码器的条纹数为 1024，求最小分辨角度。

解：该编码器分辨的最小角度  $\alpha = 360^\circ/1024 = 0.352^\circ$ 。

为了得到码盘转动的绝对位置，还须设置一个基准点，如图 3-20 中的“零标志位光槽”，又称“一转脉冲”。为了判断码盘旋转的方向，需要在光栅板上设置两组光敏元件，即 A、B 光敏元件，其输出波形如图 3-21 所示，A 相与 B 相在相位上相差  $1/4T$ 。

### 3.2.2 编码器在数字测速中的应用

由于光电编码器的输出信号是脉冲形式，因此，可以通过测量脉冲频率或周期的方法来测量转速。光电编码器可代替测速发电机的模拟测速而成为数字测速装置。数字测速方法有 M 法测速和 T 法测速，如图 3-22 所示。

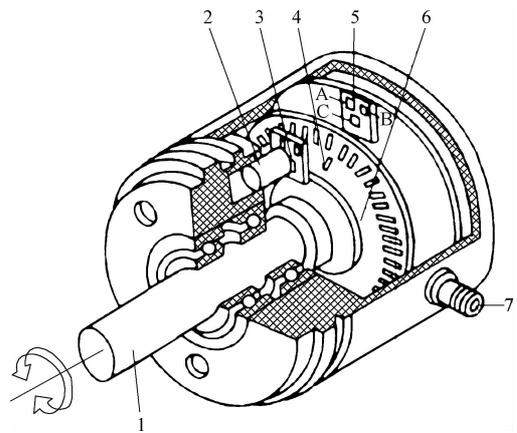


图 3-20 增量式光电码盘结构示意图

1—转轴 2—LED 3—光栅板 4—零标志位光槽  
5—光敏元件 6—码盘 7—电源及信号线连接座

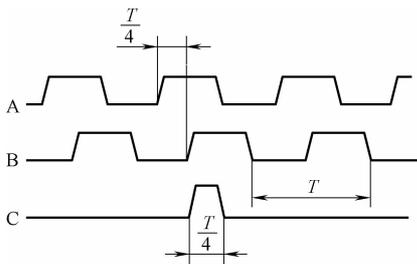


图 3-21 光电编码器的输出波形

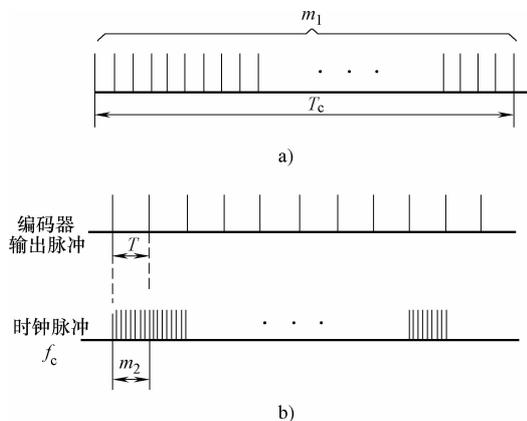


图 3-22 数字测速

a) M 法测速 b) T 法测速

### 1. M 法测速

在一定的时间间隔  $T_c$  内（如 10s、1s、0.1s 等），用编码器所产生的脉冲数来确定速度的方法称为 M 法测速。

若编码器每转产生  $N$  个脉冲，在  $t_c$  间隔内得到  $m_1$  个脉冲，则编码器所产生的脉冲频率为

$$f = m_1 / t_c \quad (3-8)$$

则转速（r/min）为

$$n = 60f / N = 60(m_1 / t_c) / N = 60m_1 / (Nt_c) \quad (3-9)$$

**【实例 3-2】** 某编码器的指标为 1024 脉冲/r（1024p/r），在 0.4s 时间内测得 4K 脉冲（1K = 1024），即  $N = 1024\text{p/r}$ ， $t_c = 0.4\text{s}$ ， $m_1 = 4\text{K} = 1024 \times 4 = 4096$  脉冲，求转速  $n$ 。

解：编码器轴的转速

$$n = 60m_1 / (Nt_c) = 60 \times 4096 / (1024 \times 0.4) \text{r/min} = 600 \text{r/min}$$

M 法测速适合于转速较快的场合。例如，脉冲的频率  $f = 1000\text{Hz}$ ， $t_c = 1\text{s}$  时，此时的测量精度可达 0.1% 左右；而当转速较慢时，编码器的脉冲频率较低，测量精度则降低。

$t_c$  的长短也会影响测量精度。 $t_c$  取得较长时，测量精度较高，但不能反映速度的瞬时变化，不适合动态测量； $t_c$  也不能取得太小，以至于在  $t_c$  时段内得到的脉冲太少，而使测量精度降低。例如，脉冲的频率  $f$  为 1000Hz， $t_c$  缩短到 0.01s 时，此时的测量精度将降低到 10% 左右。

### 2. T 法测速

用编码器所产生的相邻两个脉冲之间的时间来确定被测转速的方法称为 T 法测速。在 T 法测速中，必须使用标准频率  $f_c$ （其周期为  $T_c$ ，例如  $1\mu\text{s}$ ）作为测量编码器周期  $T$  的“时钟”。

设编码器每转产生  $N$  个脉冲，测出编码器输出的两个相邻脉冲上升沿（即周期  $T$ ）之间所能填充的标准时钟数个数  $m_2$ ，就可得到周期  $T$ ，

$$T = m_2 T_c \quad (3-10)$$

转速  $n$  (r/min) 可由下式求得

$$n = 60f / N = 60 / (TN) = 60 / [(m_2 T_c) N] = 60 / [(m_2 / f_c) N] = 60f_c / (Nm_2) \quad (3-11)$$

**【实例 3-3】** 某编码器为 1024 脉冲/r，已知标准频率时钟  $f_c = 1\text{MHz}$ ，测得编码器输出的两个相邻脉冲上升沿之间所能填充的标准时钟数  $m_2 = 1000$  脉冲，求转速  $n$ 。

解：编码器轴的转速

$$n = 60f_c / (Nm_2) = 60 \times 1 \times 10^6 / (1024 \times 1000) \text{r/min} = 58.6 \text{r/min}$$

T 法测速适合于转速较慢的场合。例如 9 编码输出脉冲的频率  $f = 10\text{Hz}$ ， $f_c = 10\text{kHz}$  时，测量精度可达 0.1% 左右；而当转速较快（编码器输出脉冲的周期较短）时，测量精度则降低。 $f_c$  也不能取得太低，以至于在  $T$  时段内得到的脉冲太少，而使测量精度降低。

### 3.2.3 编码器在测量位移中的应用

用光电编码器测量直线位移时，需用传动机构将直线位移转换为光电编码器的转动角度。设当被测物体上升时，光电编码器正转，此时 A 相超前 B 相 1/4 个周期；当被测物体下降时，光电编码器反转，A 相落后 B 相 1/4 个周期，如图 3-23 所示。

若被测物体停在某一位置时，位移为零。以此为基准，被测物体上升时，位移增加；下降时，位移减小。当位移减少到零而被测物体再继续下降时，位移变为负且数值增加；当被测物体再上升时，位移减小但仍为负。当位移减到零后，位移变为正。可见位移测量不仅要知道位移的大小，还要知道位移的正负。因此，利用光电编码器测直线位移时，符号判别及加减运算判别是关键。

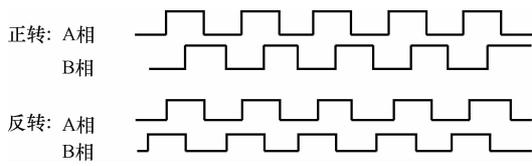


图 3-23 光电编码器输出波形

在使用光电编码器时，符号的判断和加减运算的判别，既可以通过数字电路来实现，也可以通过单片机来实现。这里介绍通过数字电路实现增量式编码器测位移的方法。

### 1. 数字电路的原理

数字电路主要包括以下几部分：编码器输出的相位相差  $90^\circ$  的信号经过细分倍频电路一方面可以提高测量的精度，如果编码器一圈输出  $N$  个脉冲，其分辨率  $360^\circ/N$ ，经过四倍频细分后即可达到  $360^\circ/4N$ ；另一方面可起到消除信号抖动的作用。

细分后信号一路形成计数信号接入计数器，另一信号经方向判别控制电路，形成方向和加减信号，接入计数器，计数结果及正负经驱动电路由 LED 显示。数字电路原理图如图 3-24 所示。

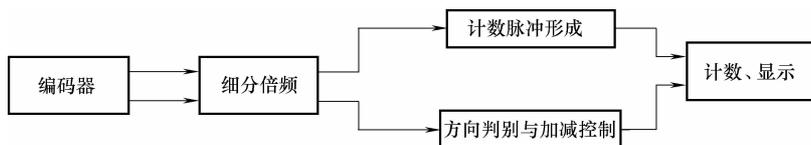


图 3-24 数字电路原理图

### 2. 倍频细分电路的设计

光电编码器的输出波形如图 3-25 所示。

由图 3-25 可知，将 A、B 两相信号进行异或操作，则  $A \oplus B$  信号是 A、B 两相信号的二倍频。如果通过各计数器对  $A \oplus B$  信号的上升沿、下降沿分别进行计数，计数值代表了码盘转过的角度，则此时计数角度的脉冲当量  $P = 360^\circ/4N$ ，这就实现了倍频，使光电编码器的分频提高了四倍。

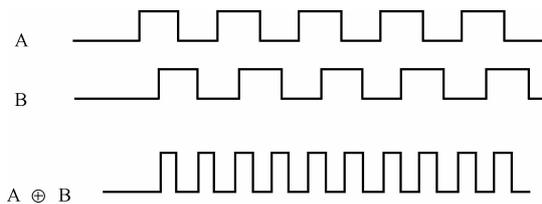


图 3-25 光电编码器的输出波形

如图 3-26 中的 74F86 异或门输出既为 A、B 二信号的二倍频方波。用单稳电路 CD4538 (上) 检出二倍频方波前沿，单稳 CD4538 (下) 检出其后沿，两者在 74F32 逻辑“或”后即可得到四倍频脉冲串。为了保证电路工作稳定可靠，两个单稳电路使用了集成化单稳 CD4538。倍频后还可以消除抖动干扰。

### 3. 辨向电路的设计

在实际工作中，被测物体移动的方向不是固定的，而方向是位移的要素之一。因此，为了判别移动的方向，必须利用编码器输出的两路相位差为  $90^\circ$  的输出信号。

(1) 正反转辨别电路 根据光电编码器正反转时, A相与B相的相位差关系, 将A相与B相分别接到D触发器D端与CLK端, 如图3-27正反转检测电路所示。不难看出正转时,  $Q=1$ ; 反转时,  $Q=0$ 。即当被测物体上升时,  $Q=1, \bar{Q}=0$ 。下降时,  $Q=0, \bar{Q}=1$ , 使用了7474触发器。

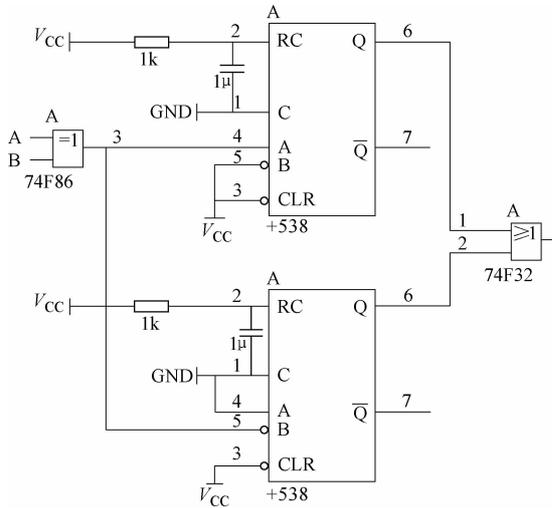


图 3-26 细分倍频电路

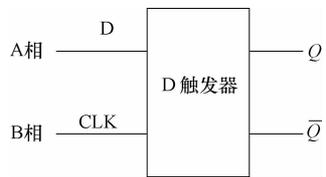


图 3-27 正反转检测电路

(2) 符号判断及加减计数控制电路 增量式编码器以物体起始运动点为零点, 在零点两方分别为正负。此处假设物体是上下移动的, 向上为正, 向下为负。物体运动时, 我们不仅要计数位置的绝对值, 还要知道它的正负区间。符号判断及加减计数控制电路如图3-28所示。

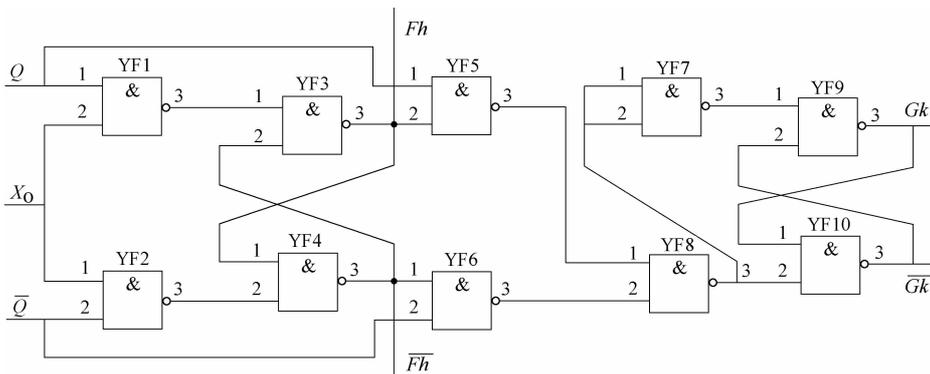


图 3-28 符号判断及加减计数控制电路

图3-28中  $Q$  和  $\bar{Q}$  两信号来自D触发器。 $X_0$  为计数器所有输出端逻辑“或”后的信号。 $Fh$  为输出正负信号。 $Gk$  为加减控制信号

设当位移为零时,  $X_0=1$ , 当位移不为零时,  $X_0=0$ 。与非门YF1~YF4组成符号控制。当  $Fh=1$  时, 符号显示为正;  $Fh=0$  时, 符号显示为负。位移为零时,  $X_0=1, Fh=YF2=\bar{X_0} \bar{Q}=Q$ 。当位移不为零时,  $X_0=0$ , 则  $Fh$  与  $\bar{Fh}$  状态保持不变。

与非门YF5~YF10组成加减计数控制电路。 $Gk=YF8=QFh+\bar{Q}Fh$ , 在位移为正的区

间，被测物体上升时， $Gk = 1$ ，做加法运算；下降时， $Gk = 0$ ，做减法运算。在位移为负的区间，被测物体上升时， $Gk = 0$ ，做减法运算；下降时， $Gk = 1$ ，做加法运算。

电路中的与非门使用了集成芯片 7400。它含有 4 个与非门，所以使用了 3 个集成芯片。具体连接电路如图 3-29。图中已将正负信号  $Fh$  和  $\overline{Fh}$  连接 LED 数码管。数码管用 7407 驱动。当信号为正即  $Fh = 1$  时，显示 0；当信号为负即  $Fh = 0$  时，显示“-”。

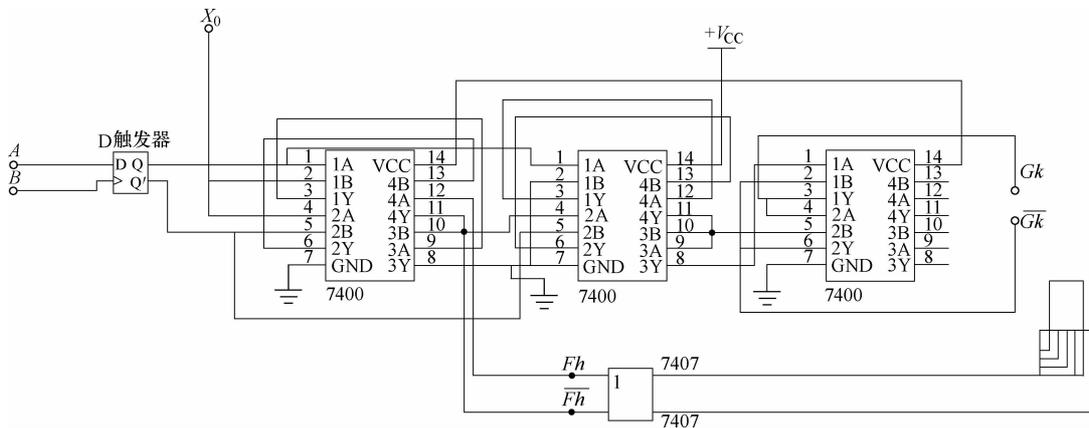


图 3-29 符号判断及加减计数控制电路实际连接图

#### 4. 计数及显示电路的设计

光电编码器的输出信号分别经过倍频电路和符号、加减控制电路后，最后进入计数器，并由显示器显示计数结果。这也是测量电路的最后一步。

(1) 计数电路 由于测量位移中既有加又有减，所以计数器应选择可逆计数器。同时出于对性能和接线上的考虑，此处选用了同步可逆计数器 74LS190（见图 3-30）。它是单时钟十进制计数器。

A、B、C、D 为输入端，工作时都接地。

QA、QB、QC、QD 为输出端，接数码器译码器。

CLK 为计数脉冲输入端，此处接倍频电路输出四倍频信号。

$\overline{D/U}$  加减控制端，高电平时减，低电平时加。此处接加减控制  $\overline{Gk}$ 。

LOAD 为置数端，正常工作时为高电平。当为低电平时将 A、B、C、D 置入计数器。此处将其设为计数器清零开关。

CTEN 端正常工作时为低电平。

MAX/MIN 为进位/借位端。当进位/借位时产生高电平。

RCO 端功能与 MAX/MIN 相似，只是当进位/借位时产生低电平。

对于计数器连接的说明如下：一个计数器不能满足计数的要求，此处为了达到位移量要求，需要 6 个计数器连接，可达到一百万的计数容量。

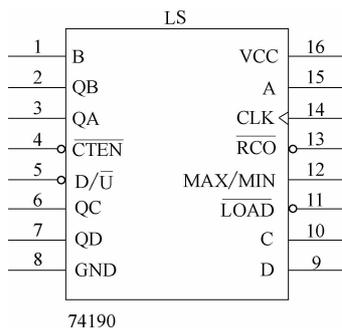


图 3-30 74LS190 同步十进制加/减计数器

连接方式有并行连接和串行连接。并行连接各计数器工作是同步的，而串行连接计数器工作不是同步的，所以此处选择了串行连接。

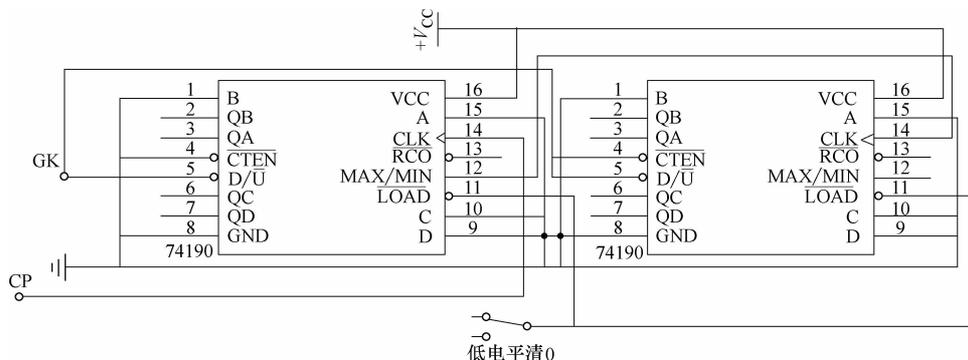


图 3-31 两片计数器串接

图 3-31 仅是两片计数器连接图，更多计数器连接同理。图中 Gk 为加减控制端。Cp 为计数脉冲。清 0 端平时高电平，当为低电平时，计数器置入零。当第一片计数器加到 9 或见到 0 时，MAX/MIN 端产生高电平，使第二 CLK 计入脉冲加 1 或减 1。

(2) 显示电路 显示器采用 LED7 位字符数码管，这里选用了共阴极的 BS201。它在数码管右下角增设了一个小数点，形成了所谓的八段数码管。将灭零输入端与灭零输出端配合使用，即可实现多位数码显示系统的灭零控制。图 3-32 示出了灭零控制的连接方法，只需在整数部分把高位的 RBO 与低位 RBI 相连，在小数部分将低位的 RBO 与高位的 RBI 相连，就可以把前、后多余的零熄灭了。在这种连接方式下，整数部分只有高位是零，而且在被熄灭的情况下，低位才有灭零输入信号。同理，小数部分只有在低位是零，而且被熄灭时，高位才有灭零输入信号。

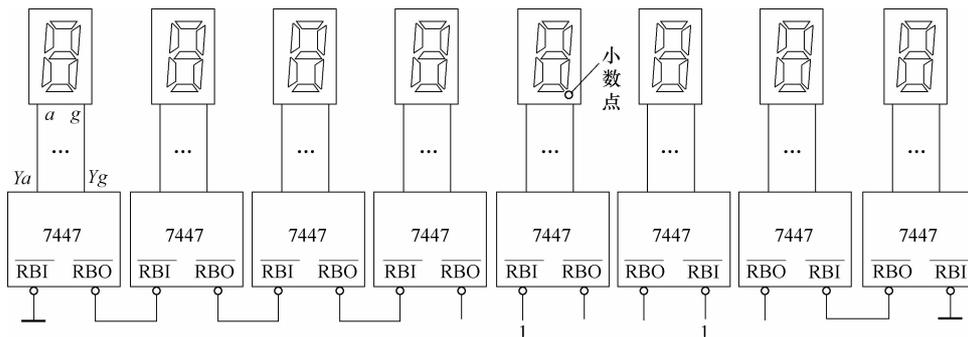


图 3-32 有灭零控制的 8 位数码显示系统

### 3.2.4 编码器的其他应用

#### 1. 编码器在交流伺服电动机中的应用

交流伺服电动机是当前伺服控制中最新的技术之一。交流伺服电动机的运行需要角度位置传感器，以确定各个时刻转子磁极相对于定子绕组转过的角度，从而控制电动机的运行。

图 3-33 所示为一交流伺服电动机及控制系统。

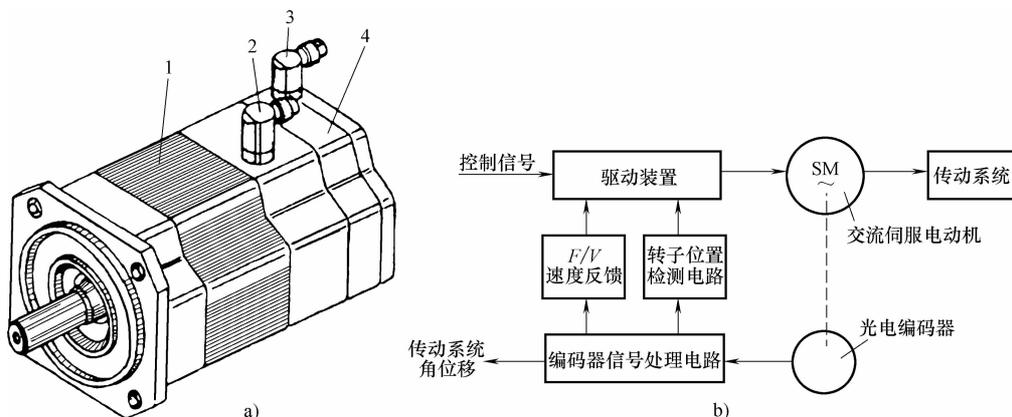


图 3-33 交流伺服电动机及控制系统

a) 外形 b) 控制系统框图

1—电动机本体 2—三相电源 (U、V、W) 连接座  
3—光电编码器信号输出及电源连接座 4—光电编码器

从图 3-33b 中可以看出, 光电编码器在交流伺服电动机控制中起了 3 个方面的作用: ①提供电动机定、转子之间相互位置的数据; ②通过 F/V (频率/电压) 转换电路提供速度反馈信号; ③提供传动系统角位移信号, 作为位置反馈信号。

## 2. 编码器在工位编码中的应用

由于绝对式编码器每一转角位置均有一个固定的编码输出, 若编码器与转盘同轴相连, 则转盘上每一工位安装的被加工工件均可以有一个编码相对应, 如图 3-34 所示。当转盘上某一工位转到加工点时, 该工位对应的编码由编码器输出给控制系统。

例如, 要使处于工位 5 上的工件转到加工点等待钻孔加工, 计算机就控制电动机通过传动机构带动转盘旋转。与此同时, 绝对式编码器输出的编码不断变化。当输出从 0100 变为 0110 时, 表示转盘已将工位 5 转到加工点, 电动机停转。

这种编码方式在加工中心 (一种带刀库和自动换刀装置的数控机床) 的刀库选刀中得到广泛应用。

## 3. 编码器在闸门开度传感器中的应用

图 3-35 所示为 ZKC-3 型闸门开度传感器, 是针对闸门测量的特点, 采用光电式或接触式绝对编码器, 在内部配以精密的变速机构制造而成的。其输出信号有并行格雷码、串行 RS-485、4~20mA 标准模拟量以及 SSI 同步串行信号等多种方式供用户选择。该传感器安装方便, 适应性强, 稳定可靠, 集检测与 A-D 转换为一体, 具有断电记忆跟踪功能。适合对各类闸门 (平板门、弧形门、人字门、门机、桥机等) 的起吊高度进行测量。

ZKC-3 型闸门开度传感器的技术指标主要取决于所配编码器, 可选配的编码器有:

- 1) 光电系列: GD-1024、GD-16384/64、GD-32768/64、GD-65536/64...
- 2) 接触系列: JZB-512、JZB-1024、JZB-8192/64、JZB-16384/64...

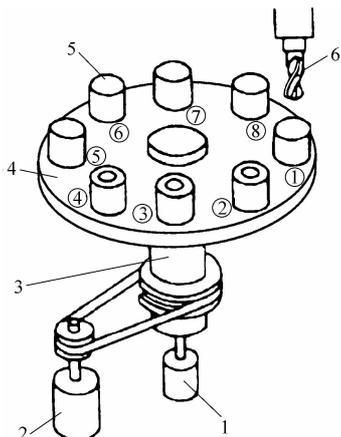


图 3-34 转盘工位编码

1—绝对式编码器 2—电动机 3—转轴  
4—转盘 5—工件 6—刀具



图 3-35 ZKC-3 型闸门开度传感器

闸门开度传感器技术指标见表 3-1。

表 3-1 闸门开度传感器技术指标

测量范围	5m、10m、20m、40m、80m、160m…	精度	$\pm 0.1\% \times \text{量程} \pm 1$
分辨率	与所配编码器有关，如配编码器 GD-32768/64，则每周分辨率 512 码，连续转 64 圈	工作电压	DC12 ~ 24V DC5 ~ 30V
输出信号	基本型：并行格雷码（B） 智能型：RS-485 串行通信接口（C）、4 ~ 20mA 标准模拟量（A）SSI 同步串行接口（S）	测量误差	$\pm 1\text{cm}$ 、 $\pm 1\text{mm}$
传输距离	基本型：传输最大距离为 400m（小于 400kHz），智能型：传输最大距离为 2km		
环境参数	温度 -25 ~ +60℃；相对湿度 $\leq 95\%$	防护等级	IP63

其他应用领域还包括：各种阀门开度、提升机吊车定位、炼钢氧枪定位、转炉定位、煤气柜高程测量、自动仓储、造纸纺织卷料定长、机械、电力、汽车工业等各行业的高精度、长距离的位移，角度（多转）的测量定位。

### 3.2.5 编码器的安装方式

编码器可以通过弹性联轴器、偏心联轴器、齿轮、链条链轮等方式与传动的有关部件连接，具体安装方式如下。

#### 1. 直接连接法

直接连接法就是采用耦合器的方式进行直接连接，具体包括弹性联轴器、偏心联轴器、十字联轴器等。

**【实例 3-4】** 请将编码器通过耦合器直接连接安装到传动机构上。  
安装步骤如下：

第一步：把耦合器穿到轴上。不要用螺钉固定耦合器和轴。

第二步：固定编码器。编码器的轴与耦合器连接时，插入量不能超过该产品的设计值。如欧姆龙 E69-C04B 型耦合器，其插入量为 5.2mm；E69-C06B 型耦合器，插入量为 5.5mm；E69-C10B 型耦合器，插入量为 7.1mm。

第三步：固定耦合器，其中紧固力矩按照编码器产品说明书进行。

第四步：连接电源输出线，在配线时必须关断电源。

第五步：检查电源投入使用。

在采用标准耦合器时，应在允许值内安装，如图 3-36 所示。

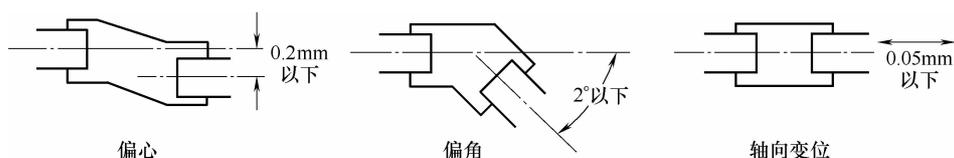


图 3-36 标准耦合器安装

连接带及齿轮结合时，先用别的轴承支住，再将编码器和耦合器结合起来，如图 3-37 所示。

图 3-38 所示为编码器借助 L 形支架固定通过偏心联轴器与卷扬轴进行直接连接的示意。

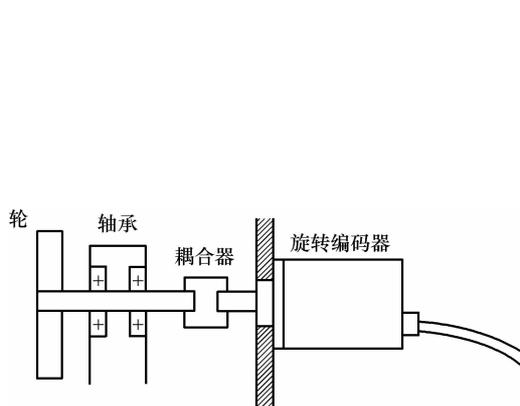


图 3-37 旋转编码器安装

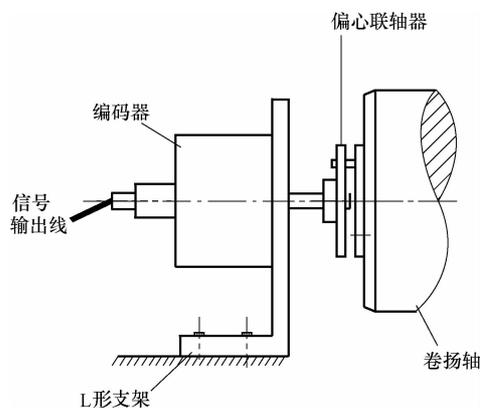


图 3-38 偏心联轴器连接

## 2. 齿轮连接法

编码器可以通过齿轮与传动机构相连接，此时需要注意勿使轴受到过大荷重。图 3-39 所示为编码器与小齿轮轴的齿轮连接示意，图 3-40 所示为编码器与闸门启闭器卷筒的齿轮连接示意。

## 3. 链条链轮连接法

图 3-41 所示为编码器通过链条链轮与某负载设备进行连接的示意。

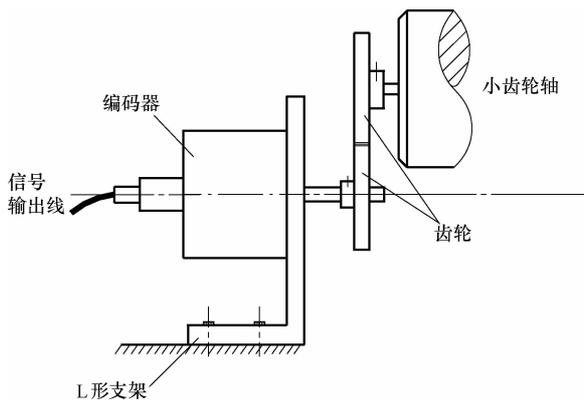


图 3-39 齿轮连接示意 1

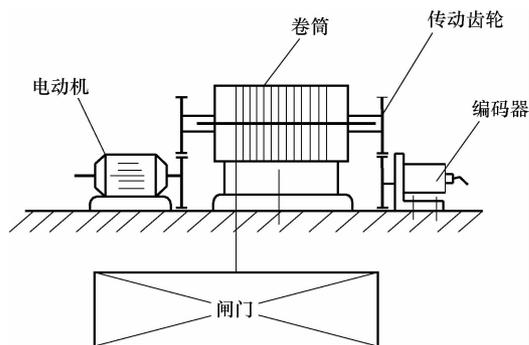


图 3-40 齿轮连接示意 2

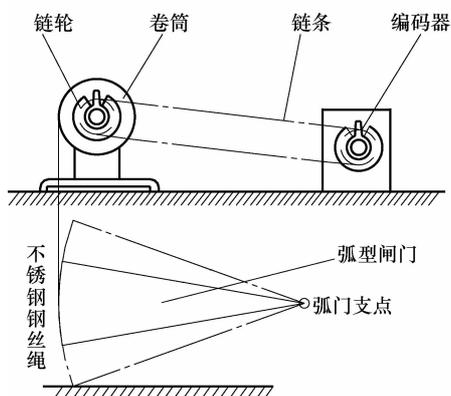


图 3-41 链条链轮连接示意

### 3.3 振动传感器

#### 3.3.1 振动测试与振动传感器概念

##### 1. 振动测试的提出

在工程振动测试领域中，测试手段与方法多种多样，按各种参数的测量方法及测量过程的物理性质来分，可以分为三类。

(1) 机械式的测量方法 将工程振动的参量转换成机械信号，再经机械系统放大后，进行测量、记录，常用的仪器有杠杆式测振仪和盖格尔测振仪，它能测量的频率较低，精度也较差。但在现场测试时较为简单方便。

(2) 光学式的测量方法 将工程振动的参量转换为光学信号，经光学系统放大后显示和记录。如读数显微镜和激光测振仪等。

(3) 电测方法 将工程振动的参量转换成电信号，经电子电路放大后显示和记录。电测法的要点在于先将机械振动量转换为电量（电动势、电荷及其他电量），然后再对电量进行测量，从而得到所要测量的机械量。这是目前应用得最广泛的测量方法。

上述三种测量方法的物理性质虽然各不相同，但是组成的测量系统基本相同，它们都包含拾振、测量放大电路和显示记录3个环节。电测法测量系统示意图，如图3-42所示。

1) 拾振环节：把被测的机械振动量转换为机械的、光学的或电的信号，完成这项转换工作的器件称为传感器。

2) 测量线路：测量线路的种类甚多，它们都是针对各种传感器的变换原理而设计的。比如，专配压电式传感器的测量电路有电压放大器、电荷放大器等；此外，还有积分电路、微分电路、滤波电路、归一化装置等。

3) 信号分析及显示、记录环节：从测量电路输出的电压信号，可按测量的要求输入给信号分析仪或输送给显示仪器（如电子电压表、示波器、相位计等）、记录设备（如光线示波器、磁带记录仪、X—Y记录仪等）等。也可在必要时记录在磁带上，然后再输入到信号分析仪进行各种分析处理，从而得到最终结果。

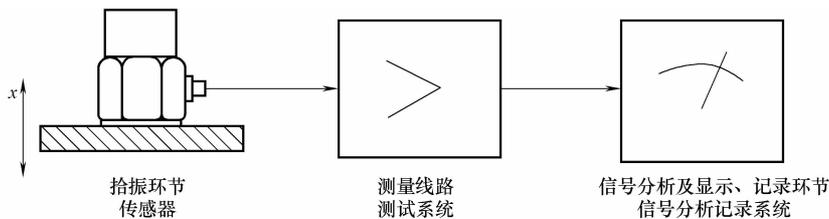


图 3-42 电测法测量示意

## 2. 传感器的机械接收原理

振动传感器在测试技术中是关键部件之一，它的作用主要是将机械量接收下来，并转换为与之成比例的电量。由于它也是一种机电转换装置，所以我们有时也称它为换能器、拾振器等。

振动传感器并不是直接将原始要测的机械量转变为电量，而是将原始要测的机械量作为振动传感器的输入量  $M_i$ ，然后由机械接收部分加以接收，形成另一个适合于变换的机械量  $M_t$ ，最后由机电变换部分再将  $M_t$  变换为电量  $E$ ，如图3-43所示。因此一个传感器的工作性能是由机械接收部分和机电变换部分的工作性能来决定的。

## 3. 传感器的机电变换原理

由于传感器内部机电变换原理的不同，输出的电量也各不相同。有的是将机械量的变化变换为电动势、电荷的变化，有的是将机械振动量的变化变换为电阻、电感等电参数的变化。一般说来，这些电量并不能直接被后续的显示、记录、分析仪器所接受。因此针对不同机电变换原理的传感器，必须附以专配的测量电路。测量线路的作用是将传感器的输出电量最后变为后续

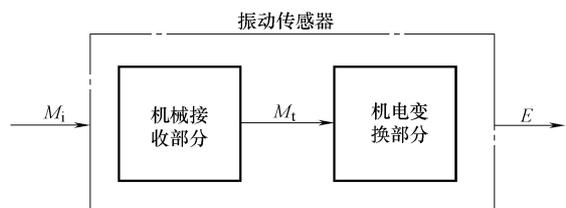


图 3-43 振动传感器的工作原理

显示、分析仪器所能接受的一般电压信号。因此，振动传感器按其功能可有以下几种分类方法，见表3-2。

表3-2 振动传感器的分类

按机械接收原理分	1. 相对式 2. 惯性式	
按机电变换原理分	1. 电动式 2. 压电式 3. 电涡流式	4. 电感式 5. 电容式 6. 电阻式
按所测机械量分	1. 位移传感器 2. 速度传感器 3. 加速度传感器 4. 力传感器	5. 应变传感器 6. 扭振传感器 7. 扭矩传感器

由于部分电感式、电容式、电阻式等传感器已经在前面章节介绍过了，这里主要介绍的是电涡流与压电式传感器。

### 3.3.2 电涡流传感器

利用电涡流效应制作的传感器称为涡流式传感器（已经在第1章进行简单介绍）。根据法拉第电磁感应定律，金属导体置于变化着的磁场中，导体内就会产生涡旋状感应电流，这种现象称为电涡流效应。涡流传感器结构简单、灵敏度高、频响范围宽，并能进行非接触测量，适用范围广。

#### 1. 电涡流效应

电涡流式传感器工作原理如图3-44所示，当振荡器产生的高频电压施于靠近金属板的电感线圈 $L$ 时，建立的高频磁场作用于金属块，使其表面产生电涡流 $i_2$ ；电涡流 $i_2$ 产生的磁场 $H_2$ 又作用于线圈 $L$ 上阻碍外磁场 $H_1$ 的变化，导致线圈的电感、等效阻抗发生变化，这些参数的变化与金属块任何形状、电导率、磁导率、线圈的几何参数、电源频率及线圈到金属板的距离等因素有关。

电涡流线圈受电涡流影响时的等效阻抗 $Z$ 的函数表达式为

$$Z_2 = R + j\omega L = f(\rho, \mu, \gamma, f, x) \quad (3-12)$$

式中， $\rho$ 为被测导体电阻率； $\mu$ 为被测导体磁导率； $\gamma$ 为线圈与被测导体尺寸因子； $f$ 为线圈激励电源的频率； $x$ 为线圈到金属板的距离。

由式(3-12)可知，只要固定其他因素就可以用电涡流传感器来测量剩下的任何一个因素。当被测对象、传感器线圈确定后， $\rho$ 、 $\mu$ 、 $\gamma$ 、 $f$ 一定，则传感器线圈的等效电感 $L$ 、等效电阻 $R$ 、等效阻抗 $Z$ 只和线圈与被测导体的距离有关。只要检测出等效阻抗 $Z$ 的变化量，就可以实现被测导体非接触位移的检测。

电涡流式传感器等效电路如图3-45所示，将线圈与被测导体等效为相互耦合的两个线圈 $L_1$ 、 $L_2$ 。

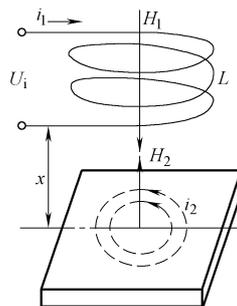


图3-44 电涡流式传感器工作原理

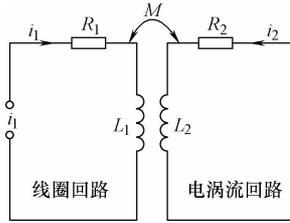


图 3-45 电涡流式传感器等效电路

根据基尔霍夫定律，可得电压平衡方程组

$$\begin{cases} R_1 i_1 + j\omega L_1 i_1 - j\omega M i_2 = u_1 \\ -j\omega M i_1 + R_2 i_2 + j\omega L_2 i_2 = 0 \end{cases} \quad (3-13)$$

解方程得

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + j\omega \left[ L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \right]} \quad (3-14)$$

由式 (3-14) 可得到测量时线圈等效阻抗为

$$Z = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + j\omega \left[ L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \right] \quad (3-15)$$

由式 (3-15) 可知，测量时，当电涡流线圈与金属板的距离  $x$  减小时，互感  $M$  增大，等效电感  $L$  减小，等效电阻  $R$  增大。

## 2. 电涡流式位移传感器

电涡流位移传感器的结构如图 3-46 所示，主要由探头和检测电路组成。探头是一只扁平线圈及支撑骨架，线圈是整个传感器系统的敏感元件；检测电路由振荡器、放大器、检波器组成。

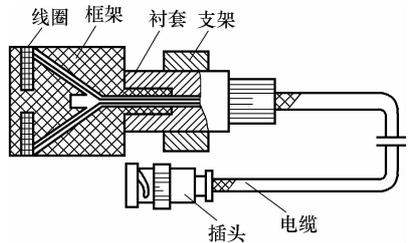


图 3-46 电涡流位移传感器结构

电涡流位移传感器检测电路一般有电桥电路、调幅调频谐振电路、反馈电路三种，图 3-47 是调频谐振电路框图，将探头线圈电感  $L$  与微调电容  $C$  构成并联  $LC$  振荡器，由电工知识可知，并联谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3-16)$$

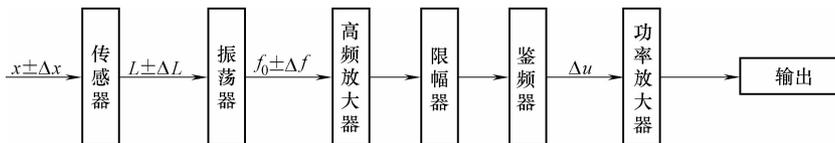


图 3-47 电涡流位移传感器调频谐振测量电路框图

当电涡流线圈与被测体的距离  $x$  改变时，电涡流线圈的电感量  $L$  也随之改变，引起  $LC$  振荡器的输出频率变化，此频率可直接用计算机测量。如果要用模拟仪表进行显示或记录，必须使用鉴频器（F/V 转换器），将频率变化转换为电压变化输出。

电涡流传感器能静态和动态地，非接触地测量被测体（必须金属导体）与探头表面的相对距离。由于其具有高线性度、高分辨率，可靠性高、灵敏度高、抗干扰能力强、响应速度快、不受油、水等介质的影响的特点，常用在汽轮机、水轮机、鼓风机、压缩机、齿轮箱等大型高速旋转机械的轴位移、轴振动、胀差、偏心等状态分析，因此在线监测与故障诊断中得到广泛应用。电涡流位移传感器可测位移量包括偏心、间隙、位置、倾斜、弯曲、变形、移动、圆度、冲击、偏心率、冲程、厚度等，如旋转机械轴的径向振动、轴向位移、胀差等。电涡流传感器的典型应用图例如图 3-48 所示。

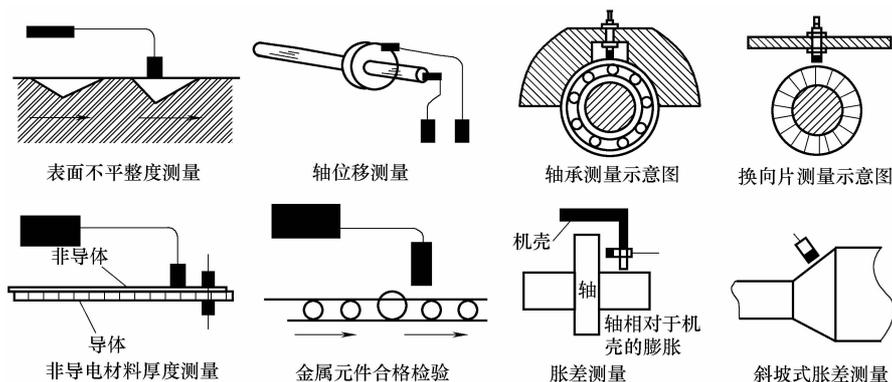


图 3-48 电涡流传感器的典型应用图例

### 3.3.3 压电式传感器

压电式传感器是一种自发电式传感器。它以某些电介质的压电效应为基础，在外力作用下在电介质表面产生电荷，从而实现非电量电测的目的。压电式传感器具有体积小、质量轻、频响高、信噪比大等特点。由于它没有运动部件，因此结构坚固、可靠性好、稳定性高。

#### 1. 压电材料

压电式传感器中的压电元件材料一般有压电晶体（即石英晶体）、压电陶瓷以及高分子压电材料三类。

(1) 压电晶体 天然结构的石英体呈六角形晶柱，它是制造压电传感器的材料。可以利用金刚石刀具将晶体切割出一片片的正方形薄片，薄片可以采用双面镀银进行封装。

石英晶体化学式为  $\text{SiO}_2$ ，是单晶体结构。石英晶体俗称水晶，有天然和人工之分。图 3-49a、b 表示了天然的石英晶体结构，图 3-49c 为割出的一晶体薄片的结构。

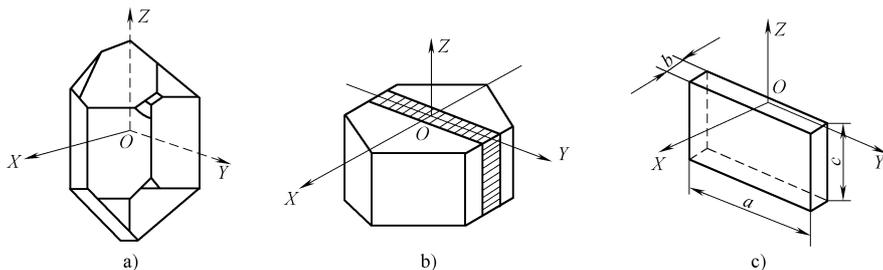


图 3-49 石英晶体

石英晶体具有以下特性：

- 1) 晶体不受外力时，晶体表面不产生电荷。
- 2) 沿晶体电轴（ $X$ 轴）方向施加作用力时，晶体表面产生电荷（沿电轴方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“纵向压电效应”）。
- 3) 沿晶体机械轴（ $Y$ 轴）方向施加作用力时，晶体表面产生电荷（沿机械轴方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“横向压电效应”）。
- 4) 沿光轴（ $Z$ 轴）方向施加作用力时，晶体表面不产生电荷。

压电晶体的电荷量的大小与外力成正比

$$Q = dF \quad (3-17)$$

式中， $d$ 为压电晶体压电系数； $F$ 为压电晶体的作用力。

(2) 压电陶瓷 压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料。它比石英晶体的压电灵敏度高得多，而制造成本却较低，因此目前国内外生产的压电元件绝大多数都采用压电陶瓷。常用的压电陶瓷材料有锆钛酸铅系列压电陶瓷（PZT）及非铅系压电陶瓷（如  $\text{BaTiO}_3$ ）。

压电陶瓷内部的晶粒有许多自发极化的电畴，它有一定的极化方向，从而陶瓷内极化强度为零。因此原始的压电陶瓷呈中性，不具有压电性质，如图 3-50 所示。

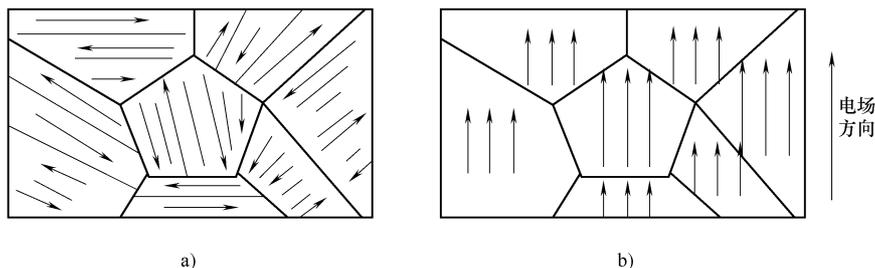


图 3-50 压电陶瓷的极化

a) 未极化 b) 电极化

陶瓷上施加外电场时，电畴的极化方向发生转变，趋向于按外电场方向的排列，从而使材料得到整体的极化效果。外电场越强，就有更多的电畴更完全地转向外电场方向。让外电场强度大到使材料极化饱和的程度，即所有电畴极化方向都整齐地与外电场方向一致时，外电场去掉后，电畴的极化方向基本不变，即剩余极化强度很大，这时的材料具有压电特性。如图 3-50b 所示。

压电陶瓷的电荷量的大小与外力成正比关系与压电晶体一样，为式（3-17）。

(3) 高分子压电材料 典型的高分子压电材料有聚偏二氟乙烯（PVF2 或 PVDF）、聚氟乙烯（PVF）、改性聚氯乙烯（PVC）等。它是一种柔软的压电材料，根据需要制成薄膜或电缆套管等形状。它不易破碎，具有防水性，可以大量连续拉制，制成较大面积或较长的尺度，价格便宜，频率响应范围较宽，测量动态范围可达 80dB。

## 2. 压电式传感器测量电路

(1) 压电式传感器等效电路 由压电元件的工作原理可知，压电式传感器可以看做一个电荷发生器。同时，它也是一个电容器，晶体上聚集正负电荷的两表面相当于电容的两个极板，极板间物质等效于一种介质，则电容量为

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} \quad (3-18)$$

式中,  $S$  为压电片的面积;  $d$  为压电片的厚度;  $\epsilon_r$  为压电材料的相对介电常数。

因此, 压电传感器可以等效为一个与电容相并联的电压源, 如图 3-51a 所示。也可以等效为一个电荷源, 如图 3-51b 所示。

(2) 压电传感器测量电路

压电传感器本身的内阻抗很高, 而输出能量较小, 因此它的测量电路通常需要接入一个高输入阻抗的前置放大器。压电传感器的输出可以是电压信号, 也可以是电荷信号, 因此前置放大器也有两种形式: 电压放大器和电荷放大器。

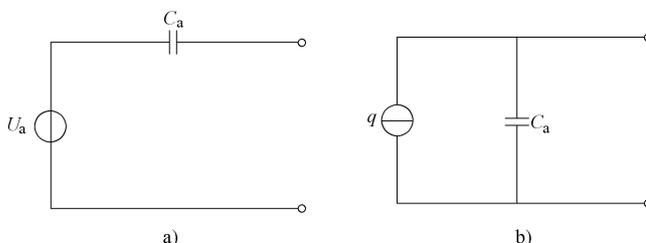


图 3-51 压电传感器等效电路

a) 电压源 b) 电荷源

1) 电压放大器 (阻抗变换器): 图 3-52 是电压放大器电路原理图及其等效电路。

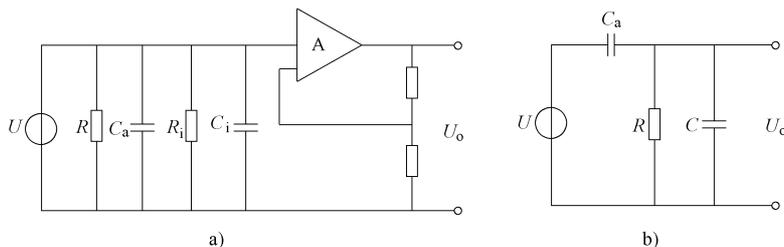


图 3-52 电压放大器电路原理图及其等效电路

a) 电路原理图 b) 等效电路

$C_a$  为连接电缆的等效电容;  $C_i$ 、 $R_i$  为放大器的输入电容和输入电阻;  $R$  压电传感器的泄漏电阻。

若压电元件受正弦力  $f = F_m \sin \omega t$  的作用, 则放大器输入端电压  $U_i$  的大小为

$$U_i = \frac{dF_m R}{\sqrt{1 + R^2 (C_i + C_a + C_c)^2}} \quad (3-19)$$

在理想情况下, 传感器的电阻值  $R_a$  与前置放大器输入电阻  $R_i$  都为无穷大, 即  $\omega R (C_i + C_a + C_c) \gg 1$ , 理想情况下输入电压幅值  $U_{in}$  为

$$U_{in} = \frac{dF_m}{C_i + C_a + C_c} \quad (3-20)$$

2) 电荷放大器: 电荷放大器常作为压电传感器的输入电路, 由一个反馈电容  $C_f$  和高增益运算放大器构成, 当略去  $R_a$  和  $R_i$  并联电阻后, 电荷放大器等效电路如图 3-53 所示, 图中 A 为运算放大器。由运算放大器特性, 得到电荷放大器的输出电压

$$U_o = \frac{Kq}{C_i + C_a + C_c + (1 + K) C_f} \quad (3-21)$$

式中,  $K$  为放大器增益。

由于  $K = 10^4 \sim 10^6$ ，此若满足  $(1 + K) C_f \gg C_a + C_c + C_i$  时，上式可表示为

$$U_o = \frac{q}{C_f} \quad (3-22)$$

### 3. 压电传感器应用

(1) 压电式测力传感器 图 3-54 是压电式单向测力传感器结构图，它主要由石英晶体、绝缘套、电极、上盖及基座等组成。

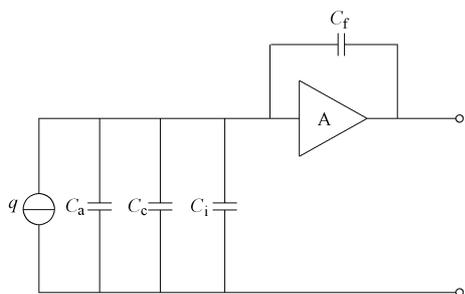


图 3-53 电荷放大器等效电路

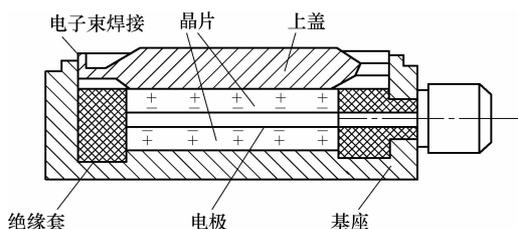


图 3-54 压电式单向测力传感器结构图

传感器上盖为传力元件，外缘壁厚为 0.1 ~ 0.5mm，当外力作用时，它将产生弹性变形，将力传递到石英晶体上。石英晶片采用  $x$  轴方向切片，利用其纵向压电效应实现力-电转换。石英晶片的尺寸约为  $\phi 8\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。该传感器的测力范围为 0 ~ 50N，最小分辨率为 0.01N，固有频率约为 50 ~ 60kHz，整个传感器重量为 10g。

(2) 压电式加速度传感器 图 3-55 是一种压电式加速度传感器结构图。它主要由压电元件、质量块、预压弹簧、基座及外壳等组成。整个部分装在外壳内，并用螺栓加以固定。

当加速度传感器和被测物一起受到冲击力振动时，压电元件受质量块惯性力的作用，根据牛顿第二定律，此惯性力是加速度的函数，即  $F = ma$ ，此惯性力  $F$  作用于压电元件上，因而产生电荷  $Q$ ，当传感器选定后， $m$  为常数，则传感器输出电荷为

$$Q = dF = dma \quad (3-23)$$

与加速度  $a$  成正比。因此，测得加速度传感器输出的电荷便可知加速度的大小。

(3) 压电式金属加工切削力测量 图 3-56 是利用压电陶瓷传感器测量刀具切削力的示意图。由于压电陶瓷元件的自振频率高，特别适合测量变化剧烈的载荷，图中压电传感器位于车刀前部的下方，当进行切削加工时，切削力通过刀具传给压电传感器，压电传感器将切削力转换为电信号输出，记录下电信号的变化便测得切削力的变化。

(4) 压电式玻璃破碎报警器 BS-D2 压电式传感器是专用于检测玻璃破碎的一种传感器，如图 3-57 所示。它利用压电元件对振动敏感的特性来感知玻璃受撞击和破碎时产生的振动波。传感器把振动波转换为电压输出，输出电压经放大、滤波、比较等处理后提供给报警系统。

报警器的电路使用时传感器用胶粘贴在玻璃上，然而通过电缆和报警电路相连。为了提高报警器的灵敏度，信号经放大后，需经带通滤波器进行滤波，要求它对选定的频谱通带的衰减要小，而带外衰减要尽量大。由于玻璃振动的波长在音频和超声波范围内，这就使滤波器成为电路中的关键。当传感器输出信号高于设定的阈值时，才会输出报警信号，驱动报警执行机构工作。

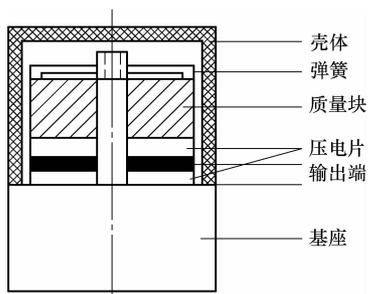


图 3-55 压电式加速度传感器结构图

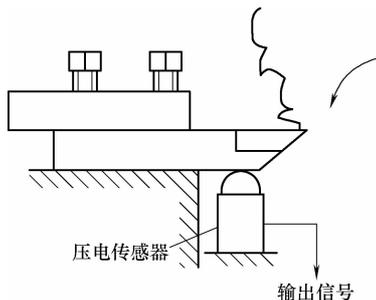


图 3-56 压电式刀具切削力测量示意图

### 3.3.4 VT800 动平衡仪

#### 1. 概述

VT800 动平衡仪可以对各种旋转机械进行整机现场动平衡，相当于一台可移动的动平衡机。VT800 动平衡仪特别适合以下几方面的测量：

- 1) 转子现场动平衡；
- 2) 机器振动的频率分析；
- 3) 机械振动强度的测量；
- 4) 转子轴振动的无触点测量；
- 5) 转子转速的无触点测量；
- 6) 扫频分析；
- 7) 混合振动的阶比分系（谐波分析）；
- 8) 制作 Nyquist 图。

VT800 的面板示意如图 3-58 所示。

#### 2. 技术参数

VT800 动平衡仪结构紧凑重量轻，键盘及显示屏在面板上，而输入/输出插口及各种控制开关均置于面板上。其性能指标见表 3-3。

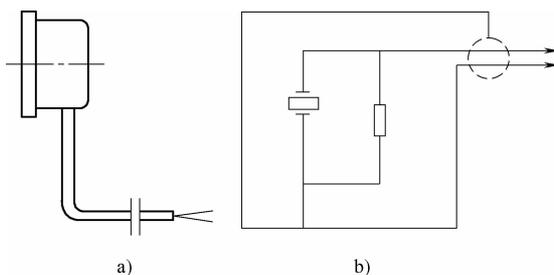
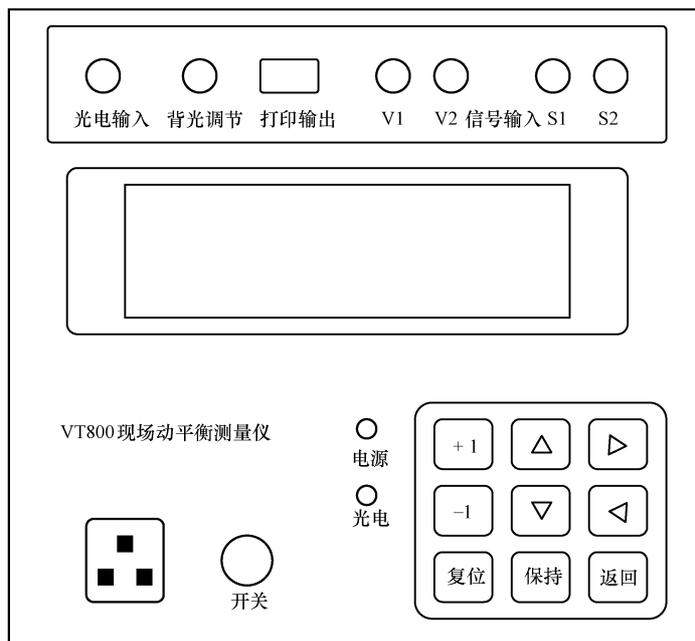


图 3-57 BS-D2 压电式玻璃破碎传感器  
a) 外形 b) 内部电路

表 3-3 VT800 的性能指标

技术内容	性能指标
最大测量点数	2
转速测量	30 ~ 30000r/min
普通振动测量	0.01 ~ 5000 $\mu$ m 0.01 ~ 2000mm/s
振动分析	FFT 频谱分析
同频工作转速	600 ~ 30000r/min
同频振幅量程	0.01 ~ 5000 $\mu$ m
振动烈度量程	0.01 ~ 2000mm/s
相位精度	(0 ~ 360°) $\pm 2^\circ$



其中: V1、V2: 电涡流位移传感器插口。  
S1、S2: 磁电式速度传感器插口。

图 3-58 VT800 的面板示意

需要注意的是:

1) 选用超低频磁电传感器或电涡流传感器测量振动信号时可使同频工作转速降至 60r/min。

2) 当使用普通磁电式速度传感器时, 由于传感器自身的限制, 振动位移的峰-峰值最大仅能测量 1000 $\mu\text{m}$ 。如需要更大的位移量程则需定做特制的磁电式速度传感器。

### 3. 系统连接及传感器安装使用

按图 3-59 所示的方法连成系统。

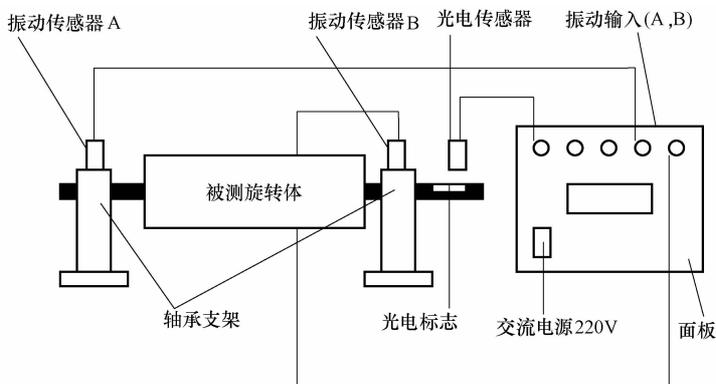


图 3-59 系统连接图

在安装中需要按照以下步骤进行：

1) 光电传感器采用低功耗激光管作为光源，接通电源后发出可见红光，配合反光标志可在 3~40mm 的距离内拾取 60~30000r/min 的转速信号。

光电传感器应接到仪器后面板上的光电输入插座上(要注意多芯插座插头方向，如图 3-60 所示)。使用光电传感器时，应先在转轴上做好光电标志，用磁力表座将光电传感固定在该标志上方，使光电传感器光敏器件正对光电标志，间隙为 3~40mm。通电后光电传感器有红光射向测量表面。转子不转时前面板上的红色发光二极管不闪烁，转子低速转动时，可清楚地看到红色发光二极管同步闪动，这说明光电传感器有转速脉冲输出，否则要调节一下光电传感器距离或重做光电标志。

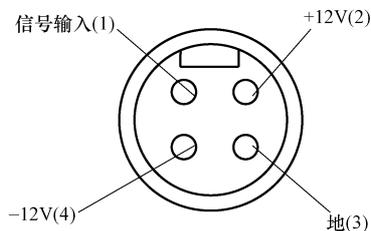


图 3-60 光电传感器引角定义图

光电传感器使用的光电标志通常为黑/白标记，它包括两部分：一部分反射性能好，另一部分反射性能较差。例如，可将轴表面擦干净后用黑漆或黑色胶布全部涂黑，再用剪刀剪一块锡纸或不干胶反光带贴在其上，反光带的宽度应视转轴直径而定，大直径转轴标志要宽一些。

光电标志的好坏直接影响测量效果，所以光电标志应黑白分明，边缘齐整，用微珠反光带效果最好。

仪器中的相角定义为：从光电标志前沿逆转速方向转过的角度。光电标志前沿定义为：逆转速方向看时，从亮到暗的边缘，具体如图 3-61 所示。

2) 磁电式速度传感器用来拾取设备绝对振动量，无须外接电源。使用时应用手持住或用磁性吸盘固定在待测量点上。该传感器可在水平→垂直→水平的 180°内工作，为双向振动速度传感器，其工作频带为 10Hz~1kHz。

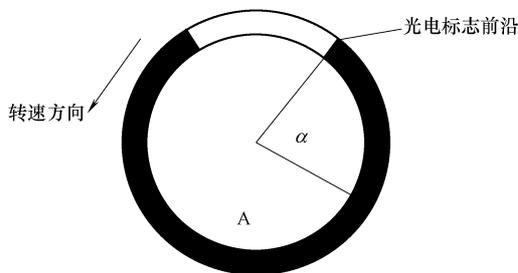


图 3-61 相角定义

3) 磁性吸盘是由钕铁硼高强磁钢和专门设计磁路构成的专用安装吸盘，顶部 M8 螺钉刚好可拧入拾振器下部螺孔中，应尽力拧紧以防止松动造成检测信号不真实。这种吸盘可十分方便地将传感器安装在铁磁材料的设备壳体上，而对非铁磁材料的设备，用户可用手持传感器或是另打孔进行固定，拧入螺钉深度应小于 6mm。

4) 超低频传感器用于超低转速振动测量。这种传感器是单方向的，垂直应用和水平应用须用两只传感器，其工作频率可低到 0.5Hz。这种传感器需另配电源及电缆线。

5) 电涡流传感器用于进行非接触测量。

#### 4. 调试

VT800 采用菜单提示，为用户提供了良好直观的人机界面，下面将举例说明如何使用菜单。例如，若仪器显示：

按 ◀、▶ 键可以选择任意一个功能，最后按 | 回车 | 键确认。

##### ● 输入参数

方式选择	
转速测量	振动测量
信号分析	动平衡

输入参数	
A0=000.000	$\Phi_a=000.0^\circ$
A01=000.000	$\Phi_a=000.0^\circ$
P =000.000	$\Phi_p=000.0^\circ$

用▲和▼键将光标移到所需输入参数的位置，再用▶、◀键将光标移到该参数的某一位，最后用+、-键增减该位数字，直至达到所需的数字。若所有参数的各位均已输入完毕，按|回车|键，即可完成本次输入。另外，本仪器对单位如克(g)、千克(kg)等也采用与数字类似的方法输入。

●输入设置

用◀和▶键将光标移到所需的选项，再用+、-键改变该项的内容。例如现在光标在双面选项上，这时如果按+或-键则双面改变为单面。

方式选择	
双面	测量
宽带	系数法

5. 操作流程

VT800 的操作流程可以参考产品说明书或者到出版社网站上下载电子资源，此处不再一一列出。

### 3.4 张力传感器

#### 3.4.1 典型的张力控制系统

在工业生产的很多行业中，都需要进行精确的张力控制，保持张力的恒定，以提高产品质量。这些行业如造纸、包装、印刷、染整、线缆、纤维、橡胶等片材、线材和带材的加工和制造行业。从行业的发展趋势看，张力系统在很多应用领域中是控制产品质量和效率的重要因素，并将得到越来越多的重视。图 3-62 所示为典型的张力控制收卷和放卷示意图。

张力控制系统，其基本元件包括张力传感器、张力控制器、离合器及制动器。张力控制可以分成手动控制和自动控制。手动控制器即稳流电流是依收料或出料的变化而分阶段手动调整离合器或制动器的励磁电流，从而获得一致的张力。自动张力控制器由张力传感器检测张力，控制器把张力数据处理后再去自动调整离合器或制动器的励磁电流从而控制卷绕物的张力。

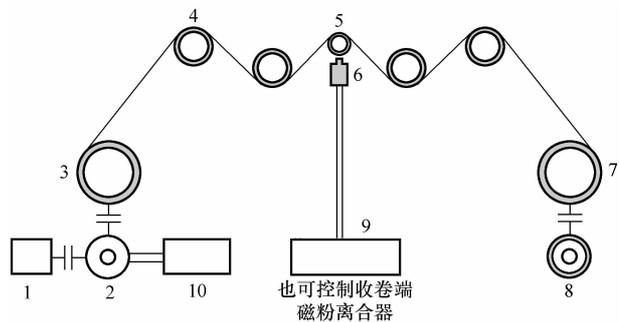


图 3-62 张力控制收卷和放卷示意图

- 1—电动机 2—磁粉离合器 3—收卷芯 4—传动轮
- 5—张力检测辊 6—负重传感器 7—放卷芯
- 8—磁粉制动器 9—自动张力控制仪 10—控制器

在放卷端，放料的张力是依设于放料组的磁粉制动器的扭矩而定。在收卷端，收料张力由磁粉离合器的传递扭矩来决定，为要保持固定的张力，须按卷径的大小来加大或减小传递扭矩。自动张力控制器是以单片机为核心的一种新型智能张力控制器，其响应速度快，控制精度高，LED 数字显示张力值，手动/自动两种状态能缓冲无断点切换，使运转更加平滑；在自动状态下如卷绕物意外断裂或整机停机，该控制器能自动保持断点时的张力。

自动张力控制器启动后自动进入手动状态，而后如果触发手动/自动键，则自动灯亮，控制器进入自动状态。再触发则又返回到手动状态。在手动状态下，可以在额定范围内调节输出电流的大小，同时可以观察到实际张力的大小的变化。同时可以调节设定张力的张力值，当有加调节键或减调节键按下时，设定张力将改变。无论在手动状态或自动状态，如果按下存储键，则把当前的设定张力值和加载电流值保存，即使断电后，仍被存储。当系统复位或重新启动时，设定张力和输出电流将自动恢复成存储值。

### 3.4.2 张力传感器和张力信号

张力传感器的功能就是能在生产过程中对片材、线材、带材及其他类似产品的张力进行在线连续测量，并能提供瞬时值。

常见的张力传感器主要有以下几种：

#### 1. 承座式张力传感器

它是对张力直接进行检测，与机械紧密地结合在一起，没有移动部件的检测方式。通常两个传感器配对使用，将它们装在检测导辊两侧的端轴上，料带通过检测导辊施加负载，使张力传感器敏感元件产生位移或变形，从而检测出实际张力值，并将此张力数据转换成张力信号反馈给张力控制器，最终实现张力闭环控制。其优点是检测范围宽，响应速度快，线性好。缺点是不能吸收张力的峰值，机械的加减速难以处理，不容易实现高速切换卷等。因此，当处于平衡状态的张力控制系统受到较强的干扰时，系统瞬间来不及做出反应，料带上张力变化的幅度值会较大，对张力控制尽快重新进入平衡状态不利。

张力传感器放置在辊子的支持轴承下方，由刚性材料做成，它只对水平方向的张力起作用。当一定张力的片材通过该辊时，片材所受到的张力分成两部分（水平方向的力  $F_R$  和垂直方向的力  $F_V$ ）。如图 3-63a 所示，设张力为  $T$ ， $F_T$  为辊子和轴承的重力， $\alpha$ 、 $\beta$  为片材的夹角，则

$$F_R = T(\cos\beta - \cos\alpha) \quad (3-24)$$

$$F_V = T(\sin\alpha - \sin\beta) + F_T \quad (3-25)$$

根据张力传感器的值  $F_R$  就可以计算出该片材此时的张力值  $T$ 。

承座式张力传感器一般是由特殊的刚性材料做成，如 ABB 公司 PFTL101A、101B 系列的传感器是由 CrMoS17 组成的特殊不锈钢材料做成。其工作原理通常有以下三种：

(1) 压磁式 张力传感器的一次线圈和二次线圈正确通过传感器的 4 个孔（其中一次线圈为激励线圈，二次线圈为感应线圈）。在正常情况下（即无水平张力）一次线圈的感应磁场如图 3-63b 所示，由于孔的合理放置，二次线圈无感应电压产生。当水平张力  $T$  作用在传感器上时，一次线圈的电磁场就会产生变化，从而二次线圈就会感应出相应的电压，如图 3-63c 所示。一旦水平张力作用改变方向，二次线圈的电压极性也相应改变。张力传感器的激励信号为 330Hz、0.5A 的交流信号，张力作用的大小反映在输出信号的幅度上，张力的方向则反映在输出信号的极性上。信号放大器的作用就是先过滤为 DC 信号，然后通过增益

运算放大器，最后可以选择适当的加法器、减法器输出张力控制所需的纸幅 A 侧张力信号、B 侧张力信号、A 侧 + B 侧的张力之和信号和 A 侧 - B 侧的张力之差信号。

该类型传感器通常是由两块铁板和四片弹性钢片连接组成的。四片弹性钢片用来吸收垂直方向的分力，磁性测量元件安装在中间二片钢片中，使测力计只对测量方向上的机械应力敏感。在测量过程中，磁弹性元件由于受机械应力的变化，将产生磁性材料的导磁性能变化。该元件是用一种经过特殊技术处理过的多片金属薄片组成。在元件上绕有两个交叉而互成垂直角度的线圈，在没有外界机械应力时，因为两个线圈相互垂直，故不会出现磁耦现象，即在二次线圈上不会产生感应电压。当磁性元件在测量方向上受到机械应力时即出现磁耦现象。在二次线圈上产生与机械力成正比的感应交流电压信号，通过信号处理，输出一个与机械力大小成正比的张力信号。

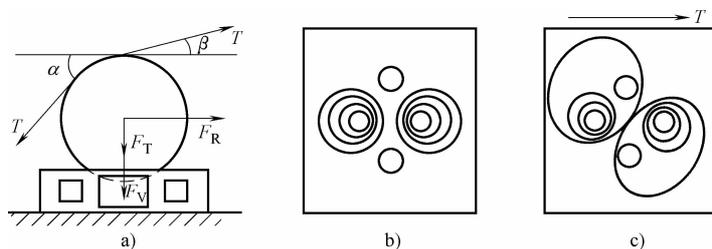


图 3-63 张力传感器的测量原理和工作原理

a) 张力分析 b) 不受力时的张力传感器 c) 不受力时的张力传感器

(2) 压敏电阻传感器 该传感器安装于轴承和机架之间，记录水平方向的卷筒张力，采用相应的放大器来进行全桥电压供给和测量信号的处理。放大器输出端的信号和径向作用力成比例，可用于数字显示或作为闭环回路的瞬时值。如美国蒙特福 T 系列就属于压敏电阻型。

(3) 板簧式微位移张力传感器 它的优点是检测范围宽，响应速度快，线性好；缺点是不能吸收张力的峰值，机械的加减速难以处理，不容易实现高速切换卷等。因此，当处于平衡状态的张力控制系统受到较强的干扰时，系统瞬间来不及做出反应，料带上张力变化的幅度值会较大，对张力控制尽快重新进入平衡状态不利。如日本三菱 LX-TD 型属于板簧式微位移张力传感器，图 3-64 所示为 LX-TD 在张力检测中的应用。

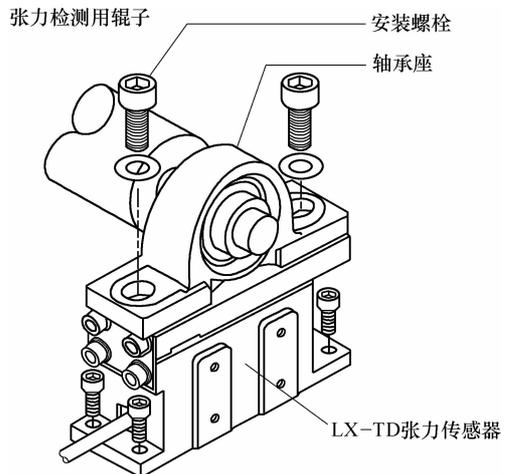


图 3-64 LX-TD 在张力检测中的应用

## 2. 浮辊式张力检测方式

它是一种间接的张力检测方式，实质上是一种位置控制，当张力稳定时，料带上的张力与气缸作用力保持平衡，使浮辊处于中央位置。当张力发生变化时，张力与气缸作用力的平衡被破坏，浮辊位置会上升或下降，此时摆杆将绕 M 点转动并带动浮辊电位器一起转动。这样，浮辊电位器准确地检测出浮辊位置的变化，它将以位置信号反馈给张力控制器，控制器经过计算并输出控制信号，控制伺服驱动

系统进行纠偏。然后浮辊恢复到原来的平衡位置。

由于浮辊式张力检测装置本身是一种储能结构，利用其自身的冗余作用，对大范围的张力跳变有良好的吸收缓冲作用，同时也能减弱料卷的偏心（椭圆）以及速度变化对张力的影响。此系统要求气缸摩擦系数小，响应速度快，气源稳定。浮辊和摆杆的重量要轻，转动要灵活。

常用的浮辊电位器如 Honeywell 公司的 WPM（见图 3-65），它的总机械行程为连续角度，理论电气行程为  $340^{\circ} \sim 353^{\circ}$  不等，线性度为



图 3-65 WPM 系列浮辊式电位器

$\pm 0.75\%$ 。由于采取隔离滚珠轴承，即使在侧面加载也能保证长寿命，并能抵抗恶劣环境。

### 3.4.3 TC818 张力控制器的应用

#### 1. 概述

TC818 张力控制器采用图形液晶显示器，可选择中、英文显示，界面友好易用，可输出  $0 \sim 24V/4A$  直接驱动磁粉离合器、磁粉制动器，也可以输出  $0 \sim 5V$ 、 $-5 \sim +5V$  信号，控制变频器、伺服电动机或其他执行机构，对卷料系统进行高精度的张力控制。可广泛应用于造纸、印刷、包装、纺织印染等行业。

TC818 可以设置为全自动张力控制器或卷径张力控制器。当功能选择设置为自动张力控制时，TC818 为全自动张力控制器，需安装张力传感器，组成闭环控制系统（见图 3-66a）。当功能选择设置为卷径张力控制时，TC818 为卷径张力控制器，只需安装接近开关/编码器对料卷半径进行测量，控制器根据卷径进行张力控制（见图 3-66b）。

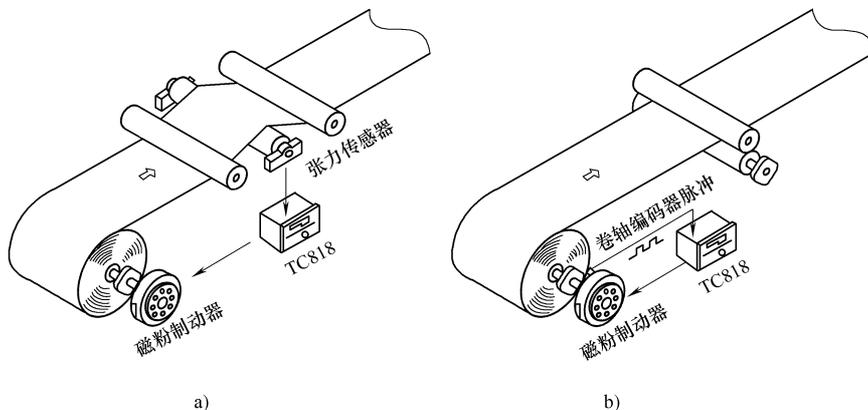


图 3-66 典型的张力控制系统

a) 全自动张力控制 b) 卷径张力控制

图 3-67 为 TC818 的操作界面。

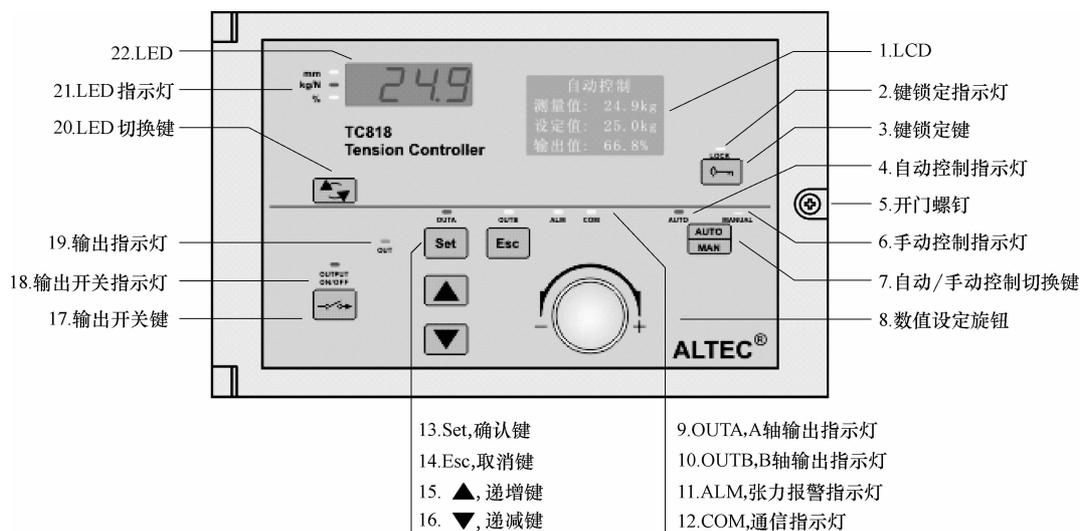


图 3-67 TC818 的操作界面

## 2. 电气连接

图 3-68 为 TC818 的电气连接。

接线端子说明见表 3-4 和表 3-5。

表 3-4 接线端子 1

序号	名称	类型	技术 参数	说 明
1	PSL, PSN	输入	电压 AC85 ~ 264V	接 AC220V 电源
2	ZT, ZTC	输出	继电器, AC3A/250V, NO	零张力报警输出
3	PA, NA	输出	输出 24V/4A 或 90V/10A	接 A 轴磁粉离合器或磁粉制动器
4	PB, NB	输出	输出 24V/4A 或 90V/10A	接 B 轴磁粉离合器或磁粉制动器
5	MCC	输入		外部输入开关信号公共端
6	MC1	输入		外部起动/停止控制信号输入端子
7	MC2	输入		外部双轴切换控制信号输入端子
8	MC3	输入		外部加速控制信号输入端子
9	MC4	输入		预备输出选择开关输入端子
10	+24V, GND	输出	DC 24V	外部接近开关 (或旋转编码器) 供电电源
11	DI0	输入	最高频率 15kHz	主轴接近开关输入端子

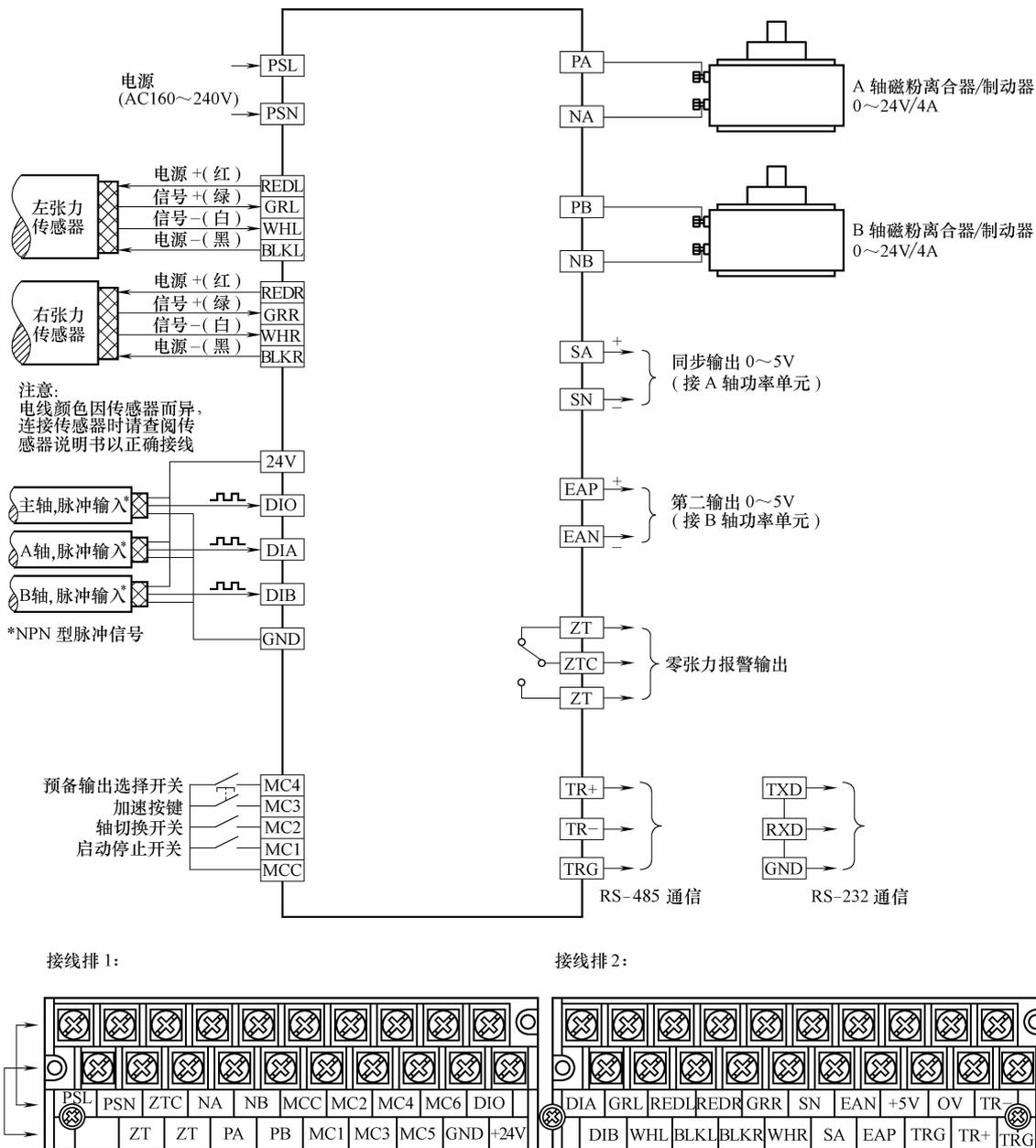


图 3-68 TC818 的电气连接

表 3-5 接线端子 2

序号	名称	类型	技术规格	说明
1	DIA	输入	最高频率为 15kHz	A 轴接近开关输入端子
2	DIB	输入		B 轴接近开关输入端子
3	GRL	输入	输入信号范围 0~200mV 或 0~20mV	左张力传感器输入信号 +
4	WHL	输入		左张力传感器输入信号 -
5	REDL	输出	输出电源电压 5V 或 10V	左张力传感器电源 +
6	BLKL	输出		左张力传感器电源 -
7	GRR	输入	输入信号范围 0~200mV 或 0~20mV	右张力传感器输入信号 +
8	WHR	输入		右张力传感器输入信号 -
9	REDR	输出	输出电源电压 5V 或 10V	右张力传感器电源 +
10	BLKR	输出		右张力传感器电源 -
11	SA, SN	输出	0~20mA 或 0~5V	同步输出 0~5V (接 A 轴功率单元)
12	EAP, EAN	输出	0~20mA 或 0~5V	第二输出 0~5V (接 B 轴功率单元)
13	TR+, TR-, TRG	输出	接 RS-232 或 RS-485	RS-232/RS-485 通信接口
14	+5V, 0V	输出		备用电源

### 3. 画面、菜单结构与参数说明

图 3-69 为 TC818 的菜单结构。

参数说明见表 3-6。

表 3-6 参数说明

参数号	参数名称	调整范围	出厂值	说明
功能选择参数：以下参数为基本参数，应根据实际情况首先设置				
28	功能选择	自动张力控制 卷径张力控制	自动张力控制	自动张力控制与卷径张力控制的选择
29	控制方式	恒张力控制 锥度张力控制 曲线程序控制	恒张力控制	控制方式选择
30	锥度系数	0.01~1.00	1.00	用于锥度张力控制，影响锥度张力控制中张力的变化率
42	第二输出	同步控制输出 轴切辅助输出 张力变送输出	同步控制输出	第二输出类型选择
张力测量参数：以下参数影响张力测量，当选择自动张力控制时必须对以下参数进行设置				
21	左误差修正	-50.0~50.0kg	0.0kg	左张力传感器误差修正，用于小误差修正，如果误差太大，需重新标定张力
22	右误差修正	-50.0~50.0kg	0.0kg	右张力传感器误差修正，同上
23	传感器选择	左张力传感器 右张力传感器 左+右张力传感器	左+右传感器	选择张力传感器的安装配置，根据实际情况选择

(续)

参数号	参数名称	调整范围	出厂值	说明
24	显示单位	kg N	kg	此参数会影响所有与单位相关的参数显示
25	信号范围	$\pm 30\text{mV}$ $\pm 300\text{mV}$	$\pm 30\text{mV}$	张力传感器的信号范围, 根据张力传感器输出信号范围设定
44	显示滤波	0.01 ~ 99.99	3.00	值越大显示越稳定
45	零张力标定	0.0kg	0.0kg	零点线性标定
46	满量程标定	0.0 ~ 999.9kg	50.0kg	满量程线性标定

卷径测量参数: 以下参数影响卷径测量, 当选择卷径张力控制或锥度张力控制时必须对以下参数进行设置

01	初始半径	最小半径-最大半径	50mm	料卷的初始半径
02	卷料厚度	0.001 ~ 1.000mm	0.020mm	卷料的实际厚度
31	卷径测量方式	厚度累加法比值法	厚度累加法	此参数控制卷料半径的测量方式
32	最大半径	10 ~ 999mm	500mm	料卷最大半径 (卷料半径上限)
33	最小半径	10 ~ 999mm	40mm	料卷最小半径 (卷料半径下限)
34	主轴半径	10 ~ 999mm	50mm	主轴半径, 用比值法测量卷径时需设置此值
35	主轴脉冲数	01 ~ 1000	01	主轴接近开关/编码器每转一圈产生的脉冲个数
36	卷轴脉冲数	01 ~ 1000	01	卷轴接近开关/编码器每转一圈产生的脉冲个数
37	计算脉冲数	01 ~ 1000	20	当脉冲累计到此值时计算一次卷径, 此参数影响卷径更新的速度及卷径测量精度
38	额定转矩	05 ~ 999N · m	50N · m	磁粉离合器/磁粉制动器的额定转矩
39	卷取方式	收卷, 放卷	放卷	收卷/放卷设置

调节参数: 以下参数影响张力控制精度, 当选择自动张力控制时必须对以下参数进行正确设置

05	比例带	0.1 ~ 999.9kg	200.0kg	
06	积分时间	0.1 ~ 10.0s	1.0s	
07	静区	0.1 ~ 999.9kg	8.0kg	
20	最大输出值	0.0 ~ 100.0%	100.0%	控制器输出功率上限
40	反馈方式	正常模式 主动送卷模式	正常模式	正控制/反控制选择
43	输出滤波	0.1 ~ 100.0s	10.0s	此参数限制输出的变化率

(续)

参数号	参数名称	调整范围	出厂值	说明
张力设定值限制参数				
18	最大设定值	0.0 ~ 999.9kg	50.0kg	限制张力设定最大值
19	最小设定值	0.0 ~ 999.9kg	0.0kg	限制张力设定最小值
启动/停止参数：以下参数影响系统启停时的输出，应该根据实际情况正确设置				
03	启停频率	1 ~ 100Hz	01Hz	同步启停功能开起时，系统通过临测主轴转速来进行自动启动/停止操作
08	预备输出	0.0 ~ 100.0%	0.0%	系统启动时的输出值
09	启动时间	0.1 ~ 25.0s	0.1s	系统启动时间
10	停机增益	01 ~ 400%	100%	
11	停机时间	0.1 ~ 25.0s	0.1s	系统停机时间
16	加速系数	0.01 ~ 2.00	1.20	
17	减速系数	0.01 ~ 2.00	1.00	
41	同步启停	关闭 开启	关闭	如果开启此功能，系统会根据主轴转速来进行自动启动/停止运行
轴切参数：以下参数影响轴切时的输出，当系统有轴切功能时应正确设置				
12	轴切输出	0.0 ~ 100.0%	0.0%	
13	轴切时间	0.1 ~ 25.0s	0.1s	
14	辅助输出	0.0 ~ 100.0%	0.0%	
15	辅助时间	0.1 ~ 25.0s	0.1s	
通信参数				
26	通信地址	0.0 ~ 9.9	0.0	控制器通信地址
27	通信波特率	4800, 9600, 19.2kbit/s	4800bit/s	通信速率
附加功能参数				
04	张力报警值	0.0 ~ 999.9kg	0.0kg	运行时才报警，在双轴切换和起/停时不报警
47	中文 English	中文 English	中文	语言选择
48	参数备份	恢复? 备份?		备份及恢复参数
49	恢复出厂值	恢复?		恢复出厂值，所以当前设置值将会丢失
50	技术支持			版权信息及公司网址

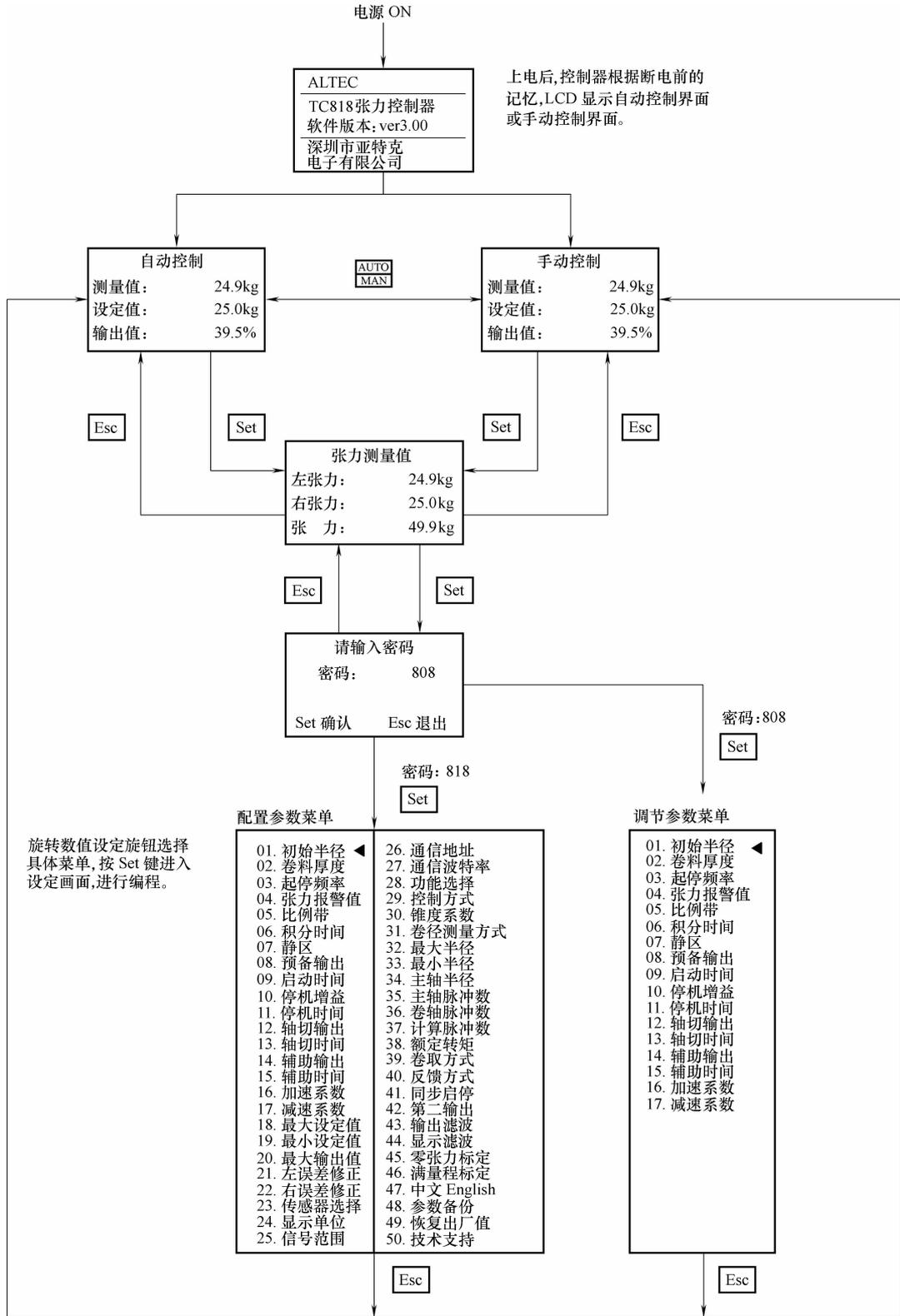


图 3-69 TC818 的菜单结构

### 4. 张力调试

TC818 控制器需要按照以下步骤进行调试：

- 1) 确保张力控制器安装及接线正确后接通电源。
- 2) 确保张力传感器安装及接线正确（见图 3-70），检查并判断张力传感器信号是否正常。

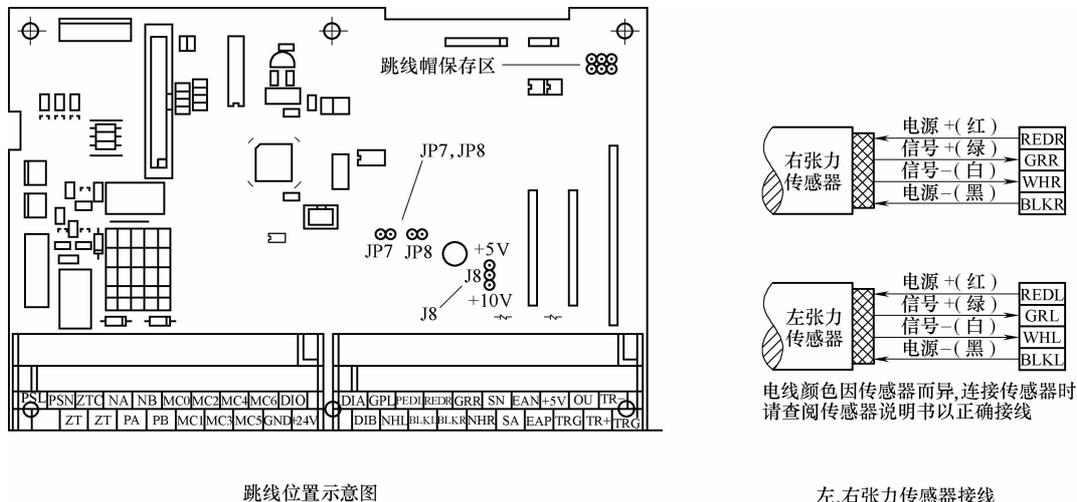


图 3-70 张力传感器的接线

- 3) 对张力测量的相关参数进行编程设定（见图 3-71）。

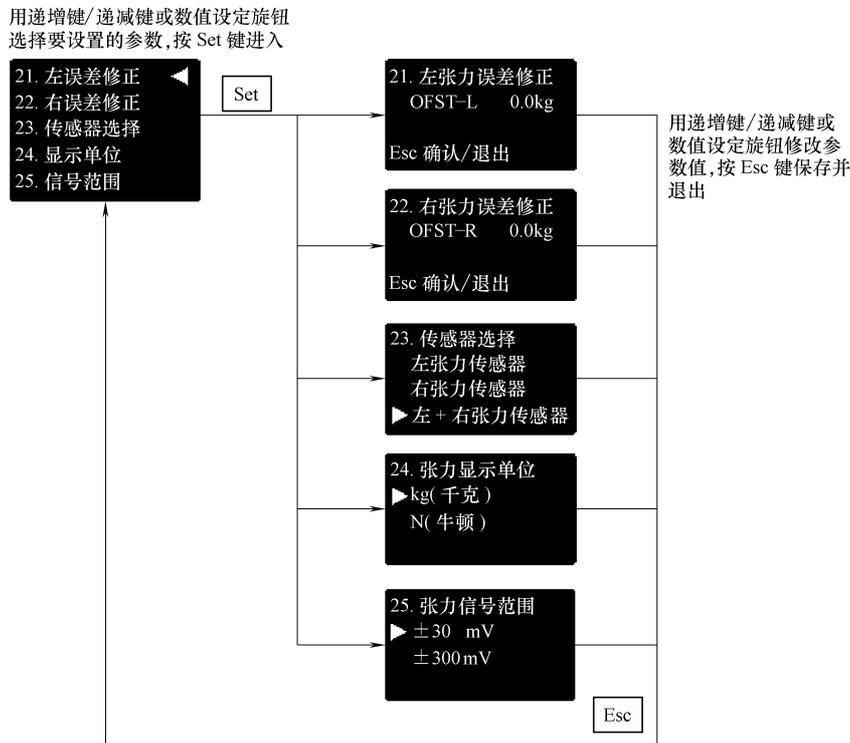


图 3-71 张力测量相关参数

4) 对张力信号的零点及满量程进行标定, 并确认张力显示正常, 如张力显示不正常回到步骤2)。

为了进行正确的闭环张力控制, 张力显示必须准确, 必须对张力控制器进行标定, 标定好的张力控制器指示的张力值才能达到理想的精度。TC818 张力控制器采用两点线性标定法, 标定过程十分简单。

用万用表 200mV 档测量传感器输出信号, 传感器未受力时, 大约为 0mV 左右; 当传感器受力时, 输出信号将会有变化: 力越大信号越大, 但不能超过传感器的最大输出信号, LX 系列张力传感器不会超过 200mV, CTS/HTS 系列张力传感器不会超过 20mV, 否则传感器有故障, 需更换、安装后再标定。

图 3-72 ~ 图 3-74 分别是张力标定示意、零张力标定和满量程标定。其中零张力标定应该在安装检测辊, 但不加载卷料的状态下进行。

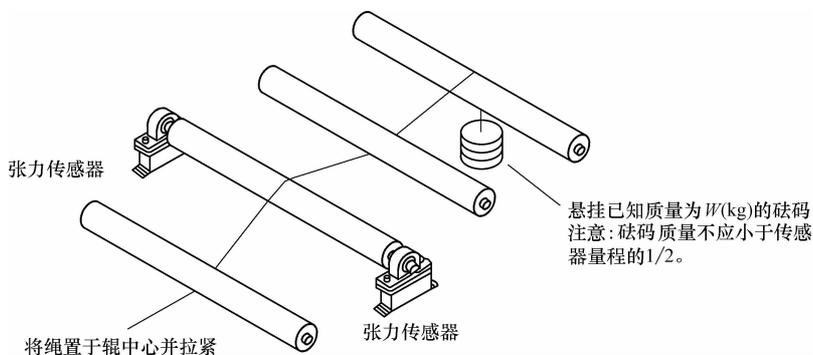


图 3-72 张力标定示意图

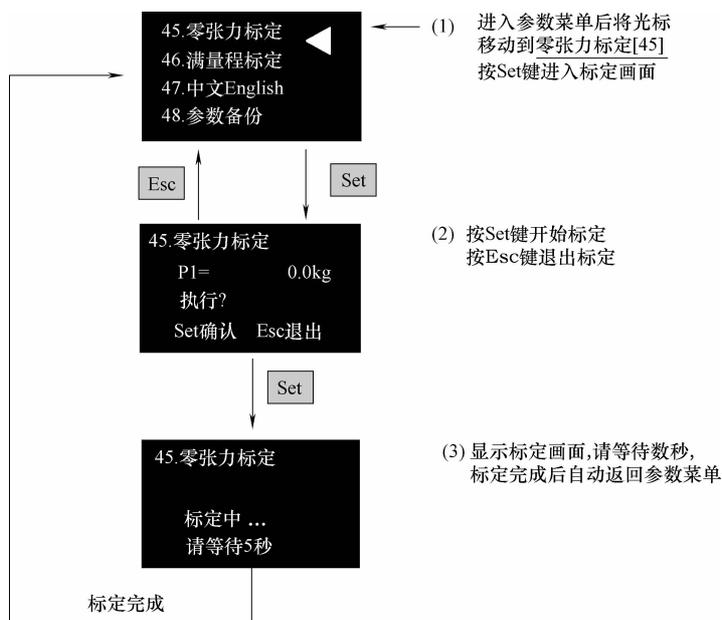


图 3-73 零张力标定

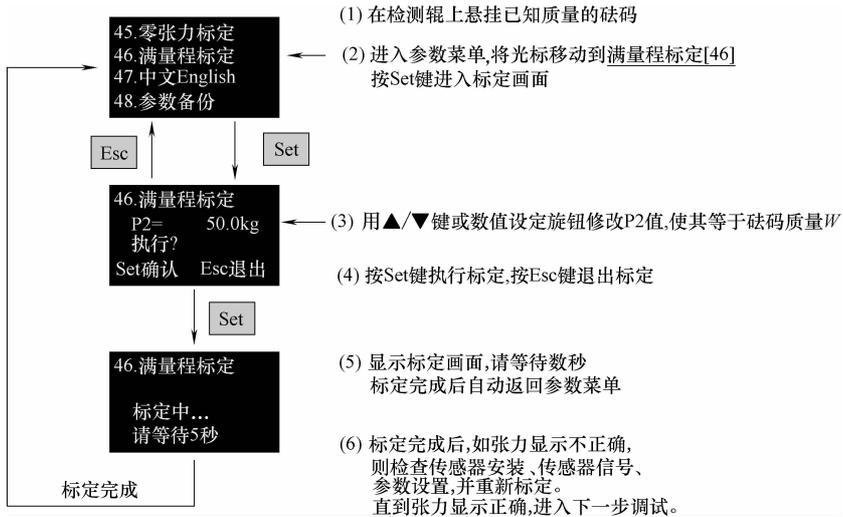


图 3-74 满量程标定

5) 通过手动调节、运行对系统进行检查,确认张力显示正常,执行机构运转正常。

6) 如以上步骤正常,切换到自动控制模式,根据运行情况对 PI 参数进行调整,确保张力系统平稳运行。

当张力测量正确后,即可进入控制器的自动及手动运行模式调试,先用手动控制模式运行,当手动运行正常,卷料达到合适及稳定的张力时,可切换到自动控制模式运行。

① 手动控制 (见图 3-75): 当控制器处于自动控制模式时,按一下 AUTO/MAN 键, MANUAL 指示灯亮,控制器转入手动控制模式,可旋转数值设定旋钮或按增/减键直接修改输出功率值,修改范围受最大输出值 [20] 的限制。

随着输出值的修改,张力测量值会有相应的变化,当卷料达到合适及稳定的张力时,可切换到自动控制模式运行。

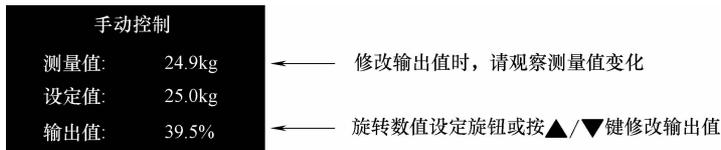


图 3-75 手动控制

② 自动控制 (见图 3-76): 当控制器处于手动控制模式时,按一下 AUTO/MAN 键, AUTO 指示灯亮,控制器转入自动控制模式,可旋转数值设定旋钮或按递增键/递减键直接修改张力设定值,修改范围受最大设定值 [18] 和最小设定值 [19] 的限制。

当控制器从手动控制模式切换到自动控制模式时,控制器将此时的测量值设置为设定值,实现无扰切换。

张力设定值是指在控制过程中,卷料所要达到的目标张力。在自动运行状态时,控制器会根据设定值、测量值和参数比例带 [05]、积分时间 [06]、静区 [07] 进行运算后调节输出,使实际张力趋近设定值,以达到控制效果。

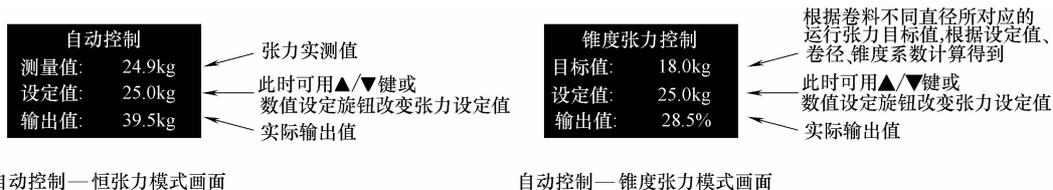


图 3-76 自动控制

当张力测量出错，显示故障代码时，控制器将自动切换到手动控制模式，按 AUTO/MAN 键也不能切换到自动控制模式。

控制器处于停止运行状态时，AUTO 指示灯闪烁。

### 5. TC818 控制器的应用

(1) 双轴切换 如图 3-77 所示，当系统采用双轴（A，B 轴）轮换运行时，在放卷轴上的材料快放完时，或在收卷轴上的材料快收满时，需对卷轴进行切换。TC818 张力控制器的轴切换功能由接线端子 MC2，MCC 控制，在 MC2，MCC 端子接一开关，此开关即为系统的轴切换开关。当轴切换开关断开时，A 轴运行；当轴切换开关短接时，B 轴运行。

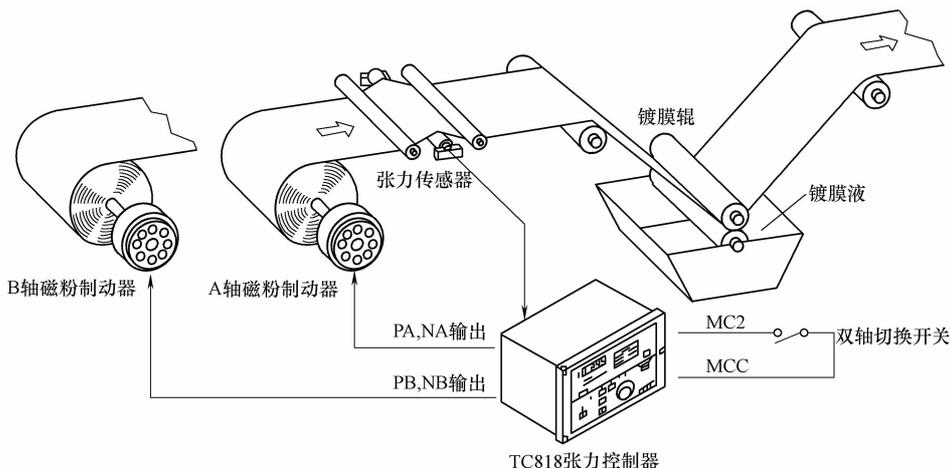


图 3-77 双轴切换

(2) 锥度张力控制 在收卷系统中，随着卷径的增大，使卷料张力逐步减小的控制称为锥度张力控制，锥度控制可使收卷膜的内层收得较紧，而外层的膜收得较松，从而使卷料膜的层与层之间不打滑，防止材料卷绕时卷得过紧及卷料卷绕歪斜。

当控制方式 [29] 设置为锥度张力控制时，TC818 张力控制器为锥度张力控制方式。

锥度系数 [30]  $t_1$  越大，随卷径变化，张力变化越大。当锥度系数 [30]  $t_1$  为 0 时，为恒张力控制方式（见图 3-78）。

当张力控制器用于放卷控制时，控制器应设置为恒张力控制方式。

(3) 卷径张力控制（见图 3-79） 在某些特殊场合，不方便安装张力传感器，或对张力控制精度要求不高，不需采用张力闭环控制方式，此时 TC818 可设置为卷径张力控制方式。

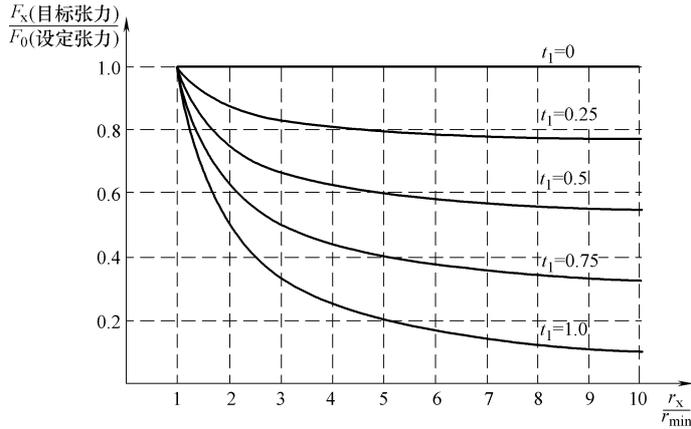


图 3-78 锥度张力控制方式

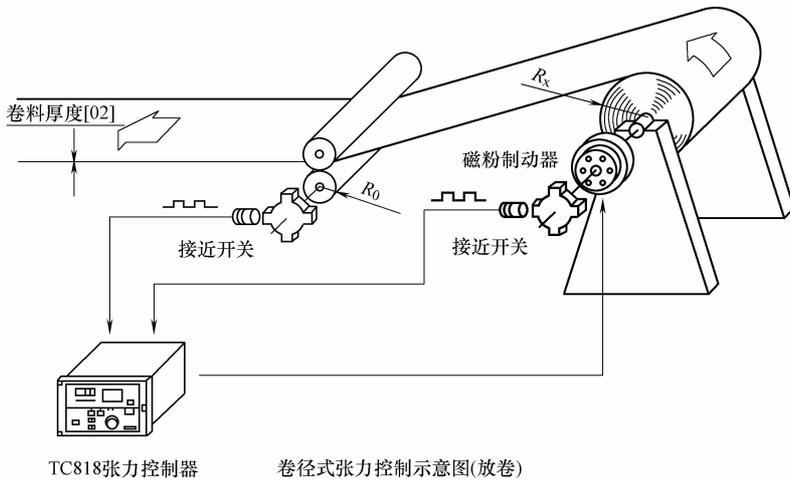


图 3-79 卷径张力控制

当功能选择 [28] 设置为卷径张力控制时，TC818 为卷径张力控制方式。

卷径张力控制的突出特点是省去了价格相对较高的张力传感器，安装简单、容易，而且能很方便地获得锥度张力控制，特别适用于印刷、包装、印染等行业的分切及收卷等机器设备上使用。

TC818 控制器采集主轴与料卷轴的脉冲信号，经过 CPU 运算，计算出放卷半径，根据卷料半径、设定张力、磁粉离合器的额定转矩 [38] 改变输出励磁电流达到控制张力的目的。功率电源可输出 0~24V，0~4A 制动电流。

用户可以通过设置卷径测量方式 [31] 选择厚度累加法或比值法作为卷径测量方式。

必须保证卷径测量计算准确，因此与卷径测量计算相关的参数必须正确设置，而且要特别注意测量卷径的接近开关或编码器的响应速度及正确安装。图 3-80 为选用 NPN 型接近开关或编码器的接线。

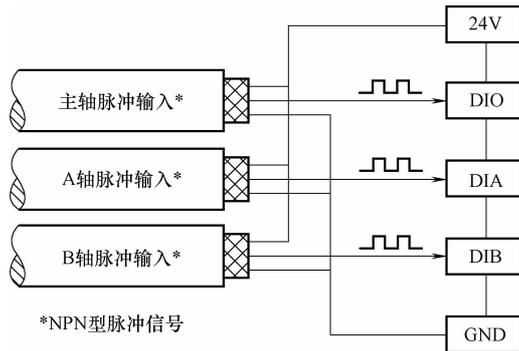


图 3-80 NPN 型接近开关或编码器的接线

## 【思考与练习】

## 1. 选择题

- (1) 常用 ( ) 制作霍尔传感器的敏感材料。
- a. 金属                      b. 半导体                      c. 塑料
- (2) 下列物理量中可以用霍尔传感器来测量的是 ( )。
- a. 位移量                      b. 湿度                      c. 烟雾浓度
- (3) 霍尔电动势与 ( )。
- a. 激励电流成正比                      b. 激励电流成反比
- c. 磁感应强度成反比                      d. 磁感应强度成正比
- (4) 压电元件是一种 ( ) 敏感元件, 可以测量那些最终能转换为 ( ) 的物理量。
- a. 力                      b. 位移                      c. 温度
- (5) 压电晶体表面所产生的电荷密度与 ( )。
- a. 晶体厚度成反比                      b. 晶体面积成反比                      c. 作用在晶体上的压力成正比
- (6) 压电片受力的方向与产生电荷的极性 ( )。
- a. 无关                      b. 有关                      c. 不确定
- (7) 压电式加速度传感器是 ( ) 信号的传感器。
- a. 适合测量任意                      b. 适合测量直流
- c. 适合测量缓变                      d. 适合测量交流
- (8) 反射式电涡流传感器励磁线圈的电源是 ( )。
- a. 直流                      b. 工频交流
- c. 高频交流                      d. 以上都不对
- (9) 增量式脉冲编码器 (pulse encoder) 输出的 A、B 两相, 其相位差为  $90^\circ$ , 它的作用是 ( )。
- a. 用于细分                      b. 提高可靠性                      c. 判别旋向
- (10) 对一个 16 位的绝对式脉冲编码盘而言, 它能测出的最小角位移为 ( )。
- a.  $11.25^\circ$                       b.  $0.196^\circ$                       c.  $0.0055^\circ$

2. 为什么导体材料和绝缘体材料不宜制成霍尔传感器？

3. 图3-81所示为霍尔式压力传感器原理，试分析其工作原理，霍尔电动势 ( $E_H = K_H IB$ ) 与压力  $P$  的关系。

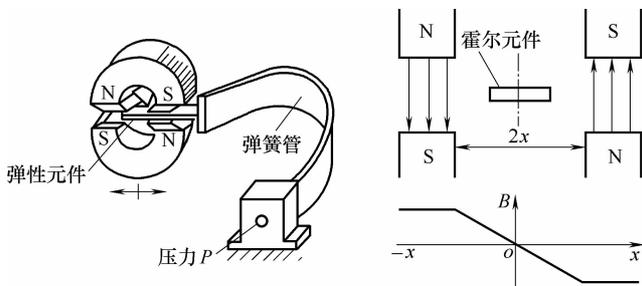


图3-81 题3图

4. 如图3-82所示，简述应用霍尔传感器构成液位控制系统的工作原理。

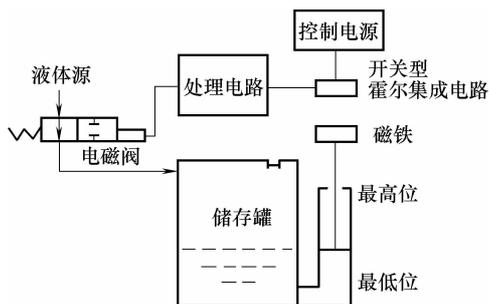


图3-82 题4图

5. 在检修某机械设备时，发现某金属齿轮的两侧各有A、B检测元件，如图3-83所示。请分析填空。

(1) 根据已学过的知识，可以确认A、B两个检测元件是\_\_\_\_\_（行程开关/接近开关），其检测原理是属于\_\_\_\_\_传感器。

(2) 齿轮每转过一个齿，则A、B各输出\_\_\_\_\_个脉冲。在设定的时间内，对脉冲进行计数，就可以测量齿轮的\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。

(3) 若齿轮的齿数  $z = 36$ ，在2s内测得A（或B）输出的脉冲数为1026个，则说明齿轮转动了\_\_\_\_\_圈，齿轮的转速约为\_\_\_\_\_ r/min。

(4) 若齿轮正转时A、B的输出脉冲如图3-83b所示，由b图可以看出，设置A、B两个检测元件是为了判别\_\_\_\_\_。

(5) 若齿轮反转，请以A的波形为基准，画出B的输出波形（应考虑相位差）。

(6) 若发现A或B无信号输出，请列出产生故障的可能原因为\_\_\_\_\_等。

(7) 可用\_\_\_\_\_（塑料/铁片）来判断A或B是否损坏。

6. 压电传感器在哪些方面应用？它能否用于静态测量？为什么？

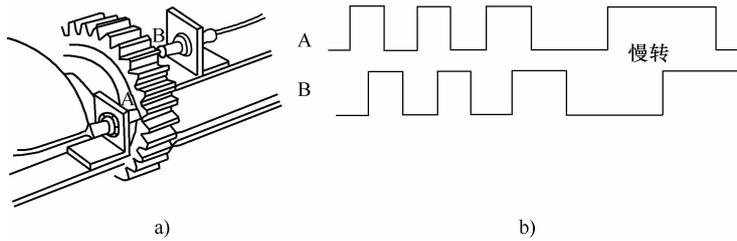


图 3-83 题 5 图

a) 安装简图 b) 输出波形

7. 简述电涡流传感器工作原理及其主要用途。

8. 压电加速度传感器与电荷放大器连接的等效电路如图 3-84 所示。图中  $C$  为传感器固有电容、电缆等效电容和放大等效电容之和。已知传感器电荷灵敏度  $S_q = 100\text{pC/g}$ ，反馈电容  $C_f = 1000\text{pF}$ ，试求当被测加速度为  $0.5g$  时，输出电压是多少？（ $g$  为重力加速度）

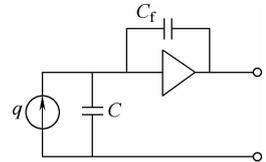


图 3-84 题 8 图

9. 用压电式单向脉动力传感器测量一正弦变化的力，压电元件用两片压电陶瓷并联，压电常数为  $200\text{pC/N}$ ，电荷放大器的反馈电容  $C_f = 2000\text{pF}$ ，测得输出电压  $u_o = 5\sin\omega t$  (V)。求：

- (1) 该压电传感器产生的总电荷  $Q$  (峰值) 为多少 pC?
- (2) 此时作用在其上的正弦脉动力 (瞬时值) 为多少?

10. 请说出最常见的几种张力传感器，其工作原理分别是什么？

# 第 4 章

## 化学传感器与仪表应用



### 导读

按检测对象，化学传感器分为气体传感器、湿度传感器、离子传感器和生物传感器等。气体传感器的传感元件多为氧化物半导体，有时在其中加入微量贵金属作增敏剂，增加对气体的活化作用。湿度传感器是测定环境中水气含量的传感器，又分为电解质式、高分子式、陶瓷式和半导体式湿度传感器。

化学传感器在矿产资源的探测、气象观测和遥测、工业自动化、医学上远距离诊断和实时监测、农业上生鲜保存和鱼群探测、防盗、安全报警和节能等各方面都有重要的应用。

## 4.1 气体传感器

### 4.1.1 气体传感器的概念及工作原理

#### 1. 气体传感器的概念

气体传感器是一种把气体（多数为空气）中的特定成分检测出来，并将它转换为电信号的器件，以便提供有关待测气体的存在及浓度大小的信息。

气体传感器最早用于可燃性气体及瓦斯泄漏报警，用于防灾，保证生产安全，以后逐渐推广应用，用于有毒气体的检测（见图 4-1）、容器或管道的检漏、环境监测（防止公害）、锅炉及汽车的燃烧检测与控制（可以节省燃料，并且可以减少有害气体的排放）、工业过程的检测与自动控制（测量分析生产过程中某一种气体的含量或浓度）。近年来，在医疗、空气净化、家用燃气灶、热水器等方面，气体传感器得到普遍的应用。

表 4-1 为气体传感器的主要检测对象及应用场所。

气体传感器的性能必须满足下列条件：

1) 能够检测易爆气体的允许浓度、有害气体的允许浓度和其他基准设定浓度，并能及时给出报警、显示与控制信号；

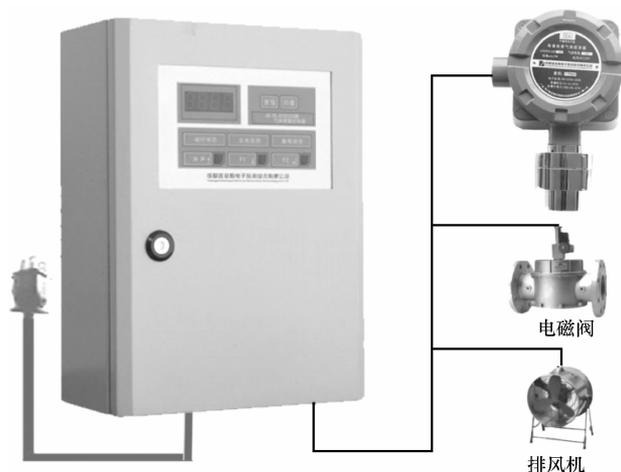


图 4-1 有毒气体报警系统

- 2) 对被测气体以外的共存气体或物质不敏感；
- 3) 性能长期稳定性、重复性好；
- 4) 动态特性好、响应迅速；
- 5) 使用、维护方便，价格便宜等。

表 4-1 气体传感器的主要检测对象及应用场所

分 类	检测对象气体	应用 场合
易燃易爆气体	液化石油气、焦炉煤气、发生炉煤气、天然气 甲烷 氢气	家庭 煤矿 冶金、试验室
有毒气体	一氧化碳（不完全燃烧的煤气） 硫化氢、含硫的有机化合物 卤素、卤化物、氨气等	煤气灶等 石油工业、制药厂 冶炼厂、化肥厂
环境气体	氧气（缺氧） 水蒸气（调节湿度，防止结露） 大气污染（SO <sub>x</sub> ，NO <sub>x</sub> ，Cl <sub>2</sub> 等）	地下工程、家庭 电子设备、汽车、温室 工业区
工业气体	燃烧过程气体控制，调节燃/空比 一氧化碳（防止不完全燃烧） 水蒸气（食品加工）	内燃机，锅炉 内燃机、冶炼厂 电子灶
其他灾害	烟雾，司机呼出酒精	火灾预报，事故预报

## 2. 气体传感器的种类

气体传感器种类较多，主要分为以下几种：

(1) 半导体型气体传感器 半导体型气体传感器是利用半导体气敏器件同气体接触，造成半导体性质变化，来检测气体的成分或浓度的气体传感器。半导体型气体传感器大体可分为电阻式和非电阻式两大类，见表 4-2。电阻式半导体气体传感器用氧化锡、氧化锌等金属氧化物材料制作敏感器件，利用其阻值的变化来检测气体的浓度。气敏器件有多孔质烧结

体、厚膜以及目前正在研制的薄膜等几种非电阻式半导体传感器。

表 4-2 半导体型气体传感器的分类

类 型	主要的物理特性	传感器举例	工作温度	代表性被测气体
电阻式	表面控制型	氧化锡、氧化锌	室温 0 ~ 450℃	可燃性气体
	体控制型	La <sub>1-x</sub> -Sr <sub>x</sub> CoO <sub>3</sub> 、FeO、氧化钛、 氧化钴、氧化镁、氧化锡	300 ~ 450℃ 700℃以上	酒精、可燃性气体、氧气
非电阻式	表面电位	氧化银	室温	乙醇
	二极管整流特性	铂/硫化镉、铂/氧化钛	室温 ~ 200℃	氢气、一氧化碳、酒精
	晶体管特性	铂栅 MOS 场效应晶体管	150℃	氨气、硫化氢

1) 表面控制型气体传感器：这类器件表面电阻变化取决于表面原来吸附气体与半导体材料之间的电子交换。器件一般工作在空气中，空气中的 O<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 接受来自半导体材料的电子而吸附负电荷，其结果表现为 N 型半导体材料的表面空间电荷区域的传导电子减小，使表面电导率减小，从而使器件处于高阻状态。一旦器件与被测气体接触，就会与吸附的氧起反应，将被氧束缚的几个电子释放出来，使敏感膜表面电导增加，使器件电阻减小。这种类型的传感器多数是以可燃性气体为检测对象，但如果吸附能力强，即使是非可燃性气体也能作为检测对象。

这类器件具有检测灵敏度高、响应速度快、实用价值大等优点。目前常用的材料为氧化锡和氧化锌等较难还原的氧化物，也有研究用有机半导体材料的。在这类传感器中一般均掺有少量贵金属（如 Pt 等）作为激活剂。这类器件目前已商品化的有 SnO<sub>2</sub>、ZnO 等气体传感器。

2) 体电阻控制型气体传感器：这类器件是利用体电阻的变化来检测气体的半导体器件。很多氧化物半导体由于化学计量比偏离，即组成原子数偏离整数比的情况，如 Fe<sub>1-x</sub>O、Cu<sub>2-x</sub>O 等，或 SnO<sub>2-x</sub>、ZnO<sub>1-x</sub>、TiO<sub>2-x</sub> 等。前者为缺金属型氧化物，后者为缺氧型氧化物，统称为非化学计量化合物，它们是由不同价态金属的氧化物构成的固溶体，其中  $x$  值由温度和气相氧分压决定。由于氧的进出使晶体中晶格缺陷（结构组成）发生变化，电导率随之发生变化。缺金属型为生成阳离子空位的 P 型半导体，氧分压越高，电导率越大。与此相反，缺氧型氧化物为生成晶格间隙阳离子或生成氧离子缺位的 N 型半导体，氧分压越高，电导率越小。

这类器件因须与外界氧分压保持平衡，或受还原性气体的还原作用，致使晶体中的结构缺陷发生变化，随之体电阻变化。这种变化也是可逆的，当被测气体脱离后气敏器件又恢复原状。这类传感器以  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 传感器为代表。其检测对象主要有液化石油气（主要是丙烷）、煤气（主要是 CO、H<sub>2</sub>）和天然气（主要是甲烷）。

上述两种电阻型半导体气体传感器的优点是价格便宜、使用方便、对气体浓度变化响应快、灵敏度高。其缺点是稳定性差、老化快、对气体识别能力不强、特性的分散性大等。为了解决这些问题，目前正从提高识别能力、提高稳定性、开发新材料、改进工艺及器件结构等方面进行研究。

3) 非电阻型气体传感器：这类传感器目前尚无商品，单从这方面也可看出科技人员正为发展气体传感器方面做着努力。目前的成果主要有二极管、FET 及电容型几种。

二极管型气体传感器是利用一些气体被金属与半导体的界面吸收，对半导体禁带宽度或金属的功函数的影响，而使二极管整流特性发生性质变化而制成的，如 Pd/Ti、Pd/ZnO 之类二极管可用于对 H<sub>2</sub> 的检测。

FET 型气体传感器是将 MOSFET 或 MISFET 中的金属栅采用 Pd 等金属膜，根据栅压域值的变化来检测未知气体。初期的 FET 型气体传感器以测 H<sub>2</sub> 为主，近年来已制成 H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、CO、乙醇等 FET 型气体传感器。最近又发展了 ZrO<sub>2</sub>、LaF 固体电解质膜及锑酸质子导电体厚膜型的 FET 气体传感器。

人们发现 CaO-BaTiO<sub>3</sub> 等复合氧化物随 CO<sub>2</sub> 浓度变化其静电容量有很大变化。该元件当加热到 419℃ 时，可测定 CO<sub>2</sub> 浓度范围 (0.05% ~ 2%)。其优点是选择性好，很少受 CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 等气体干扰，不受湿度干扰，有良好前景。

(2) 固体电解质式气体传感器 这类传感器内部不是依赖电子传导，而是靠阴离子或阳离子进行传导，因此，把利用这种传导性能好的材料制成的传感器称为固体电解质传感器。

(3) 接触燃烧式气体传感器 一般将在空气中达到一定浓度、触及火种可引起燃烧的气体称为可燃性气体，如甲烷、乙炔、甲醇、乙醇、乙醚、一氧化碳、氢气等均为可燃性气体。

接触燃烧式气体传感器是将白金等金属线圈埋设在氧化催化剂中构成。使用时对金属线圈通以电流，使之保持在 300 ~ 600℃ 的高温状态，同时将元件接入电桥电路中的一个桥臂，调节桥路使其平衡。一旦有可燃性气体与传感器表面接触，燃烧热进一步使金属丝升温，造成器件阻值增大，从而破坏了电桥的平衡。其输出的不平衡电流或电压与可燃烧气体浓度成比例，检测出这种电流或电压就可测得可燃性气体的浓度。

半导体可燃气体敏感元件的结构主要有烧结型、厚膜型、薄膜型和旁热式，如图 4-2 所示。

接触燃烧式气体传感器的优点是对气体选择性好，线性好，受温度、湿度影响小，响应快。其缺点是对低浓度可燃性气体灵敏度低，敏感元件受到催化剂侵害后其特性锐减，金属丝易断。

(4) 电化学式气体传感器 电化学式气体传感器包括离子电极型、定电位型、伽伐尼电池型等种类。

1) 离子电极型气体传感器：这种传感器由电解液、固定参照电极和 pH 电极组成，通过透气膜使被测气体和外界达到平衡，在电解液中进行如下化学平衡（以被测气体 CO<sub>2</sub> 为例）：



根据质量作用法则，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的浓度一定与在设定范围内的 H<sup>+</sup> 浓度和 CO<sub>2</sub> 分压成比例，根据 pH 值就能知道 CO<sub>2</sub> 的浓度。适当的组合电解液和电极，可以检测多种气体，如 NH<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> (pH 电极)、HCN (Ag 电极)、卤素 (卤化物电极) 等传感器已实用化。

2) 伽伐尼电池式气体传感器：这种传感器中，由隔离膜、铅电极 (阳)、电解液、白金电极 (阴) 组成一个伽伐尼电池，当被测气体通过聚四氟乙烯隔膜扩散到达负极表面时，即可发生还原反应，在白金电极上被还原成 OH<sup>-</sup> 离子，阳极上铅被氧化成氢氧化铅，溶液中产生电流。这时流过外电路的电流和透过聚四氟乙烯膜的氧的速度成比例，阴极上氧分压

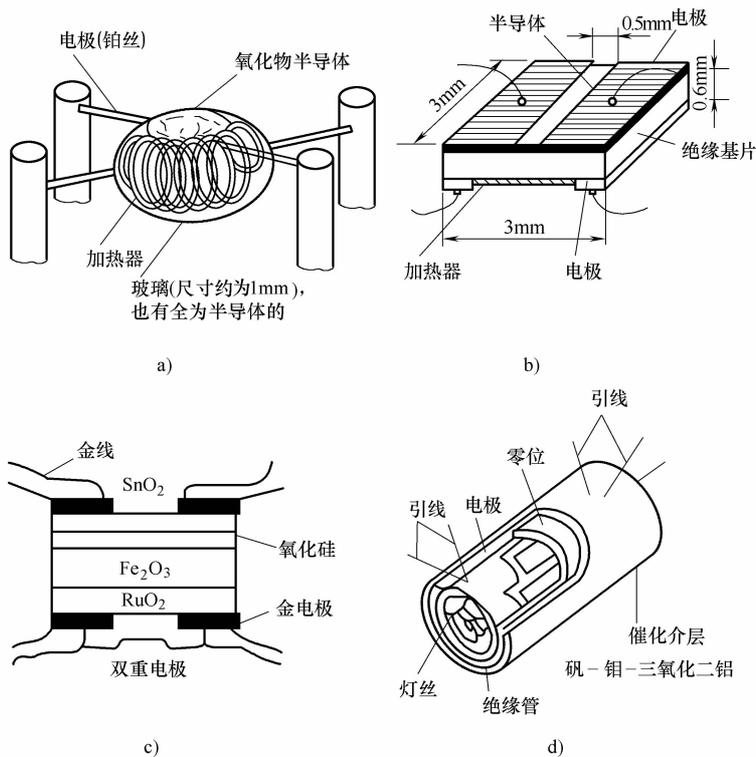


图 4-2 可燃气体传感器的结构

a) 烧结型 b) 厚膜型 c) 薄膜型 d) 旁热式

几乎为零，氧透过的速度和外部的氧分压成比例。

3) 定位电解法气体传感器：这种传感器又称控制电位电解法气体传感器，它由工作电极、辅助电极及参比电极以及聚四氟乙烯制成的透气隔离膜组成。在工作电极与辅助电极、参比电极间充以电解液，传感器工作电极（敏感电极）的电位由恒电位器控制，使其与参比电极电位保持恒定，待测气体分子通过透气膜到达敏感电极表面时，在多孔型贵金属催化作用下，发生电化学反应（氧化反应），同时辅助电极上氧气发生还原反应。这种反应产生的电流大小受扩散过程的控制，而扩散过程与待测气体浓度有关，只要测量敏感电极上产生的扩散电流，就可以确定待测气体的浓度。在敏感电极与辅助电极之间加一定电压后，使气体发生电解，如果改变所加电压，氧化还原反应选择性地进行，就可以定量检测气体。

(5) 集成型气体传感器 这种传感器有两类：一类是把敏感部分、加热部分和控制部分集成在同一基底上，以提高器件的性能；另一类是把多个具有选择性的元件，用厚膜或薄膜的方法制在一个衬底上，用微机处理和信号识别的方法对被测气体进行选择性的测定，既可对气体进行识别又可提高检测灵敏度。

#### 4.1.2 可燃烧性气体的气体传感器

检测可燃性气体，有利于提高人们的生活的质量，保护周围的生态环境，保障机器的正常安全生产，甚至保护人民的生命安全。

### 1. H<sub>2</sub> 传感器和最新敏感材料

采用 NO 直接氧化制备氮氧化物作为绝缘层制备高性能 Si 基 MOS 肖特基二极管式气体传感器，这种肖特基二极管式气体传感器具有高的响应灵敏度和好的响应重复性，可以探测浓度约为  $10^{-6}$  的氢气。现在在特定的高温环境下，检测气体有采用碳化硅代替硅，利用 Pt 作为电极，利用 N<sub>2</sub>O 氧化工艺制备金属-绝缘体-SiC 肖特基势垒二极管气体传感器超薄栅介质，这种传感器能在高温下稳定工作。

将光纤传输、标准具透射、钯膜的氢吸附、吸收光谱定量分析各种技术运用为一体，开发出了这种传感器。用一束单色光照射标准具，敏感材料钯吸附了 H<sub>2</sub>，氢气就会吸收单色光，分析吸收谱线可知氢气浓度。国外用 Pd/PVDF 膜制备了激光振幅可调的光学氢气传感器。该传感器的检测范围为 0.2% ~ 100%。

Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-H<sub>2</sub>OH<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 复合氧化物为固态电解质，利用混合压膜和蒸发的方法制作传感催化电极和参考电极，研制了室温全固态电解质氢气传感器。也有用质子交换膜为电解质，碳纸和铂黑分别为电极的扩散层和催化层，制作了恒电位式氢气传感器。通过在工作电极前面加设聚乙烯膜，增大氢气扩散阻力，可以将氢气氧化电流与氢气浓度之间的线性关系提高到氢气浓度。

半导体氢敏传感器是以金属钯 (Pd) 作为栅极，由 Pd-TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-Si 构成场效应晶体管，当钯栅场效应晶体管吸收氢气时，将使半导体的导电电子比例发生变化，因而使氢敏元件的阻值也随着被测氢气的浓度变化而变化，这种钯极场效应晶体管对氢气十分敏感，它具有吸附环境中氢气的功能，而对其他气体则表现惰性。这种氢敏场效应晶体管的特点是选择性强、灵敏度高、响应速度快、稳定性好等。其主要结构如图 4-3 所示。

为提高灵敏度，将 PtO-Pt 纳米粒子膜与 TiO<sub>2</sub>、SnO<sub>2</sub> 纳米粒子膜复合，使膜层结构得以优化，研制出具有双层结构复合膜的新型气体传感器。实验结果表明，PtO-Pt 纳米粒子膜的催化作用能显著提高 TiO<sub>2</sub> 和 SnO<sub>2</sub> 膜的氢敏性能，TiO<sub>2</sub>/PtO-Pt 复合膜和 SnO<sub>2</sub>/PtO-Pt 复合膜对空气中的氢气有很高的选择性。

### 2. CH<sub>4</sub> 传感器和最新敏感材料

主要有 SnO<sub>2</sub> 半导体传感器，为了提高灵敏度加入少量的 Pd、Sb、Y、Nb 和 In（现有报道三价铁离子 P 型掺杂）等元素并进行外层催化处理，催化层由 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Pt 组成，研制成能够探测  $(50 \sim 10000) \times 10^{-6}$  甲烷；此外还加入适量的溶剂 SnCl<sub>2</sub> 和少量的硅胶增强机械强度和表面孔隙率，元件采用 Pt-Ir 丝作为加热器，为了适应恶劣的环境，加隔膜，如图 4-4 所示。

光纤甲烷传感器，主要工作原理根据比尔-朗伯定理，实际应用时要解决参数过多的情况，所以有差分吸收法、透射法和利用二次谐波检测的方法。其中差分法根据的是波长分布相近的两个

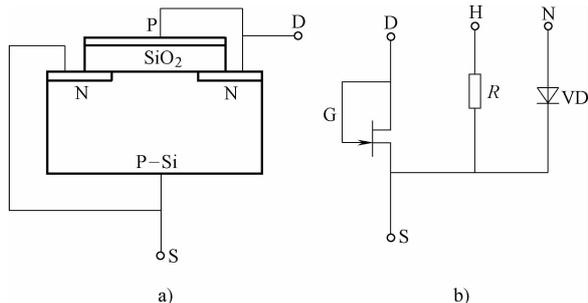


图 4-3 H<sub>2</sub> 传感器的主要结构

a) 场效应晶体管 b) 氢敏元件<sup>[23]</sup>

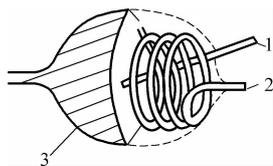


图 4-4 元件结构示意图

1—Pt 丝 2—Pt-Ir 丝圈  
3—气敏材料

单色光，最终得以下公式，采用双光路方法提高检测强度：

$$\alpha = \frac{1}{\alpha(\lambda_1 - \lambda_2)} \frac{I(\lambda_2) - I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} \quad (4-2)$$

式中， $\alpha$  为在一定波长下的单位浓度、单位长度介质的吸收系数； $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为相隔极近的两个波长； $I(\lambda_1)$ 、 $I(\lambda_2)$  为两种波长的透射光强。

而透射式对同一束光进行谐波调制，达到与差分一样的效果。基于二次谐波检测技术采用分布反馈式半导体激光器作为光源，通过光源调制实现气体浓度的谐波检测，利用二次谐波与一次谐波的比值来消除由光源的不稳定和变化所引起的检测误差。

光纤光栅是光纤芯区折射率受永久性、周期性调制的一种特种光纤，光纤光栅甲烷传感器以光纤光栅传感器对传感信息采用波长编码，因此它不受电磁噪声和光强波动的干扰，并且便于利用复用（波分、时分、空分）技术实现对多种传感量的准分布多点测量。满足公式  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$  的波长才能被反射出来，其他的光线具有很好的透射率，从而提高检测的精度。式中  $\lambda_B$  为 Bragg 波长（即光栅反射对应于自由空间中的中心波长）， $\Lambda$  为光栅周期， $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率（见图 4-5）。

国外有报道采用催化剂边界生长的 ZnO 薄膜技术，根据 ZnO 薄膜的电阻大小来响应和检测气体。另根据气体有特殊的选择性，研制聚合体膜通检测出气体渗透压力，从而得出气体浓度。新的检测方法有强度调制激光二极管作为光源，特殊的聚合体 Cryptophane A 和更大的有机 Cryptophane E 分子对甲烷气体分子吸收，Cryptophane 是一种特殊的有空穴合成有机体，如图 4-6 所示。

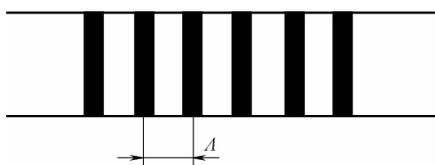


图 4-5 光栅周期

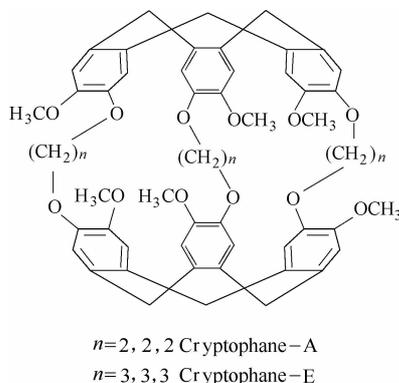


图 4-6 一种特殊的有空穴合成有机体

### 3. 一氧化碳气体传感器

电化学一氧化碳气体传感器采用密闭结构设计，其结构是由电极、过滤器、透气膜、电解液、电极引出线（管脚）、壳体等部分组成（见图 4-7）。

CO 气体传感器与报警器配套使用，是报警器中的核心检测元件，它是以定电位电解为基本原理。当一氧化碳扩散

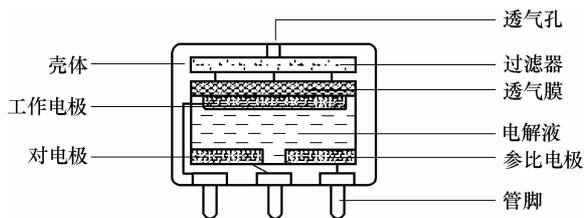


图 4-7 电化学一氧化碳气体传感器

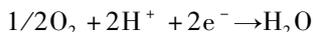
到气体传感器时，其输出端产生电流输出，提供给报警器中的采样电路，起着将化学能转化为电能的作用。当气体浓度发生变化时，气体传感器的输出电流也随之成正比变化，经报警器的中间电路转换放大输出，以驱动不同的执行装置，完成声、光和电等检测与报警功能，与相应的控制装置一同构成了环境检测或监测报警系统。

如图4-7所示，当一氧化碳气体通过外壳上的气孔经透气膜扩散到工作电极表面上时，在工作电极的催化作用下，一氧化碳气体在工作电极上发生氧化。

其化学反应式为



在工作电极上发生氧化反应产生的  $\text{H}^+$  离子和电子，通过电解液转移到与工作电极保持一定间隔的对电极上，与水中的氧发生还原反应。其化学反应式为



因此，传感器内部就发生了氧化-还原的可逆反应。其化学反应式为



这个氧化-还原的可逆反应在工作电极与对电极之间始终发生着，并在电极间产生电位差。由于在两个电极上发生的反应都会使电极极化，这使得极间电位难以维持恒定，因而也限制了对一氧化碳浓度可检测的范围。

为了维持极间电位的恒定，需要加入一个参比电极。在三电极电化学气体传感器中，其输出端所反映出的是参比电极和工作电极之间的电位变化，由于参比电极不参与氧化或还原反应，因此，它可以使极间的电位维持恒定（即恒电位），此时电位的变化就同一氧化碳浓度的变化直接有关。当气体传感器产生输出电流时，其大小与气体的浓度成正比。通过电极引出线用外部电路测量传感器输出电流的大小，便可检测出一氧化碳的浓度，并且有很宽的线性测量范围。这样，在气体传感器上外接信号采集电路和相应的转换和输出电路，就能够对一氧化碳气体实现检测和监控。

### 4.1.3 气体传感器的应用

随着工业及科研中使用气体做原料、燃料的增多，日常生活中煤气、液化气作为家庭燃料的普及，对气体的检测与控制显得日益重要。目前已有的气体传感器种类较多，但由于半导体气体传感器的突出优点使其应用相对较广。

气体传感器的线性一般较差，而气体检测的目的也多为报警与控制。在此以电阻式半导体气敏器件为例给出气体报警器与控制器的原理简图（见图4-8）以供参考。注意此类器件常设有加热丝（ $f_1$ 、 $f_2$ ）以加速被测气体的化学吸附和电离的过程，并烧去器件表面的污物（起清洁作用）。负载电阻  $R_L$  串联在传感器中，其两端加工作电压，在加热丝两端（ $f_1$ 、 $f_2$ ）加有加热电源。在洁净空气中，传感器的电阻较大，在负载上的输出电压较小；当在待测气体中时，传感器的电阻变小，则  $R_L$  上的输出电压较大。图4-8a为报警器，超过规定浓度时，发出声光报警；图4-8b为控制器，由  $R$  调节设定浓度，超过设定浓度时，比较器翻转，输出控制信号，由驱动电路带动继电器或其他元件。

(1) 气体报警器 这种报警器可根据使用气体种类，安放在易检测到气体泄漏的地方，这样就可随时监测气体是否泄漏，一旦泄漏气体达到危险浓度，便自动发出报警信号。

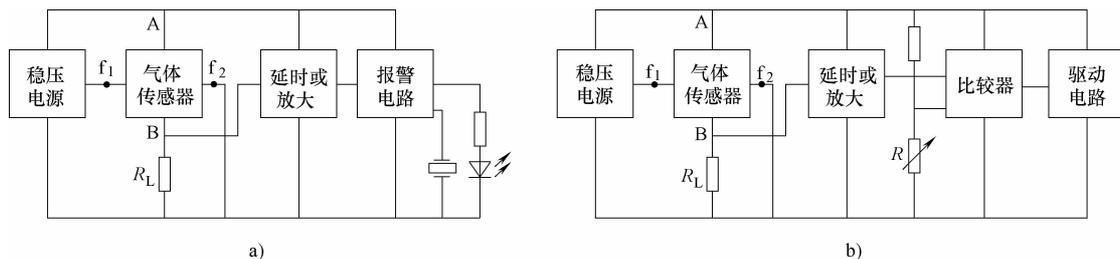


图 4-8 气体报警器与控制器的原理框图

a) 报警器 b) 控制器

图 4-9 是一种简易的家用气体报警器电路。气体传感器采用直热式气敏器件 TGS109。当室内可燃气体增加时，由于气敏器件接触到可燃气体而其阻值降低，这样流经测试回路的电流增加，可直接驱动蜂鸣器报警。

设计报警器时，重要的是如何确定开始报警的浓度。一般情况下，对于丙烷、丁烷、甲烷等气体，都选定在爆炸下限的十分之一。

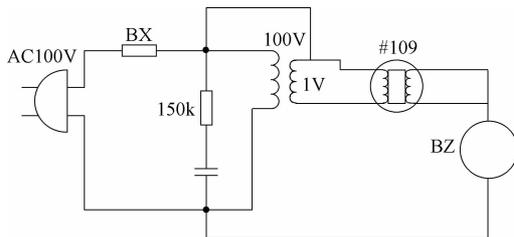


图 4-9 简单的家用气体报警器电路

(2) 自动空气净化换气扇 利用  $\text{SnO}_2$  气敏器件，可以设计用于空气净化的自动换气扇。图 4-10 是自动换气扇的电路。当室内空气污浊时，烟雾或其他污染气体使气敏器件阻值下降，晶体管 VT 导通，继电器动作，接通风扇电源，可实现电扇自动启动，排放污浊气体，换进新鲜空气。当室内污浊气体浓度下降到希望的数值时，气敏器件阻值上升，VT 截止，继电器断开，风扇电源切断，风扇停止工作。

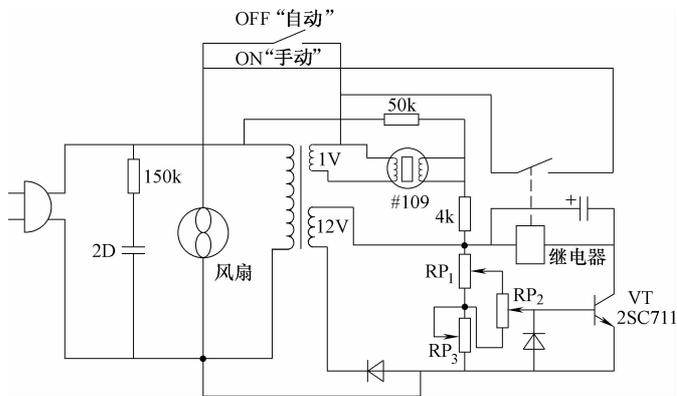


图 4-10 自动换气扇的电路

(3) 家用煤气安全报警器 家用煤气安全报警器的电路由两部分组成：一部分是煤气报警器，在煤气浓度达到危险界限前发生警报；另一部分是开放式负离子发生器，其作用是自动产生空气负离子，使煤气中主要有害成分一氧化碳与空气负离子中的臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 反应，生成对人体无害的二氧化碳。家用煤气安全报警器的电路如图 4-11 所示。

煤气报警电路，包括电源电路、气敏探测电路、电子开关电路和声光报警电路。开放式空气负离子发生器电路由  $R_1 \sim R_{13}$ 、 $C_5 \sim C_7$ 、 $\text{VD}_5 \sim \text{VD}_7$ 、 $3\text{CTS}_3$  及  $T_2$  等组成。这种负离子发生器，由于元器件少，结构简单，通常无需特别调试即能正常工作。减小  $R_{12}$  的阻值，可以使负离子浓度增加。

煤气报警电路，包括电源电路、气敏探测电路、电子开关电路和声光报警电路。开放式空气负离子发生器电路由  $R_1 \sim R_{13}$ 、 $C_5 \sim C_7$ 、 $\text{VD}_5 \sim \text{VD}_7$ 、 $3\text{CTS}_3$  及  $T_2$  等组成。这种负离子发生器，由于元器件少，结构简单，通常无需特别调试即能正常工作。减小  $R_{12}$  的阻值，可以使负离子浓度增加。

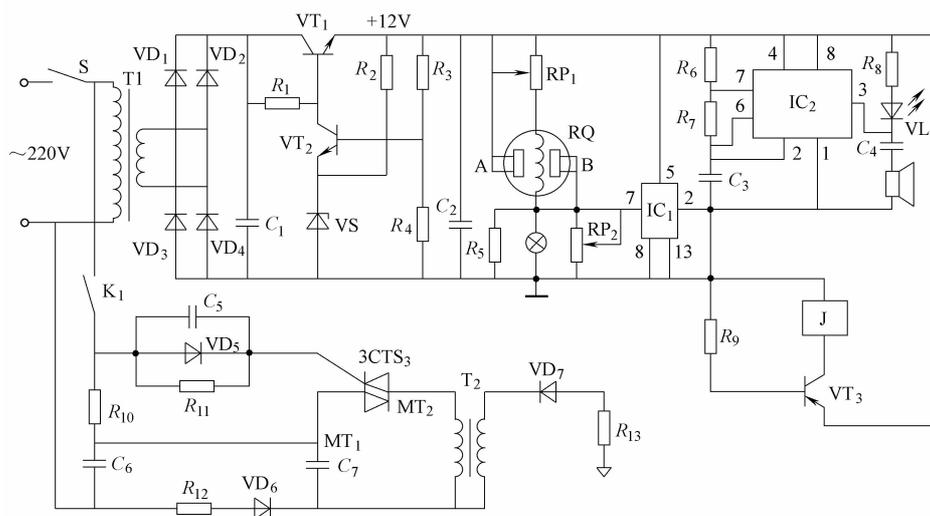


图 4-11 家用煤气安全报警器的电路

## 4.2 烟雾传感器

### 4.2.1 基本概念

烟雾是比气体分子大得多的微粒悬浮在气体中形成的，和一般的气体成分的分析不同，必须利用微粒的特点来检测。这类传感器多用于火灾报警器，也是以烟雾的有无决定输出信号的传感器，不能定量地连续测量。

(1) 散射式烟雾传感器 在发光管和光电器件之间设置遮光屏，无烟雾时接收不到光信号，有烟雾时借微粒的散射光使光电器件发出电信号，其原理如图 4-12 所示。这种传感器的灵敏度与烟雾种类无关。

(2) 离子式烟雾传感器 用放射性同位素镅 ( $\text{Am}241$ ) 等放射出微量的  $\alpha$  射线，使附近空气电离，当平行平板电极间有直流电压时，产生离子电流  $I_k$ 。有烟雾时，微粒将离子吸附，而且离子本身也吸收  $\alpha$  射线，其结果是离子电流  $I_k$  减小。若有一个密封有纯净空气的离子室作为参比元件，将两者的离子电流比较，就可以清除外界干扰，得到可靠的检测结果。此法的灵敏度与烟雾种类有关。其原理如图 4-13 所示。

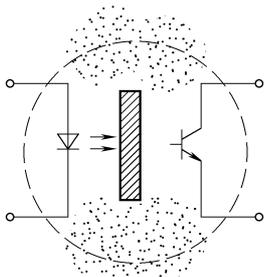


图 4-12 散射式烟雾传感器的原理

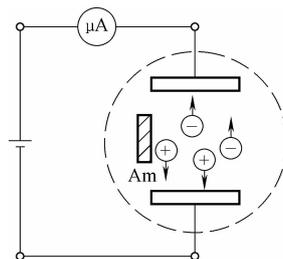


图 4-13 离子式烟雾传感器的原理

## 4.2.2 烟雾传感器在宾馆火灾自动报警系统中的应用

现代化的宾馆一般都具有多功能、综合性的特点，集餐饮、住宿、娱乐、购物为一体，很容易引发火灾。火灾自动报警系统，对于及早发现火灾和对火灾进行早期的扑灭，最大化地减小火灾造成的人员伤亡、经济损失及不良的社会影响起着重要的作用。

(1) 系统总体结构简化设计 火灾自动报警系统主要由触发器件、火灾报警装置以及联动控制系统等组成。系统的工作原理如图 4-14 所示。

(2) 触发器件 在火灾自动报警系统中，自动或手动产生火灾报警信号的器件，主要包括手动报警按钮和火灾探测器。手动报警按钮是手动方式产生火灾报警信号的器件，火灾探测器是能对火灾参数（如烟、温、光、火焰辐射、气体浓度等）响应，并自动产生火灾报警信号的器件。对于宾馆类建筑，为了精确预报失火位置，最大限度地减小探测器的误报率，选用感烟探测器、感温探测器来组成区域火灾探测器网络。客房内卧室、书房、餐厅、会客室使用带蜂鸣器底座探测器，客房内任意区域探测器向控制室发出火灾报警信号，同时触发蜂鸣器发出蜂鸣声，提醒处于熟睡或工作状态的客人快速撤离。

1) 感烟探测器：感烟式火灾探测器是利用一个小型烟雾传感器响应悬浮在其周围附近大气中的燃烧和（或）热解产生的烟雾气溶胶（固态或液态微粒）的一种火灾探测器。一般有离子式和光电式感烟火灾探测器。本系统选用光电式感烟探测器（见图 4-15）。光电式感烟探测器有一个烟雾检测室，里面设有一个光源和一个感光元件。光源的光线一般不能照射到感光元件上，但是当有烟雾进入后，光线在烟雾中产生散射，从而有部分光线射到感光元件上，烟雾越浓，散射到感光元件上的光线就越多，感光元件再把光信号转换为电信号进行输出火灾控制器。

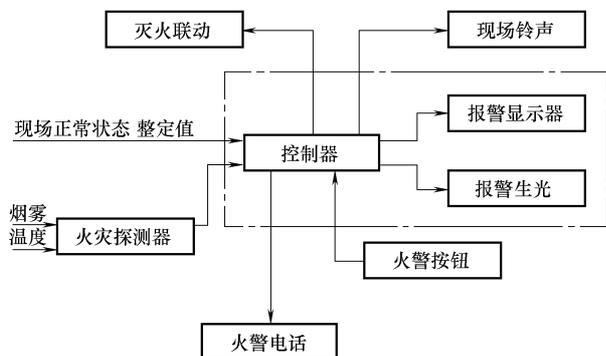


图 4-14 火灾自动报警系统工作原理图



图 4-15 光电式感烟火灾探测器

2) 感温探测器：在火灾初起阶段，使用热敏元件来探测火灾的发生是一种有效的手段。感温式火灾探测器可以根据其作用原理分为定温式火灾探测器、差温式火灾探测器和差定温火灾探测器三种。本系统选用空气管线型差温火灾探测器。它由空气管和膜盒以及电路部分组成，当环境温度缓慢变化时，空气管内空气受热膨胀后，能从膜盒的漏气孔泄出，因此不会推动波纹片，电接点不会闭合；当环境温度上升很快，空气管内的空气受热膨胀迅速，来不及从膜盒的漏气孔泄出，膜盒内压力增加，推动波纹片位移，使接点闭合，从而产生火灾报警信号。

(3) 火灾报警装置 在火灾自动报警系统中,用以接受、显示和传递火灾报警信号,并能发出控制信号和具有其他辅助功能的控制指示设备称为火灾报警装置。本系统采用火灾声光报警器,这是一种安装在现场的声光报警设备,当现场发生火灾并确认后,安装在现场的火灾声光报警器可由消防控制中心的火灾报警控制器启动,发出强烈的声光报警信号,以达到提醒现场人员注意的目的。考虑到探测器报警的可靠性,系统采用预警和火警两级报警方式。当区域内同种或两种探测器单回路报警时,系统发出一级报警,这需要工作人员进一步确认;当双回路报警或手动装置报警时,系统认为火灾发生,发出火灾警报,并通过消防控制系统启动灭火系统进行灭火。

(4) 联动控制系统 宾馆类建筑的火灾自动报警系统的联动设备主要由室内外消火栓系统、自动喷水灭火系统、防排烟系统以及火灾报警装置和消防应急照明等部分组成。

## 4.3 湿度与水分传感器

### 4.3.1 湿度与湿度传感器

#### 1. 湿度基本概念

随着现代工农业技术的发展及生活条件的提高,湿度的检测与控制成为生产和生活中必不可少的手段。例如:大规模集成电路生产车间,当其相对湿度低于30%时,容易产生静电而影响生产;一些粉尘大的车间,当湿度小而产生静电时,容易产生爆炸;纺织厂为了减少棉纱断头,车间要保持相当高的湿度(60%~75%RH);一些仓库(如存放烟草、茶叶、中药材等)在湿度过大时,易发生变质或霉变现象。在农业上,先进的工厂式育苗、食用菌的培养与生产、水果及蔬菜的保鲜等都离不开湿度的检测与控制。

湿度是指物质中所含水蒸气的量,目前的湿度传感器多数是测量环境中的水蒸气含量。通常用绝对湿度、相对湿度和露点(或露点温度)来表示。

(1) 绝对湿度 绝对湿度是指单位体积的气氛中水蒸气的质量,其表达式为

$$H_a = \frac{m_v}{V} \quad (4-3)$$

式中, $m_v$ 为待测气氛中的水蒸气质量; $V$ 为待测气体的总体积。

(2) 相对湿度 相对湿度为待测环境中水蒸气分压与相同温度下水的饱和水蒸气压的比值的百分数。这是一个无量纲量,常表示为%RH,其表达式为

$$H_r = \left( \frac{p_v}{p_w} \right)_T \times 100\% \text{ RH} \quad (4-4)$$

式中, $p_v$ 为待测环境的水蒸气分压; $p_w$ 为待测环境温度相同时水的饱和水蒸气压。

(3) 露点 在一定大气压下,将含水蒸气的空气冷却,当降到某温度时,空气中的水蒸气达到饱和状态,开始从气态变成液态而凝结成露珠,这种现象称为结露,此时的温度称为露点或露点温度。如果这一特定温度低于0℃,水蒸气将凝结成霜,此时称其为霜点。通常对两者不予区分,统称为露点,其单位为℃。

#### 2. 湿度传感器

湿敏元件是指对环境湿度具有响应或将湿度转换成相应可测信号的元件。湿度传感器是

由湿敏元件及转换电路组成的，具有把环境湿度转变为电信号的能力。湿度传感器的主要特性有以下几点：

1) 感湿特性：湿度传感器的特征量（如电阻、电容、频率等）随湿度变化的关系，常用感湿特征量和相对湿度的关系曲线来表示，如图 4-16 所示。

2) 湿度量程：表示湿度传感器技术规范规定的感湿范围。全量程湿度为（0 ~ 100）% RH。

3) 灵敏度：湿度传感器的感湿特征量（如电阻、电容等）随环境湿度变化的程度，也是该传感器感湿特性曲线的斜率。由于大多数湿度传感器的感湿特性曲线是非线性的，因此常用不同环境下的感湿特征量之比来表示其灵敏度的大小。

4) 湿滞特性：湿度传感器在吸湿过程和脱湿过程中吸湿与脱湿曲线不重合，而是一个环形回线，这一特性就是湿滞特性，如图 4-17 所示。

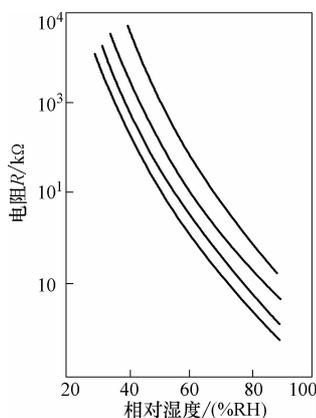


图 4-16 湿度传感器的感湿特性

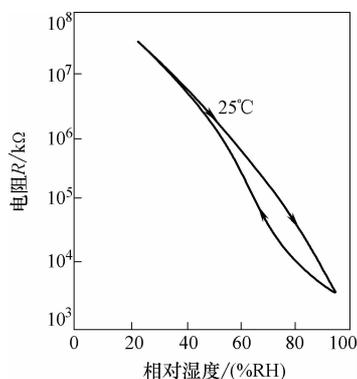


图 4-17 湿度传感器的湿滞特性

5) 响应时间：在一定环境温度下，当相对湿度发生跃变时，湿度传感器的感湿特征量达到稳定变化量的规定比例所需的时间。一般以相应的起始湿度和终止湿度这一变化区间的 90% 的相对湿度变化所需的时间来计算。

6) 感湿温度系数：当环境湿度恒定时，温度每变化 1℃ 所引起的湿度传感器感湿特征量的变化量。

7) 老化特性：湿度传感器在一定温度、湿度环境下存放一定时间后，其感湿特性将发生变化的特性。

湿度传感器种类繁多。按输出的电学量可分为电阻型、电容型、频率型等；按探测功能可分为绝对湿度型、相对湿度型、结露型等；按材料可分为陶瓷型、有机高分子型、半导体型、电解质型等。下面就材料不同分别加以介绍。

(1) 陶瓷型湿度传感器 陶瓷型湿度传感器的感湿机理，目前尚无定论，国内外学者主要提出了质子型和电子型两类导电机理，但这两种机理有时并不能独立地解释一些传感器的感湿特性，在此不再深入探究。只需要知道这类传感器是利用其表面多孔性吸湿进行导电，从而改变元件的阻值。这种湿敏元件随外界湿度变化而使电阻值变化的特性便是用来制造湿度传感器的依据。陶瓷型湿度传感器较成熟的产品有 MgCr-TiO<sub>2</sub> 系、ZnO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系、

ZrO<sub>2</sub> 系厚膜型、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜型、TiO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜型等。

1) MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 系湿度传感器: MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 系湿度传感器是一种典型的多孔陶瓷湿度测量器件。由于它具有灵敏度高、响应特性好、测湿范围宽和高温清洗后性能稳定等优点,目前已商品化,并得到广泛应用。MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 系湿度传感器的结构示意图如图 4-18 所示。

MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 系湿度传感器是以 MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 为基础材料,加入一定比例的 TiO<sub>2</sub> (20% ~ 35% mol/L) 制成的。感湿材料被压制成 4mm × 4mm × 0.5mm 的薄片,在 1300℃ 左右烧成,在感湿片两面涂布氧化钌 (RuO<sub>2</sub>) 多孔电极,并于 800℃ 下烧结。在感湿片外附设有加热清洗线圈,此清洗线圈主要是通过加热排除附着在感湿片上的有害气氛及油雾、灰尘,恢复对水蒸气的吸附能力。

2) ZrO<sub>2</sub> 系厚膜型湿度传感器: 由于烧结法制成的体型陶瓷湿度传感器结构复杂,工艺上一致性差,特性分散,近来,国外开发了厚膜陶瓷型湿度传感器,这不仅降低了成本,也提高了传感器的一致性。

ZrO<sub>2</sub> 系厚膜型湿度传感器的感湿层是用一种多孔 ZrO<sub>2</sub> 系厚膜材料制成的,它可用碱金属调节阻值的大小并提高其长期稳定性。其结构示意图如图 4-19 所示。

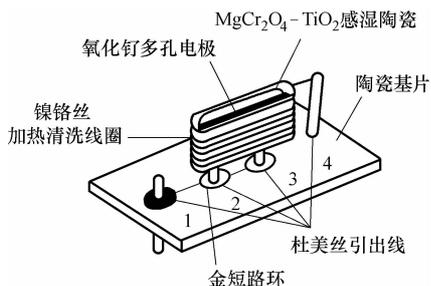


图 4-18 MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 系湿度传感器的结构示意图

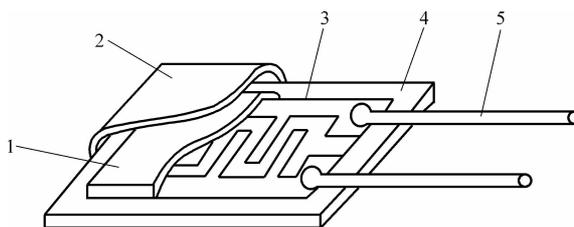


图 4-19 ZrO<sub>2</sub> 系湿度传感器的结构示意图

1—电极引线 2—印制的 ZrO<sub>2</sub> 感湿层 (厚为几十微米)  
3—瓷衬底 4—由多孔高分子膜制成的防尘过滤膜  
5—用丝网印刷法印制的 Au 梳状电极

(2) 有机高分子型湿度传感器 有机高分子型湿度传感器常用的有高分子电阻式湿度传感器、高分子电容式湿度传感器和结露传感器。

1) 高分子电阻式湿度传感器: 这种传感器的工作原理是由于水分子吸附在有极性基的高分子膜上,在低湿度下,因吸附量少,不能产生荷电离子,所以电阻值较高。当相对湿度增加时,吸附量也增加,大量的吸附水就成为导电通道,高分子电解质的正负离子对主要起到载流子作用,这就使高分子湿度传感器的电阻值下降。利用这种原理制成的传感器称为高分子电阻式湿度传感器。

2) 高分子电容式湿度传感器: 这种传感器是以高分子材料吸水后,元件的介电常数随环境相对湿度的改变而变化的原理制成的。元件的介电常数是水与高分子材料两种介电常数的总和。当含水量以水分子形式被吸附在高分子介质膜中时,由于高分子介质的介电常数 (3 ~ 6) 远远小于水的介电常数 (81),所以介质中水的成分对总介电常数的影响比较大,使元件对湿度有较好的敏感性能。其结构示意图如图 4-20 所示。以高分子电容式湿度传感

器为例，它是在绝缘衬底上制作一对平板金（Au）电极，然后上面涂敷一层均匀的高分子感湿膜做电介质，在表层以镀膜的方法制作多孔浮置电极（Au膜电极），形成串联电容。

3) 结露传感器：这种传感器是利用了掺入炭粉的有机高分子材料吸湿后的膨润现象。在高湿度下，高分子材料的膨胀引起其中所含炭粉间距变化而产生电阻突变。利用这种现象可制成具有开关特性的湿度传感器。其特性曲线如图 4-21 所示。

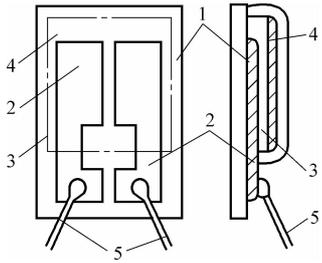


图 4-20 高分子电容式湿度传感器的结构示意图

1—微晶玻璃衬底 2—下电极 3—敏感膜  
4—多孔浮置电极 5—引线

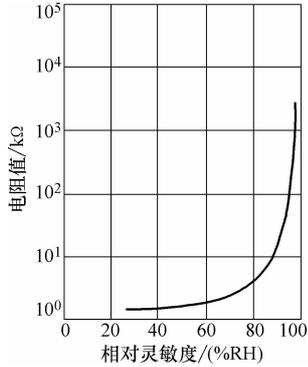


图 4-21 结露传感器的特性曲线

结露传感器是一种特殊的湿度传感器，它与一般湿度传感器的不同之处在于它对低湿度不敏感，仅对高湿度敏感。故结露传感器一般不用于测湿，而作为提供开关信号的结露信号器，用于自动控制或报警，如用于检测磁带录像机、照相机结露及小汽车玻璃窗除露等。

(3) 半导体型湿度传感器 此类传感器品种也很多，现以硅 MOS 型  $Al_2O_3$  湿度传感器为例说明其结构与工艺。传统的  $Al_2O_3$  湿度传感器的缺点是气孔形状大小不一，分布不匀，所以一致性差，存在着湿滞大、易老化、性能漂移等缺点。硅 MOS 型  $Al_2O_3$  湿度传感器是在硅单晶上制成 MOS 晶体管，其栅极是用热氧化法生长成的厚度为 80nm 的  $SiO_2$  膜，在此  $SiO_2$  膜上用蒸发及阳极化方法制得多孔  $Al_2O_3$  膜，然后再蒸镀上多孔金（Au）膜而制成的。这种传感器具有响应速度快、化学稳定性好及耐高温冲击等特点。其结构示意图如图 4-22 所示。

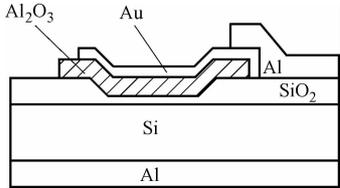


图 4-22 MOS 型  $Al_2O_3$  湿度传感器的结构示意图

### 4.3.2 含水量检测方法

通常将空气或其他气体中的水分含量称为湿度，将固体物质中的水分含量称为含水量。

固体物质中所含水分的重量与总重量之比的百分数，就是含水量的值。固体中的含水量可用下列方法检测。

(1) 称重法 将被测物质烘干前后的重量  $G_H$  和  $G_D$  测出，含水量便是

$$W = \frac{G_H - G_D}{G_H} \times 100\% \quad (4-5)$$

这种方法很简单，但烘干需要时间，检测的实时性差，而且有些产品不能采用烘干法。

(2) 电导法 固体物质吸水后电阻变小,用测定电阻率或电导率的方法便可判断含水量。例如,用专门的电极安装在生产线上,可以在生产过程中得到含水量数据。但要注意,被测物质的表面水分可能与内部含水量不一致,电极应设计成测量纵深部位电阻的形式。

(3) 电容法 水的介电常数远大于一般干燥固体物质,因此用电容法测含水量相当灵敏,造纸厂的纸张含水量便可用电容法测量。由于电容法是由极板间的电力线贯穿被测介质的,所以表面水分引起的误差较小。至于电容值的测定,可用交流电桥、谐振电路及伏安法等。

(4) 红外吸收法 水分对波长为  $1.94\mu\text{m}$  的红外射线吸收较强,并且可用几乎不被水分吸收的  $1.81\mu\text{m}$  波长作为参比。由上述两种波长的滤光片对红外光进行轮流切换,根据被测物对这两种波长的能量吸收的比值便可判断含水量。

检测元件可用硫化铅光敏电阻,但应使光敏电阻处在  $10\sim 15^\circ\text{C}$  的某一温度下,为此要用半导体制冷器维持恒温。这种方法也常用于造纸工业的连续生产线。

(5) 微波吸收法 水分对波长在  $1.36\text{cm}$  附近的微波有显著吸收现象,而植物纤维对此波段的吸收要比水小几十倍,利用这一原理可制成测木材、烟草、粮食、纸张等物质中含水量的仪表。微波法要注意被测物料的密度和温度对检测的影响,这种方法的设备稍为复杂一些。

### 4.3.3 湿度传感器的应用

自1938年美国的 F. W. Dummore 研制成功浸涂式氯化锂湿敏元件至今,已有几十种湿敏元件应运而生,但目前湿度传感技术的研究还远不如对温度等其他传感器技术研究得那么精确和完善。湿度较难检测的原因在于湿度信息的传递较复杂。湿度信息的传递必须靠其信息物质——水对湿敏元件直接接触来完成,因此,湿敏元件不能密封、隔离,必须直接暴露于待测的环境中。而水在自然环境中容易发生三态变化,当其液化或结冰时,往往使湿敏元件的高分子材料、电解质材料溶解,腐蚀或老化给测量带来不利。因此,目前湿敏元件在长期稳定性方面还存在一些问题,人们为了得到长期可靠的湿度传感器,有时宁可在测量精度、响应时间、湿度和温度特性、形状尺寸等方面作出一些牺牲。根据大工业自动化微机控制的需要,提出了湿度传感器微型化、集成化、廉价化的发展方向。

(1) 自动去湿装置 图4-23为自动去湿装置。H为湿度传感器,  $R_s$  为加热电阻丝,  $\text{VT}_1$  和  $\text{VT}_2$  接成施密特触发器,  $\text{VT}_2$  的集电极负载 K 为继电器线圈。在常温常湿情况下调好各电阻值,使  $\text{VT}_1$  导通,  $\text{VT}_2$  截止。当阴雨等使环境湿度增大而导致 H 的阻值下降达到某值时,  $R_F$  与  $R_2$  并联的阻值小到不足以维持  $\text{VT}_1$  导通,由于  $\text{VT}_1$  截止而使  $\text{VT}_2$  导通,其负载继电器 K 通电,常开触点 II 闭合,加热电阻丝

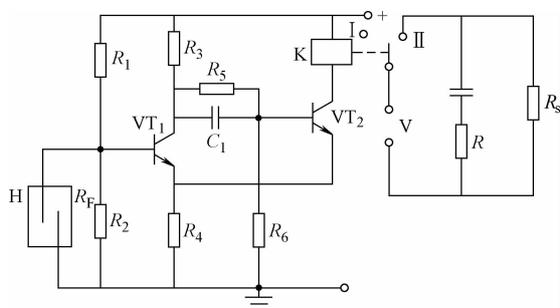


图4-23 自动去湿装置

$R_s$  通电加热,驱散湿气。当湿度减小到一定程度时,施密特电路又翻转到初始状态,  $\text{VT}_1$  导通,  $\text{VT}_2$  截止,常开触点 II 断开,  $R_s$  断电停止加热。从而实现了防湿自动控制。

(2) 便携式湿度计 湿度传感器必须组成相应的电路才能进行湿度的测量与控制。电桥电路是电阻式湿度传感器的主要测量电路形式之一。其框图如图 4-24 所示。

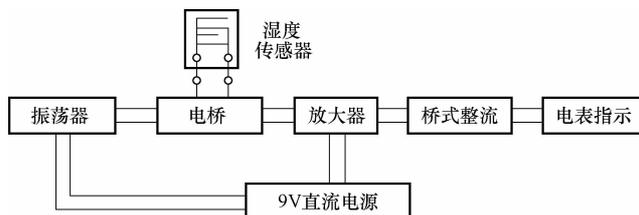


图 4-24 电阻式湿度传感器测量电路的框图

振荡器为电路提供交流电源。电桥的一臂为湿度传感器，由于湿度变化使湿度传感器的阻值发生变化，于是电桥失去平衡，产生信号输出。放大器可把不平衡信号加以放大，整流器将交流信号变成直流信号，由直流毫安表显示。振荡器和放大器都由 9V 直流电源供给。电桥法适合于氯化锂湿度传感器。便携式湿度计的具体电路如图 4-25 所示。

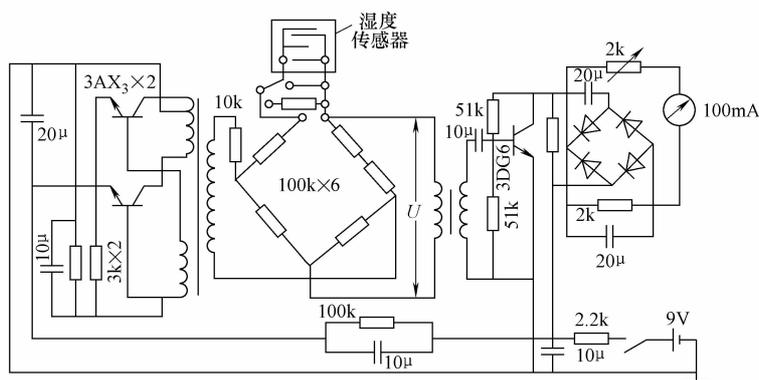


图 4-25 便携式湿度计的具体电路

## 4.4 pH 传感器

### 4.4.1 pH 概念及传感器

#### 1. pH 概念

氢离子浓度指数是指溶液中氢离子的总数和总物质的量的比。它的数值俗称“pH 值”。表示溶液酸性或碱性程度的数值，即所含氢离子浓度的常用对数的负值。

如果某溶液所含氢离子的浓度为  $0.00001\text{mol/L}$ ，它的氢离子浓度指数就是 5，计算方法为  $-1\text{g}[\text{浓度值}]$ 。与其相反，如果某溶液的氢离子浓度指数为 5，他的氢离子浓度为  $0.00001\text{mol/L}$ ，计算方法为  $10(-\text{浓度指数})$ 。

氢离子浓度指数一般在  $0 \sim 14$  之间，当它为 7 时溶液呈中性，小于 7 时呈酸性，值越小，酸性越强；大于 7 时呈碱性，值越大，碱性越强。

## 2. pH 的测量

有很多方法来测量溶液的 pH 值。

1) 在待测溶液中加入 pH 指示剂, 不同的指示剂根据不同的 pH 值会变化颜色, 根据指示剂的颜色就可以确定 pH 的范围。滴定时, 可以作精确的 pH 标准。

2) 使用 pH 试纸。pH 试纸有广泛试纸和精密试纸, 用玻璃棒蘸一点待测溶液到试纸上, 然后根据试纸的颜色变化并对照比色卡也可以得到溶液的 pH 值。上方的表格就相当于一张比色卡。pH 试纸不能显示出油分的 pH 值, 由于 pH 试纸以氢铁制成和以氢铁来量度待测溶液的 pH 值, 但油中不含有氢铁, 因此 pH 试纸不能显示出油分的 pH 值。

3) 使用 pH 计。pH 计是一种测量溶液 pH 值的仪器, 它通过 pH 选择电极 (如玻璃电极) 来测量出溶液的 pH 值。pH 计可以精确到小数点后两位。

此外还有许多其他更为先进, 更为精确的 pH 值测算方法和手段。

## 3. pH 控制

在各种化学工艺中, pH 值的控制非常重要。以锡镍合金电镀为例, 当 pH 值  $> 12$  时, 镀层无法沉积; 当 pH 值在  $7 \sim 9$  时, 铜的含量保持在一稳定值左右, 且镀层颜色随 pH 值增大而变淡。这是因为镀液 pH 值升高, 铜、镍金属络合物的稳定性增加, 铜、镍游离金属离子含量减少, 铜、镍离子沉积电势变得更负, 从而使镀层含锡量增加, 颜色变淡; pH 值  $< 6$  后, 阴极出现析氢现象, 镀层质量下降。如图 4-26 所示为 pH 值对铜镍含量的影响示意。

因此, 电镀自动生产线必须及时获取镀槽中镀液的 pH 值, 并随之做出工艺操作。通常的做法就是在镀槽或者其他槽液中安装在线 pH 传感器, 并与 PLC 相连, 这样就能够使 pH 值自动控制在一个很窄的范围内 (比如  $\pm 0.2 \sim 0.5 \text{pH}$ )。还可精确控制药剂的用量, 避免过量投药, 化学试剂消耗大大减少。由于是在线测试, 减少人为抽样实验的错误, 提高处理效率, 节省处理成本。

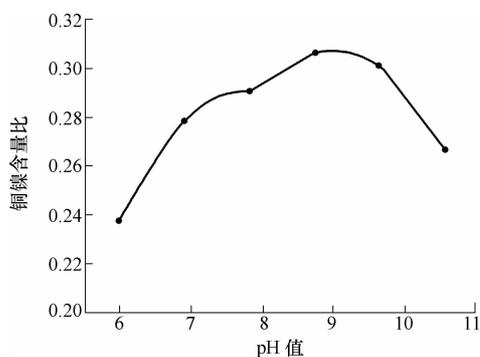


图 4-26 pH 值对铜镍含量的影响

### 4.4.2 在线 pH 传感器

#### 1. 在线 pH 传感器的原理

测定 pH 值, 就是测定溶液中  $\text{H}^+$  的活度, 通过 pH 计换算成 pH 值进行显示与控制。在线 pH 传感器一般都采用双高阻输入, 它既适用于不接地的试液的 pH 值的测定, 又适用于接地的试液, 如工业生产中反应槽内溶液 pH 值的原位监测等。

在线 pH 检测系统结构框图如图 4-27 所示。

在线 pH 传感器与数字电压表 (或智能仪表、电脑终端)、pH 发送器组成一种在线 pH 测量仪器。pH 指示电极、参比电极、第三电极 (溶液地电极)、温度传感器和被测试液组成测量电池。指示电极的电位随被测溶液的 pH 值变化而变化, 而参比电极的电位不随 pH 值的变化而变化, 它们符合能斯特方程中电位  $E$  与离子活度之间的关系。第三电极用来克服共模电压干扰和地电流的干扰。仪器设置了稳定的定位调节器和斜率调节器。前者是用来

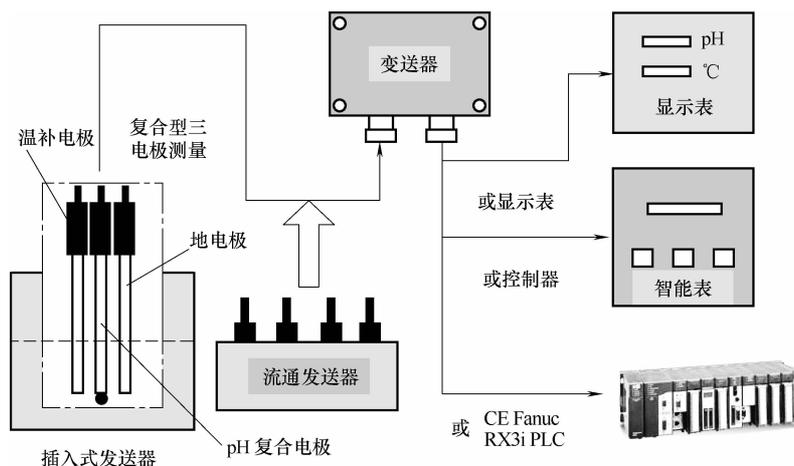


图 4-27 在线 pH 检测系统结构框图

抵消测量电池的起始电位，使仪器的示值与溶液的实际 pH 值相等；而后者通过调节放大器的灵敏度使 pH 值整量化；由温度传感器进行温度自动补偿。外形如图 4-28 所示。



图 4-28 pH 计外形

## 2. 在线 pH 传感器的技术指标

图 4-29 所示为电镀自动生产线所用的其中一种在线 pH 传感器（PC3 型），它具有如下技术指标：

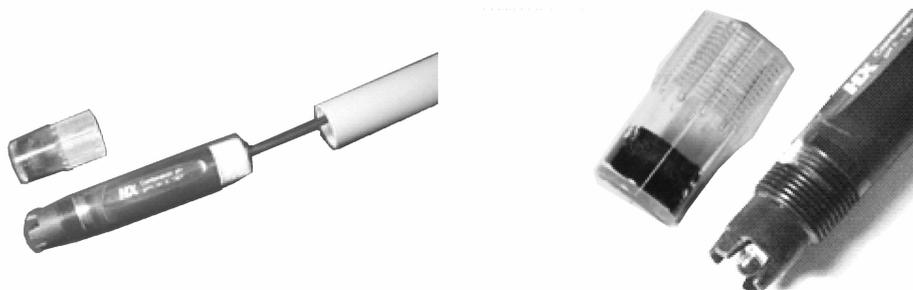


图 4-29 PC3 型在线 pH 传感器

1) 传感器为全密封设计,可在恶劣环境中(尤其是在电镀液中)使用,能在现场挂壁安装。

2) 测量范围:  $0 \sim 14\text{pH}$ ; 最小读数为  $0.01\text{pH}$ ; 精度为  $0.02\text{pH} \pm 1$  个字(工业上要求  $\pm 0.2\text{pH}$ )。

3) 输入阻抗  $\geq 1 \times 10^{12} \Omega$ 。

4) 具有温度自动补偿。

5) 由于采用双高阻,可以用高内阻参比电极,如固态参比电极等。

6) 变送输出:  $0 \sim 1400\text{mV}$  或  $4 \sim 20\text{mA}$  两种电流输出信号。 $0 \sim 1400\text{mV}$  输出信号是供数字电压表读数,每  $100\text{mV}$  代表 1 个  $\text{pH}$ 。 $4 \sim 20\text{mA}$  供远距离传输、控制仪表和上位机用,如需要电压输出信号变送时,可在电流输出两端自行并接  $250\Omega$ ,获取  $1 \sim 5\text{V}$  直流电压输出(并接电阻的精度直接影响变送输出电压的精度)。

7) 如果用智能仪表作为显示器,具有  $4 \sim 20\text{mA}$  或  $0 \sim 20\text{mA}$  输出、 $\text{pH}$  下限值和上限值报警或控制开关信号输出、可通过设置改变显示精度(最小读数为  $0.01\text{pH}$  或  $0.1\text{pH}$ )。

### 3. 测量电镀液 pH 值时的使用方法

在电镀液中使用在线 pH 传感器应按照以下使用方法进行:

1) 将 pH 电极、参比电极、温度传感器、地电极和电源分别插入如图 4-30 所示的相应的电极插座中。

2) 仪器接通电源预热 30min 后,将所有电极插入  $\text{pH} 6.86$  标准缓冲溶液(第一种)中,平衡一段时间(主要考虑电极电位和温度的平衡),待读数稳定后,调节定位调节器,使仪器显示 6.86。

3) 用蒸馏水冲洗电极并用吸水纸擦干后,插入  $\text{pH} 4.01$  标准缓冲溶液(第二种)中,待读数稳定后,调节斜率调节器,使仪器显示 4.01。仪器校正完毕,将密封盖盖上。

为了保证精度建议以上 2)、3) 两个标定步骤重复一两次。一旦仪器校正完毕,“定位”和“斜率”调节器不得有任何变动。

4) 用蒸馏水冲洗电极并用吸水纸擦干后,插入样品溶液中进行测量。

若测定偏碱性的溶液时,应用  $\text{pH} 6.86$  标准缓冲溶液(第一种)和  $\text{pH} 9.18$  标准缓冲溶液(第二种)来校正仪器。

变送器的校正周期因测量条件和精度要求而定,一般一周或一个月校正一次。校正的方法可以用标准溶液校正;也可以用在测量点取样,用精密 pH 计测量出 pH 值,据此对变送器进行校正。注意校正时标准溶液的温度与状态(静止还是流动)和被测液的温度与状态要尽量一致。

当遇到下列情况时仪器必须重新标定:①换用新电极;②“定位”或“斜率”调节器变动过。

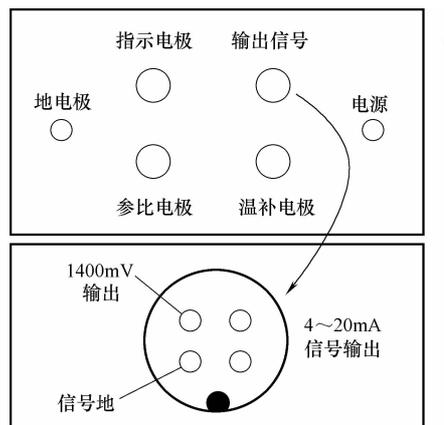


图 4-30 变送器各插座连接图  
(向插座看)

#### 4. 在线 pH 传感器的维护与注意事项

为了确保电镀控制工艺的准确性，在线 pH 传感器应注意以下事项：

1) 在线 pH 传感器的输入端的玻璃电极插座与插头必须保持干燥清洁，在电镀液环境中，尤其需要进行日常维护。

电镀处理场所，空气不可能干燥及非常清洁，故对传输线接插部分应用单面胶的绝缘胶带缠绕密实以防潮。对 pH 计最好外加透明有机玻璃罩严实。调校打开后应立即封好。

2) 新玻璃 pH 电极或长期干储存的电极，在使用前应在 pH 浸泡液中浸泡 24h 后才能使用。pH 电极在停用时，就将电极的敏感部分浸泡在 pH 浸泡液中。这对改善电极响应迟钝和延长电极寿命是非常有利的。在使用复合电极时，溶液一定要超过电极头部的陶瓷孔。常温电极一般在 5 ~ 60℃ 温度范围内使用。如果在低于 5℃ 或高于 60℃ 时使用，请分别选用特殊的低温电极或高温电极。

3) pH 浸泡液的正确配制方法：取 pH 4.00 缓冲剂（250mL）包，溶于 250mL 纯水中，再加入 56g 分析纯 KCl，适当加热，搅拌至完全溶解即成。用标准溶液标定时，首先要保证标准缓冲溶液的精度，否则将引起严重的测量误差。标准溶液可自行配制，但最好用标准缓冲溶液（见表 4-3）。

表 4-3 缓冲溶液的 pH 值与温度关系的对照表

温度/℃	溶液	0.05mol/kg	0.02mol/kg	0.01mol/kg
	pH	邻-苯二甲酸氢钾	混合磷酸盐	四硼酸钠
0		4.003	6.984	9.464
5		3.999	6.951	9.395
10		3.998	6.923	9.332
15		3.999	6.900	9.276
20		4.002	6.881	9.225
25		4.008	6.865	9.180
30		4.015	6.853	9.139
35		4.024	6.844	9.102
40		4.035	6.838	9.068
45		4.047	6.834	9.038
50		4.060	6.833	9.011

4) 玻璃 pH 电极和甘汞电极在使用时，必须注意内电极与球泡之间及参比电极内陶瓷蕊附近是否有气泡或污物存在，如有必须除去。

在线 pH 测量中，电极的沾污也是经常遇到的一个问题。在电极敏感膜上粘附某些物质，例如：油类、沥青、胶体物质、悬浮物及固体结块等，均会引起电极响应迟钝，甚至使电极失效。为了保证有效的连续测量，电极系统应安装清洗装置。常用的有定时自动刷洗、超声波清洗或定时喷水清洗等。另一种办法是在测量池前面安装过滤分离设备，将样品液流中可能沾污电极的物质分离去，然后进入测量池测量。还有一种最简单和可靠的方法，是定期进行人工清洗，具体期限应根据被测介质的液体情况及测试的精度要求综合考虑，一般为



# 第 5 章

## 光电传感器与仪表应用



### 导读

光电传感器是采用光电元件作为检测元件的传感器。它首先把被测量的变化转换成光信号的变化，然后借助光电元件进一步将光信号转换成电信号。光电传感器一般由光源、光学通路和光电元件三部分组成。光电检测方法具有精度高、反应快、非接触等优点，而且可测参数多，传感器的结构简单，形式灵活多样，因此，光电传感器在检测和控制中应用非常广泛。

跟光电传感器紧密相连的是光纤传感器、激光传感器。这两者都能在恶劣环境下表现出良好的传感器适用性，如化学工业、钢铁工业等。

而视觉传感器的低成本和易用性已吸引机器设计师和工艺工程师将其集成入各类曾经依赖人工、多个光电传感器或根本不检验的应用，其工业应用包括检验、计量、测量、定向、瑕疵检测和分拣等。

## 5.1 光电传感器与光电开关

### 5.1.1 光电传感器与光电开关概述

#### 1. 光电效应

光电效应是物理学中一个重要而神奇的现象，在光的照射下，某些物质内部的电子会被光子激发出来而形成电流，即光生电（见图 5-1）。光电现象由德国物理学家赫兹于 1887 年发现，而正确的解释为爱因斯坦所提出。科学家们对光电效应的深入研究对发展量子理论起了根本性的作用。

通过大量的实验（见图 5-2）总结出光电效应具有如下实验规律：

1) 每一种金属在产生光电效应时都存在一极限频率（或称截止频率），即照射光的频率不能低于某一临界值。相应的波长被称做极限波长（或称红限波长）。当入射光的频率低于极限频率时，无论多强的光都无光电子逸出。

2) 光电效应中产生的光电子的速度与光的频率有关，而与光强无关。

3) 光电效应的瞬时性。实验发现, 只要光的频率高于金属的极限频率, 光的亮度无论强弱, 光子的产生都几乎是瞬时的, 响应时间不超过  $1\text{ns}$ 。

4) 入射光的强度只影响光电流的强弱, 即只影响在单位时间内由单位面积逸出的光电子数目。

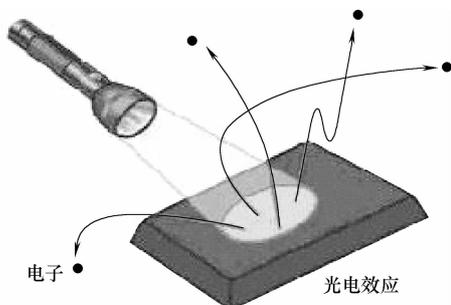


图 5-1 光电效应示意

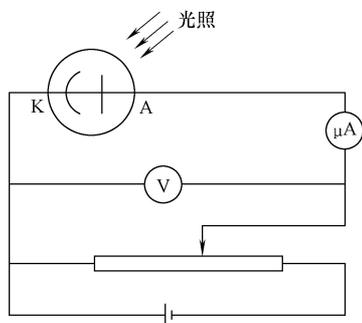


图 5-2 光电效应实验

根据元器件的不同, 光电效应分为三大类:

第一类是外光电效应: 在光线作用下, 能使电子逸出物体表面的称为外光电效应, 也称为光电子发射效应 (见图 5-3)。此类光电传感器主要有光电管、光电倍增管, 它属于真空光电元件。如图 5-4 所示为紫外线光电管。

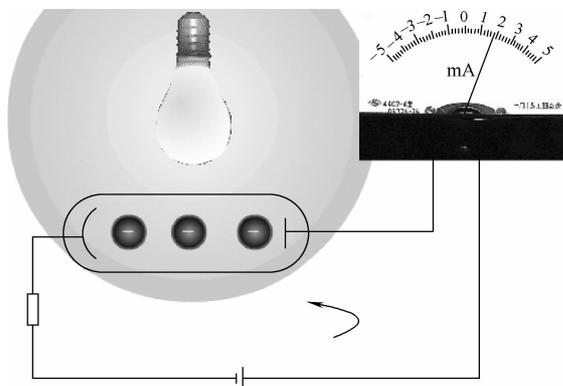


图 5-3 外光电效应

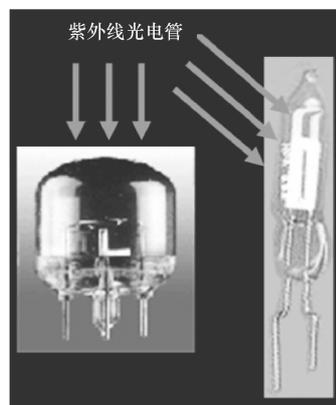


图 5-4 紫外线光电管

第二类是内光电效应: 在光线作用下能使物体电阻率改变的称为内光电效应, 又叫做光电导效应 (见图 5-5)。此类光电传感器有光敏电阻, 它属于半导体光电元件。

第三类是阻挡层光电效应: 在光线作用下能使物体产生一定方向电动势的称为阻挡层光电效应。此类传感器主要有光电池 (见图 5-6) 和光电晶体管等, 它属于半导体光电元件。

## 2. 光敏元器件与光电传感器

光敏元器件是指能将光信号转变为电信号的元器件, 有时候又会被称为“光电传感器”。光敏元器件与发光管配合, 可以实现电→光、光→电的相互转换。

常见的光敏元器件有光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等。

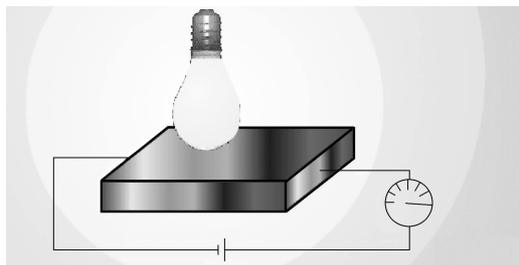


图 5-5 内光电效应

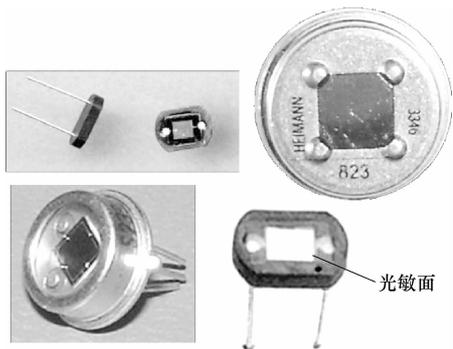


图 5-6 光电池

1) 光敏电阻是在陶瓷基片上沉积一层光敏半导体，再接上两根引线做电极制成的。光敏电阻常用的有碳膜电阻和金属膜电阻，受到光照射后阻值不会发生变化；而光敏电阻的阻值对光的变化则非常敏感，原因在于光敏电阻的材料和结构。它的外壳上有玻璃窗口或透镜，使光线能够入射到光敏半导体薄层上，随着入射光的增强或减弱，半导体的特征激发强度也不一样，使半导体内部的载流子数量发生变化，从而使光敏电阻的阻值跟着改变。常见的有紫外光敏电阻器、可见光敏电阻器、红外光敏电阻器几种，对应的波长不同，使用时不能混淆。光敏电阻的外形及电路符号如图 5-7 所示。

光敏电阻的主要参数有：①暗电阻 ( $R_D$ )：光敏电阻器在无光照射时的电阻值称为暗电阻；②亮电阻 ( $R_L$ )：光敏电阻器在受到光照射时所具有的阻值称为亮电阻；③峰值波长：光敏特性响应最佳时所对应的波长。

2) 光敏二极管是由一 PN 结构成的半导体器件。不是用作整流元件，而是通过它把光信号转换为电信号，即它是一种光电转换器件。如图 5-8 所示，光敏二极管的两管脚有正、负极之分，靠近管脚和色点的是正极，另一管脚为负极；较长的一脚为正极，较短的一脚为负极。

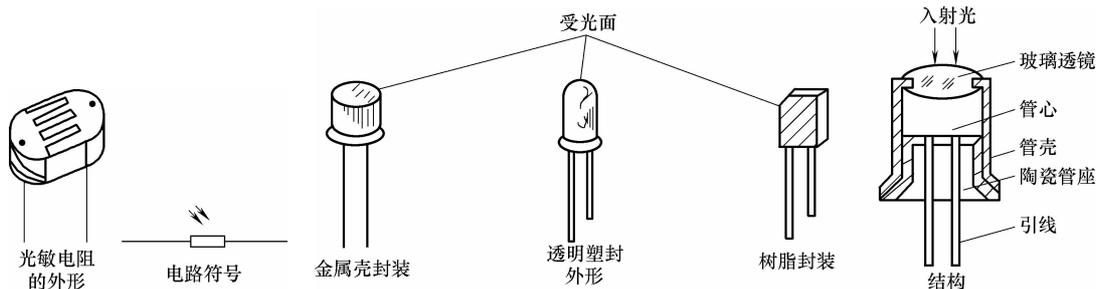


图 5-7 光敏电阻的外形及电路符号

图 5-8 光敏二极管的外形与结构

光敏二极管是在反向电压下工作的，在黑暗状态下，由于本征激发微弱，反向电流（此时电流称为暗电流）很小。当有光照时，随着本征激发的增强，少数载流子浓度增加，使得反向电流迅速增大到几十微安，此时的电流称为光电流。光照的强弱变化引起了光敏二极管光电流大小的变化，这样就可以很容易地实现光电信号的转换。在入射光照强度一定时，光敏二极管的反向电流为恒值，与所加反向电压大小基本无关。

光敏二极管的检测方法：①用万用表  $R \times 100$  或  $R \times 1k$  档，与测普通二极管一样，其正向电阻应为  $10k\Omega$  左右；②对掉两表笔，使光敏二极管工作在反向状态，用一物体遮住光敏二极管的透明窗口，测得的电阻值应接近无穷大；③去掉遮光物，表笔指针应向右偏转至几千欧处，光线越强，电阻值越小。若测得的正反向电阻都是无穷大或零，说明管子已损坏。

3) 光敏二极管能实现光电转换，但灵敏度低，使用光敏晶体管就大大提高了光电转换的灵敏度。光敏晶体管为 NPN 结构，基极即为光射窗口，因此大多数光敏晶体管只有集电极和发射极两个管脚，也有基极有引出脚的，作为温度补偿用，不用时剪去。管脚排列如图 5-9 所示，靠近色点标志的是发射极，较远的是集电极，引线较长的是基极。

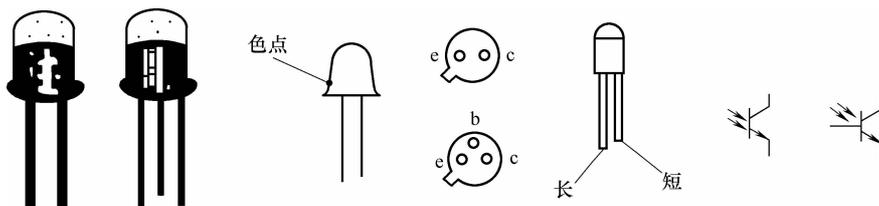


图 5-9 光敏晶体管管脚排列

实际应用光敏晶体管作为接收器件时，为提高接收灵敏度，可给它一个适当的偏置电流即施加一个附加光照，使其进入浅放大区，实际安装时发光二极管不要挡住晶体管的受光面，以免影响遥控信号的接收。采用这种办法可以非常有效地提高接收灵敏度，增大遥控距离。

光敏晶体管的检测如图 5-10 所示。①用遮光物遮住光敏晶体管的窗口，没有光照，光敏晶体管没有电流，测得的阻值应为无穷大；②去掉遮光物，使光敏晶体管的窗口朝向光源，晶体管导通，万用表的指针向右偏转至  $1k\Omega$  左右，指针偏转角的大小反映了管子的灵敏度。

### 3. 光电开关

光电开关是传感器大家族中的成员，它把发射端和接收端之间光的强弱变化转化为电流的变化以达到探测的目的。以红外线光电开关为例，其所发射的红外线属于一种电磁射线，其特性等同于无线电或 X 射线。人眼可见的光波是  $380 \sim 780nm$ ，发射波长为  $780nm \sim 1mm$  的长射线称为红外线，一般红外线光电开关优先使用的是接近可见光波长的近红外线。图 5-11 所示为各种不同频率与波长的电磁射线。

图 5-12 为光电开关的工作原理示意，由光电开关内部振荡回路产生的调制脉冲先经反射电路后，由发射管辐射出光脉冲；当被测物体进入受光器作用范围时，被反射回来的光脉冲进入光敏二极管，并在接收电路中将光脉冲解调为电脉冲信号，再经放大器放大和同步选通整形，然后用数字积分或 RC 积分方式排除干扰，最后经延时（或不延时）触发驱动器输

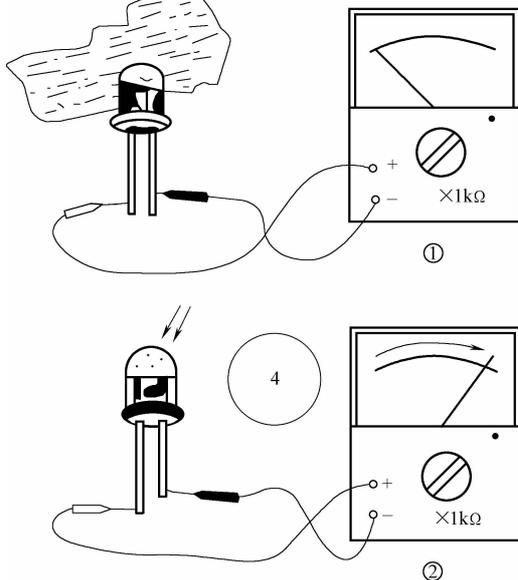


图 5-10 光敏晶体管的检测

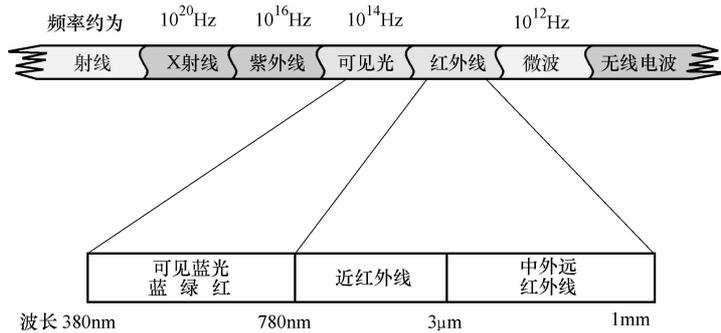


图 5-11 电磁射线

出光电开关控制信号。

常用光电开关的分类是按检测方式来划分的，其可分为反射式、对射式和镜面反射式等几种类型。对射式检测距离远，可检测半透明物体的密度（透光度）。反射式的工作距离被限定在光束的交点附近，以避免背景影响。镜面反射式的反射距离较远，适宜作远距离检测，也可检测透明或半透明物体。具体反射率见表 5-1。

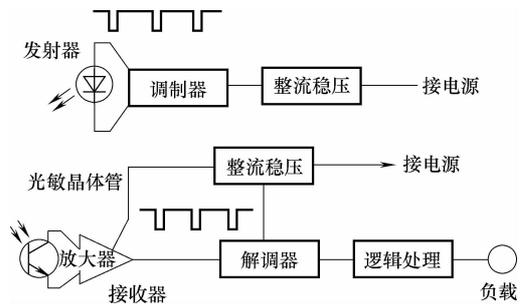


图 5-12 光电开关的工作原理

表 5-1 镜面反射式的具体反射率

材 料	反 射 率	材 料	反 射 率
白画纸	90%	不透明黑色塑料	14%
报纸	55%	黑色橡胶	4%
餐巾纸	47%	黑色布料	3%
包装箱硬纸板	68%	未抛光白色金属表面	130%
洁净松木	70%	光泽浅色金属表面	150%
干净粗木板	20%	不锈钢	200%

图 5-13 所示为直接反射光电开关，它是一种集发射器和接收器于一体的传感器，当有被检测物体经过时，将光电开关发射器发射的足够量的光线反射到接收器，于是光电开关就产生了开关信号。当被检测物体的表面光亮或其反光率极高时，直接反射式的光电开关是首选的检测模式。

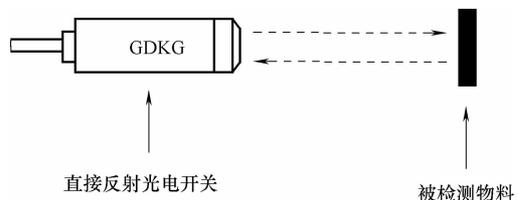


图 5-13 直接反射光电开关

由于光电开关输出回路和输入回路是电隔离的（即电绝缘），所以它可以在许多场合得到应用，如物位检测、液位控制、产品计数、宽度判别、速度检测、定长剪切、孔洞识别、信号延时、自动门传感、色标检出、冲床和剪切机以及安全防护等诸多领域。此外，利用红外线的隐蔽性，还可在银行、仓库、商店、办公室以及其他需要的场合作为防盗警戒之用。

光电开关是现代微电子技术发展的产物，一般具有如下优点：

- 1) 具有自诊断稳定工作区指示功能，可及时告知工作状态是否可靠。
- 2) 对射式、反射式、镜面反射式等光电开关都有防止相互干扰功能，安装方便。
- 3) 响应速度快，高速光电开关的响应速度可达到 0.1ms，每分钟可进行 30 万次检测操作，能检出高速移动的微小物体。

### 5.1.2 光敏器件的应用

#### 1. 常见的光电转换电路

根据光敏器件的不同，可以分为以下几种光电转换电路。

- (1) 光敏电阻测量电路（见图 5-14）
- (2) 光敏晶体管测量电路（见图 5-15）

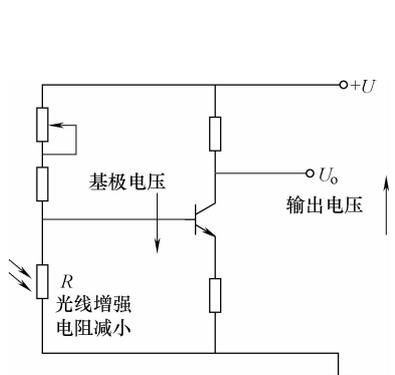


图 5-14 光敏电阻测量电路

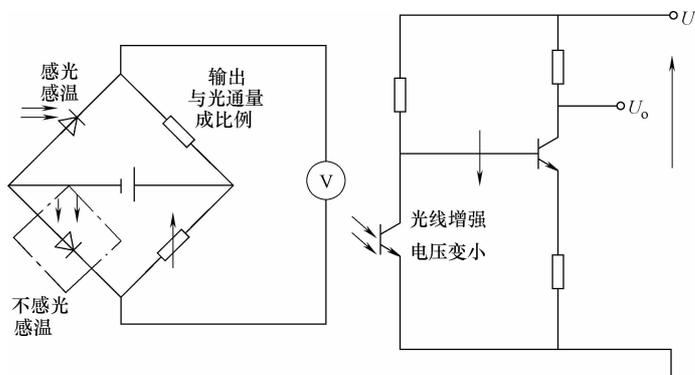


图 5-15 光敏晶体管测量电路

- (3) 光电池测量电路（见图 5-16）

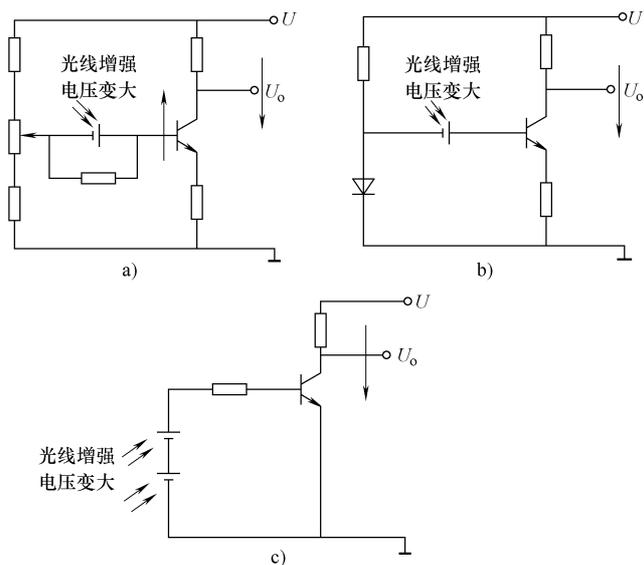


图 5-16 光电池测量电路

(4) 使用运算放大器的光敏元件测量电路 (见图 5-17)

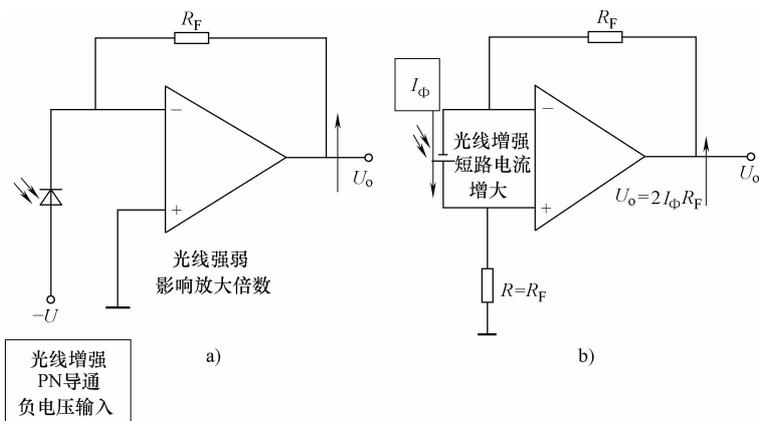


图 5-17 使用运算放大器的光敏元件测量电路

2. 光敏电阻控制路灯开关

电路如图 5-18 所示, 电路中使用一只负阻发光二极管 VL, 这种二极管不仅具有普通发光二极管的发光特性, 还具有负阻特性 (这里只用到其负阻特性, 没有用其发光特性)。当外加电压低于其转折电压时, 便会导通, 导通后的正向电压为 1.8V 左右, 这种二极管的转折电压分为 5V、10V、15V、20V, 这里选为 5V 档。

白天, 光敏电阻  $R_G$  两端的电压较低, 小于 VL 的转折电压 5V, VL 关断, 双向晶闸管 VS 也关断, 灯 H 不亮。天黑时,  $R_G$  两端电压上升 (阻值增大), 当达到 5V 时, VL 导通, VS 被触发导通, 灯 H 点亮。深夜,  $R_G$  阻值最大, 但流向 VS 的门控制电流经  $VD_1$  的稳压作用, 最大也只有 0.2mA 左右。凌晨,  $R_G$  阻值逐渐减小, 其两端电压也逐渐下降, 当降到一定值 (3V) 时, VS 会因为门极触发电流太小而关断, 或 VL 会因正向电流太小而关掉, 使 VS 截止, 照明灯 H 熄灭。这要求 VL 的维持电流尽可能小, 最好在  $50\mu A$  以下。

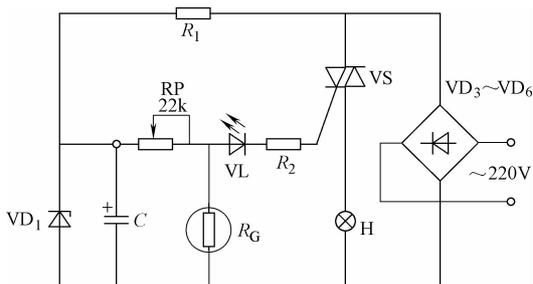


图 5-18 光敏电阻控制路灯开关

3. 光敏二极管在声控光控智能开关中的应用

声控光控智能开关为一种节能、方便的开关, 它可以用于办公楼、住宅、公寓、工厂等一切需要人到开灯、人走关灯的场所。该电路如图 5-19 所示, 以时基电路 IC 即 NE555 为核心器件, 构成稳态电路。

白天, 光敏二极管  $VD_1$  受到光线的影响, 阻值变小,  $RP_2$  与  $VD_1$  的分压值较低, IC 的④脚电压很低, IC 被强制复位, 此时即使驻极体传声器 BM 接收到声音, IC 的第③脚输出端仍呈低电平。由于双向晶闸管 VS 无触发信号, 呈截止断开状态, 灯泡 H 不亮。

夜晚, 由于光敏二极管  $VD_1$  不受光照, 因此阻值增大, IC 的④脚电压也升高, 强制复位消除。当有声响时, 驻极体传声器 BM 将声音信号转换成电信号, 并加在晶体管  $VT_1$  的基极,  $VT_1$  放大的电信号加至 IC 的第②脚, IC 的输出端第③脚由低电平转为高电平, 双向晶闸管 VS

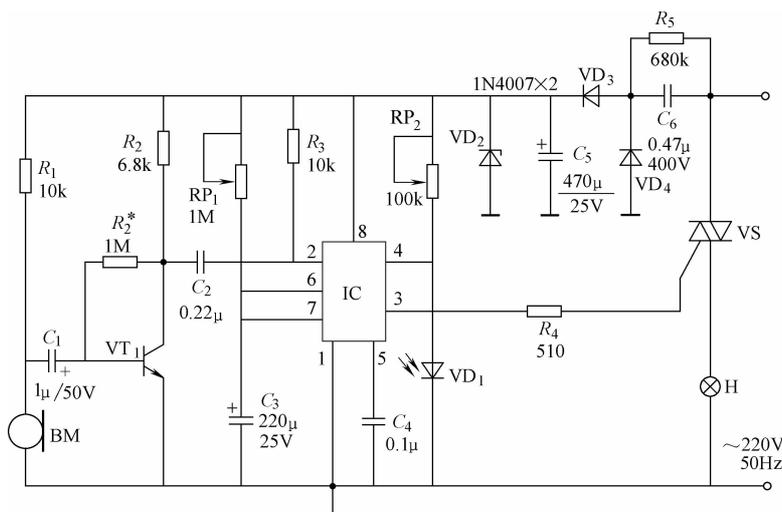


图 5-19 光敏二极管在声控光控智能开关中的应用

被触发后导通，灯泡 H 点亮。声音消失后，整个电路仍处于稳态，当电容  $C_3$  上的电压充至 IC 第⑥脚的阈值电压时，电容  $C_3$  通过 IC 的第⑦脚放电，整个电路又回到初始状态。

### 5.1.3 光电开关的接线方式

在日常应用中，光电开关经常是被接入到继电器控制回路或 PLC 控制回路中，在这里罗列了几乎所有的光电开关接线方式。

#### 1. 光电开关 DC 二线直流

光电开关采用 DC 二线直流是最常用的方式之一（见图 5-20a），它一般具有以下技术指标：接线电压为 DC10 ~ 30V（或 DC10 ~ 65V）；常开触点或者常闭触点；具备短路保护；漏电流小于等于 0.5mA；电压降小于 5V。

对于二线直流的光电开关来说，其原理如图 5-20b 所示，一般不能进行串联或者并联连接。

#### 2. 光电开关 DC 三线直流

光电开关采用 DC 三线直流也是最常用的方式之一（见图 5-21a），它一般具有以下技

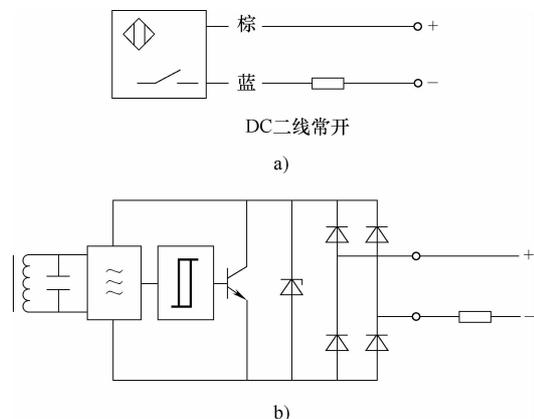


图 5-20 光电开关 DC 二线直流接线图与原理图

a) 接线图 b) 原理图

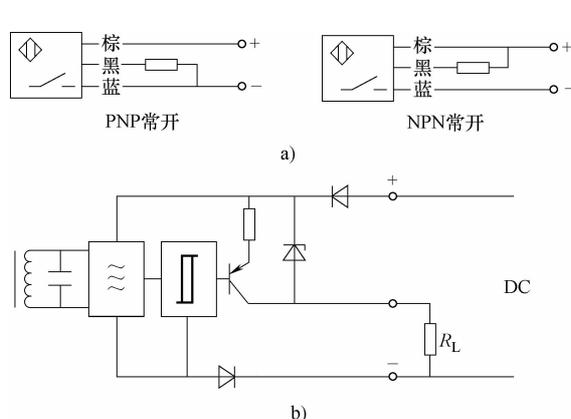


图 5-21 光电开关 DC 三线接线图与原理图

a) 接线图 b) 原理图

技术指标：接线电压为 DC10 ~ 30V（或 DC10 ~ 65V）；常开触点（NO）或者常闭触点；具备短路保护；电压降小于 1.8V。

光电开关 DC 三线直流原理图如图 5-21b 所示。

这类光电开关串联时，电压降相加，单个光电开关的准备延时时间相加。如果光电开关并联，需要采用如图 5-22 所示的电路。

### 3. 光电开关 DC 四线直流

光电开关采用 DC 四线直流不常见（见图 5-23a），其技术指标与 DC 三线直流相同，也允许光电开关串联或并联。光电开关 DC 四线直流原理图如图 5-23b 所示。

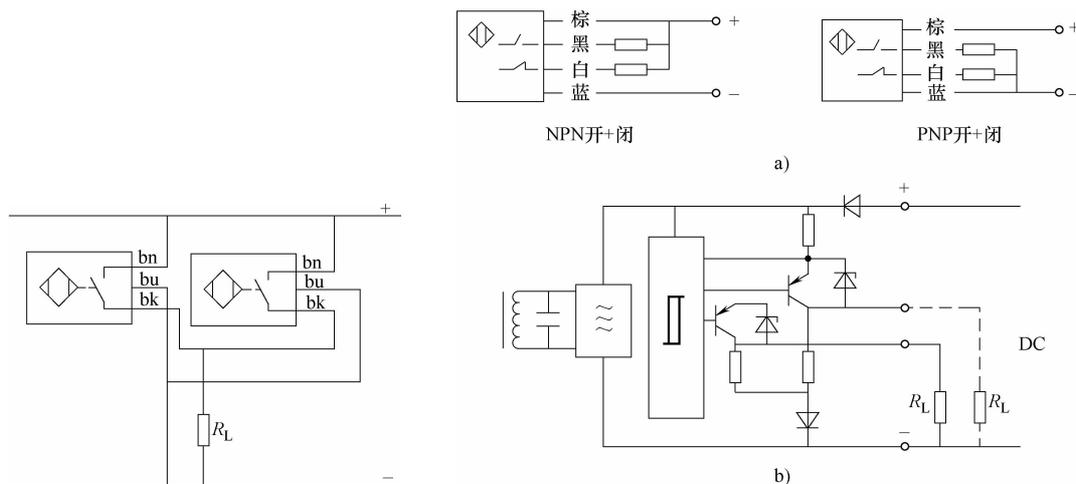


图 5-22 光电开关并联

图 5-23 光电开关 DC 四线接线图与原理图

a) 接线图 b) 原理图

### 4. 光电开关 AC 二线交流

光电开关采用 AC 二线交流的接线如图 5-24 所示，其技术指标一般为：接线电压为 AC20 ~ 250V；常开触点或者常闭触点；漏电电流小于等于 1.3mA；电压降小于 6.5V。

这类光电开关允许进行串联，如图 5-25 所示，需要注意的是：

- 1) 常开触点：“与”逻辑；
- 2) 常闭触点：“或非”逻辑；

3) 串联时，传感器上的电压降相加，它减去了负载上可以利用的电压，因此不能低于负载最低工作电压，另外还需要注意电网的电压波动。

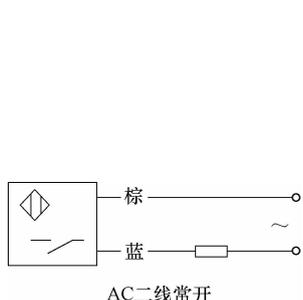


图 5-24 光电开关二线交流接线图

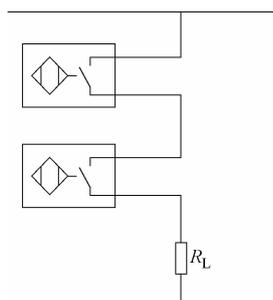


图 5-25 光电开关 AC 二线串联示意图

在实际应用中，机械开关经常会与光电开关进行串联，具体接线如图 5-26 所示。当光电开关处于断开触点，电源电压被断开，若在光电开关衰减期间机械触点闭合会使光电开关短时间内出现功能障碍。光电开关准备延时时间小于等于 80ms，在这个时间内就会产生故障，或者失灵。补偿办法就是在机械触点上并联上一个电阻，并联上的电阻使光电开关的电源没有在机械触点上中断，机械触点无论是断开和闭合，光电开关都会正常工作。对于 AC200V 进线电源来说，电阻阻值大约为  $82\text{k}\Omega/1\text{W}$ 。

AC 二线光电开关还可以进行并联，如图 5-27 所示。

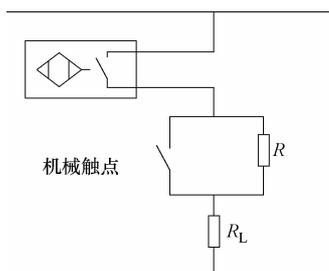


图 5-26 机械开关和光电开关串联

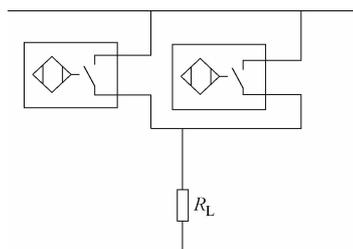


图 5-27 AC 二线光电开关并联

并需要注意以下几点：

- 1) 常开触点：“与”逻辑；
- 2) 常闭触点：“或非”逻辑
- 3) 当传感器常开触点闭合时，另一个并联的传感器被短路，当传感器断开时就需要一个准备的延时时间（ $\leq 80\text{ms}$ ）。补偿办法就是在触点上串联一个电阻可以保证传感器的最小工作电压，避免了触点断开之后的准备时间。

#### 5.1.4 光电开关的具体应用

在日常应用中，光电开关经常是被接入到继电器控制回路或 PLC 控制回路，在这里列出了几乎所有的光电开关接线方式。

##### 1. 光电开关在造纸断纸检测中的应用

在纸厂的断纸中，通常采用手动将纸幅打断，而经常由于一定的误差性，导致了一些不必要的卷缸和缠辊现象发生，从而影响了纸机的运行效率。这里采用了一种自动断纸检测系统，就是采用在检测点设置光电开关，在断纸位置处设置断纸气刀，然后通过 PLC 控制，达到自动监测断纸点位置的效果。同时设置手动或自动方式，控制气刀将纸幅在断纸点打断。

断纸监测系统的硬件组成主要有以下几个部分：

- 1) 光电开关：现场开关元件，负责纸幅断裂信号的监测和状态输入。
- 2) PLC：处理断纸监测点光电开关的输入信号，对此进行编程，并输出信号给不同部位的气刀将纸幅打断，以及输出相应的信号。
- 3) 气刀：负责将纸幅打断，以防止产生不必要的卷缸和缠缸现象，常采用气动装置。

在纸厂中常用的光电开关可以采用如图 5-28 所示的任意一种。纸厂所用的光电开关还应具有：电源指示、自诊断 LED 指示器、光敏度电位计调节旋钮、低光警告指示和密封防水等级 IP65。

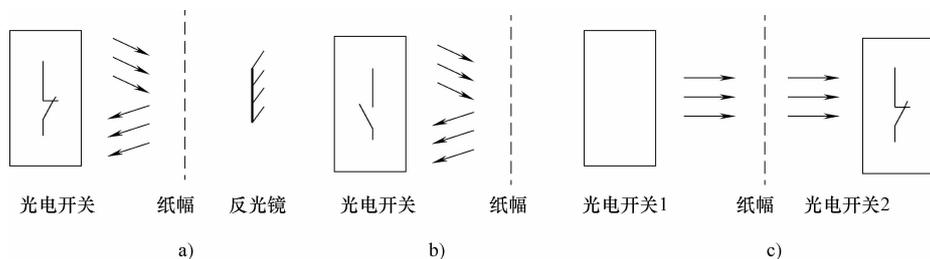


图 5-28 断纸监测光电开关工作原理

图 5-29 所示是纸厂造纸生产线中分别设置的七处断纸检测点（1#~7#光电开关）和四处断纸气刀（No. 1~No. 4）。

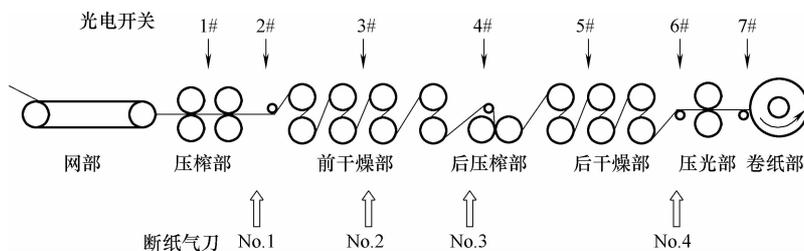


图 5-29 纸机断纸检测点和气刀位置示意图

## 2. 光电开关在煤矿原煤车间中的应用

某煤矿原煤车间动筛系统的煤溜槽上下落差达 38m，且溜槽拐点较多，当矿井提升的煤水分含量较大时，溜槽经常发生堵塞，而且处理难度较大，处理时间较长，经常会发生一连串的压皮带事故，不但影响了矿井的正常提升，甚至会威胁到人身安全。

在对射式红外线光电开关应用之前，由于机械式的防堵保护仅限于安装在煤流冲击不到的部位即溜槽顶部，只要溜槽发生堵塞便会从其底部一直堵到顶部，机械保护才会动作，错过了最佳处理时间，再处理起来相当困难，同时机械式的保护经常会由于煤流的冲击发生损坏，给维护带来很大的不便。现在按图 5-30 所示安装对射式光电开关，当溜槽下部堵塞时，即发出信号，给维护带来了时间。

在原煤系统中，破碎机中也可以安装光电开关，具体如图 5-31 所示，它能在破碎机转子稍微产生剧烈振动之前就会自动停车，起到了保护破碎机的作用，有效地防止了事故的进一步扩大。

## 3. 光电开关在水泥包装计数中的应用

某水泥厂在进行包装计数时采用如图 5-32 所示的光电开关。

其具体工艺流程如图 5-33 所示。水泥袋在弯道的挡板作用下输送到装车机的皮带机上，在装车皮带机的下面距离装车工约 2m 处安装一对防尘对射型光电传感器。

光电传感器的发射端一直不间断地发出红外线，如果传送带上有物体时，接收的传感器收不到红外线，就输出低电平信号，否则输出高电平，这样传送带上每通过一袋水泥时接收的传感器就产生一个脉冲信号，该信号进行滤波处理后，将其视为通过一袋水泥。

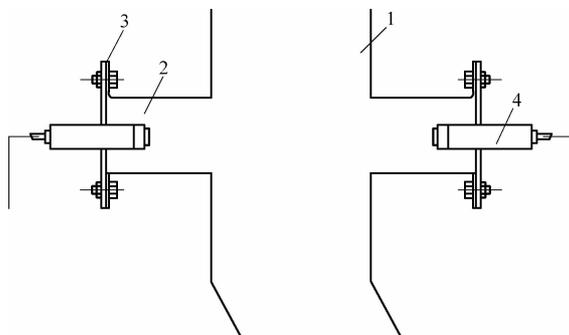


图 5-30 对射式光电开关在溜槽中的应用

1—溜槽 2—圆柱护罩 3—活动护板 4—对射式光电开关

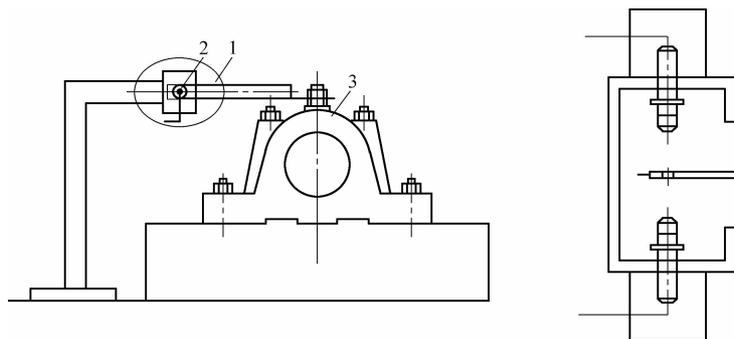


图 5-31 光电开关在破碎机中的应用

1—对射式光电开关 2—护罩 3—轴承座

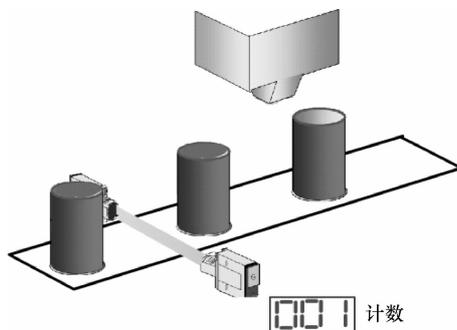


图 5-32 光电开关在包装计数中的应用

系统在开机时自动计算水泥袋通过传感器的时间，所以如果是空袋或者是其他的东西从皮带上通过时，系统可以认为是干扰源而不予处理；当在皮带上水泥出现连包现象时，系统

自动计算通过的时间而自动加上连包的数值；当传感器堵塞或损坏或卡袋时，系统自动报警，在屏幕或现场提醒工作人员。

在水泥包装计数应用中，对包装计数进行了一些程序处理，如采用 PLC，其工作流程如图 5-34 所示。

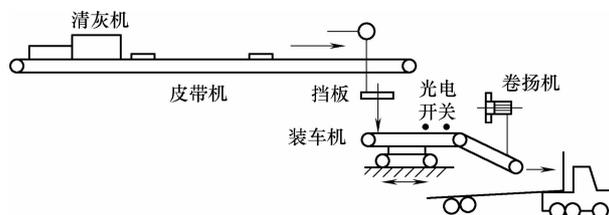


图 5-33 水泥包装工艺流程

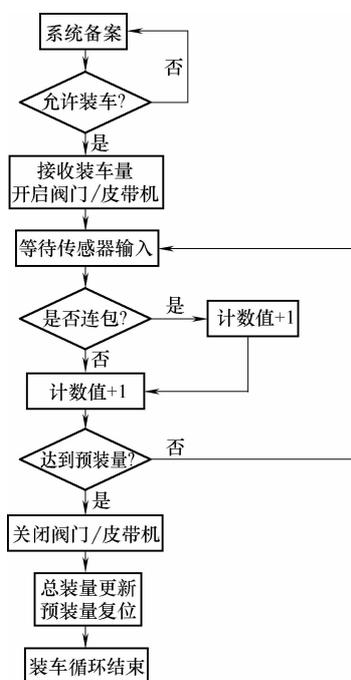


图 5-34 计数的程序处理过程

#### 4. 光电开关在各类测速中的应用

转速的测量对于电动机传动控制来说非常重要，光电式测速仪在实际应用中非常普遍，它共有两种工作原理，如图 5-35a 所示的反射式和图 5-35b 所示的直射式。反射式光电转速仪是利用均匀贴在测速轴上的反光标进行计数，而直射式光电转速仪则是利用测速轴上均匀分布的孔进行计数。

#### 5. 光电开关的其他应用

光电开关还可以用于布匹宽度检测、有无检测（见图 5-36a）、两台行车安全

距离的检测（见图 5-36b），以及在装箱过程中的空箱检测、推出位置检测（见图 5-36c）。

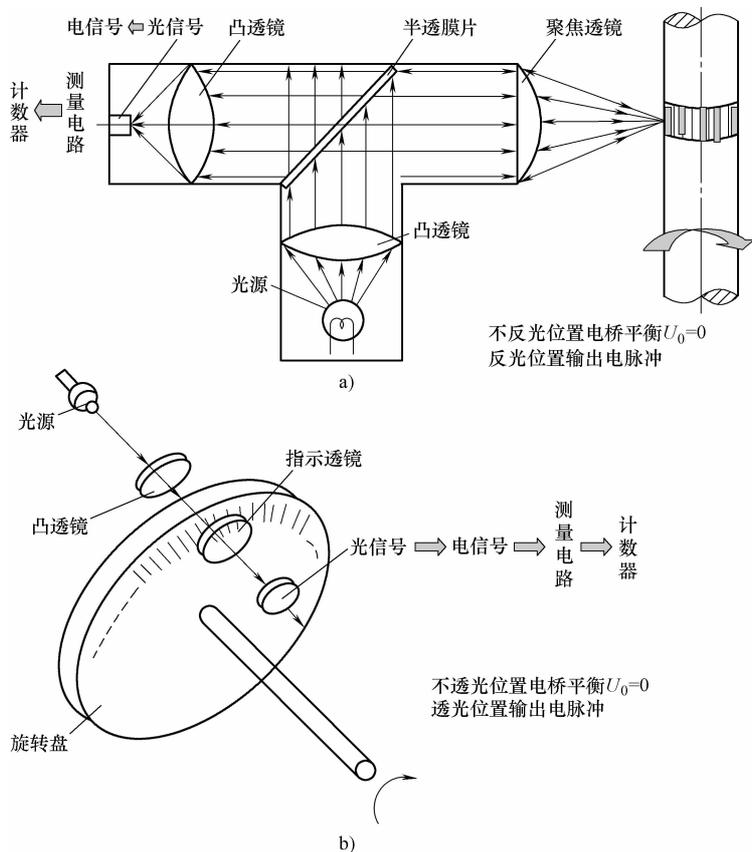


图 5-35 光电转速仪

a) 反射式 b) 直射式

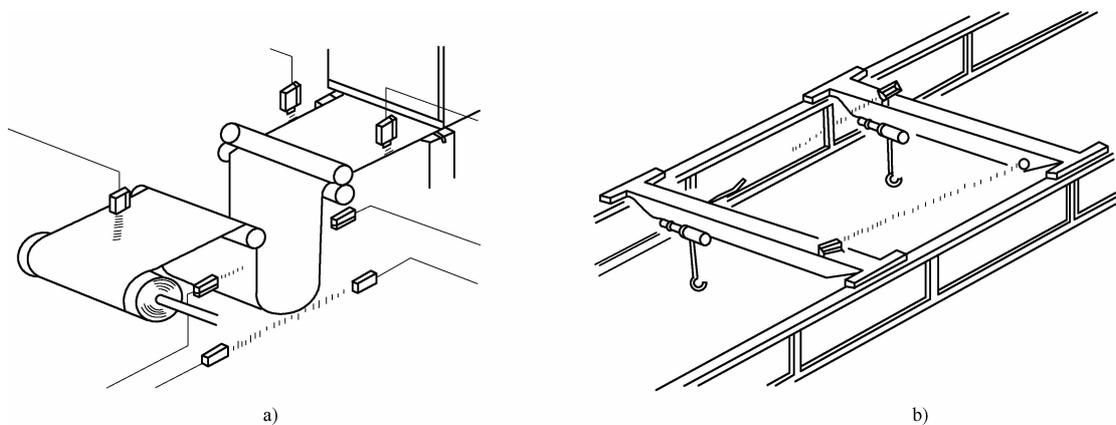


图 5-36 光电开关的其他应用

a) 布匹宽度检测、有无检测 b) 两台行车安全距离检测

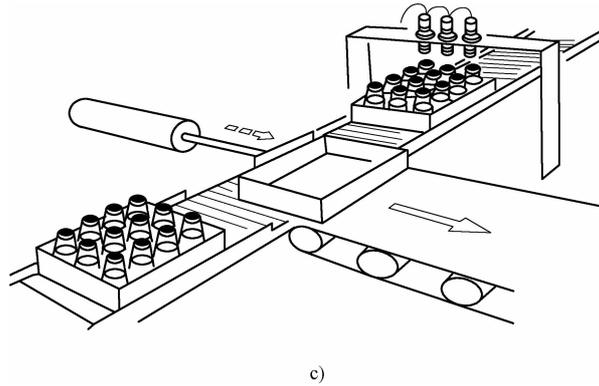


图 5-36 光电开关的其他应用 (续)  
c) 空箱检测、推出位置检测

## 5.2 光纤传感器

### 5.2.1 光纤传感器的工作原理

以电为基础的传统光电传感器是一种把测量的状态转变为可测的电信号的装置，它的电源、敏感元件、信号接收和处理系统以及信息传输均用金属导线连接，如图 5-37a 所示。光纤传感器则是一种把被测量的状态转变为可测的光信号的装置，它是由光发送器、敏感元件（光纤或非光纤的）、光接收器、信号处理系统以及光纤构成，如图 5-37b 所示。

在光纤传感器中，由光发送器发出的光经光源光纤引导至敏感元件。这时，光的某一性质受到被测量的调制，已调光经接收光纤耦合到光接收器，使光信号变为电信号，最后经信号处理得到所期望的被测量。由此可见，光纤传感器与以电为基础的传统光电传感器相比较，在测量原理上有本质的差别。传统光电传感器是以机电测量为基础，而光纤传感器则以光学测量为基础。

光是一种电磁波，其波长从极远红外线的 1mm 到极远紫外线的 10nm。它的物理作用和生物化学作用主要因其中的电场而引起。因此，讨论光的敏感测量必须考虑光的电矢量  $E$  的振动，即

$$E = A \sin(\omega t + \varphi) \tag{5-1}$$

式中， $A$  为电场  $E$  的振幅矢量； $\omega$  为光波的振动频率； $\varphi$  为光相位； $t$  为光的传播时间。

可见，只要使光的强度、偏振态（矢量  $A$  的方向）、频率和相位等参量之一随被测量状态的变化而变化，或受被测量调制，那么，通过对光的强度调制、偏振调制、频率调制或相位调制等，就能获得所需要的被测量的信息。

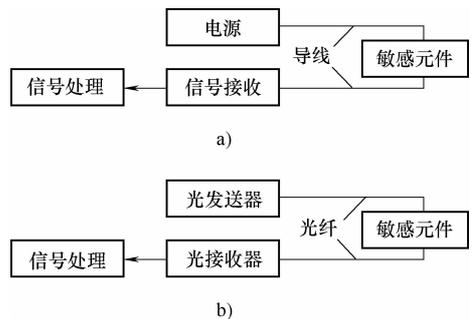


图 5-37 光纤传感器与传统光电传感器的区别  
a) 传统传感器 b) 光纤传感器

## 5.2.2 光纤传感器的分类

### 1. 根据光纤在传感器中的作用

根据光纤在传感器中的作用，光纤传感器分为功能型、非功能型和拾光型三大类。

(1) 功能型（全光纤型）光纤传感器 利用对外界信息具有敏感能力和检测能力的光纤（或特殊光纤）作传感元件，将“传”和“感”合为一体的传感器。光纤不仅起传光作用，而且还利用光纤在外界因素（弯曲、相变）的作用下，其光学特性（光强、相位、偏振态等）的变化来实现“传”和“感”的功能。因此，传感器中光纤是连续的。由于光纤连续，增加其长度，可提高灵敏度（见图 5-38）。

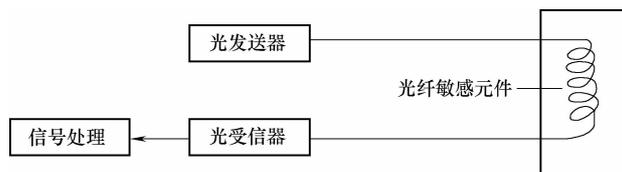


图 5-38 功能型（全光纤型）光纤传感器

(2) 非功能型（或称传光型）光纤传感器 如图 5-39 所示，光纤仅起导光作用，只“传”不“感”，对外界信息的“感觉”功能依靠其他物理性质的功能元件完成。光纤不连续。此类光纤传感器无需特殊光纤及其他特殊技术，比较容易实现，成本低。但灵敏度也较低，用于对灵敏度要求不太高的场合。

(3) 拾光型光纤传感器 用光纤作为探头，接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光（见图 5-40）。其典型例子如光纤激光多普勒速度计、辐射式光纤温度传感器等。



图 5-39 非功能型光纤传感器

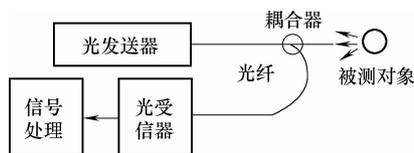


图 5-40 拾光型光纤传感器

### 2. 根据光受被测对象的调制形式

根据光受被测对象的调制形式，光纤传感器可以分为强度调制型、偏振调制、频率调制、相位调制等。

(1) 强度调制型光纤传感器 它是一种利用被测对象的变化引起敏感元件的折射率、吸收或反射等参数的变化，而导致光强度变化来实现敏感测量的传感器。有利用光纤的微弯损耗；各物质的吸收特性；振动膜或液晶的反射光强度的变化；物质因各种粒子射线或化学、机械的激励而发光的现象；以及物质的荧光辐射或光路的遮断等来构成压力、振动、温度、位移、气体等各种强度调制型光纤传感器。

优点：结构简单、容易实现，成本低。

缺点：受光源强度波动和连接器损耗变化等影响较大。

(2) 偏振调制光纤传感器 它是一种利用光偏振态变化来传递被测对象信息的传感器。

有利用光在磁场中媒质内传播的法拉第效应做成的电流、磁场传感器；利用光在电场中的压电晶体内传播的泡克尔斯效应做成的电场、电压传感器；利用物质的光弹效应构成的压力、振动或声传感器；以及利用光纤的双折射性构成的温度、压力、振动等传感器。这类传感器可以避免光源强度变化的影响，因此灵敏度高。

(3) 频率调制光纤传感器 它是一种利用单色光射到被测物体上反射回来的光的频率发生变化来进行监测的传感器。有利用运动物体反射光和散射光的多普勒效应的光纤速度、流速、振动、压力、加速度传感器；利用物质受强光照射时的喇曼散射构成的测量气体浓度或监测大气污染的气体传感器；以及利用光致发光的温度传感器等。

(4) 相位调制传感器 相位调制传感器的基本原理是利用被测对象对敏感元件的作用，使敏感元件的折射率或传播常数发生变化，从而导致光的相位变化，使两束单色光所产生的干涉条纹发生变化，通过检测干涉条纹的变化量来确定光的相位变化量，从而得到被测对象的信息。通常有利用光弹效应的声、压力或振动传感器；利用磁致伸缩效应的电流、磁场传感器；利用电致伸缩的电场、电压传感器以及利用光纤赛格纳克（Sagnac）效应的旋转角速度传感器（光纤陀螺）等。这类传感器的灵敏度很高。但由于需用特殊光纤及高精度检测系统，因此成本高。

以上4类光纤传感器可以用表5-2进行对比说明。

表5-2 根据光受被测对象的调制形式的光纤传感器对比说明

传感器		光学现象	被测量	光纤	分类
干涉型	相位调制光纤传感器	干涉（磁致伸缩）	电流、磁场	SM、PM	a
		干涉（电致伸缩）	电场、电压	SM、PM	a
		Sagnac 效应	角速度	SM、PM	a
		光弹效应	振动、压力、加速度、位移	SM、PM	a
		干涉	温度	SM、PM	a
非干涉型	强度调制光纤温度传感器	遮光板遮断光路	温度、振动、压力、加速度、位移	MM	b
		半导体透射率的变化	温度	MM	b
		荧光辐射、黑体辐射	温度	MM	b
		光纤微弯损耗	振动、压力、加速度、位移	SM	b
		振动膜或液晶的反射	振动、压力、位移	MM	b
		气体分子吸收	气体浓度	MM	b
		光纤漏泄膜	液位	MM	b
偏振调制光纤温度传感器	法拉第效应	电流、磁场	SM	b, a	
	泡克尔斯效应	电场、电压	MM	b	
	双折射变化	温度	SM	b	
	光弹效应	振动、压力、加速度、位移	MM	b	
频率调制光纤温度传感器	多普勒效应	速度、流速、振动、加速度	MM	c	
	受激喇曼散射	气体浓度	MM	b	
	光致发光	温度	MM	b	

注：MM：多模；SM：单模；PM：偏振保持；a、b、c分别为功能型、非功能型、拾光型。

### 5.2.3 光纤传感器在各行业中的应用

#### 1. 光纤传感器在印制电路板（PCB）检测中的应用

(1) 检测传送带上是否有 PCB 如图 5-41 所示, 由于 PCB 的反光率差别很大, 用直反式传感器来检测很不可靠。光纤传感器具有很高的增益, 能可靠检测各电路板而不受反光率的影响。

代表传感器: Banner 公司 VS1AN5CV10。

(2) 印制电路板码放高度检测与涂胶检测 如图 5-42 所示, 为了确认粘合剂是否正确刷在 IC 芯片的粘结处以及监测 PCB 的码放高度, 选用光纤传感器, 将光纤检测头安装在涂胶的位置附近, 以确认胶是否被涂到正确位置。

代表传感器: Banner 公司的 VS2KRN5V & D10DNFP, 其光纤选用 PBCT26U & L4C6 镜头。

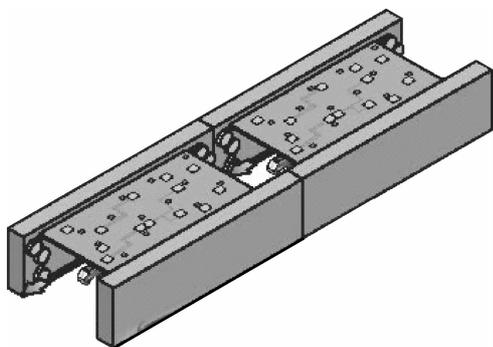


图 5-41 检测传送带上是否有 PCB

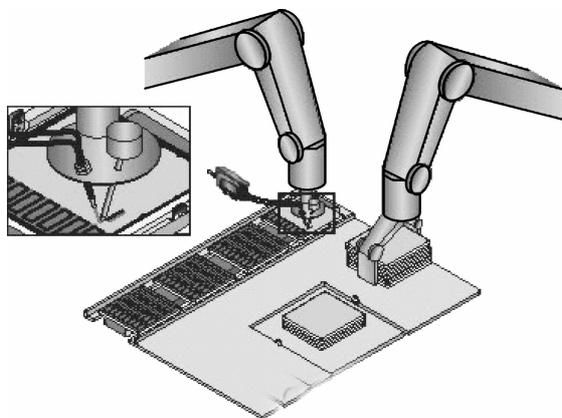


图 5-42 印制电路板码放高度检测与涂胶检测

(3) 电容极性检测 如图 5-43 所示, 由于电容是有极性的, 所以当它被插装到 PCB 上时需要检测其放置方向是否正确。而光纤传感器能检测到电容侧面的极性标识, 当没有检测到极性标识时会产生输出信号。

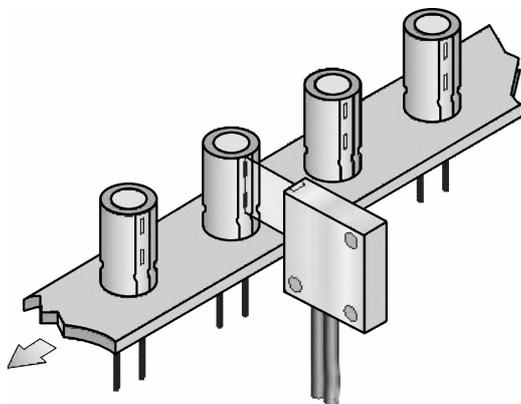


图 5-43 电容极性检测

代表传感器: Banner 公司的 D11EN6FP, 其光纤选用 PBRS1X326U。

(4) PCB 定位孔检测 如图 5-44 所示，在检测一个完全插装好的 PCB 之前，PCB 需要精确定位在某一处。定位孔或其他定位标志一般是用来定位的。光纤传感器配合使用同轴光纤和镜头，在 6mm 的检测距离处光点仅为 0.25mm，可检测很小的孔。

代表传感器：Banner 公司的 SME312FP，其光纤选用 PBCT26U & L4C6 镜头。

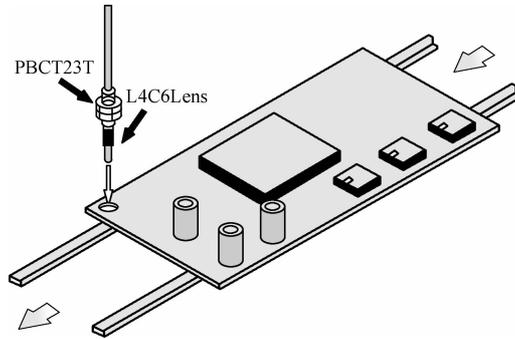


图 5-44 PCB 定位孔检测

关于 Banner 公司的光纤传感器、光纤等部分资料请参考附录 C。

### 2. 光纤传感器在液位/位移检测中的应用

光纤传感器能检测液位/位移，其工作原理如图 5-45 所示。发光器件（即光源）射出来的光通过传输光纤送到敏感元件，在敏感元件的球面上，有一部分透过，而其余的光被反射回来。当敏感元件与液体相接触时，与空气接触相比，球面部的光透射量增大，而反射量减少。因此，由反射光量即可知道敏感元件是否接触液体。反射光量决定于敏感元件玻璃的折射率和被测物质的折射率。被测物质的折射率越大，反射光量越小。来自敏感元件的反射光，通过传输光纤由受光器件的光敏晶体管进行光电转换后输出。针对同一种液体来说，敏感元件的反射光量的变化，直接与距离  $d$  有关系，其函数关系如图 5-46 所示。

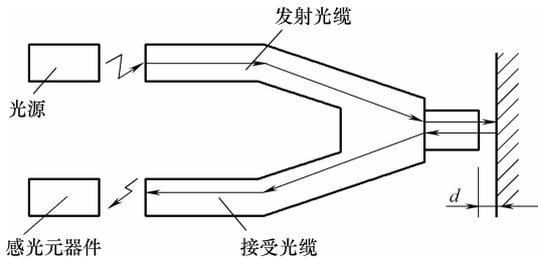


图 5-45 光纤位移传感器的工作原理

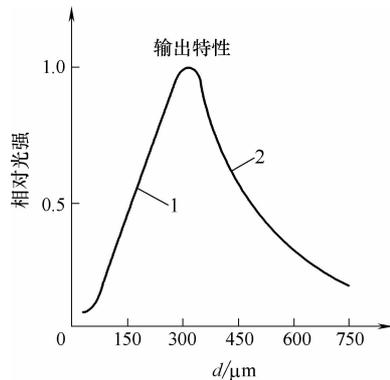


图 5-46 距离决定反射光强度

### 3. 光纤传感器在油井压力检测中的应用

在油田的开发过程中，人们需要知道在产液或注水过程中有关井内流体的特性与状态的详细资料，这就要用到石油测井，其可靠性和准确性是至关重要的，而传统的压力传感器无

法在井下恶劣的环境诸如高温、高压、腐蚀、地磁地电等干扰下工作。光纤传感器可以克服这些困难，其对电磁干扰不敏感而且能承受极端条件，包括高温、高压（几十兆帕以上）以及强烈的冲击与振动，可以高精度地测量井筒和井场环境参数，同时，光纤传感器具有准分布式测量能力，可以在不干扰油井参数场的情况下同时测出井下的温度、压力，并可以测出井下的温度、压力剖面，可以获得传统测试方式无法获取的数据。

光纤传感器的压力检测工作原理如图 5-47 所示，即光纤微量弯曲时传输光的强度衰减，也被称为微弯损耗效应。

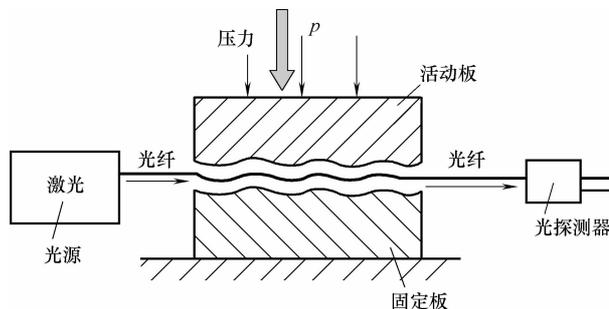


图 5-47 压力检测工作原理

## 5.3 激光传感器

### 5.3.1 激光传感器原理

#### 1. 激光与激光器

激光是 20 世纪 60 年代出现的最重大的科学技术成就之一。它发展迅速，已广泛应用于国防、生产、医学和非电测量等各方面。激光与普通光不同，需要用激光器产生（见图 5-48）。

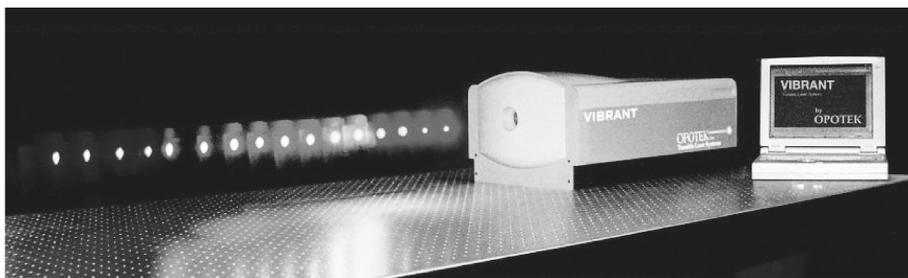


图 5-48 激光器

激光器的工作物质在正常状态下，多数原子处于稳定的低能级  $E_1$ ，在适当频率的外界光线的作用下，处于低能级的原子吸收光子能量受激发而跃迁到高能级  $E_2$ 。

光子能量公式为

$$E = E_2 - E_1 = h\nu \quad (5-2)$$

式中， $h$  为普朗克常数； $\nu$  为光子频率。

反之，在频率为  $\nu$  的光的诱发下，处于能级  $E_2$  的原子会跃迁到低能级释放能量而发光，称为受激辐射。激光器首先使工作物质的原子反常地多数处于高能级（即粒子数反转分布），就能使受激辐射过程占优势，从而使频率为  $\nu$  的诱发光得到增强，并可通过平行的反

射镜形成雪崩式的放大作用而产生强大的受激辐射光，简称激光。

激光具有 3 个重要特性：

- 1) 高方向性（即高定向性，光速发散角小），激光束在几公里外的扩展范围不过几厘米；
- 2) 高单色性，激光的频率宽度比普通光小 1/10 以上；
- 3) 高亮度，利用激光束会聚最高可产生达几百万度的温度。

激光器按工作物质可分为 4 种：

- 1) 固体激光器：它的工作物质是固体。常用的有红宝石激光器、掺钕的钇铝石榴石激光器（即 YAG 激光器）和钕玻璃激光器等。如图 5-49 所示，它们的结构大致相同，特点是小而坚固、功率高，钕玻璃激光器是目前脉冲输出功率最高的器件，已达到数十兆瓦。



图 5-49 固体激光器

- 2) 气体激光器：它的工作物质为气体。现已有各种气体原子、离子、金属蒸气、气体分子激光器。常用的有  $\text{CO}_2$  激光器（见图 5-50）、氦氖激光器和一氧化碳激光器，其形状如普通放电管，特点是输出稳定，单色性好，寿命长，但功率较小，转换效率较低。

- 3) 液体激光器：它又可分为螯合物激光器、无机液体激光器和有机染料激光器，其中最重要的是有机染料激光器，它的最大特点是波长连续可调。

- 4) 半导体激光器：它是较年轻的一种激光器，其中较成熟的是砷化镓激光器。特点是效率高、体积小、重量轻、结构简单，适宜于在飞机、军舰、坦克上以及步兵随身携带。可制成测距仪和瞄准器。但输出功率较小、定向性较差、受环境温度影响较大。

## 2. 激光产品危险等级分类

激光产品危险等级分类是描述激光系统对人体造成伤害程度的界定指标。分类从第 I 类激光（无伤害）到第 IV 类激光器，如 2000W  $\text{CO}_2$  激光器（可以切割厚钢板）。制造商必须在第 II 类，第 III 类和第 IV 类激光产品上贴有带激光危险等级分类字样的警告标签。



图 5-50  $\text{CO}_2$  激光器

第 I 类激光产品——没有生物性危害。任何可能观看的光束都是被屏蔽的，且在激光暴露时激光系统是互锁的。大型激光打印机，如 DEC LPS-40 是由 10mW ( III b 类) 氦氖激光驱动的，尽管实际的激光器是 III b 类，但打印机是互锁的，以避免和暴露的激光束发生任何接触，因此，该设备不产生任何生物性危害。这也适用于 CD 播放器和小型激光打印机，他们都是第一类设备。

第 II 类激光产品——输出功率为 1mW。不会灼伤皮肤，不会引起火灾。由于眼睛反射可以防止一些眼部损害，所以这类激光器不被视为危险的光学设备。例如当眼睛遇到明亮的光线时，会自动眨眼，或者转动头部以避开这些强光线。这就是所谓的反射行为或反射时间。在这段时间内这类激光产品不会对眼睛造成伤害。尽管如此，一个人也不会愿意较长时间盯着看它。在这类激光设备上应放黄色警告标签。

第 III a 类激光产品——输出功率为 1 ~ 5mW。不会灼伤皮肤。在某种条件下，这类激光可以对眼睛造成致盲以及其他损伤。这类激光产品应该有：

- 1) 激光发射指示灯，表明激光器是否在工作；
- 2) 应该使用电源钥匙开关，阻止他人擅自使用；
- 3) 应该贴有一个危险标签和输出 xx 的标签。

第 III b 类激光产品——输出功率为 5 ~ 500mW。在功率比较高时，这类激光产品能够烧焦皮肤。这类激光产品明确定义为对眼睛有危害，尤其是在功率比较高时，将造成眼睛损伤。这类激光产品必须具备：

- 1) 钥匙开关，阻止他人擅自使用；
- 2) 激光发射指示灯，表明激光器是否在工作；
- 3) 启动电源后有 3 ~ 5s 延迟时间使操作者离开光束路径；
- 4) 装有急停开关，随时关断激光光束；
- 5) 在激光器上必须贴有红色的危险标签和 xx (aperature) 标签 (250mW 激光器照射一张红纸，不到 2s 就点燃了! )。

第 IV 类激光产品——输出功率大于 500mW。这类激光产品一定能够造成眼睛损伤。就像灼烧皮肤和点燃衣物一样，激光能够引燃其他材料。这类激光产品必须具备：

- 1) 钥匙开关，阻止他人擅自使用；
- 2) 保险装置，防止工作时系统的保护盖被打开；
- 3) 激光发射指示灯，表明激光器是否在工作；
- 4) 装有急停开关，随时关断激光光束；
- 5) 在激光器上贴好红色危险标签和 xx (aperature) 标签，这类激光反射光束和主光束一样都很危险 (一个 1000W CO<sub>2</sub> 激光器可以在一块钢板上打孔，设想一下，如果是眼睛会怎么样! )。

### 3. 激光传感器原理

如图 5-51 所示的激光传感器就是利用激光技术进行测量的传感器。它由激光器、激光检测器和测量电路组成。激光传感器是新型测量仪表，它的优点是能实现无接触远距离测量，速度快，精度高，量程大，抗光、电干扰能力强等。

激光传感器测量的基本原理是光学三角法 (见图 5-52)，即半导体激光器 1 被镜片 2 聚焦到被测物体 6。反射光被镜片 3 收集，投射到 CCD 阵列 4 上；信号处理器 5 通过三角函数计算阵列 4 上的光点位置得到距物体的距离。

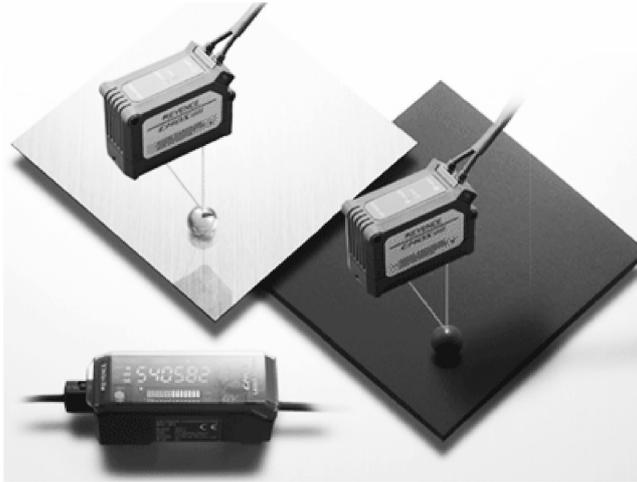


图 5-51 激光传感器

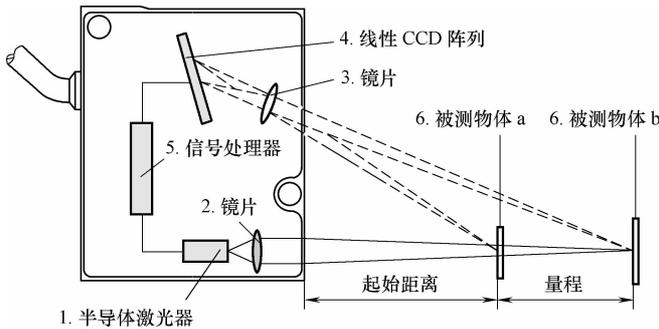


图 5-52 激光传感器测量基本原理

#### 4. 激光传感器所能解决的其他技术无法解决的问题

激光传感器可用于其他技术无法应用的场合。例如，当目标很近时，计算来自目标反射光的普通光电传感器也能完成大量的精密位置检测任务。但是，当目标距离较远或目标颜色变化时，普通光电传感器就难以应付了。

虽然先进的背景噪声抑制传感器和三角测量传感器在目标颜色变化的情况下能较好地工作，但是，在目标角度不固定或目标太亮时，其性能的可预测性变差。此外，普通光电三角测量传感器一般量程只限于 0.5m 以内。

超声波传感器虽然也经常用于检测距离较远的物体，而且由于它不是光学装置，所以不受颜色变化的影响。但是，超声波传感器是依据声速测量距离的，因此存在一些固有的缺点，不能用于以下场合：

- 1) 待测目标与传感器的换能器不相垂直的场合。因为超声波检测的目标必须处于与传感器垂直方位偏角不大于  $10^\circ$  以内。
- 2) 需要光束直径很小的场合。因为一般超声波束在离开传感器 2m 远时直径为 0.76cm。
- 3) 需要可见光斑进行位置校准的场合。
- 4) 多风的场合。

- 5) 真空场合。
  - 6) 温度梯度较大的场合。因为这种情况下会造成声速的变化。
  - 7) 需要快速响应的场合。
- 而激光传感器能解决上述所有场合的检测。

### 5.3.2 激光传感器在工业中的应用

#### 1. 长距离激光传感器在巷道堆垛机中的应用

在如图 5-53 所示的有轨巷道堆垛机自动控制系统中，激光测距与定位、PLC 控制、矢量变频调速等技术的应用，使有轨巷道堆垛机控制系统超越了原有的设计思路，实现堆垛机的绝对认址，不仅有效解决了计数与定位的精度与可靠性问题，并且方便地实现平滑调速，优化调速曲线、优化启动与制动性能，从而提升了堆垛机的整机性能，确保整机性能可靠、平稳、高效。

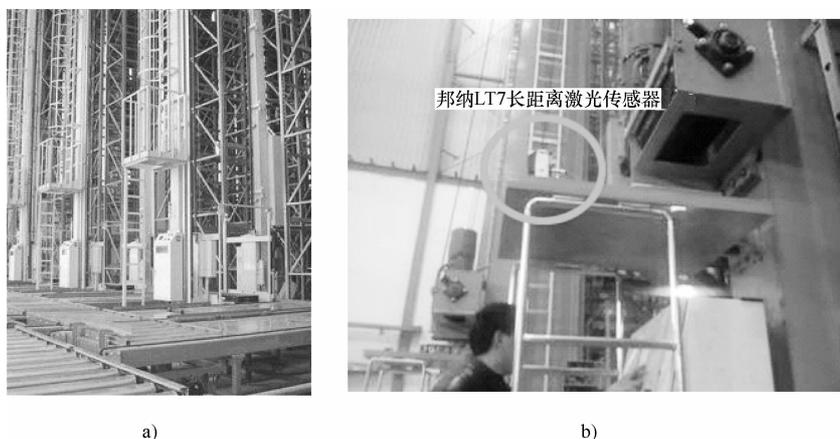


图 5-53 有轨巷道堆垛机中激光测距及定位

a) 巷道堆垛机 b) 邦纳 LT7 长距离激光传感器

(1) LT7 产品介绍 在提升堆垛机的整机性能方面，美国邦纳公司推出 LT7 长距离激光传感器（见图 5-54），该传感器为高精度，超长距离的“Time-of-Flight”激光距离传感

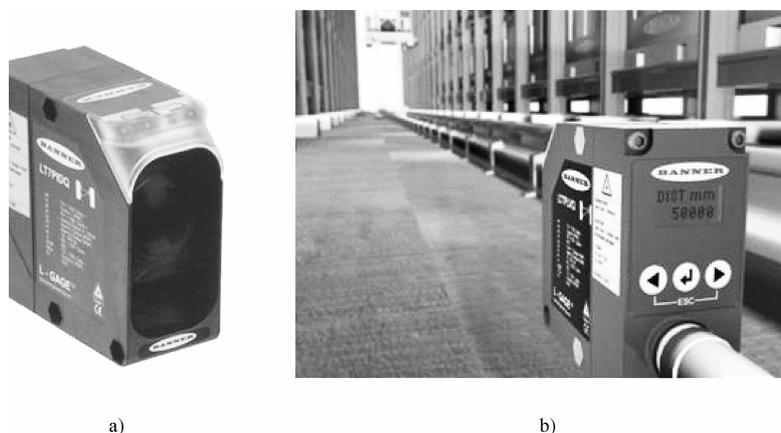


图 5-54 邦纳 LT7 长距离激光传感器

a) 正面安装 b) 侧面显示

器，通过反射板检测距离达到 250m，可以满足国内大多数巷道堆垛机的行程需要。

邦纳 LT7 长距离激光传感器的特点如下：具有大面积反射板（见图 5-55），2 个 PNP 输出，检测距离可达 250m；提供 2 个报警输出，配合 LCD 显示，易于故障分析；按键示教，可通过按键或串行接口完成；连续的检测距离显示；2mm 精度；RS-422 和 SSI 同步串行输出；红外激光测量，可视红色 2 级激光，精确对准；快速预热，漂移减到最小。



图 5-55 LT7 传感器的大面积反射板

(2) LT7 的工作原理（见图 5-56）

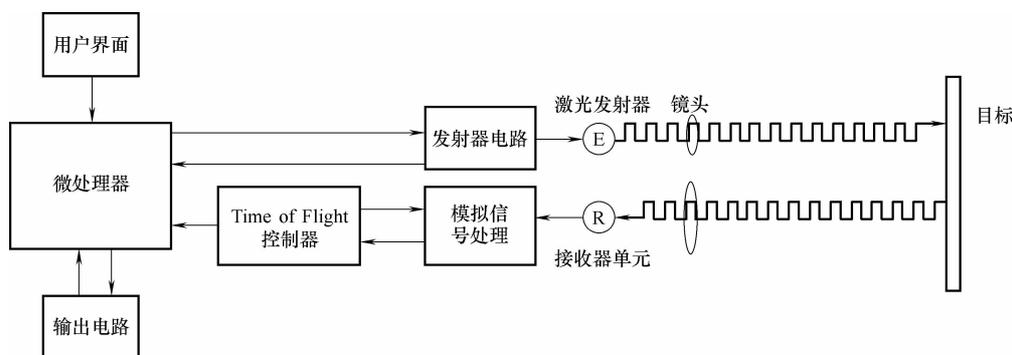


图 5-56 LT7 的工作原理

(3) 激光测距传感器与上位机通信 LT7 激光测距传感器的通信方式为 SSI 同步串行输出和 RS-422 的通信方式，可以接带 SSI 输入模块的 PLC 或者是仪器仪表，如采用西门子 S7-300PLC 模块（见图 5-57）。

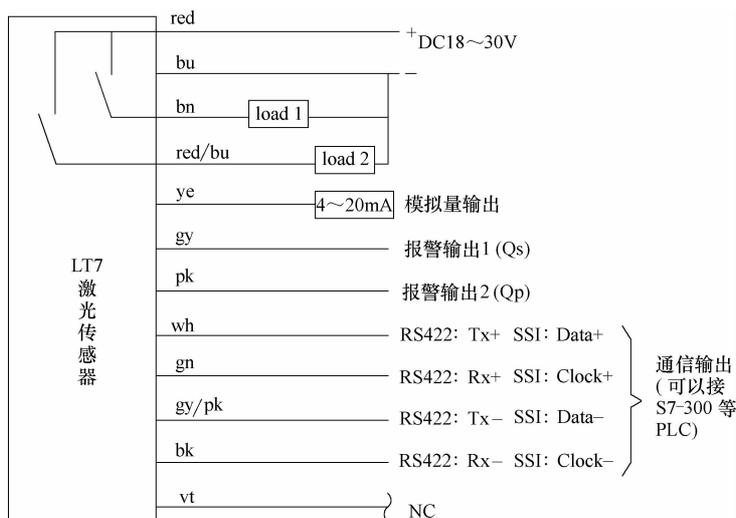


图 5-57 激光测距传感器与上位机通信

实际应用过程中，现场通信比较顺利，同时运行也没有发现有干扰的现象。而以前采用 SSI 应用在部分堆垛机上下位置检测时，由于大电动机距离较近及频繁启动，有时 SSI 通信会有干扰现象，采用 LT7 激光测距传感器时，堆垛机上下位置时采用 RS-422 的通信方式，由于采用了互补脉冲的通信方式，抗干扰性能好，同时 S7-300PLC 上有可作为 RS-422 通信的备用模块，这样就可以有效的解决干扰的问题。

(4) 激光测距与定位的实现 通过激光测距器将一个货架的绝对地址数据读出，并自动保存到 PLC 内部的货位地址数据寄存器中，进行货位地址数据表的修改设置与保存固化，形成货位地址数据表供堆垛机运行定位使用，完成原始数据的初始化和固化校准。当堆垛机接收到上位机或操作面板触摸屏下达的作业指令时，PLC 接受作业指令，通过激光测距器读取堆垛机当前地址，并存储在 PLC 内供程序计算用。

通过 PLC 程序对以上数据的处理，实现堆垛机的认址与定位。由于激光测距实现了绝对认址，实现了货位设定的数字化，从而方便了货位数据、出入库台位置、运行速度值等的设置，易于实现数据比较、计数、自动换速及精准定位等功能。

## 2. 激光传感器在集装箱数控焊机中的应用

集装箱底板和侧板的焊缝是折线焊缝，在自动焊接时必须进行焊缝跟踪。折线焊缝的跟踪是焊接领域的一大难题，主要原因是折弯处采用单一传感器，跟踪信号的获取极为困难，其次是焊枪姿态的改变。在焊接条件下，存在着较强的电磁场和弧光干扰，采用单传感器很难获得持续的有效信号，这也是焊接自动跟踪在实际焊接过程难以广泛使用的一个重要原因。

集装箱专用数控焊机使用激光传感器和高精度超声波传感器构成的传感器系统，采用微分的方法对两个传感器采集的信号进行分析，以提取表征信号，根据两种信号之间的关联，编制专家系统，从而实现对集装箱折线焊缝跟踪。

(1) 生产工序介绍 生产的关键工序是侧壁波纹板与箱顶、箱底的焊接，即侧壁波纹板的焊接。集装箱波纹板的形状尺寸如图 5-58 所示。

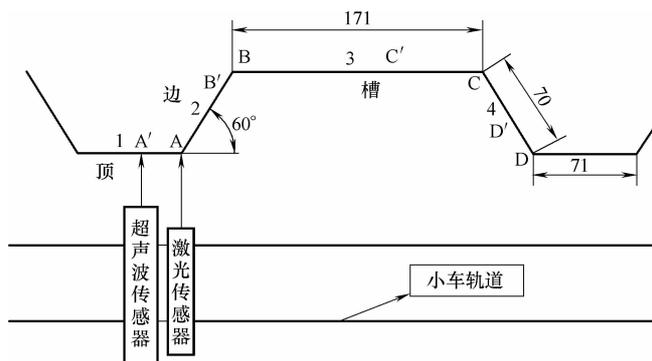


图 5-58 集装箱波纹板的形状尺寸

由图 5-58 可知，侧板是波纹板结构，由槽、边、顶三部分组成，重复出现。有的侧板顶与边的夹角为  $60^\circ$ （以下简称  $60^\circ$  波纹板），有的侧板顶与边的夹角为  $30^\circ$ （以下简称  $30^\circ$  波纹板）。平焊的最长距离只有 171mm，在焊“边”的时候由于两种位置角度大于  $30^\circ$ ，所以焊接时焊枪必须调整角度才能保证焊接质量，否则焊接无法进行。而且，由于板厚仅

1.5~2mm, 焊枪在调整角度时不能停留, 否则会使薄板烧穿。同时, 由于集装箱的尺寸有12m多, 在整个焊接过程中一定对焊缝进行跟踪, 否则无法保证焊枪始终指向待焊接位置。

在1段时, 枪到A'点之前, 焊枪的运动是 $x$ 轴的匀速直线运动, 超声波传感器和激光传感器数据融合后作距离跟踪, 主要利用超声波传感器信号, 当枪到达A点时超声波传感器和激光传感器数据融合后获得折弯点信号, 焊枪圆弧右转 $30^\circ$ , 主要利用激光传感器信号并且对 $x, y$ 电动机速度重置, 进行 $x, y$ 线性插补, 开始第2段焊接; 在第2段中, B点之前, 由于超声波传感器的信号反射严重, 无法实现跟踪, 对此段进行插补, 总速度值应该与1段的速度相同, 焊枪在B点, 当超声波传感器和激光传感器数据融合后, 主要利用激光传感器信号获得折弯点信号, 焊枪弧齿轮预转 $30^\circ$ , 结束插补运动, 进入第3段。3, 4段的运动基本上重复了1, 2段。

(2) 激光传感器的选用 焊接过程中, 焊接弧光强度大于自然光强度, 采用激光传感器, 具有单色性好、高能量、高亮度的特点, 并且信号会随波纹板表面起伏的变化而变化, 利于发现波纹板折弯处。集装箱专用数控焊机采用的激光传感器由一个激光发生器和一个激光接收器构成。激光发生器采用高稳定度 He-Ne 激光光源。它提供足够高强度的, 波长为632.8nm的单色辐射源, 可防止辐射功率的涨落对测试结果的影响, 以便保证测量精度。

激光传感器结构如图5-59所示, 由激光光源产生激光, 经工件反射后, 进入激光接收器。试验激光传收发装置距离集装箱波纹板顶距离为85mm。采用丝杆传动均匀采集64个数据, 结果如图5-60所示。

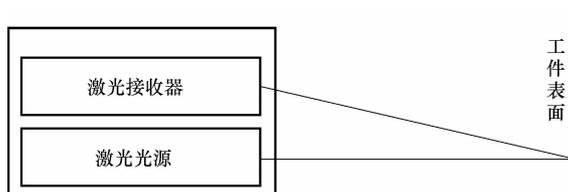


图 5-59 激光传感器结构

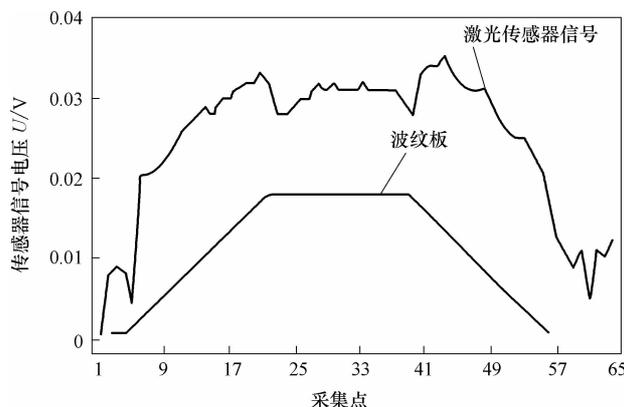


图 5-60 激光传感器数据折线图

由图5-61可知, 当激光传感器经过波纹板折弯处时, 信号发生较大的改变, 波形上表现为尖锐的突变, 在波纹板的板凹槽/顶处, 信号波动幅度较小, 基本维持直线关系; 而在

波纹板斜坡处，信号变化近似成线形。

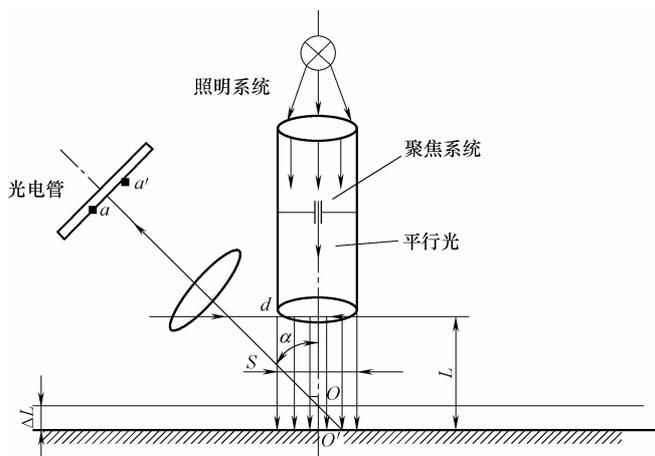


图 5-61 激光传感器的光路原理图

根据图 5-61 可知，角  $\alpha$  的大小随着  $L$  的增大而减小。由图 5-62 可知，在垂直于反射面的入射光的反射强度最大，即  $\alpha$  越小反射强度越大。由这两个结论不难推出，当激光照射到波纹板顶或凹槽时， $L$  的大小基本不发生改变，所以接近为一水平直线。由于传感器距离波纹板顶的距离最小，所以传感器信号最小；当激光照射在斜板上时，随着  $L$  的增大  $\alpha$  减小，传感器信号相应的增大或减小；当激光照射在凹槽上时， $L$  增到最大，传感器信号也就稳定在最大值附近。各个转折点处信号的跳变是因为波纹板折弯处是圆弧，激光光斑每一个点的反射角  $\alpha$  都不同。

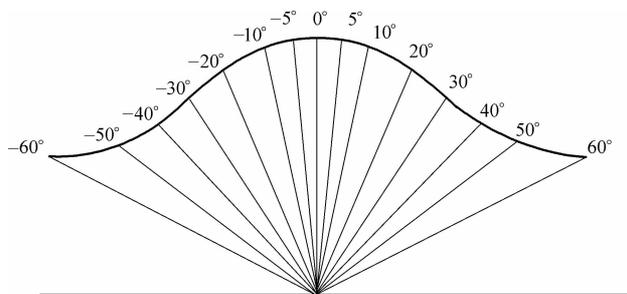


图 5-62 面反射率与入射角的函数

### 3. 激光传感器在钢铁工业中的应用

激光传感器日益成为在钢铁工业领域中普遍应用于铸造、加工、焊接及机器人等方面的测量工具。它主要针对金属工艺中小尺寸、高频率的测量需求，用于质量监测，不需直接接触金属表面而几乎在任何环境下进行操作（见图 5-63）。

(1) 水平连铸控制 铸造工艺自动化的提高要求越来越精确地控制水平连铸。由于传统的测量系统直接接触熔体表面，由于粘接熔体而容易失效。而无接触激光系统提供了完美的解决方案：不直接接触熔体的自由测量特性，并提供许多其他优点，比如在金属表面以较大距离进行大范围测量。主要应用领域是熔炉水平连铸的监控（见图 5-64），如连铸壳、檐

槽、连接件和模具。

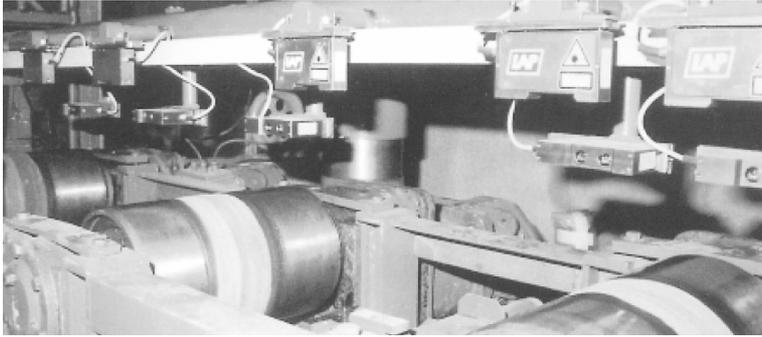


图 5-63 激光传感器在钢铁工业中的应用

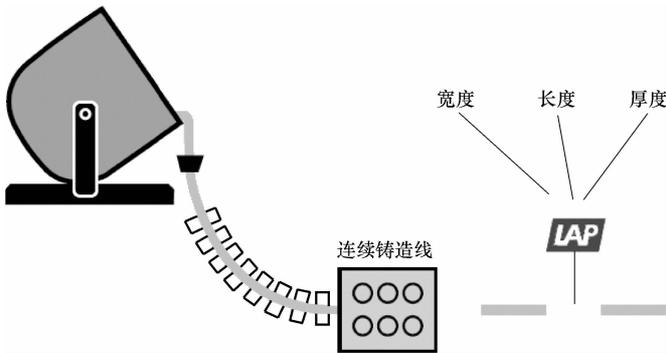


图 5-64 激光传感器在水平连铸控制中的应用  
LAP-激光传感器

(2) 厚度测量 布置两个传感器是进行厚度测量的基础。首先为一个滚筒指定原点，产品在滚筒上移动，与转轴接触的一面被作为零点，接下来的测量是相对于零点测出一个厚度值。另一种厚度测量，产品在位于其上方和下方的两个传感器之间移动，两个传感器测出的距离差得出产品的厚度值，这种测量装置的优点是产品可以在传送时上下振动不会发生测量误差（见图 5-65）。空气冷却的激光传感器可以对高温材料进行测量。穿梭厚度测量系统可以实现不同轨道的固定厚度测量。

除产品厚度外，还可以测量宽度、长度和边角等。

(3) 水平度/直线度测量 水平度是板材的一个重要质量指标。自动化测量和控制系统集成在滚动线上监控水平度。高精度测量轴对这些车间进行控制是必要的。这种测量轴可以

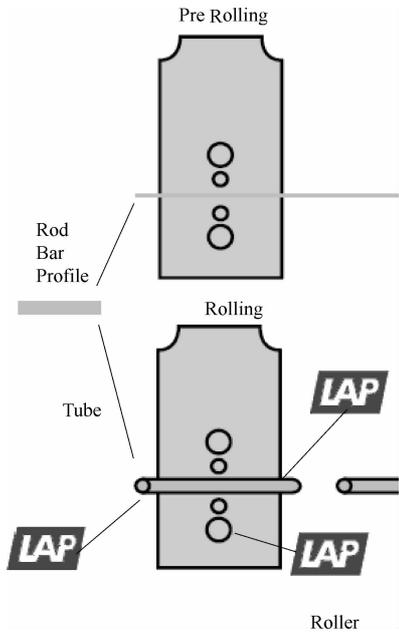


图 5-65 激光传感器在轧机中的应用  
LAP-激光传感器 Rolling-轧机 Pre ROLLING-预轧  
Tube-钢管 Rod Bar Profile-钢棒或钢条

实现无接触激光在线测量。由于激光传感器带宽高达 10kHz，高精度外形测量甚至可在高速时在线进行。如图 5-66 所示，在工厂现场，热端采用  $N$  个激光传感器测量水平度（边部—中间—边部），或者在冷端在两级高速轨道上测量，在这两种情况下产品表面外形由激光传感器检测并用计算机软件进行分析、评估和显示。

(4) 直径测量/弯曲半径的确定 激光传感器可用于直径测量。如图 5-67 所示，一个装配两个接收器的激光传感器，可测量一个半径在 2m 之内的钢板，两个接收器可将测量精确度提高两倍。

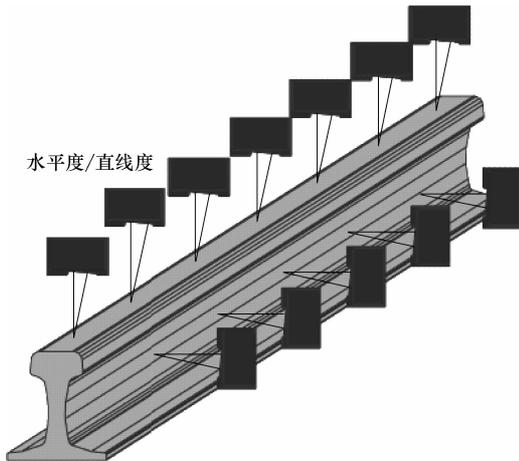


图 5-66 水平度/直线度测量

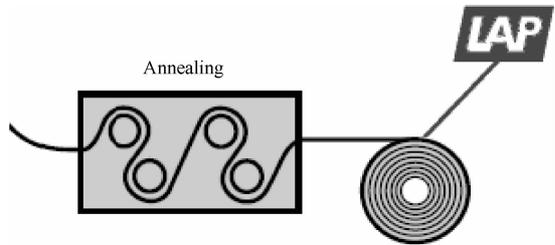


图 5-67 直径测量  
Annealing-退火 LAP-激光传感器

## 5.4 视觉传感器

### 5.4.1 视觉传感器原理

#### 1. 机器视觉的含义

机器视觉，顾名思义就是将自动控制机器的能力和视觉传感结合起来。形象地说，人通过眼睛感知外部世界的变化，然后通过大脑进行分析处理、作出判断，最后由手和脚完成动作。机器视觉就是将这一过程通过具有运算能力的自动化控制设备来完成的。具体来说，机器视觉是用摄像机代替人眼，用计算机代替人的大脑来进行测量与判断的。

如图 5-68 所示的机器视觉系统是指通过机器视觉产品（即图像摄取装置，分 CMOS 和 CCD 两种）将被摄取目标转换成图像信号，传送给专用的图像处理系统，根据像素分布和亮度、颜色等信息，转变成数字化信号；图像系统对这些信号进行各种运算来抽取目标的特征，如：面积、长度、数量、位置等；再根据预设的容许度和其他条件输出结果，如：尺寸、角度、偏移量、个数、合格/不合格、有/无等；最后根据判别的结果来控制现场的设备动作。



图 5-68 机器视觉系统

机器视觉技术，是一门涉及人工智能、神经生物学、心理物理学、计算机科学、图像处理、模式识别等诸多领域的交叉学科。其特点是速度快、精度高、自动化及智能化程度高、非接触、客观性强、可靠性高、信息量大、功能多、生产效率高。正是由于机器视觉具有这些特点，因此在现代自动化生产过程中，人们将机器视觉系统广泛地用于工况监视、成品检验和质量控制等领域，广泛应用于食品和饮料、化妆品、制药、建材和化工、金属加工、电子制造、包装印刷、汽车制造等行业中。

## 2. CCD 传感器

如图 5-69 所示的电荷耦合器件图像传感器 (Charge Coupled Device, CCD)，它使用一种高感光度的半导体材料制成，能把光线转变成电荷，通过模数转换器芯片转换成数字信号，数字信号经过压缩以后由相机内部的闪速存储器或内置硬盘卡保存，因而可以轻而易举地把数据传输给计算机，并借助于计算机的处理手段，根据需要和想象来修改图像。

CCD 传感器是一种新型光电转换器件，它能存储由光产生的信号电荷。当对它施加特定时序的脉冲时，其存储的信号电荷便可在 CCD 内作定向传输而实现自扫描。它主要由光敏单元、输入结构和输出结构等组成。它具有光电转换、信息存储和延时等功能，而且集成度高、功耗小，已经在摄像、信号处理和存储 3 大领域中得到广泛的应用，尤其是在图像传感器应用方面取得了令人瞩目的发展。

CCD 有面阵和线阵之分，面阵是把 CCD 像素排成一个平面的器件；而线阵是把 CCD 像

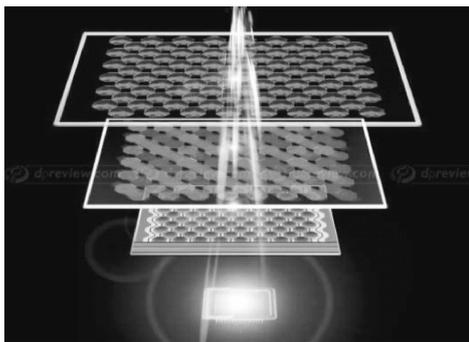


图 5-69 CCD 传感器

素排成一直线的器件。

(1) 面阵 CCD 面阵 CCD 的结构一般有三种。

第一种是帧转移性 CCD。它由上、下两部分组成，上半部分是集中了像素的光敏区域，下半部分是被遮光而集中垂直寄存器的存储区域。其优点是结构较简单并容易增加像素数，缺点是 CCD 尺寸较大，易产生垂直拖影。

第二种是行间转移性 CCD。它是目前 CCD 的主流产品，它们是像素群和垂直寄存器在同一平面上，其特点是在一个单片上，价格低，并容易获得良好的摄影特性。

第三种是帧行间转移性 CCD。它是第一种和第二种的复合型，结构复杂，但能大幅度减少垂直拖影并容易实现可变速电子快门等。

(2) 线阵 CCD 线阵 CCD 是用一排像素扫描过图片，做三次曝光——分别对应于红、绿、蓝三色滤镜，正如名称所表示的，线性传感器是捕捉一维图像。初期应用于广告界拍摄静态图像，线性阵列，处理高分辨率的图像时，受局限于非移动连续光照的物体。

### 3. CMOS 传感器

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)，中文学名为互补金属氧化物半导体，它本是计算机系统内一种重要的芯片，保存了系统引导最基本的资料。CMOS 的制造技术和一般计算机芯片没什么差别，主要是利用硅和锗这两种元素所做成的半导体，使其在 CMOS 上共存着带 N (带 - 电) 和 P (带 + 电) 级的半导体，这两个互补效应所产生的电流即可被处理芯片纪录和解读成影像。后来发现 CMOS 经过加工也可以作为数码摄影中的图像传感器 (见图 5-70)，CMOS 传感器也可细分为被动式像素传感器 (Passive Pixel Sensor CMOS) 与主动式像素传感器 (Active Pixel Sensor CMOS)。

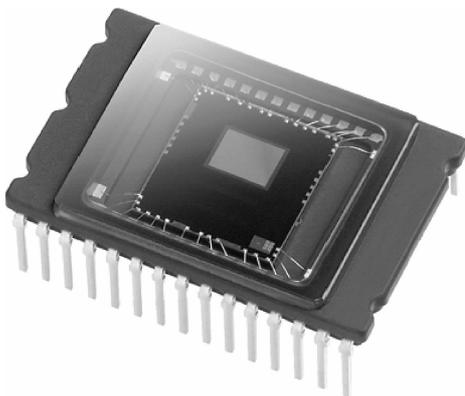


图 5-70 CMOS 传感器

### 4. CMOS 与 CCD 的区别

CCD 与 CMOS 传感器是被普遍采用的两种图像传感器，两者都是利用感光二极管进行光电转换，将图像转换为数字数据，而其主要差异是数字数据传送的方式不同。CCD 传感器中每一行中每一个像素的电荷数据都会依次传送到下一个像素中，由最底端部分输出，再经由传感器边缘的放大器进行放大输出；而在 CMOS 传感器中，每个像素都会邻接一个放大器及 A/D 转换电路，用类似内存电路的方式将数据输出。

造成这种差异的原因在于：CCD 的特殊工艺可保证数据在传送时不会失真，因此各个像素的数据可汇聚至边缘再进行放大处理；而 CMOS 工艺的数据在传送距离较长时会产生噪声，因此，必须先放大，再整合各个像素的数据。

由于数据传送方式不同，因此 CCD 与 CMOS 传感器在效能与应用上也有诸多差异，这些差异包括：

(1) 灵敏度差异 由于 CMOS 传感器的每个像素由 4 个晶体管与一个感光二极管构成 (含放大器与 A/D 转换电路)，使得每个像素的感光区域远小于像素本身的表面积，因此在

像素尺寸相同的情况下，CMOS 传感器的灵敏度要低于 CCD 传感器。

(2) 成本差异 由于 CMOS 传感器采用一般半导体电路最常用的 CMOS 工艺，可以轻易地将周边电路（如 AGC、CDS、Timing generator 或 DSP 等）集成到传感器芯片中，因此可以节省外围芯片的成本；除此之外，由于 CCD 采用电荷传递的方式传送数据，只要其中有一个像素不能运行，就会导致一整排的数据不能传送，因此控制 CCD 传感器的成品率比 CMOS 传感器困难许多，即使有经验的厂商也很难在产品问世的半年内突破 50% 的水平，因此，CCD 传感器的成本会高于 CMOS 传感器。

(3) 分辨率差异 CMOS 传感器的每个像素都比 CCD 传感器复杂，其像素尺寸很难达到 CCD 传感器的水平，因此，当比较相同尺寸的 CCD 与 CMOS 传感器时，CCD 传感器的分辨率通常会优于 CMOS 传感器的水平。例如，市面上 CMOS 传感器最高可达到 210 万像素的水平（OmniVision 的 OV2610，2002 年 6 月推出），其尺寸为 1/2 英寸，像素尺寸为  $4.25\mu\text{m}$ ，但 Sony 在 2002 年 12 月推出了 ICX452，其尺寸与 OV2610 相差不多（1/1.8 英寸），但分辨率却能高达 513 万像素，像素尺寸也只有 2.78mm 的水平。

(4) 噪声差异 由于 CMOS 传感器的每个光敏二极管都需搭配一个放大器，而放大器属于模拟电路，很难让每个放大器所得到的结果保持一致，因此与只有一个放大器放在芯片边缘的 CCD 传感器相比，CMOS 传感器的噪声就会增加很多，影响图像品质。

(5) 功耗差异 CMOS 传感器的图像采集方式为主动式，光敏二极管所产生的电荷会直接由晶体管放大输出，但 CCD 传感器为被动式采集，需外加电压让每个像素中的电荷移动，而此外加电压通常需要达到 12 ~ 18V；因此，CCD 传感器除了在电源管理电路设计上的难度更高之外（需外加 power IC），高驱动电压更使其功耗远高于 CMOS 传感器的水平。举例来说，OmniVision 推出的 OV7640（1/4 英寸、VGA），在 30fps 的速度下运行，功耗仅为 40mW；而致力于低功耗 CCD 传感器的 Sanyo 公司推出的 1/7 英寸、CIF 等级的产品，其功耗却仍保持在 90mW 以上。因此 CCD 发热量比 CMOS 大，不能长时间在阳光下工作。

综上所述，CCD 传感器在灵敏度、分辨率、噪声控制等方面都优于 CMOS 传感器，而 CMOS 传感器则具有低成本、低功耗以及高整合度的特点。不过，随着 CCD 与 CMOS 传感器技术的进步，两者的差异有逐渐缩小的态势，例如，CCD 传感器一直在功耗上作改进，以应用于移动通信市场（这方面的代表业者为 Sanyo）；CMOS 传感器则在改善分辨率与灵敏度方面的不足，以应用于更高端的图像产品。

## 5.4.2 线阵 CCD 扫描实现零件二维尺寸的高精度测量

### 1. 线阵 CCD 扫描测量原理

线阵 CCD 扫描测量系统主要由线阵 CCD 相机、运动工作台、控制电路及线光源等组成，扫描测量原理如图 5-71 所示。

被测零件放置于运动工作台上，随工作台一起以速度  $v$  向右方行进，零件未进入相机视场 AB 时，线光源所发射光线直接通过光学成像系统成为一帧灰度值较高的背景图像，当零件进入相机视场时，零件遮挡光线使得采集图像含有零件轮廓信息，将所有输出图像按采集的先后关系进行拼接，即可得到完整的高分辨率零件图像，通过图像处理得到零件的二维几何尺寸。

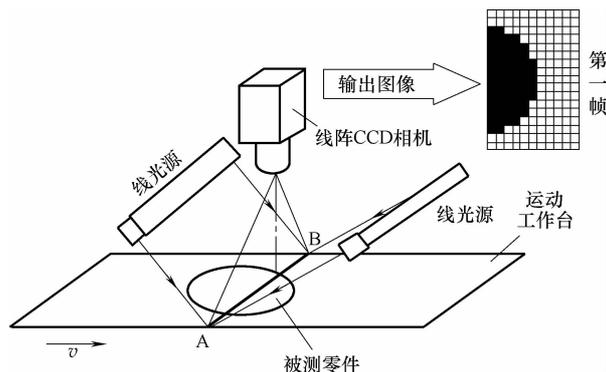


图 5-71 线阵 CCD 相机扫描测量原理

## 2. 扫描同步控制

扫描同步控制是线阵 CCD 扫描测量零件二维几何尺寸的关键技术，也是影响系统测量精度的最主要因素。所谓扫描同步是指：单位时间内线阵 CCD 相机所采集图像总和对应的物方实际尺寸与零件的行进速度相同。当扫描同步时，获取的零件图像与实际零件相比没有发生变形，如图 5-72a 所示，对其进行处理的结果最接近零件尺寸的真实值；当相机采集速度大于零件行进速度时，零件图像被拉长，如图 5-72b 所示，对其进行处理的结果将大于零件尺寸的真实值；当相机采集速度小于零件行进速度时，零件图像被压缩，如图 5-72c 所示。对其进行处理的结果小于零件尺寸的真实值。

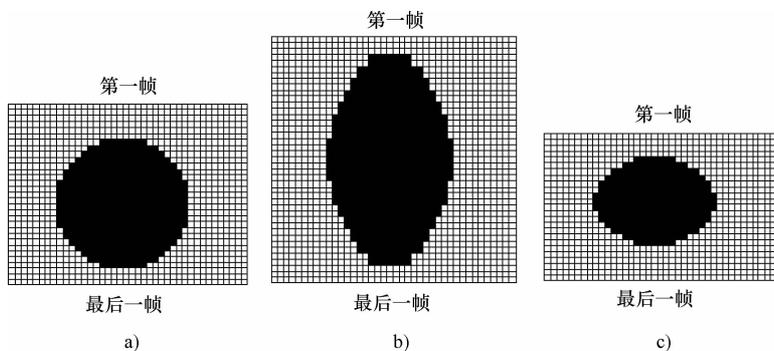


图 5-72 线阵 CCD 相机扫描图像

为保证对零件尺寸测量的准确性，需要进行同步控制。线阵 CCD 的像素尺寸  $S$  为  $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ ，线扫描速度  $v_x$  为 500 帧/s，镜头焦距  $f$  为 50mm，镜头到零件的距离  $D$  为 150mm，则 CCD 像素所对应的物方尺寸  $L$  为

$$L = \frac{D}{f} \times S = \frac{150}{50} \times 14 = 42\mu\text{m} \quad (5-3)$$

则单位时间内线阵 CCD 相机所采集图像总和对应的物方实际尺寸（即 CCD 相机扫描图像速度  $v$ ）为

$$v = L \times v_x = 42 \times 500 = 21\text{mm/s} \quad (5-4)$$

在这种情况下，要实现零件扫描同步则要求零件的行进速度为 21mm/s。

### 5.4.3 视觉检测系统的结构与工作原理

视觉检测系统主要由照明光源、光学镜头、摄像机、图像信息的处理与执行机构四大部分组成。

#### 1. 光源及照明系统

照明光源及照明系统是整个视觉检测系统的关键部件之一，起着十分重要的作用，它并不是简单的照亮物体而已。首先，照明光源要能够真实地再现印品的色彩，不能够造成颜色的失真，这就要求光源的发光光谱要接近于日光，同时应保证有足够的亮度，并在整个照明区域内的亮度要均匀一致；其次，光源和照明系统的设计要避免印品上的一些高反射率的特殊区域，如：烫金、激光防伪标志等使采集的图像溢出，造成检测精度降低或根本无法检测；最后，在某些应用场合，还要考虑光源与照明方案的配合应尽可能地突出物体特征量，在物体需要检测的部分与那些不重要部分之间应尽可能地产生明显的区别，以增加对比度，同时还应保证足够的整体亮度，物体位置的变化不应该影响成像的质量。在机器视觉应用系统中一般使用透射光和反射光。对于反射光情况应充分考虑光源和光学镜头的相对位置、物体表面的纹理、物体的几何形状、背景等要素。总之，在选择光源和设计照明系统时，要根据印品的具体情况，确定所需光源的几何形状、照明亮度、均匀度、光谱特性、发光效率及使用寿命等。

#### 2. 光学镜头

光学镜头相当于人眼的晶状体。光学镜头的品质会影响视觉检测系统分辨物体的能力，影响图像的对比度以及清晰成像的范围。一个镜头的成像质量优劣，即其对像差校正的优良与否，可通过像差大小来衡量，常见的像差有球差、彗差、像散、场曲、畸变、色差六种。

#### 3. 摄像机

我们知道，光学镜头通过的是被拍摄物体的光学信息，而在计算机中处理的是被拍摄物体的电信息，那么摄像机就是完成从光学信息到电信息转换的装置。

(1) 工作原理 在摄像机中，关键的器件是被称为视觉传感器的芯片。在芯片上整齐地排列着像小水池一样的单元，但它们盛的不是水，而是电荷。携带被拍摄物体光学信息的光线通过镜头而到达芯片的表面，光信息就变成了电荷信号，即曝光。光强的地方电荷多，光弱的地方电荷少，对应着印品上不同区域的明暗程度。不同的颜色分解为红、绿、蓝三种基色，存放在不同的单元之中。曝光所产生的电荷信号，按扫描顺序依次经过放大和模数转换等处理，最后从摄像机中输出。

(2) 分类 印品质量检测所使用的摄像机根据实际情况的不同可分为两大类，线阵式摄像机和面阵式摄像机。线阵式摄像机一次只能获得图像的一行信息，被拍摄的物体必须以直线的形式从摄像机前来回通过，才能获得完整的图像，因此非常适合于对以一定速度匀速运动的物体的图像检测。而面阵式摄像机则可以一次获得整幅图像的信息，因此摄像速度更快。比如我们日常使用的数码相机。

而光电转换器件是构成摄像机的核心器件。目前，典型的光电转换器件主要有 CCD、CMOS 图像传感器两种。CCD 是目前机器视觉最为常用的图像传感器。它集光电转换及电荷存储、电荷转移、信号读取于一体，是典型的固体成像器件。CMOS 图像传

传感器的开发最早出现在20世纪70年代初。20世纪90年代初期,随着超大规模集成电路(VLSI)制造工艺技术的发展,CMOS图像传感器得到迅速发展。目前,CMOS图像传感器以其良好的集成性、低功耗、宽动态范围和输出图像几乎无拖影等特点而得到了广泛的应用。

(3) 印品检测对摄像机的要求 从以上摄像机的工作原理可以看出,若要使系统能够正确地进行判断与决策,必须要求:①首先原始图像信息的质量要高;②摄像机要有足够的动态范围,即印品上的很亮和很暗的部位都能准确地反映;③摄像机要有足够的分辨率,即印品上的微小细节都能够清晰地再现;④摄像机要能够真实地再现印品的色彩;⑤摄像机的读出速度要与印品的前进速度相一致,以保证足够的精度和100%的采集。

#### 4. 图像信息的处理与执行机构

图像信息的处理与执行机构,即计算机,是机器视觉系统的核心,它相当于人的大脑。整个图像信息的处理过程通常包括:

(1) 预处理 高速运动的印品在通过摄像机时,与模板图像相比,往往会产生位置上的移动、旋转,有时甚至有飘动,使采集的图像发生变形失真;光源的不稳定和外界环境的影响,使采集的图像亮度不均匀,颜色发生变化;其他外部设备、供电电源和采集设备本身也会引入一定的干扰和噪声。为此,在安装视觉系统的过程中,一方面要消除这些不利的因素,另一方面还要通过图像预处理来排除和淡化它们的影响。常见的图像预处理操作主要包括图像增强、数据编码和传输、平滑、边缘锐化、分割等内容。经过这些处理之后,图像的质量得到了相当程度的改善,既改善了图像的视觉效果,又便于计算机对图像进行分析、处理与识别。

(2) 特征的提取与识别

(3) 测量 用简洁的一句话来说即是“与模板相比,找出差异”。

综上所述,机器视觉是集光、机、电、计算机于一身的技术,极适用于大批量生产过程中的重复性测量、检查与辨识。

### 5.4.4 一种机器人视觉系统模块的设计

#### 1. 概述

机器视觉可以代替人类的视觉从事检验、目标跟踪、机器人导向等方面的工作,特别是在那些需要重复、迅速地从图像中获取精确信息的场合。尽管在目前硬件和软件技术条件下,机器视觉功能还处于初级水平,但其潜在的应用价值引起了世界各国的高度重视,发达国家如美国、日本、德国、法国等都投入了大量的人力物力进行研究,近年来已经在机器视觉的某些方面获得了突破性的进展,机器视觉在车辆安全技术、自动化技术等应用中也越来越显示出其重要价值。本文根据最新的CMOS图像采集芯片设计了一种通用的视觉系统模块,经过编制不同的图像处理、模式识别算法程序,本模块可以应用到足球机器人、无人车辆等各种场合。

#### 2. 设计原理

系统硬件体系结构图如图5-73所示。

系统包含5个主要芯片:图像采集芯片OV7620,高速微处理器SH4,大规模可编程阵列FPGA,和串口通信控制芯片MAX232。FPGA内部编程设立两个双口RAM,产生图像传

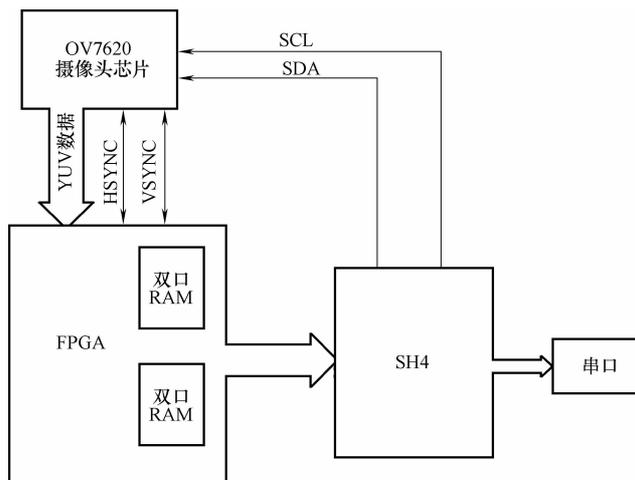


图 5-73 系统硬件体系结构图

感器所需的点频、行场同步等信号，以及控制双口 RAM 的存储时序。SH4 负责对 OV7620 通过 I<sup>2</sup>C 进行配置，读取双口 RAM 的图像数据，进行处理，并通过串口实现图像资料的上传或控制步进电动机等其他设备。

### 3. 图像采集模块

系统模块以 CMOS 图像传感器 OV7620 为核心，还包括一个聚光镜头和其他一些辅助元器件，比如 27MHz 的晶振、电阻、电容等。

COMS 图像传感器是近几年发展较快的新型图像传感器，由于采用了相同 COMS 技术，因此可以将像素阵列与外围支持电路集成在同一块芯片上，是一个完整的图像系统（Camera on Chip）。本系统采用的是 Omnvision 公司推出的一块 CMOS 彩色图像传感器 OV7620，分辨率为 640x480。它能工作在逐行扫描方式下，也能工作在隔行扫描方式下。它不仅能输出彩色图像，也可用作黑白图像传感器。这块芯片支持的图像输出格式有很多种：① YCrCb4: 2: 2 16bit/8bit 格式；② ZV 端口输出格式；③ RGB 原始数据 16bit/8bit；④ CCIR601/CCIR656 格式。其功能包括有对比度、亮度、饱和度、白平衡及自动曝光、同步信号位置及极性输出，帧速率和输出格式等都可以通过 I<sup>2</sup>C 总线进行编程配置片内寄存器控制。

聚光镜头选用桑来斯公司生产的 DSL103 镜头。此镜头体积小，适合嵌入式视觉传感器的应用场合。

### 4. FPGA 接口模块

FPGA 采用 Xilinx 公司的 xc2s100，这款芯片内部集成了 10000 个逻辑门。接口程序采用 VHDL（Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language）书写。为了提高数据的传输速率，在 xc2s100 内部分配了两个双口 RAM 缓冲区，其大小为 127KB，每个双口 RAM 存储 1 行的图像数据。两组双口 RAM 进行奇偶行计数器切换。当一行存储完毕后，立即向 SH4 传送一个读取该行数据的中断的申请信号。FPGA 内部功能模块图如图 5-74 所示。

这里主要问题在于 FPGA 内部的双口 RAM 读写操作共用同一数据总线和地址总线，当同时进行读写操作的时候就会产生时序问题导致写入或读出的数据错误。在这两个过程中为

为了防止数据和地址总线冲突，在 FPGA 内部设计了一个中央总线仲裁器。根据公共数据传输的先后顺序，中央仲裁器先接受图像传感器的总线请求，当图像存储到 RAM 中后，中央仲裁器才响应单片机的读信号请求。

### 5. 单片机模块

本系统采用 SH4 芯片作为处理器：SH4 单片机是日立公司推出的一款低功耗、高性能，RISC（精简指令集计算机）结构的全 32 位单片机。其处理速度可高达 60 ~ 100MIPS，能在 2.25V 电压下工作，功耗仅 400mW。片内集成有 32 位乘法器、4 路 5KB CACHE、存取器管理单元 MMU 和其他一些通用接口及时钟电路等。日立公司为 SH4 系列单片机提供了 C 及 C++ 语言集成编译工具 HIM（Hitachi IntegrationManag）。利用它可以将日立 C、C++ 格式的源程序编译链接为汇编程序或目标机器码。

图像传感器芯片 OV7620 具有灵活的可编程功能，可通过 I<sup>2</sup>C 总线对其进行编程来设置各功能寄存器。由于单片机没有内部硬件 I<sup>2</sup>C 总线接口，所以只有采用软件模拟的方法实现 I<sup>2</sup>C 总线接口功能。取 SH4 的两个 I/O 引脚作为 I<sup>2</sup>C 总线的 SCL 和 SDA 总线器件接口。

本模块采用了人类可以识别的 ASCII 串口通信协议，从而可以通过上位机方便地和人进行交互通信。当连接到一台计算机上，本模块可通过串口上传整幅原始图像数据，用来进行系统调试或更高级的图像处理。

#### 5.4.5 iVu 系列视觉传感器在标签喷码检测上的应用

iVu 视觉传感器是美国邦纳最新推出的全新视觉产品。传统的视觉相机体型较大，更改环境操作时需要电脑进行设定。针对中国的视觉相机市场需求，邦纳开发了全新的操作方便、不需要 PC 进行设定的机器视觉——iVu。其精小的体型、强大的功能、独特的外观尤其适用于普通光电传感器不能解决问题的场合。

所有食品饮料在生产过程中都要求在包装上必须有日期/标签的喷码信息，这就需要—个经济有效的方法来确保喷码信息是否存在。

如图 5-75 所示，通过设定 iVu 的 Match 工具来检测每个包装上是否有喷码信息，以及喷码信息是否正确。首先抓取一个标准喷码图像作为模版，检测过程中将每个包装盒的表面与模板进行对比，当发现包装盒表面没有喷码信息或信息错误时，给生产线发出 FAIL 信号，将该产品剔除。

同理，iVu 视觉传感器同样可以应用于检测油漆桶标签印字有无。图 5-76 是某生产油漆的生产流水线上的油漆桶贴标机，该设备上有时标签上会没有印字，其有效的解决方案是通过 iVu

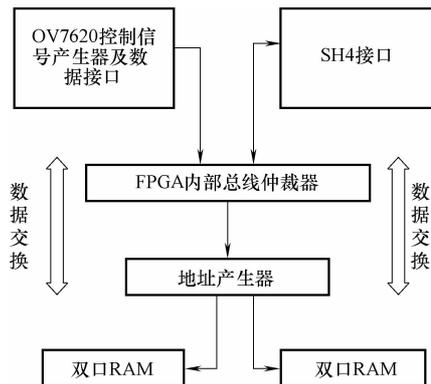


图 5-74 FPGA 内部功能模块图



图 5-75 日期/标签的喷码检测

图像传感器设备进行检测，并输出开关量信号报警以提示操作人员。



图 5-76 视觉传感器安装于设备上对标签进行检测

## 【思考与练习】

### 1. 选择题

- (1) 光敏电阻的工作基础是 ( ) 效应。
    - a. 外光电效应
    - b. 内光电效应
    - c. 光生伏特效应
  - (2) 光敏电阻在光照下，阻值 ( )。
    - a. 变小
    - b. 变大
    - c. 不变
  - (3) 光敏二极管工作在 ( ) 偏置状态，无光照时 ( )，有光照时 ( )。
    - a. 正向
    - b. 反向
    - c. 截止
    - d. 导通
  - (4) 光敏晶体管与光敏二极管相比，灵敏度 ( )。
    - a. 高
    - b. 低
    - c. 相同
  - (5) 以下元件中，属于光源的有 ( )，属于光电元件的有 ( )。
    - a. 发光二极管
    - b. 光敏晶体管
    - c. 光电池
    - d. 激光二极管
    - e. 红外发射二极管
    - f. 光敏二极管
  - (6) 在光线作用下，半导体电导率增加的现象属于 ( )。
    - a. 外光电效应
    - b. 内光电效应
    - c. 光电发射
  - (7) ( ) 一般用于光的测量、控制和光电转换。
    - a. 发光二极管
    - b. 光敏电阻
    - c. 光电池
    - d. 激光二极管
  - (8) 光电式传感器属于 ( ) 传感器。
    - a. 接触式
    - b. 非接触式
2. 光电式传感器可分为哪几类？分别举出几个例子加以说明。

3. 光电效应有哪几种？与之对应的光电元件有哪些？

4. 造纸厂经常需要测量纸张的“白度”以提高产品质量（见图 5-77），请简要说明工作原理。

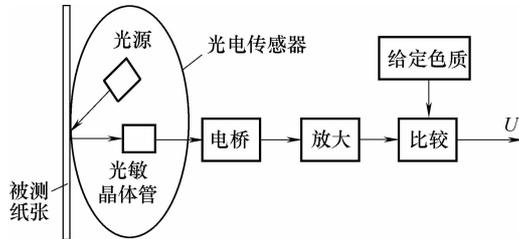


图 5-77 题 4 图

5. 图 5-78 给出了光电式鼠标的外形结构及工作原理图，鼠标内部安置了两个相互垂直的滚轴，分别是 X 方向的滚轴和 Y 方向的滚轴，这两个滚轴都与一个可以滚动的小球接触，小球滚动时会带动两个滚轴转动，试分析其工作过程。



图 5-78 题 5 图

6. 如图 5-79 所示，说明光电式传感器的工作原理。

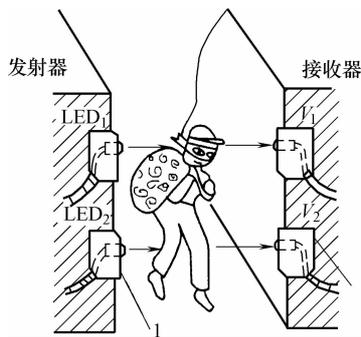


图 5-79 题 6 图

7. 光纤传感器有哪些类型？其各自的工作原理是什么？

8. 激光传感器的优点是什么？

# 附 录

## 附录 A 工业热电阻分度表

工作端温度/℃	电阻值/Ω		工作端温度/℃	电阻值/Ω	
	Cu50	Pt100		Cu50	Pt100
-200		18.52	30	56.43	111.67
-190		22.83	40	58.57	115.54
-180		27.10	50	60.70	119.40
-170		31.34	60	62.84	123.24
-160		35.54	70	64.98	127.08
-150		39.72	80	67.12	129.90
-140		43.88	90	69.26	134.71
-130		48.00	100	71.40	138.51
-120		52.11	110	73.54	142.29
-110		56.19	120	75.69	146.07
-100		60.26	130	77.83	149.83
-90		64.30	140	79.98	153.58
-80		68.33	150	82.13	157.33
-70		72.33	160		161.05
-60		76.33	170		164.77
-50	39.24	80.31	180		168.48
-40	41.40	84.27	190		172.17
-30	43.56	88.22	200		175.86
-20	45.71	92.16	210		179.53
-10	47.85	96.09	220		183.19
0	50.00	100.00	230		186.84
10	52.14	103.90	240		190.10
20	54.29	107.79	250		194.10

(续)

工作端温度/℃	电阻值/Ω		工作端温度/℃	电阻值/Ω	
	Cu50	Pt100		Cu50	Pt100
260		197.71	560		300.75
270		197.71	570		304.01
280		201.31	580		307.25
290		204.90	590		310.49
300		208.48	600		313.71
310		215.61	610		316.92
320		219.15	620		320.12
330		222.68	630		323.30
340		226.21	640		326.48
350		229.72	650		329.64
360		233.21	660		332.79
370		236.70	670		335.93
380		240.18	680		339.06
390		243.64	690		342.18
400		247.09	700		345.28
410		250.53	710		348.38
420		253.96	720		351.46
430		257.38	730		354.53
440		260.78	740		357.59
450		264.18	750		360.64
460		267.56	760		363.67
470		270.93	770		366.70
480		274.29	780		369.71
490		277.64	790		372.71
500		280.98	800		375.70
510		284.30	810		378.68
520		287.62	820		381.65
530		290.92	830		384.60
540		294.21	840		387.55
550		297.49	850		390.84

注：ITS-1990 国际温标所颁布的分度表的温度间隔是 1℃，本书为节省篇幅，将间隔扩大到 10℃，仅供读者练习查表用，附录 B 亦如此。若读者欲获知每 1℃ 的对应阻值或毫伏数，可查阅有关 ITS-1990 国际温标的手册。

## 附录 B 镍-镍硅（镍铝）K型热电偶分度表（自由端温度为0℃）

工作端温度 /℃	热电动势 /mV	工作端温度 /℃	热电动势 /mV	工作端温度 /℃	热电动势 /mV
-270	-6.458	400	16.397	10	0.397
-260	-6.441	410	16.820	20	0.798
-250	-6.404	420	17.243	30	1.203
-240	-6.344	430	17.667	40	1.612
-230	-6.262	440	18.091	50	2.023
-220	-6.158	450	18.516	60	2.436
-210	-6.035	460	18.941	620	25.755
-200	-5.891	470	19.366	630	26.179
-190	-5.730	480	19.792	640	26.603
-180	-5.550	490	20.218	650	27.025
-170	-5.354	500	20.644	660	27.447
-160	-5.141	510	21.071	670	27.869
-150	-4.913	520	21.497	680	28.289
-140	-4.669	530	21.924	690	28.710
-130	-4.411	540	22.350	700	29.129
-120	-4.138	550	22.776	710	29.548
-110	-3.852	560	23.203	720	29.965
240	9.747	570	23.629	730	30.382
250	10.154	580	24.055	740	30.798
260	10.561	590	24.480	750	31.213
270	10.971	600	24.905	760	31.628
280	11.382	610	25.330	770	32.041
290	11.795	-100	-3.554	780	32.453
300	12.209	-90	-3.243	790	32.865
310	12.624	-80	-2.920	800	33.275
320	13.040	-70	-2.587	810	33.685
330	13.457	-60	-2.243	820	34.093
340	13.874	-50	-1.889	830	34.501
350	14.293	-40	-1.527	840	34.908
360	14.713	-30	-1.156	850	35.313
370	15.133	-20	-0.778	860	35.718
380	15.554	-10	-0.392	870	36.121
390	15.975	0	0.00	880	36.524

(续)

工作端温度 /°C	热电动势 /mV	工作端温度 /°C	热电动势 /mV	工作端温度 /°C	热电动势 /mV
890	36.925	180	7.340	1160	47.367
900	37.326	190	7.739	1170	47.737
910	37.725	200	8.138	1180	48.105
920	38.124	210	8.539	1190	48.473
930	38.522	220	8.940	1200	48.838
940	38.918	230	9.343	1210	49.202
950	39.314	1000	41.276	1220	49.565
960	39.708	1010	41.665	1230	49.926
970	40.101	1020	42.053	1240	50.286
980	40.494	1030	42.440	1250	50.644
990	40.885	1040	42.826	1260	51.000
70	2.851	1050	43.211	1270	51.355
80	3.267	1060	43.595	1280	51.708
90	3.682	1070	43.978	1290	52.060
100	4.096	1080	44.359	1300	52.410
110	4.509	1090	44.740	1310	52.759
120	4.920	1100	45.119	1320	53.106
130	5.328	1110	45.497	1330	53.451
140	5.735	1120	45.873	1340	53.795
150	6.138	1130	46.249	1350	54.138
160	6.540	1140	46.623	1360	54.479
170	6.941	1150	46.995	1370	54.819

## 附录 C Banner 公司部分光纤及传感器资料

### 1. 直反式光纤

型 号	类型	光纤光芯尺寸	结 构	外形尺寸 (mm 及 inches)
PBCT23TM3	直反式 同轴光纤 带螺纹	1mm × 0.5mm 9mm × 0.25mm	带接口与 D11& D12 塑料光纤传感 器配用, 带 M3 螺纹	

(续)

型号	类型	光纤光芯尺寸	结构	外形尺寸 (mm 及 inches)
PBCT23TS	直反式 同轴光纤 带螺纹	1mm × 0.5mm 9mm × 0.25mm	带接口与 D11&D12 塑料光纤 传感器配用, 不锈 钢表皮, 带 M4 螺 纹, 可配用 L4C6 镜头	
PBCT23TS1	直反式 同轴光纤 带螺纹	1mm × 0.5mm 9mm × 0.25mm	带接口; 可与 Q45, OMNI-BEAM, MAXI-BEAM&VALU- BEAM 塑料光纤传 感器配用不锈钢表 皮, 可配用 L4C6 镜头	
PBCT26U	直反式 同轴光纤 带螺纹	1mm × 0.5mm 9mm × 0.25mm	可自行截短 带 M4 螺纹 可配用 L4C6 镜头	
PBCT26UM3	直反式 同轴光纤 带螺纹	1mm × 0.5mm 9mm × 0.25mm	可自行截短 带 M3 螺纹	
PBCT26 UM4M2.5	直反式 同轴光纤 带螺纹	1mm × 0.5mm 9mm × 0.25mm	可自行截短 带 M4&M2.5 螺纹 配用 w/L2 镜头	
PBPS66U	直反式 探针 侧面出光	1.5mm	可自行截短 侧面出光 不可弯折探针	
PBR1X326U	直反式 探针 正面出光	32mm × 0.265mm	可自行截短 铝制外壳检测头 正面出光	

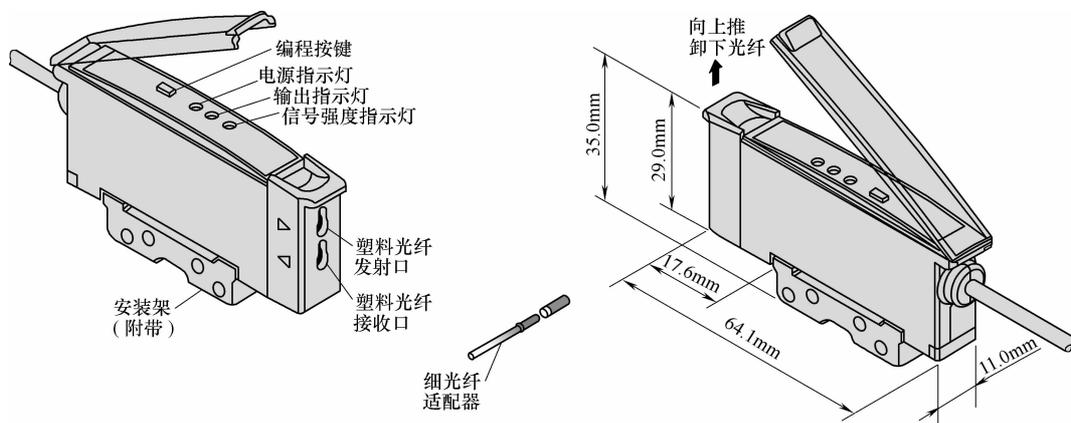
(续)

型 号	类型	光纤光芯尺寸	结 构	外形尺寸 (mm 及 inches)
PBRS1X326U	直反式 侧面出光 矩形	32mm × 0.265mm	可自行截短 铝制外壳检测头 侧面出光	
PBRS26U	直反式 矩形	0.5mm	可自行截短 小型扁平检测头	
PBT16U	直反式 带螺纹	0.25mm	可自行截短 带 M3 螺纹	
PBT26U PBT26UHF	直反式 带螺纹	0.5mm	可自行截短 带 M3 螺纹	

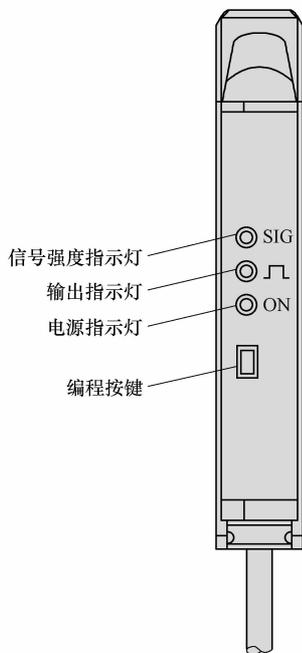
## 2. D11 系列光纤传感器技术指标

型 号	开关阈值设定	连接方式	供电电压	输出形式	最大检测距离
					直反式性能为 90% 反射率白测试卡测试结果
D11E2N6FP D11E2N6FPQ	设定在暗态 示教值以上	2m(6.5')	10 ~ 30V dc	NPN	检测范围随检测模式和光纤种类不同而变化  PIT46U 型光纤, 对射式: 180mm* PIT26U 型光纤, 对射式: 50mm  PBT46U 型光纤, 反射式: 50mm PBT26U 型光纤, 反射式: 10mm  * 对射式检测距离可使用镜头来延长 (见样本镜头部分)
4 针 Pico QD					
D11EP6FP D11EP6FPQ	2m(6.5')	PNP			
4 针 Pico QD					
D11E2P6FP D11E2P6FPQ	设定在亮/暗态 示教值中间	2m(6.5')	NPN		
4 针 Pico QD					
D11E2N6FP D11E2N6FPQ	设定在亮/暗态 示教值中间	2m(6.5')	PNP		
4 针 Pico QD					

### 3. D11 系列光纤传感器外观尺寸

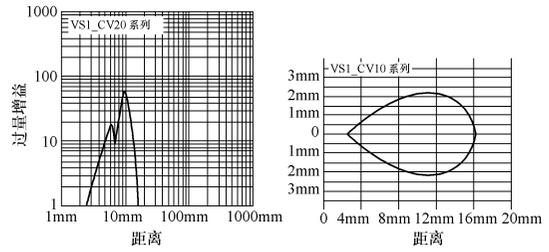
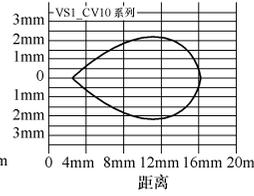
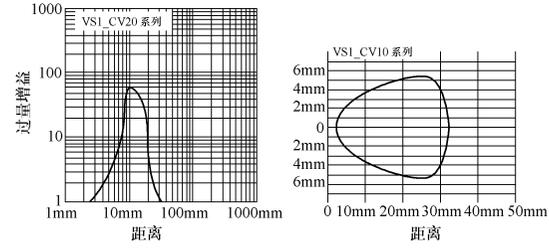
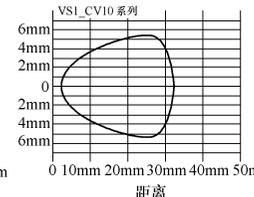


面板外形



#### 4. VS1 系列光纤传感器技术指标

VS1 系列聚焦式传感器-可见红光型号

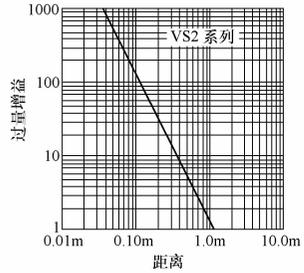
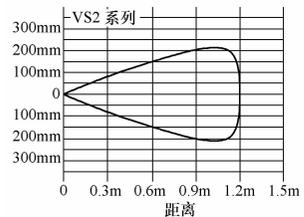
型 号	检测范围	电缆形式	供电电压	输出形式	过量增益	光 形 图
VS1AN5CV10 VS1AN5CV10Q	10mm(0.4") ± 5mm	2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式	DC10 ~ 30V	NPN/LO		
VS1RN5CV10 VS1RN5CV10Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		NPN/DO		
VS1AP5CV10 VS1AP5CV10Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/LO		
VS1RP5CV10 VS1RP5CV10Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/DO		
VS1AN5CV20 VS1AN5CV20Q	20mm(0.8") ± 10mm	2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式	DC10 ~ 30V	NPN/LO		
VS1RN5CV20 VS1RN5CV20Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		NPN/DO		
VS1AP5CV20 VS1AP5CV20Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/LO		
VS1RP5CV20 VS1RP5CV20Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/DO		

VS1 系列聚焦式传感器-红外光型号

型 号	检测范围	电缆形式	供电电压	输出形式	过量增益	光 形 图
VS1AN5C10 VS1AN5C10Q	10mm(0.4") ± 5mm	2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式	DC10 ~ 30V	NPN/LO		
VS1RN5C10 VS1RN5C10Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		NPN/DO		
VS1AP5C10 VS1AP5C10Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/LO		
VS1RP5C10 VS1RP5C10Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/DO		
VS1AN5C20 VS1AN5C20Q	20mm(0.8") ± 10mm	2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式	DC10 ~ 30V	NPN/LO		
VS1RN5C20 VS1RN5C20Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		NPN/DO		
VS1AP5C20 VS1AP5C20Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/LO		
VS1RP5C20 VS1RP5C20Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 电缆接插件式		PNP/DO		

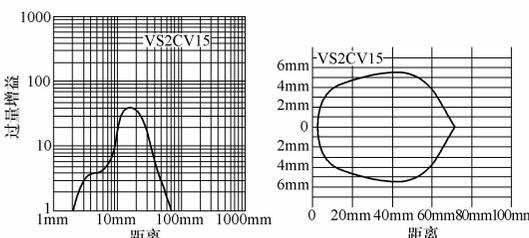
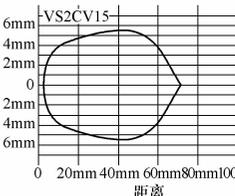
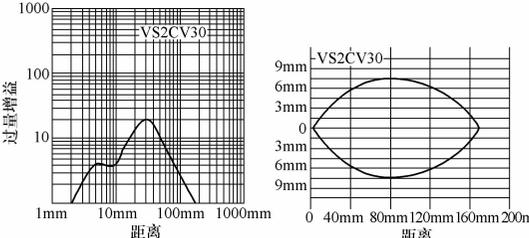
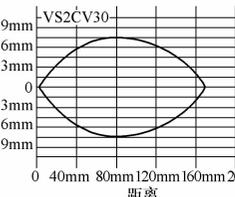
## 5. VS2 系列光纤传感器技术指标

VS2 系列对射式发射器(E)和接收器(R)

型号*	检测距离	电缆形式	供电电压	输出形式	过量增益		
VS2KAN5V 套装传感器 VS25EV 发射器 VS2AN5R 接收器	最佳检测距离 600mm(24") 最大检测距离 1.2m(48")	2m(6.5')	DC10 ~ 30V	NPN/LO			
VS2KAN5VQ 套装传感器 VS25EVQ 发射器 VS2AN5RQ 接收器		3 针 Pico 型 电缆式接插件					
VS2KRN5V 套装传感器 VS25EV 发射器 VS2RN5R 接收器		2m(6.5')	DC10 ~ 30V	NPN/DO			
VS2KRN5VQ 套装传感器 VS25EVQ 发射器 VS2RN5RQ 接收器		3 针 Pico 型 电缆式接插件					
VS2KAP5V 套装传感器 VS25EV 发射器 VS2AP5R 接收器			2m(6.5')	DC10 ~ 30V		PNP/LO	<p>光形圈 有效光束: 3mm</p> 
VS2KAP5VQ 套装传感器 VS25EVQ 发射器 VS2AP5RQ 接收器			3 针 Pico 型 电缆式接插件				
VS2KRP5V 套装传感器 VS25EV 发射器 VS2RP5R 接收器			2m(6.5')	DC10 ~ 30V		PNP/DO	
VS2KRP5VQ 套装传感器 VS25EVQ 发射器 VS2RP5RQ 接收器			3 针 Pico 型 电缆式接插件				

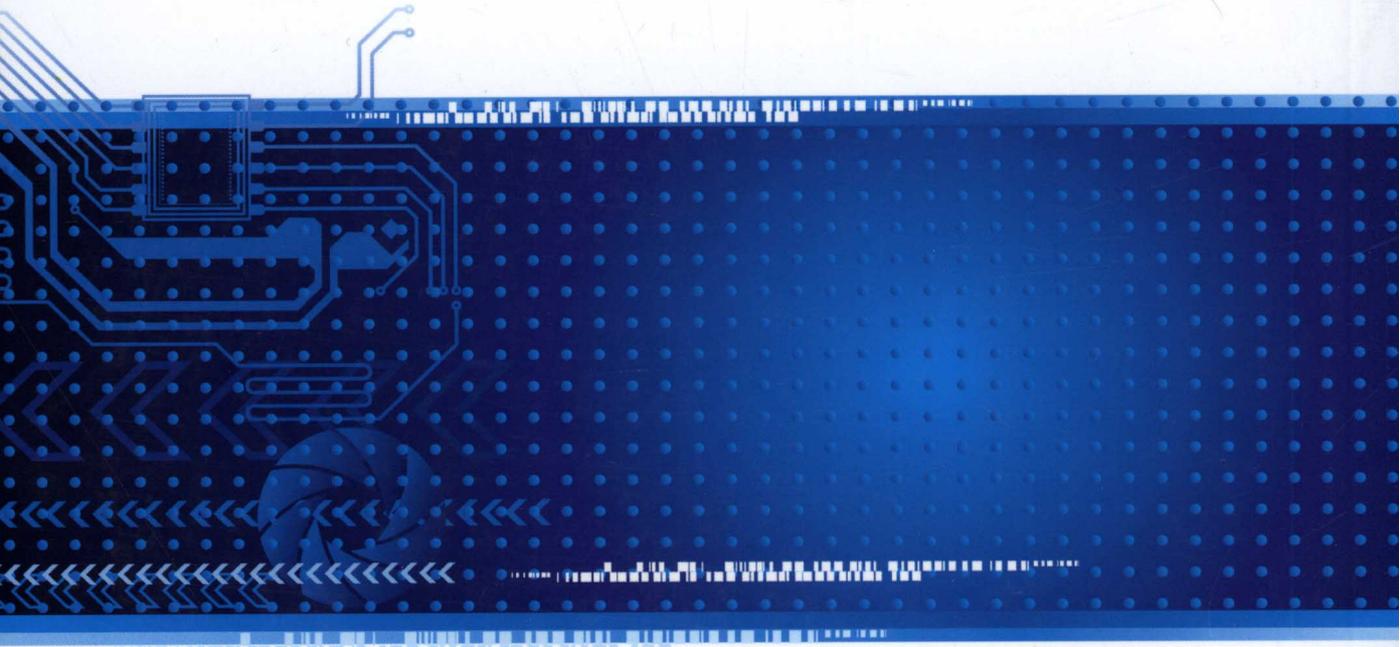
\*注:传感器可以成套订购,也可以分别订购。

VS2 系列聚焦式传感器

型 号	检测范围	电缆形式	供电电压	输出形式	过量增益	光 形 图
VS2AN5CV15 VS2AN5CV15Q	15mm(0.6") ± 5mm	2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式	DC10 ~ 30V	NPN/LO		
VS2RN5CV15 VS2RN5CV15Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式		NPN/DO		
VS2AP5CV15 VS2AP5CV15Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式		PNP/LO		
VS2RP5CV15 VS2RP5CV15Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式		PNP/DO		
VS2AN5CV30 VS2AN5CV30Q	30mm(1.2") ± 10mm	2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式	DC10 ~ 30V	NPN/LO		
VS2RN5CV30 VS2RN5CV30Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式		NPN/DO		
VS2AP5CV30 VS2AP5CV30Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式		PNP/LO		
VS2RP5CV30 VS2RP5CV30Q		2m(6.5')3 芯电缆式 3 针 Pico 型电缆接插件式		PNP/DO		

## 参 考 文 献

- [1] 李方园. 自动化综合实践 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 柳桂国. 检测技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 柳桂国. 智能仪表技术 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2005.
- [4] 胡向东, 刘京诚, 余成波, 等. 传感器与检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 陈圣林, 侯成晶. 传感器技术及其应用电路 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 梁森, 欧阳三泰, 王侃夫. 自动检测技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [7] 陈黎敏. 传感器技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [8] 贺良华. 现代检测技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008.
- [9] 李瑜芳. 传感器原理及其应用 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2008.
- [10] 李邓化, 彭书华, 许晓飞. 智能检测技术及仪器 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] 吴建平. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [12] 高向升, 张金锋. 弯管流量计应用技巧实例分析. <http://www.ca800.com>.
- [13] TC818 张力控制器使用说明书. 深圳市亚特克电子有限公司. <http://www.altec.cc>.
- [14] 王锋. 通过基于光电编码器的数字电路实现直线位移高精度测量的一种方法. <http://www.chuangdong.com>.
- [15] 王东哲, 等. 基于无线传感器网络的智能交通系统的设计. <http://www.ca800.com>.
- [16] 徐亮, 等. 基于 MSP430F149 的无线环境监测传感器系统设计 [J]. 国外电子元器件, 2006 (12).
- [17] 寇海洲, 等. 无线传感器网络在车位控制中的应用 [J]. 计算机与信息技术, 2008 (4).
- [18] 李娜娜, 等. 基于 WSN 和分级 RFID 融合的物流跟踪监控系统 [J]. 计算机技术与发展, 2008 (10).
- [19] 陈丽华, 等. 集装箱数控焊机传感器数据融合 [J]. 焊接学报, 2008 (10).
- [20] 基于线阵 CCD 扫描的测量技术. <http://www.ca800.com>.
- [21] 陆晓君. ZigBee (物联网) 无线网络电能管理系统设计与选型方案. <http://www.ca800.com>.
- [22] 包佑炳. 基于 RFID 电子标签的物流控制系统的设计. <http://www.ca800.com>.
- [23] ZigBee 无线网状网络在楼宇自控系统中的应用. <http://www.ca800.com>.
- [24] 光电开关在热轧钢坯长度在线检测中的应用. <http://www.ca800.com>.
- [25] 冯成龙, 等. 传感器应用技术项目化教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.



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>

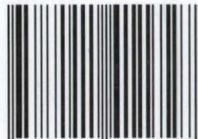
封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术/工业自动化仪表

ISBN 978-7-111-41172-7

策划编辑◎林春泉 / 封面设计◎路恩中

ISBN 978-7-111-41172-7



9 787111 411727 >

定价: 33.00元