

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

传感器原理及应用

FUNDAMENTAL AND
APPLICATION OF SENSOR

苑会娟 © 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

传感器原理及应用

主 编 苑会娟
副主编 周 真 吴海滨 李万臣
参 编 赵文杰 冯侨华 王北一 周宝国 宋起超
主 审 于晓洋



机械工业出版社

本书系统介绍了传感器的基本概念、基本特性、技术性能指标及改善性能的途径,传感器的标定和校准方法以及传感器的发展和选用原则,并对电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、热电式、光电式、化学式和波式等各类传感器的工作原理、组成结构、特性、测量电路及其典型应用做了较系统的阐述,并对其他现代新型传感器做了简要介绍。

本书是测控技术与仪器专业研究性教学方法配套系列教材之一,可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机械设计制造及其自动化等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书,同时也可作为从事电子仪器仪表及测控技术行业的工程技术人员提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器原理及应用/苑会娟主编. —北京:机械工业出版社, 2017. 10

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

ISBN 978-7-111-58175-8

I. ①传… II. ①苑… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 243169 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:王 康 责任编辑:王 康 王小东

责任校对:刘 娟 封面设计:张 静

责任印制:李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.25 印张·493 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58175-8

定价:48.00 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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前言

按照系統工程的观点，可以将仪器仪表产品的技术结构分为信息流、能量流和材料流，用信息流可以控制能量流和材料流。信息流涵盖信息获取、信息采集与变换、信息转换与处理、信息传输、信息控制、信息输出与显示等全过程。“测控技术与仪器”专业培养的学生应掌握测量系统科学构成的相关理论知识和应用技术，其中信息流传输过程中的信息获取、转换处理、传输和控制已成为测量系统构成的核心技术基础，而传感技术完成对信息的获取、传输和处理，在信息技术中起着相当重要的作用，因此，“传感器原理及应用”是测控技术与仪器专业的主干专业课，同时，本课程也是高等院校电子信息工程、机械设计制造及其自动化、电气工程及其自动化、电子科学与技术以及物联网工程等专业的专业重要课。

随着 2016 年 6 月我国正式加入《华盛顿协议》，培养学生的工程能力已经成为我国工程教育的主流趋势。为适应特色专业建设和工程教育认证，根据中国机械工业教育协会仪器科学与技术学科教学委员会的要求编写了本书。

本书面向普通高等院校测控技术与仪器专业，力求突出专业特色，以案例形式引入每一单元内容，既可增强学生的工程观念，又可增加阅读兴趣。在阐述传感器基本原理的基础上，侧重分析各种传感器性能，并引用较多的传感器应用实例，突出工程应用，使理论更紧密地联系实际。同时，融入学科发展新理论和新技术，如第 11 单元的生物传感器、第 12 单元的微传感器与智能传感器和第 13 单元的无线传感器网络，并通过相关知识链接将国家相关标准以及一些前沿研究成果介绍给学生。

全书共分 14 个单元，由 4 所院校 9 位从事传感器教学的教师编写，苑会娟任主编。第 1、2、14 单元由哈尔滨理工大学苑会娟编写；第 3 单元 3.1~3.3 节、第 11 单元由哈尔滨理工大学周真编写；第 4、5 单元由哈尔滨理工大学吴海滨编写；第 6、13 单元由哈尔滨理工大学王北一编写；第 7 单元由黑龙江科技大学周宝国编写；第 8 单元由哈尔滨理工大学赵文杰编写；第 9 单元由哈尔滨工程大学李万臣编写；第 10、12 单元由哈尔滨理工大学冯侨华编写；第 3 单元 3.4、3.5 节由黑龙江工学院宋超编写。全书由苑会娟负责统稿，并由哈尔滨理工大学于晓洋主审。

本书适合作为普通高等院校测控技术与仪器专业的教材，也可作为其他相关专业的教材，还可供从事传感器技术的研究、生产与应用的科技工作者和工程技术人员参考。

在本书编写过程中，作者参阅了相关教材和文献，在此向各位原作者致谢。

由于编者水平有限，尽管有多位老师反复审校，但书中可能还会有疏漏或错误之处，恭请读者不吝赐教。

编 者

目 录

前言

第1单元 传感器概论	1
学习要点	1
相关知识链接	1
引导案例	1
1.1 传感器的定义与组成	2
1.2 传感器的基本特性	5
1.3 传感器的技术指标	18
1.4 传感器的发展趋势	21
习题	23
参考文献	24
第2单元 电阻式传感器	25
学习要点	25
相关知识链接	25
引导案例	25
2.1 电阻应变式传感器	26
2.2 应变片的静态特性	28
2.3 应变片的动态特性	31
2.4 应变片电桥测量电路	34
2.5 应变片的温度效应和补偿	38
2.6 应变片的选用与粘贴	42
2.7 电阻应变式传感器的应用	45
2.8 压阻式传感器	48
2.9 电位器式传感器	52
习题	55
参考文献	57
第3单元 电感式传感器	58
学习要点	58
相关知识链接	58
引导案例	58
3.1 自感式传感器	59
3.2 差动变压器式传感器	65
3.3 零点残余电压	69
3.4 电涡流式传感器	70
3.5 压磁式传感器	75
习题	77

参考文献	78
第4单元 电容式传感器	79
学习要点	79
相关知识链接	79
引导案例	79
4.1 电容式传感器的工作原理	80
4.2 电容式传感器的特性	82
4.3 电容式传感器的测量电路	85
4.4 电容式传感器的特点及设计要点	90
4.5 电容式传感器的应用	94
习题	100
参考文献	100
第5单元 压电式传感器	101
学习要点	101
相关知识链接	101
引导案例	101
5.1 压电效应	102
5.2 压电材料	103
5.3 压电元件	108
5.4 测量电路	110
5.5 压电式传感器应用	114
习题	117
参考文献	117
第6单元 磁电式传感器	118
学习要点	118
相关知识链接	118
引导案例	118
6.1 磁电感应式传感器	118
6.2 霍尔式传感器	121
6.3 磁栅式传感器	126
6.4 磁电式传感器应用	129
习题	132
参考文献	133
第7单元 热电式传感器	134
学习要点	134
相关知识链接	134

引导案例	134	参考文献	258
7.1 热电偶传感器	135	第 11 单元 生物传感器	259
7.2 热电阻温度传感器	143	学习要点	259
7.3 PN 结型温度传感器	148	相关知识链接	259
7.4 石英晶体温度传感器	151	引导案例	259
7.5 热电式传感器的应用	152	11.1 生物传感器的结构及工作原理	260
习题	154	11.2 生物功能物质的分子识别机理	261
参考文献	155	11.3 酶传感器	264
第 8 单元 光电式传感器	156	11.4 免疫传感器	267
学习要点	156	11.5 半导体生物传感器	270
相关知识链接	156	11.6 生物传感器应用	273
引导案例	156	习题	275
8.1 光电效应	157	参考文献	275
8.2 光电元件	159	第 12 单元 微传感器与智能传感器	276
8.3 光源	168	学习要点	276
8.4 光电式传感器的应用	172	相关知识链接	276
8.5 色敏光电传感器	175	引导案例	276
8.6 CCD 传感器	177	12.1 微传感器	277
8.7 光栅传感器	182	12.2 智能传感器	285
8.8 光纤传感器	185	习题	291
8.9 红外光传感器	195	参考文献	291
习题	201	第 13 单元 无线传感器网络	292
参考文献	201	学习要点	292
第 9 单元 波传感器	202	相关知识链接	292
学习要点	202	引导案例	292
相关知识链接	202	13.1 无线传感器网络的基本 概念与体系结构	293
引导案例	202	13.2 无线传感器网络的特点	295
9.1 声传感器	203	13.3 无线传感器网络的应用	298
9.2 声表面波传感器	211	13.4 无线传感器网络的关键技术	301
9.3 超声波传感器	218	习题	306
9.4 次声波传感器	223	参考文献	306
9.5 微波传感器	226	第 14 单元 传感器的标定	307
习题	230	学习要点	307
参考文献	230	相关知识链接	307
第 10 单元 化学传感器	231	引导案例	307
学习要点	231	14.1 标定的概念	307
相关知识链接	231	14.2 传感器的静态标定	308
引导案例	231	14.3 传感器的动态标定	313
10.1 气体传感器	232	习题	316
10.2 湿度传感器	242	参考文献	316
10.3 离子传感器	250		
习题	258		

第 1 单元

传感器概论

学习要点

- ◆ 传感器的定义、组成及分类；
- ◆ 传感器的静态特性及动态特性；
- ◆ 传感器的技术性能指标及改善传感器性能的方法。

相关知识链接

- ◆ GB/T 7665—2005 传感器通用术语；
- ◆ GB/T 7666—2005 传感器命名法及代码；
- ◆ GB/T 14479—1993 传感器图用图形符号；
- ◆ GB/T 18459—2001 传感器主要静态性能指标计算方法。

引导案例

航天飞行器上的传感器

神州十号载人飞船是中国神州号飞船系列之一，于2013年6月11日发射升空。神州十号载人飞船上装有超过千只传感器，用于监测航天员的呼吸、脉搏、体温等生理参数和飞船升空、运行、返回等多项飞行参数，并及时传回指挥控制中心，指挥控制中心再根据这些信息发出指令控制相关设备。所有的航天飞行器均使用了大量传感器，例如美国的航天飞机一次发射飞行过程中所用的传感器总量达到3500只，俄罗斯的“能源”号运载火箭在发射“暴风雪”号飞船时用了39种类型的传感器，箭、船上传感器总用量同样达到了3500只。欧空局发射的“阿里安娜-5”火箭，在全箭试车时用了压力、温度、冲击、振动、位移、液位、扭矩等类型的传感器，总量为620只，其中，监测发动机参数的传感器约为377只。全箭在研制阶段，传感器的选用量达到435只，质量鉴定阶段约为190只，验收试验约为170只。在飞行试验阶段，必需的测量参数大约为260个，其中用于发动机参数测量的传感器达到了100只。在一次飞行试验中，所用各种物理量传感器总量为570~1100只。

这些传感器对保障飞船的安全飞行起到至关重要的作用。

传感器不仅应用于航天航空，还广泛应用于科技、生产和生活的方方面面。传感器是人类五种感觉器官眼（视觉）、耳（听觉）、鼻（嗅觉）、舌（味觉）、皮肤（触觉）的延伸，用于获取外界信息，是人类认识世界的“先行官”，它和通信技术及计算机技术一起，完成对信息的获取、传输和处理，形成了信息技术系统的“感官”“神经”“大脑”三大组成部

分，构成了 Collection、Communication and Computer 即 3C 技术。

传感技术不仅是检测的基础，也是控制的基础，是现代信息技术的源头，又是信息社会得以存在和发展的物质和技术基础。传感器的出现及应用促进了科学技术的发展和社会的进步，丰富了人类的生活。传感器技术在现代科学技术中具有重要的地位和作用。

1.1 传感器的定义与组成

1.1.1 传感器的定义

根据我国 2005 年 7 月 29 日发布的国家标准《传感器通用术语》（GB/T 7665—2005），传感器（transducer/sensor）的定义为：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。

其中，敏感元件（sensing element）指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件（transducing element）指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分；当传感器输出为规定的标准信号时，则称为变送器（transmitter）；传感器的英文 transducer 与 sensor 通用。

这一定义包含了以下几方面的信息：

- 1) 传感器是一种测量“器件”或“装置”，能完成检测任务。
- 2) 它的输入量是“被测量”，可能是物理量，也可能是化学量或生物量等。
- 3) 它的输出量是“可用”的电信号，如电压、电流、频率等，便于传输、转换、处理和显示等。
- 4) 输出输入之间的对应关系应具有“一定的规律”，且应有一定的准确度，可以用确定的数学模型来描述。

注意，其中将传感器和变送器的概念明确区分开来，当传感器的输出为“规定的标准信号”时，则称之为变送器。所谓的“规定的标准信号”，电流输出标准信号为 4 ~ 20mA 或 0 ~ 10mA，电压输出标准信号为 1 ~ 5V、0 ~ 5V、0 ~ 10V 或 -10 ~ 10V。

1.1.2 传感器的组成

根据传感器的定义可知，传感器的基本组成通常包括敏感元件和转换元件两部分，它们分别完成检测和转换两个基本功能。而仅由敏感元件和转换元件组成的传感器通常输出信号较弱，还需要转换电路将输出信号放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。因此，传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路三部分组成，如图 1-1 所示。

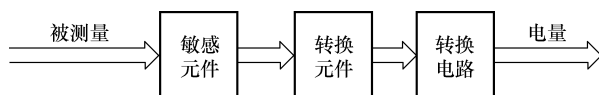


图 1-1 传感器的组成

图中，各组成部分说明如下：

- 1) 敏感元件直接感受被测量，并以确定的关系输出某一物理量。

2) 转换元件将敏感元件输出的非电物理量转换成电参量。

3) 转换电路将电参量转换成便于测量的电量。转换电路的类型又与转换元件类型有关,因此常把转换电路作为传感器的组成环节之一。

图1-2所示是一种压力传感器示意图。固定在弹簧管自由端的衔铁,位于电感线圈A和线圈B对称位置,而两个电感线圈接入后面的转换电路中。当弹簧管内部压力变化时,产生的变形使弹簧管自由端发生位移。这里的弹簧管就是敏感元件,它将被测压力的变化转换为位移量的变化。电感线圈A和线圈B是转换元件,它们将位移量变化转换成电感量变化,其后的转换电路将电感量转换成电压。

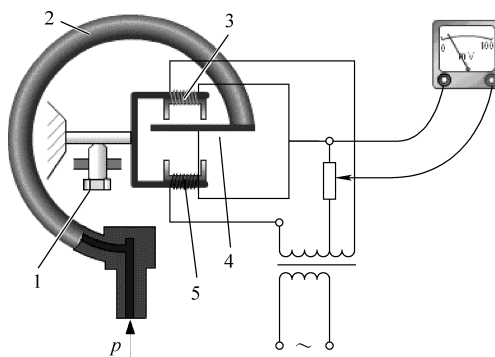


图1-2 实际的传感器组成

1—调机械零点螺钉 2—C形螺旋管 3—电感线圈A
4—衔铁 5—电感线圈B

需要指出的是,并非所有传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件这两个部分,如半导体气敏或湿敏传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等,它们一般能将感受到的被测量直接转换为电信号输出,即敏感元件和转换元件的功能合二为一。

有些传感器,转换元件不止一个。在实际应用中,仅由一个转换元件构成的传感器是很少的,通常把具有不同性能的转换元件结合起来完成转换功能。

1.1.3 传感器的分类

从不同角度出发,形成不同的传感器分类方法。一种被测量可以用不同类型的传感器来测量,而同一原理的传感器通常又可测量多种被测量,因此,对传感器的分类方法各不相同,目前尚没有统一的分类方法。

1. 按照传感器的工作机理分类

按照感知被测量(外界信息)所依据的基本效应的科学属性,可以将传感器分成物理传感器、化学传感器和生物传感器三大类。

物理传感器是利用某些元件的物理性质以及某些功能材料的特殊物理性能,诸如压电效应、磁致伸缩现象、离子、热电、光电、磁电等效应,把被测物理量转化成便于处理的能量形式信号的传感器。被测信号的微小变化被转换成电信号,其中起导电作用的是电子,相对后续开发难度较小。

在物理传感器中又可分为物性型传感器和结构型传感器。结构型传感器是基于物理学中场的定律构成的,包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。这类传感器的特点是,传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础。如电容传感器是利用静电场定律制成的结构型传感器,极板的形状、距离等的变化均能改变电容传感器的性能。物性型传感器是基于物质定律构成的,如胡克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则,大多数是以物质本身的常数形式给出的,这些常数的大小决定了传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随材料的不同而不同。如压电式传感器就是利用材料的压电效应制成的物性型传感器,不同的压电材料,其压电效应是不同的。

化学传感器主要是利用敏感材料与物质间的电化学反应原理，把无机和有机化学成分、浓度等转换为电信号的传感器，如气体传感器、湿度传感器和离子传感器，其中起导电作用的是离子。离子的种类很多，故化学传感器变化极多，较为复杂，相对后续开发难度较大。

生物传感器是利用生物活性物质，如分子、细胞甚至某些生物机体组织等对某些物质特性的选择能力构成的传感器，如葡萄糖和微电极结合形成的葡萄糖传感器、酶传感器、微生物传感器、组织传感器和免疫传感器等。生物传感器的研究历史较短，但发展非常迅速，随着半导体技术、微电子技术和生物技术的发展，它的性能将进一步完善，多功能、集成化和智能化的生物传感器将成为现实，前景十分广阔。

2. 按照传感器的工作原理分类

按照传感器对信号转换作用的原理可分为电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器、热电式传感器、波式传感器等。按照工作原理分类，有利于理解传感器的工作原理。

3. 按输入信息（被测量）分类

传感器按输入量（用途）分类有位移传感器、压力传感器、位置传感器、液面传感器、能耗传感器、速度传感器、温度传感器、振动传感器、湿敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、真空度传感器等。按被测量分类的方法体现了传感器的功能和用途，有利于用户有针对性地选择传感器。在许多情况下，往往将按照工作原理分类和按照被测量分类两种方法综合使用，如应变式压力传感器、压电式加速度传感器、光电码盘式转速传感器等。

4. 按应用范围分类

根据传感器的应用范围的不同，通常分为工业用、民用、科研用、医用、军用传感器等。按具体使用场合，还可分为汽车用、舰船用、航空航天用传感器等。如果根据使用目的的不同，还可分为计测用、监测用、检查用、控制用、分析用传感器等。

1.1.4 传感器的命名方法

中华人民共和国国家标准 GB/T 7666—2005《传感器命名法及代码》和 GB/T 14479—1993《传感器图用图形符号》规定了传感器的命名方法及图形符号，并将其作为统一传感器命名及图形符号的依据。

1. 传感器命名方法

一种传感器产品的名称，由主题词加四级修饰语构成。

主题词是传感器；第一级修饰语是被测量，包括修饰被测量的定语；第二级修饰语是转换原理，一般可后续以“式”字；第三级修饰语是特征描述，指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件以及其他必要的性能特征，一般可后续以“型”字；第四级修饰语是主要技术指标（量程、测量范围、精度等）。

当对传感器的产品名称命名时，除第一级修饰语外，其他各级可视产品的具体情况任选或省略。

2. 传感器代号

传感器的完整代号应包括主称、被测量、转换原理及序号四部分，在被测量、转换原理和序号之间需有连字符“-”连接，如图 1-3 所示。

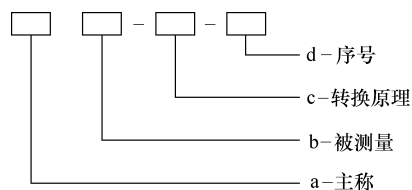


图 1-3 传感器代号表述格式

主称（传感器），用汉语拼音字母“C”标记。

被测量，用其一个或两个汉字汉语拼音的第一个大写字母标记（如压力用 Y 表示）。当这组代号与该部分的另一个代号重复时，则用其汉语拼音的第二个大写字母作代号（如应力用 YL 表示，硬度用 YD 表示）。依此类推。当被测量有国际通用标志时，应采用国际通用标志。当被测量为离子、粒子或气体时，可用其元素符号、粒子符号或分子式加圆括号“（ ）”表示。如（ α ）粒子，（ β ）射线。标准对常用的被测量代号做了相应的规定。

转换原理，用其一个或两个汉字汉语拼音的第一个大写字母标记。当这组代号与该部分的另一个代号重复时，则用其汉语拼音的第二个大写字母作代号（如电容用 DR 表示，光纤用 GX 表示）。依此类推。标准对常用的转换原理代号也做了相应的规定。

序号，用阿拉伯数字标记。序号可表征产品设计特征、性能参数、产品系列等。如果传感器产品的主要性能参数不改变，仅在局部有改进或改动时，其序号可在原序号后面顺序地加注大写汉语拼音字母 A、B、C…（其中 I、O 两个字母不用）。序号及其内涵可由传感器生产厂家自行决定。

图 1-4 所示为传感器代号标记示例。

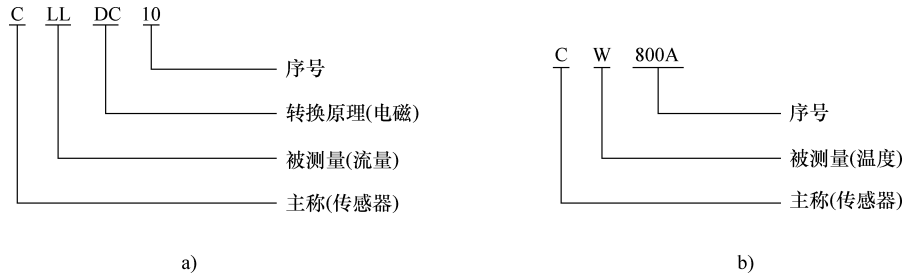


图 1-4 传感器代号标记示例
a) 电磁式流量传感器 b) 温度传感器

3. 传感器的图形符号

传感器一般符号由符号要素正方形和等边三角形构成，如图 1-5 所示。图中的正方形轮廓符号表示转换元件；三角形轮廓符号表示敏感元件。在轮廓符号内，填上或加入适当的限定符号或代号，用以表示传感器的功能。

GB/T 14479—1993 给出了 43 种常用传感器的图形符号示例。图 1-6 所示为三种典型的传感器图形符号。

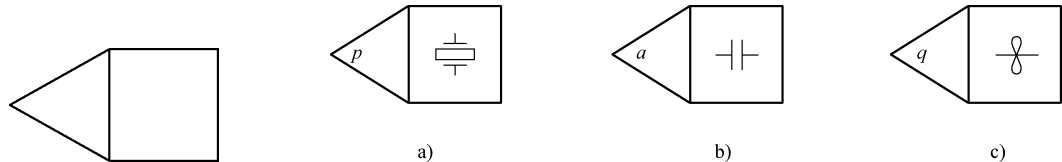


图 1-5 传感器图形符号
图 1-6 三种典型传感器图形符号
a) 压电式压力传感器 b) 电容式加速度传感器 c) 涡轮式流量传感器

1.2 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指其输出与输入之间的关系。

理想情况下，传感器的输出和输入是一一对应的，即传感器能不失真的再现输入信号，

这就是传感器的理想特性。然而，由于在设计、制造以及使用过程中存在很多影响因素，使得传感器不可能呈现理想特性。传感器的特性与被测量的性质有关，当被测量处于不变或缓变情况下，输出与输入之间的关系称为传感器的静态特性；当被测量随时间变化时，输出与输入之间的关系称为传感器的动态特性。

1.2.1 静态特性 (static characteristics)

传感器的静态数学模型是指当输入量为静态量时，传感器的输出量与输入量之间的数学模型。在不考虑传感器滞后及蠕变的情况下，传感器的静态数学模型可以用一个代数方程来表示，即

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1-1)$$

式中 x ——输入量；

y ——输出量；

a_0 ——零位输出（输入量 x 为零时的输出量）；

a_1 ——传感器的线性灵敏度，常用 K 或 s 表示；

$a_2 \cdots a_n$ ——非线性项的待定常数。

它是一个不含时间变量的代数方程，也可用以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标所画出的特性曲线来描述。

在研究传感器的静态特性时，可先不考虑零位输出，根据传感器的内在结构参数不同，式 (1-1) 可能有图 1-7 所示的四种情况。

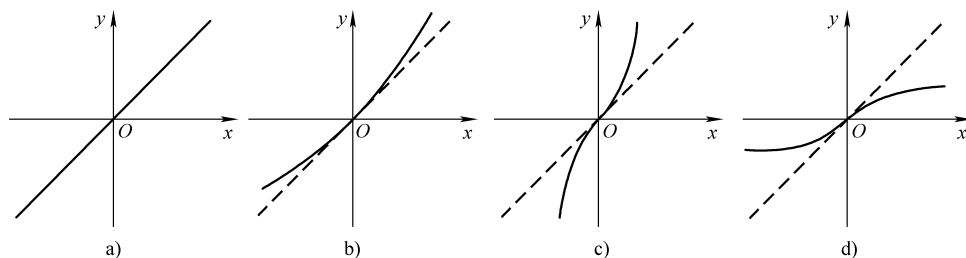


图 1-7 传感器静态特性曲线

图 1-7a 所示为理想的线性特性，通常是所希望的传感器应具有的特性，在这种情况下，有 $a_0 = a_2 = a_3 \cdots a_n = 0$ ，因此得到

$$y = a_1 x \quad (1-2)$$

因为直线上任何点的斜率相等，所以传感器的灵敏度为

$$s = \frac{y}{x} = a_1 \quad (1-3)$$

图 1-7b 所示为仅有偶次非线性项，其输出 - 输入特性方程为

$$y = a_0 + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots \quad (1-4)$$

因为没有对称性，所以线性范围在零点附近较窄，一般传感器设计很少采用这种特性。

图 1-7c 所示为仅有奇次非线性项，其输出 - 输入特性方程为

$$y = a_0 + a_1 x + a_3 x^3 + \cdots \quad (1-5)$$

这类传感器一般输入量 x 在相当大的范围内具有较宽的准线性，这是较接近理想线性的

非线性特性，它相对坐标原点对称的，即 $y(x) = -y(x)$ ，所以它具有相当宽的近似线性范围。

图 1-7d 所示为普遍情况下，传感器的数学模型应包括多项式的所有项数，即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \cdots \quad (1-6)$$

传感器的静态特性包括多种性能指标如线性度、符合度、分辨力、灵敏度、迟滞、重复性、漂移及不确定度等，可通过静态校准来确定。静态校准是指在规定的静态测试条件下，通过一定的试验方法记录相应的输入 - 输出数据，以确定传感器静态特性的过程。通过静态校准获得的静态特性称为传感器的校准曲线，它是各校准点的正、反行程算术平均值的平均值点的连接曲线，又称为正、反行程实际平均特性（曲线）。

1. 线性度（linearity）

校准曲线与某一规定直线一致的程度称为传感器的线性度。某一规定直线又称为参比直线，所以传感器的线性度可以表示为校准曲线相对于参比直线的最大偏差，用满量程输出的百分比来表示。满量程输出是指在规定的条件下，传感器测量范围的上限和下限输出值之间的代数差。计算传感器线性度的一般公式

$$\xi_L = \frac{\Delta Y_{L,\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$\Delta Y_{L,\max} = \max(\bar{y}_i - Y_i)$$

式中 $\Delta Y_{L,\max}$ ——传感器的校准曲线对参比直线的最大偏差；

$\bar{y}_i$ ——传感器在第 i 个校准点处的总平均特性值（即在该点处全部测量值的平均值）；

Y_i ——传感器在第 i 个校准点处的参比特性值；

Y_{FS} ——传感器的满量程输出。

需要说明一点，在有关静态特性的公式中，凡拟合特性（如参比特性或工作特性）、给定特性的输出值用大写 Y 表示，实测的输出值用小写 y 表示。

随参比直线的不同，有多种线性度。因此在说明线性度时应加以限定，不加限定词的线性度即指独立线性度。

(1) 独立线性度 ($\xi_{L,in}$) 相对于“最佳直线”的线性度称为独立线性度。“最佳直线”是能保证传感器正反行程校准曲线对它的正、负偏差相等且为最小的一条直线。或者说“最佳直线”是相互最靠近而又能包容传感器正、反行程实际平均特性曲线的两条平行直线的中位线。图 1-8a 为独立线性度的计算方法原理。

(2) 绝对线性度 ($\xi_{L,ab}$) 绝对线性度又称理论线性度，它的参比直线为规定直线，计算公式见式 (1-7)。绝对线性度反映的是线性精度，与其他几种线性度的性质截然不同。参比直线应根据传感器特性的使用要求确定。在几种线性度中，绝对线性度的要求最严，如果需要传感器具有互换性，就必须采用绝对线性度。

(3) 端基线性度 ($\xi_{L,te}$) 端基线性度的参比直线为端基直线。端基直线为实际平均输出特性的首、末两端点的连线。图 1-8b 为端基线性度计算方法原理。端基线性度与其他线性度相比，计算结果一般偏大。

(4) 平移端基线性度 ($\xi_{L,s,te}$) 平移端基线性度的参比直线为平移端基直线。平移端基直线和端基直线具有相同的斜率，但应通过平移把实际特性对它的最大偏差减至最小。当

实际特性曲线呈单调增大或单调减小性质时，平移端基直线即为最佳直线。平移端基线性度可在要求不太高的某些场合近似代替独立线性度。

(5) 零基线性度 $\xi_{L,ze}$ 零基线性度的参比直线是零基直线。零基直线为一条经过传感器理论零点的直线，但应通过改变斜率把传感器实际特性对它的最大偏差减至最小。零基直线又称为强制过零的最佳直线。图 1-8c 为零基线性度计算方法原理。

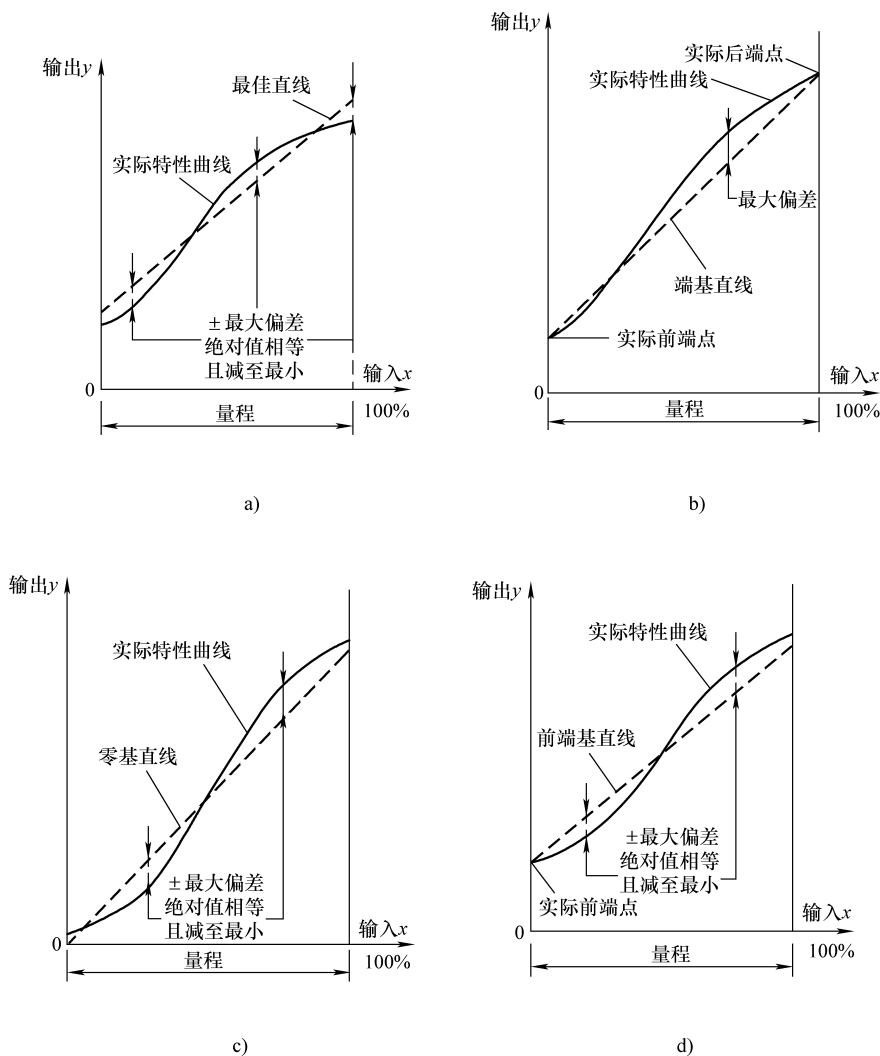


图 1-8 线性度的计算方法原理

a) 独立线性度计算方法原理 b) 端基线性度计算方法原理
c) 零基线性度计算方法原理 d) 前端基线性度计算方法原理

(6) 前端基线性度 ($\xi_{L,f,te}$) 前端基线性度的参比直线为前端基直线。前端基直线通过传感器实际特性的前端点，但应通过改变斜率把传感器实际特性对它的最大偏差减至最小。图 1-8d 为前端基线性度计算方法原理。

(7) 最小二乘线性度 ($\xi_{L,ls}$) 最小二乘线性度的参比直线为最小二乘直线。最小二乘直线应保证传感器实际特性对它的偏差的二次方和为最小。

最小二乘直线方程为

$$Y_{ls} = a + bx \quad (1-8)$$

式中 Y_{ls} ——传感器的理论输出；

a, b ——最小二乘直线的截距和斜率；

x ——传感器的实际输入。

最小二乘直线的截距和斜率可通过传感器实际特性的直线拟合求出，计算公式如下

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum \bar{y}_i - \sum x_i \sum x_i \bar{y}_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-9)$$

$$b = \frac{n \sum x_i \bar{y}_i - \sum x_i \sum \bar{y}_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-10)$$

式中 x_i ——传感器在第 i 个校准点处的输入值；

$\bar{y}_i$ ——传感器在第 i 个校准点处的实际特性值；

N ——校准点数。

最小二乘直线不能保证最大偏差为最小。为减小偏差，可将最小二乘直线平移，使最大正、负偏差绝对值相等。最小二乘直线或平移最小二乘直线可在要求不太高的场合代替最佳直线，以便近似求独立线性度。

用线性度来表征传感器的线性，类似地，用符合度来表征传感器的符合性。传感器的符合性是指传感器的输出—输入特性接近或偏离某一曲线的性质。

符合度 (conformity) 是指校准曲线与规定特性曲线 (例如直线、对数曲线、抛物线等) 之间的符合程度，即为校准曲线相对于参比曲线的最大偏差，用满量程输出的百分比表示。随参比曲线不同，有多种符合度。各种符合度的定义与计算方法与线性度类似，不同的是将线性度中参比直线换成参比曲线。

2. 分辨力 (resolution)

分辨力的定义为在规定测量范围内可以检测出的被测量的最小变化量。即指在整个输入量程内都能产生可观测的输出量变化的最小输入量变化。计算公式为

$$R_x = \max |\Delta x_{i, \min}| \quad (1-11)$$

式中 $\Delta x_{i, \min}$ ——在第 i 个测量点上可观测输出变化的最小输入变化量；

$\max |\Delta x_{i, \min}|$ ——在整个量程内取最大的 $\Delta x_{i, \min}$ ，即得传感器在整个量程内都能产生可观测输出变化的最小输入变化量。

传感器零点处的分辨力也称为阈值。

3. 灵敏度 (sensitivity)

灵敏度是指传感器输出量的变化值与相应的被测量的变化量之比。传感器在第 i 测量点处的灵敏度可用式 (1-12) 计算

$$s_i = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Y_i}{\Delta x_i} \right) \quad (1-12)$$

式中 Δx_i ——在第 i 个测量点上传感器的输入变化量；

ΔY_i ——在第 i 个测量点上由 Δx_i 引起的传感器的输出变化量。

线性传感器的灵敏度为一常数，计算公式为

$$s = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1-13)$$

式中 $Y_{\max}$ ——工作特性所决定的最大输出值；

$Y_{\min}$ ——工作特性所决定的最小输出值；

$x_{\max}$ ——测量范围的上限值；

$x_{\min}$ ——测量范围的下限值。

所谓线性传感器就是工作特性用直线方程表示的传感器。工作特性是用约定真值的输出—输入特性的方程或曲线。

4. 迟滞 (hysteresis)

迟滞 (滞后) 也称为回差, 是在规定的测量范围内, 输入量增大行程期间和输入量减小行程期间任一被测量值处输出量的最大差值。也就是说, 对应同一大小的输入信号, 传感器正反行程的输出信号大小却不相等, 这就是迟滞现象。产生这种现象的主要原因是传感器机械部分存在不可避免的缺陷, 如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等。而迟滞的大小一般用实验方法来确定, 计算公式为

$$\xi_H = \frac{\Delta Y_{H,\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{\max |\bar{y}_{d,i} - \bar{y}_{u,i}|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中 $\bar{y}_{d,i}$ ——反行程实际平均特性, $\bar{y}_{d,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{d,ij}$ 。其中 $y_{d,ij}$ 为反行程第 i 个校准点处的第 j 个测量值 ($i=1 \sim m; j=1 \sim n$)；

$\bar{y}_{u,i}$ ——正行程实际平均特性, $\bar{y}_{u,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{u,ij}$ 。其中 $y_{u,ij}$ 为正行程第 i 个校准点处的第 j 个测量值 ($i=1 \sim m; j=1 \sim n$)， n 为测量循环数。

5. 重复性 (repeatability)

重复性是指在相同测量条件下, 对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性。传感器的重复性是其随机误差的极限值。传感器在某校准点处的重复性可计算为在该校准点处的一组测量值的样本标准偏差在一定置信度下的极限值, 并以其满量程输出的百分比来表示, 而传感器的重复性则取为各校准点处重复性的最大者。计算公式为

$$\xi_R = \frac{c S_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中 c ——包含因子, $c = t_{0.95}$ ；

$S_{\max}$ ——最大的样本标准差, 可从 m 个校准点的 $2m$ 个标准偏差的估值 S 中选取最大者。

传感器的校准试验, 一般只做 $n = 3 \sim 5$ 个循环, 其测量值属于小样本。对于小样本, t 分布比正态分布更符合实际情况。因此, 在国家标准 GB/T 18459—2001 中规定按 t 分布取包含因子 $c = t_{0.95}$ (保证 95% 的置信度)。若不取 $c = t_{0.95}$, 则应事先声明。 $t_{0.95}$ 与自由度 f , 或与校准循环数 n (在本情况下, $f = n - 1$) 有关, 如表 1-1 所示。

表 1-1 $t_{0.95}$ 与校准循环数 n 的关系

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{0.95}$	12.706	4.303	3.182	2.776	2.571	2.447	2.365	2.306	2.262

6. 漂移 (drift)

漂移是指在一定时间间隔内, 传感器输出中与被测量无关的不希望有的变化量。包括零点输出漂移和满量程输出漂移, 零点输出漂移和满量程输出漂移又可分为时间漂移 (时漂) 和温度漂移 (温漂)。时漂是指在规定的时间内零点输出或满量程输出仅随时间的变化; 温漂是指由环境温度变化所引起的零点输出变化或满量程输出变化, 又称为热零点偏移和热满量程输出偏移。

漂移指标一般常用的计算公式为

(1) 零点输出漂移 (D_0)

$$D_0 = \frac{\Delta y_0}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{|y_{0,\max} - y_0|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中 y_0 ——初始的零点输出;

$y_{0,\max}$ ——最大漂移处的零点输出。

(2) 热零点偏移 (γ)

$$\gamma = \frac{\bar{y}_{0(T_2)} - \bar{y}_{0(T_1)}}{Y_{FS(T_1)} (T_2 - T_1)} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中 $\bar{y}_{0(T_1)}$ ——在温度 T_1 下, 平均零点输出值;

$\bar{y}_{0(T_2)}$ ——在温度 T_2 下, 平均零点输出值。

$Y_{FS(T_1)}$ ——在温度 T_1 下的理论满量程输出。

满量程输出漂移和热满量程输出偏移计算公式与式 (1-16)、式 (1-17) 类似, 只是其中的零点输出替换成满量程输出。

7. 不确定度 (uncertainty) 及其他综合静态性能指标

不确定度是表征合理地赋予被测量之值的分散性, 与测量结果相联系的参数。不确定度能更合理地从定性和定量两方面表示测量结果的性质。在规定的条件下进行静态校准和按规定的计算方法所得到的一种不确定度称为总不确定度, 又称基本不确定度。总不确定度是线性度加迟滞加重复性的一种组合, 体现它们的联合作用, 不是简单相加。

在静态工作情况下, 线性度 (符合度)、迟滞、重复性通常被称为传感器的分项性能指标或单项性能指标, 而这些指标的不同组合即构成各种综合性能指标。综合性能指标 (如总不确定度) 和各分项性能指标之间并无数学上确定的联系。

以线性传感器为例 (非线性传感器的算法原理同于线性传感器), 并根据以极限偏差来衡量传感器的性能指标的原则, 给出各项综合性能指标的计算方法。

(1) 线性度加迟滞 (ξ_{LH}) 线性度加迟滞是传感器系统误差的极限值, 计算公式为

$$\xi_{LH} = \pm \frac{|\Delta Y_{LH,\max}|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-18)$$

式中 $\Delta Y_{LH,\max}$ ——正行程实际平均特性 ($\bar{y}_{u,i}$) 和反行程实际平均特性 ($\bar{y}_{d,i}$) 相对于参比直线的最大偏差。

如果不加说明, 线性度加迟滞应指按传感器的正行程实际平均特性和反行程实际平均特性相对于其自身的参比直线算出的结果。这里的参比直线采用最佳直线。

(2) 线性度加迟滞加重复性 (ξ_{LHR}) 线性度加迟滞加重复性又称为传感器的总不确定

度, 定义为在参比工作条件下, 实际特性相对于其工作特性的偏差在规定的置信度下皆不超过的一个极限范围。当用传感器满量程输出的百分比来表示时, 称为传感器的相对总不确定度, 通常也把它称为总不确定度。计算公式为

$$\xi_{\text{LHR}} = \pm \frac{\max |B_i + t_{0.95} S_i|}{Y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (1-19)$$

式中 B_i ——第 i 个校准点处的总系统误差的极限值;

$t_{0.95} S_i$ ——第 i 个校准点处的总随机误差的极限值。 $t_{0.95}$ 为 t 分布下 95% 置信度的包含因子; S_i 为在第 i 个校准点处的样本标准偏差。

在计算线性度加迟滞加重复性时, 参比直线应取为传感器的工作特性直线。

1.2.2 动态特性 (dynamic characteristics)

当传感器的输入量随时间而变化, 传感器的输出是否能很好地跟随输入量的变化而变化是传感器的另一个重要性能, 这就是传感器的动态特性, 通常也称为响应特性, 它是传感器的输出值能够真实地再现变化着的输入量能力的反应。

传感器的动态特性要在动态条件下测试, 虽然被测量随时间变化的形式是多种多样的, 但常见的输入信号可以分为规律性信号和随机性信号两大类。

规律性信号分为周期信号和非周期信号。周期信号包括正弦周期信号和复杂周期信号; 非周期信号包括阶跃信号、线性信号和其他瞬变信号。

随机性信号分为平稳信号和非平稳信号。平稳信号又包括多态历过程和非多态历过程。

这样, 研究传感器的动态特性就可以归结为研究传感器对有规律的输入信号的响应特性。由于复杂周期信号在收敛条件下可以展开成傅里叶级数, 分解为各种谐波, 即可以用一系列正弦信号的叠加表示源信号, 因此只要研究正弦周期输入信号下传感器的响应特性, 就可以判断它对各种复杂周期信号的响应特性。其他种类的瞬变的非周期输入信号其高频分量都不及阶跃信号来得迅速, 因此可以通过研究阶跃输入信号下传感器的动态特性来确定它对各种瞬变的非周期输入信号的响应特性。所以在研究传感器动态特性时, 采用的具有代表性的输入信号有正弦周期信号、阶跃信号和线性信号, 而经常使用的是前两种。

输入量为正弦信号的传感器响应称为频率响应或稳态响应; 输入量为阶跃信号的传感器响应称为阶跃响应或瞬态响应。

1. 数学模型和传递函数

为了研究传感器对于上述两类输入信号的动态特性, 必须建立传感器的动态数学模型。在工程上通常忽略如非线性和随机变量等一些影响不大的因素, 将传感器作为线性定常系统来考虑, 所以传感器的动态数学模型可用高阶常系数线性微分方程表示, 即

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-20)$$

式中 x ——输入量;

y ——输出量;

t ——时间;

$a_0, a_1, \cdots, a_n$ 和 $b_0, b_1, \cdots, b_m$ ——系数, 均为实常数。

当初始条件为零的情况下, 式 (1-20) 的拉普拉斯变换为

$$\begin{aligned} & (a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) y(s) \\ & = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0) x(s) \end{aligned} \quad (1-21)$$

则传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-22)$$

传递函数是拉普拉斯变换算子 s 的有理分式, 与输入量 $x(t)$ 无关, 它只与传感器的结构参数有关。分子的阶次 m 不能大于分母的阶次 n , 这是由物理条件决定的。

分母的阶次代表传感器的特征, 当 $n=0$ 时, 称为零阶传感器; $n=1$ 时, 称为一阶传感器; $n=2$ 时, 称为二阶传感器; $n>2$, 称为高阶传感器。虽然传感器的种类和形式很多, 但它们一般都可以简化为一阶或二阶传感器 (高阶可以分解为若干低阶), 因此一阶和二阶传感器是最基本类型。

2. 传感器的频率响应特性及性能指标

(1) 传感器的频率响应特性 传感器的输入量按正弦函数变化时, 其输出量也是同频率的正弦函数, 其振幅和相位随频率变化而变化, 这一性质称为传感器的频率响应特性。

设输入幅值为 X 、角频率为 ω 的正弦量 $x = X \sin \omega t$, 则获得的输出量为

$$y = Y \sin(\omega t + \varphi)$$

式中 Y 、 φ ——输出量的幅值和初相角。

将 x 、 y 的各阶导数代入传感器动态数学模型式 (1-20) 可得

$$\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (1-23)$$

式 (1-23) 将传感器的动态响应从时域转换到频域, 故称之为传感器的频率响应特性, 简称频率特性。在形式上它相当于将传递函数式 (1-22) 中的 s 置换成 $(j\omega)$ 而得, 因而又称为频率传递函数。其指数形式为

$$\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{Y e^{j(\omega t + \varphi)}}{X e^{j\omega t}} = \frac{Y}{X} e^{j\varphi} \quad (1-24)$$

由此可得频率特性的模

$$A(\omega) = \left| \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} \right| = \frac{Y}{X} \quad (1-25)$$

它又称为传感器的动态灵敏度 (或称增益)。 $A(\omega)$ 表示输出与输入的幅值比随频率 ω 的变化而变化, 故又称为幅频特性。

以 $\text{Re} \left[\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} \right]$ 和 $\text{Im} \left[\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} \right]$ 分别表示 $A(\omega)$ 的实部和虚部, 则频率特性的相位角为

$$\varphi(\omega) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im} \left[\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} \right]}{\text{Re} \left[\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} \right]} \right\} \quad (1-26)$$

代表输出超前于输入的角度。对传感器而言, φ 通常为负值, 即输出滞后于输入。 $\varphi(\omega)$ 表示相位 φ 随频率 ω 而变, 故称之为相频特性。

对于可以用二阶系统描述的传感器, 通常给出其固有频率 ω_n 与阻尼比 ξ 来表示频率响应特性。

(2) 衡量频率响应的性能指标 评价传感器的频域动态特性时, 常用幅频特性与相频

特性表示。由于相频特性与幅频特性之间有一定的内在关系,因此表示传感器的频率响应特性及频域性能指标时主要用幅频特性。

1) 截止频率、通频带和工作频带。传感器响应幅值上升到响应幅值最大值的 70% 时的频率称为下截止频率,传感器响应幅值下降到响应幅值最大值的 70% 时的频率称为上截止频率,二者之差称为传感器的通频带(或称带宽)。一般规定对数幅频特性曲线上幅值衰减 3dB 时所对应的频率范围,作为通频带。对传感器来说,一般取幅值误差为 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$ (或其他值)时所对应的频率范围,称为工作频带。

2) 谐振频率和固有频率。幅频特性曲线在某一频率处有峰值,这个工作频率就是谐振频率 ω_r 。固有频率 ω_n 是指在不阻尼时,传感器的自由振荡频率。 ω_r 表征瞬态响应的速度, ω_r 的值越大,时间响应速度越快。

3) 幅值频率误差 δ 和相位频率误差 φ 。当传感器对随时间变化的周期信号进行测量时,必须求出传感器所能测量周期信号的最高频率 ω_p ,以保证在 ω_p 范围内,幅值频率误差不超过给定数值 δ 和相位频率误差不超过给定数值 φ 。

3. 传感器的阶跃响应特性及性能指标

(1) 传感器的阶跃响应特性 当给起始静止的传感器输入一个阶跃信号

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ A & t > 0 \end{cases} \quad (1-27)$$

时,其输出信号 $y(t)$ 称为阶跃响应,响应曲线如图 1-9 所示。

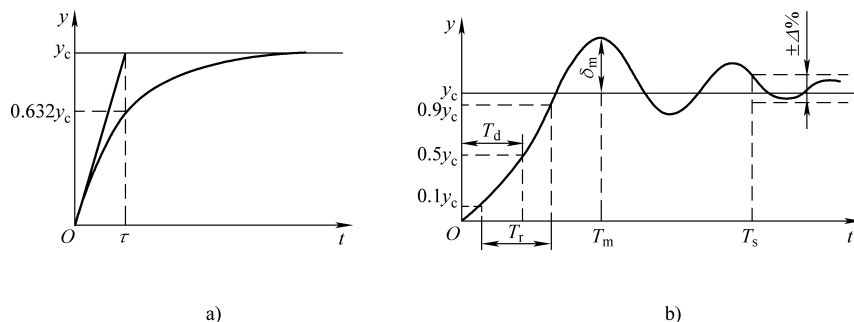


图 1-9 阶跃响应曲线

a) 一阶响应 b) 二阶响应

$y(t)$ 经过若干次振荡(或不经过振荡)缓慢地趋向稳定值 kA , 且 $kA = y_c$, 这里 k 为仪器的静态灵敏度。这一过程称为过渡过程, $y(t)$ 为过渡函数。

(2) 衡量阶跃响应的主要指标

1) 时间常数 τ 。传感器输出值上升到稳态值 y_c 的 63.2% 所需的时间。它越小,表示传感器的响应越快,系统达到稳定的时间就越少。

2) 上升时间 T_r 。传感器输出值由稳态值 y_c 的 10% 上升到 90% 所需的时间,但有时也规定其他百分数。

3) 响应时间 T_s 。输出值上升到其最终规定百分率时所需要的时间,即输出值达到允许误差范围所经历的时间。为注明这种百分率,可将其置于主词前面,例如:98% 响应时间。

4) 超调量 δ_m 。响应曲线第一次超过稳态值之峰高,即 $\delta_m = y_{\max} - y_c$,或用相对值表示,即 $\delta = (\delta_m / y_c) \times 100\%$ 。

5) 动态误差 e_{ss} 。指无限长时间后传感器的稳态输出值与目标值之间偏差 δ_{ss} 的相对值 $e_{ss} = (\delta_{ss}/y_c) \times 100\%$ 。

4. 传感器的动态响应

(1) 零阶传感器 根据传感器的数学模型式 (1-20) 可知, 零阶传感器的系数只有 a_0 与 b_0 。

$$y = \frac{b_0}{a_0} x = Kx \quad (1-28)$$

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_0}{a_0} = K \quad (1-29)$$

式中 K ——静态灵敏度。

式 (1-29) 表明零阶传感器的输入量无论随时间如何变化, 输出量幅值总是与输入量成确定的比例关系, 在时间上也无滞后。

实际应用中, 许多高阶系统在变化缓慢、频率不高的情况下, 都可以近似看作零阶传感器。

(2) 一阶传感器 一阶传感器的微分方程为

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-30)$$

令 $\tau = a_1/a_0$, 为时间常数; $K = b_0/a_0$, 为静态灵敏度, 则式 (1-30) 变成

$$(\tau s + 1)y = Kx \quad (1-31)$$

其传递函数和频率特性分别为

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1-32)$$

$$\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{K}{j\omega\tau + 1} \quad (1-33)$$

幅频特性和相频特性分别为

$$A(\omega) = K / \sqrt{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (1-34)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan(-\omega\tau) \quad (1-35)$$

$A(\omega)$ 与 $\varphi(\omega)$ 如图 1-10 所示, 图中坐标为对数坐标, 称为伯德图。

为使输出量不失真, 要求 $A(\omega)$ 近似为常值, 时间滞后 $\varphi(\omega)/\omega$ 也近似为常值; 由式 (1-34)、式 (1-35) 和图 1-10 可知, 应满足 $\omega\tau \ll 1$ 。这时 $A(\omega) \approx K$, $\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$, $\varphi(\omega)/\omega \approx -\tau$, 即输出量相对于输入量的滞后与 ω 基本无关。

当输入阶跃函数 $\begin{cases} x=0 & t \leq 0 \\ x=A & t > 0 \end{cases}$ 时, 式 (1-31) 的解为

$$y = KA(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-36)$$

其响应曲线如图 1-8a 所示。则动态相对误差为

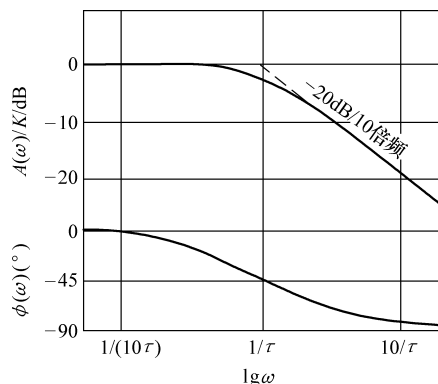


图 1-10 一阶传感器的伯德图

$$\gamma = \frac{KA - KA(1 - e^{-t/\tau})}{KA} = e^{-t/\tau} \quad (1-37)$$

当 $t = \tau$ 时, $\gamma = 0.368$; $t = 3\tau$ 时, $\gamma = 0.05$; $t = 5\tau$ 时, $\gamma = 0.007$ 。

由此可见, 一阶传感器在输入阶跃信号后, 若在 $t > 5\tau$ 之后采样, 可认为输出已接近稳态, 其动态误差可以忽略。

反过来, 若已知允许的稳态误差值, 也可由式 (1-37) 计算出所需的响应时间。

综上所述可见, 一阶环节的动态响应特性主要取决于时间常数 τ 。 τ 越小, 阶跃响应越迅速, 频率响应的上截止频率越高。 τ 的大小表示惯性的大小, 故一阶环节又称为惯性环节。

(3) 二阶传感器 二阶传感器的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-38)$$

也可写成

$$\left(\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right) y(s) = Kx(s) \quad (1-39)$$

式中 K ——静态灵敏度, $K = b_0/a_0$;

ω_n ——固有频率, $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2} = 1/\tau$;

ξ ——阻尼比, $\xi = a_1/(2\sqrt{a_0 a_2})$ 。

传感器的传递函数和频率响应分别为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K}{s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1} \quad (1-40)$$

$$\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{K}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + 2j\xi \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1-41)$$

幅频特性和相频特性分别为

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \frac{\omega}{\omega_n} \right]^2}} \quad (1-42)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (1-43)$$

二阶传感器的幅频特性与相频特性如图 1-11 所示。由图可见, 当 $\omega/\omega_n \ll 1$ 时, $A(\omega) \approx K$, $\varphi(\omega) \approx 0$, 近似于零阶传感器。要使频带加宽, 关键是提高固有频率 ω_n 。当阻尼比 ξ 趋于 0 时, 幅值比在固有频率附近 ($\omega/\omega_n = 1$) 变化很大, 系统发生谐振。为了避免这种情况, 可增大 ξ 值, 当 $\xi \geq 0.707$ 时, 谐振就不会发生了。当 $\xi \approx 0.7$ 时, 幅频特性的平坦段最宽, 而且相频特性接近于一条斜直线, 在检测复合周期振动时能保证有较宽的频率响应范围且幅值失真与相位失真均较小。 $\xi \approx 0.7$ 称为最佳阻尼。

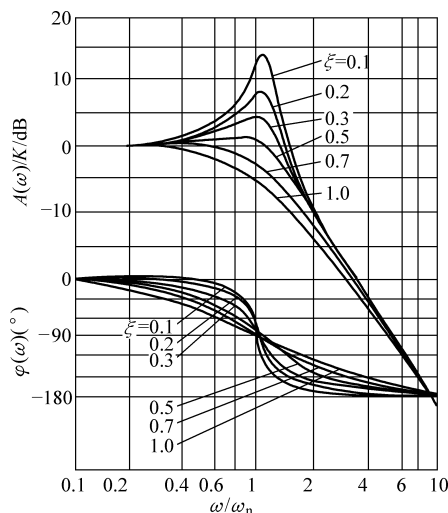


图 1-11 二阶传感器的幅频特性与相频特性

若对二阶传感器输入一阶跃信号，式（1-39）就变成

$$\left(\frac{1}{\omega_n^2}s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n}s + 1\right)y(s) = KA \quad (1-44)$$

特征方程为

$$\frac{1}{\omega_n^2}s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n}s + 1 = 0$$

两根分别为

$$\begin{cases} r_1 = (-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n \\ r_2 = (-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n \end{cases}$$

根据阻尼比的大小不同，可分为以下四种情况：

当 $0 < \xi < 1$ （欠阻尼）时，特征方程具有共轭复数根，过渡函数为

$$y = KA \left[1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\omega_n t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right) \right] \quad (1-45)$$

当 $\xi = 1$ （临界阻尼）时，特征方程具有两重根 $-\xi\omega_n$ ，过渡函数为

$$y = KA [1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t}] \quad (1-46)$$

当 $\xi > 1$ （过阻尼）时，特征方程具有不同实根，过渡函数为

$$y = KA \left[1 - \frac{(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} + \frac{(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} \right] \quad (1-47)$$

它有两个衰减的指数项，当 $\xi \gg 1$ 时，其中的后一个指数项比前一项衰减快得多，可忽略不计，这样就从二阶系统蜕化成一阶系统的惯性环节了。

当 $\xi = 0$ （零阻尼）时，过渡函数为

$$y(t) = KA [1 - \sin(\omega_n t + \varphi)] \quad (1-48)$$

这是一个等幅振荡过程，其振荡频率就是系统的固有频率 ω_n 。

对应于不同 ξ 值的二阶传感器系统的单位阶跃响应曲线如图 1-12 所示。

由图可知，二阶传感器的阶跃响应在很大程度上取决于阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 。传感器的固有频率由其结构参数所决定， ω_n 越高，其响应越快，传感器的频带也越宽。阻尼比直接影响超调量和振荡次数。 $\xi = 0$ 时，超调量为 100%，且持续不停地振荡下去，达不到稳态。 $\xi > 1$ ，则传感器蜕化

到等同于两个一阶环节的串联，此时虽然不产生振荡（即不发生超调），但也需经过较长时间才能达到稳态。 $0 < \xi < 1$ 时，将产生衰减振荡，可按式（1-45）由允许误差计算响应时间 T_s ，或由 T_s 计算稳态误差 e_{ss} 。为了使系统接近稳态值的时间缩短，设计时常取 $\xi = 0.6 \sim 0.8$ 。

（4）高阶传感器 对于可写出运动方程的高阶传感器，仍可依据式（1-22）、式（1-23）写出传递函数、频率特性等。对于高阶系统进行计算是比较困难的，有些传感器难

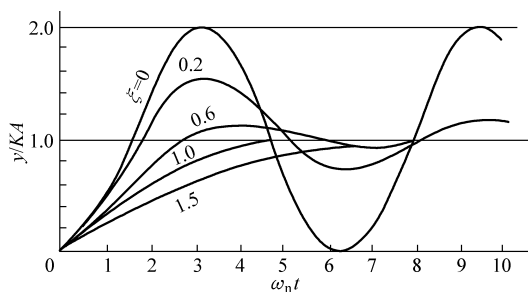


图 1-12 二阶传感器的阶跃响应

以写出其运动方程，这时可以采用试验方法来获得其动态特性。

1.3 传感器的技术指标

1.3.1 传感器的技术指标

由于传感器的应用范围十分广泛，原理、结构与类型繁多，使用要求又千差万别，所以欲列出用来全面衡量传感器质量的统一指标是很困难的。表 1-2 列出了传感器的技术性能指标，其中若干基本参数指标和比较重要的环境参数指标经常作为检验、使用和评价传感器的依据。

表 1-2 传感器的技术性能指标

基本参数指标	量程指标：测量范围，过载能力等
	灵敏度指标：灵敏度，分辨力，满量程输出，输入输出阻抗等
	精度有关指标：测量不确定度，重复性，线性度，滞后，灵敏度误差，阈值，稳定性，漂移等
	动态性能指标：固有频率，阻尼系数，时间常数，频响范围，频率特性，临界频率，临界速度，稳定时间等
环境参数指标	温度指标：工作温度范围，温度误差，温度漂移，温度系数，热滞后等
	抗冲击振动指标：容许抗各向冲击振动的频率、振幅、加速度，冲振引入的误差等
	其他环境参数：抗潮湿，抗介质腐蚀能力，抗电磁干扰能力（电磁兼容性 EMC）等
可靠性指标	工作寿命，平均无故障时间，保险期，疲劳性能，绝缘电阻，耐压，抗飞弧性能等
其他指标	使用方面：供电方式（直流，交流，频率及波形等），电压幅度与稳定性，功耗，各项分布参数等
	结构方面：外形尺寸，重量，壳体材质，结构特点等
	安装连接方面：安装方式，馈线，电缆等

对于一种具体的传感器而言，并不是全部指标都是必需的。希望使某一传感器各项指标都优良，不仅设计和制造困难，而且在实际上也没有必要。因此，不要选用“万能”的传感器去适用不同的使用场合。恰恰相反，应该根据实际需要，保证主要指标，其余指标满足基本要求即可。即使是主要指标，也不必盲目追求单项指标的全面优异，而主要应关心其稳定性和变化规律，从而可在电路上使用计算机进行补偿和修正，这样可使许多传感器既可低成本又可高精度应用。

1.3.2 改善传感器性能的途径

可采取下列技术途径来改善传感器的性能。

1. 差动技术

差动技术是传感器中普遍采用的技术。它的应用可显著地减小温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器精度的影响，能减小非线性误差，增大灵敏度等。这种技术也广泛用于消除或减小由于结构原因引起的共模误差（如温度误差）。其原理如下：

设有一传感器，其输出为

$$y_1 = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots$$

用另一相同的传感器,但使其输入量符号相反(例如位移传感器使之反向移动),则它的输出为

$$y_2 = a_0 - a_1x + a_2x^2 - a_3x^3 + a_4x^4 - \dots$$

使二者输出相减,即

$$\Delta y = y_1 - y_2 = 2(a_1x + a_3x^3 + \dots)$$

于是,总输出消除了零位输出和偶次非线性项,得到了对称于原点的相当宽的近似线性范围,减小了非线性,而且使灵敏度提高了一倍,抵消了共模误差。在传感器中,外界被测量的满量程往往只引起单个敏感元件的少量变化,为了取出这种少量变化,去除不变部分,需要在敏感部分采用差动技术。

2. 平均技术

平均技术利用了平均效应,可以减少测量时的随机误差。常用的平均技术有误差平均效应和数据平均处理。

(1) 误差平均效应 误差平均效应的原理是利用 n 个传感器单元同时感受被测量,而其输出将是这些单元输出的总和。假如将每一个单元可能带来的误差 δ_0 均看作随机误差,根据误差理论,总的误差 Δ 将减小为

$$\Delta = \pm \frac{\delta_0}{\sqrt{n}}$$

例如 $n=10$ 时,误差 Δ 可减小为 δ_0 的 31.6%;若 $n=500$,误差减小为 δ_0 的 4.5%。

误差平均效应在光栅、感应同步器、磁栅、容栅等传感器中都取得了明显的效果。在其他一些传感器中,误差平均效应对某些工艺性缺陷造成的误差同样能起到弥补作用。

(2) 数据平均处理 同理,如果将相同条件下的测量重复 n 次或进行 n 次采样,然后进行数据平均处理,随机误差也将减小 $\sqrt{n}$ 倍。因此对允许进行多次重复测量(或采样)的被测量,都可以采用数据平均处理减小随机误差。对于带有微机芯片的智能化传感器,实现起来尤为方便。

上述误差平均效应与数据平均处理的原理在设计 and 应用传感器时均可采纳,应用时,应将整个测量系统视作对象。常用的多点测量方案与多次采样平均的方法,可减小随机误差,增加灵敏度,提高测量精度。

3. 零示法、微差法与闭环技术

设计或应用传感器时,零示法、微差法与闭环技术可用以消除或减小系统误差。

(1) 零示法 它可消除指示仪表不准而造成的误差。采用这种方法时,被测量对指示仪表的作用与已知的标准量对它的作用相互平衡,使指示仪表示零,这时被测量就等于已知的标准量。机械天平是零示法的典型例子。平衡电桥就是零示法在传感器技术中应用的实例。

(2) 微差法 微差法是在零示法的基础上发展起来的。由于零示法要求被测量与标准量应完全相等,因而要求标准量能连续可变,这往往不容易做到。但是,如果标准量与被测量的差值减小到一定程度,那么由于它们的相互抵消的作用,就能使指示仪表的误差影响大大削弱,这就是微差法的原理。

几何量测量中广泛采用的测微仪,如电感式测微仪、光学式比较仪等,就是微差法的实例。用该方法测量时,标准量可采用量块或标准工件,测量精度大大提高。

(3) 闭环技术 当要求传感器具有宽的频率响应、大的动态范围、高的灵敏度、分辨率、精度以及高的稳定性、重复性和可靠性时,由敏感元件、转换元件、测量电路等环节组成的开环传感器将很难满足要求,而利用反馈技术使传感器构成闭环平衡式传感器,组成闭环反馈测量系统,将能满足上述各种要求。闭环式传感器在过程参数检测技术中被广泛采用。

跟踪技术也属于闭环技术思想。除对平衡点的跟踪外,还可以跟踪某些特定值点(往往是极值点)以及综合指标参数,产生反馈作用的量有一维或多维。跟踪技术有着广泛的应用,如恒星跟踪、雷达多目标跟踪、导航惯性平台的跟踪等。

4. 屏蔽、隔离与干扰抑制

传感器大多安装在现场工作,而现场的条件往往较差,有时甚至极其恶劣。各种外界因素都会影响传感器的精度与各有关性能。为了减小测量误差保证其原有性能,应设法削弱或消除外界因素对传感器的影响。主要从两个方面来实现,一是减小传感器对影响因素的灵敏度;二是降低外界因素对传感器的实际作用程度。

对于电磁干扰,可以采用屏蔽(电场屏蔽、电磁屏蔽和磁屏蔽)、隔离措施,也可用滤波等方法抑制。对于如温度、湿度、机械振动、气压、声压、辐射甚至气流等,可采用相应的隔离措施,如隔热、密封、隔振等,或者在变换成电量后对干扰信号进行分离或抑制,减小其影响。在电路上还可采用滤波、加去耦电容和正确接地等电路措施。

5. 分段与细分技术

对于大尺寸、高精度的几何量测量问题,可以采取分段测量方案。将测量范围分成若干分段区间,在分段区间内再进行局部细分。这项技术要求在工艺经济的条件下,尽量密地将标尺分成若干段。测量过程从零位开始,记录下所经历段数,然后在段内用模拟方法细分。常用两只传感器完成段计数、模拟细分和分辨运动方向的功能,两只传感器之间的距离减去分段整倍数后相差 $1/4$ 分段,即运动测量时两只传感器分别发出正弦和余弦信号。

在激光干涉仪、感应同步器、光栅、磁栅、容栅等传感器技术上采用了分段与细分技术,用 CCD 光敏阵列测量光点位置也属于这项技术。在这项技术中,往往使用多只敏感元件,覆盖多个分段,用空间平均方法提高测量精度。

6. 补偿与修正技术

补偿与修正技术在传感器中得到了广泛的应用。这种技术的运用主要是针对两种情况,一种是针对传感器本身特性的,另一种是针对传感器的工作条件或外界环境的。

对于传感器特性,可以找出误差的变化规律,或者测出其大小和方向,采用适当的方法加以补偿或修正。

针对传感器工作条件或外界环境进行误差补偿,也是提高传感器精度的有力技术措施。不少传感器对温度敏感,由于温度变化引起的误差十分可观,为了解决这个问题,必要时可以控制温度,但往往费用太高,或使用现场不允许。而在传感器内引入温度误差补偿又常常是可行的。这时应找出温度对测量值影响的规律,然后引入温度补偿措施。

补偿与修正可以利用电子线路(硬件)来解决,也可以用微机通过软件来实现。

7. 稳定性处理

传感器作为长期测量或反复使用的器件,其稳定性显得特别重要,其重要性甚至超过精度指标,尤其是对那些很难或无法定期检定的场合。

造成传感器性能不稳定的原因，主要是随着时间的推移和环境条件的变化，构成传感器的各种材料与元器件性能将发生变化。

为了提高传感器性能的稳定性，应该对材料、元器件或传感器整体进行必要的稳定性处理。如对结构材料进行时效处理、冰冷处理、永磁材料的时间老化、温度老化、机械老化及交流稳磁处理、电气元件的老化筛选等。

在使用传感器时，若测量要求较高，必要时也应对附加的调整元件、后续电路的关键器件进行老化处理。

1.4 传感器的发展趋势

当前，传感器技术的发展趋势主要体现在三个方面：一是对于传感器本身的开发，进行基础研究，探索新理论，发现新现象，开发传感器的新材料和新工艺；二是与计算机共同构成的传感器系统，以实现传感器的集成化、智能化和多功能化；三是通过与其他学科的交叉融合，实现无线网络化。

1. 发现新现象

传感器工作的基本原理是利用物理现象、化学反应和生物效应，所以发现新现象与新效应是发展传感器技术、研制新型传感器的重要理论基础。例如利用抗体和抗原在电极表面相遇复合时，会引起电极电位的变化，利用这一现象可制出免疫传感器。另外利用约瑟夫逊效应可制成超精密的传感器，不仅能测量磁，还对温度、电压、重力也能进行超精密的测量。

2. 开发新材料

新型传感器敏感元件材料是研制新型传感器的重要物质基础。例如，光导纤维能制成压力、流量、温度、位移等多种传感器；用高分子聚合物薄膜作为传感器敏感材料的研究，在国内外已经开展起来。利用高分子聚合物能随周围环境的相对湿度大小成比例的吸附和释放水分子的原理，制成的等离子聚合物聚苯乙烯薄膜湿度传感器具有测湿范围宽、尺寸小、温度系数小和响应速度快的特点。

3. 提高传感器性能和扩大检测范围

检测技术的发展，必然要求传感器的性能如准确度、灵敏度、测量范围等不断提高。例如用直线光栅测线位移时，测量范围在几米时，准确度可达几微米；利用超导材料约瑟夫逊效应的磁传感器可测 10^{-9} Gs 的极弱磁场；利用核磁共振吸收效应的磁敏传感器，可将检测极限扩展到地磁强度的 10^{-2} 。

4. 传感器的微型化和微功耗

现在各类控制仪器设备的功能越来越强大，要求各个部件体积也是越小越好，因此传感器本身的体积也会要求更小。微传感器的特征之一就是体积小，其敏感元件的尺寸一般为微米级，由微机械加工技术制作而成。利用微机械工艺技术制作的传感器具有体积小、重量轻、反应快、灵敏度高以及成本低等优点。目前形成产品的主要有微型压力传感器、微型陀螺和微型加速度传感器等，它们的体积是原来传统传感器的几十甚至几百分之一，质量也从

千克级下降到几十克乃至几克。此外由于实际的工作环境的限制，例如在野外现场或者远离电网的地方，只能依靠电池或太阳能等供电。开发低功耗的传感器和无源传感器是必然的发展方向，这样既可以节省能源又可提高系统寿命。

5. 传感器的智能化

智能传感器是测量技术、半导体技术、计算技术、信息处理技术、微电子学和材料科学互相结合的综合密集型技术。智能传感器与一般传感器相比具有自补偿能力、自校准能力、自诊断能力、数值处理能力、双向通信能力、信息存储、记忆和数字量输出功能。它可充分利用计算机的计算和存储能力，对传感器的数据进行处理，并能对它内部行为进行调节，使采集的数据更佳。

6. 传感器的集成化和多功能化

传感器的集成化一般包含两方面含义：其一是将传感器与其后级的放大电路、运算电路、温度补偿电路等制成一个组件，实现一体化，与一般传感器相比，具有体积小、反应快、抗干扰、稳定性好的优点；其二是将同一类传感器集成在同一芯片上构成二维阵列式传感器。

传感器的多功能化是指一器多能，即用一个传感器可以检测两个或两个以上的参数。例如通过使用特殊的陶瓷将温度和湿度敏感元件集成在一起，制成温湿度传感器。多功能化不仅可以降低生产成本、减小体积，而且可以有效地提高传感器的稳定性、可靠性等性能指标。

7. 传感器的数字化与网络化

随着现代化的发展，传感器的功能已突破传统的功能，其输出也不再是单一的模拟信号，而是经过微处理器处理好的数字信号，有的甚至带有控制功能，这种传感器就叫作数字传感器。它有如下特点：

- 1) 数字传感器将模拟信号转换成数字输出，提高了传感器输出信号抗干扰能力，特别适用于电磁干扰强、信号距离远的工作现场。
- 2) 软件对传感器线性修正及性能补偿，减少系统误差。
- 3) 一致性和互换性好。

传感器网络化是传感器领域发展的一项新兴技术，利用 TCP/IP，使工作现场测控数据能就近登录网络，并与网络上的节点直接进行通信，实现数据的实时发布与共享。传感器网络化的目标就是采用标准的网络协议，同时采用模块化结构将传感器和网络技术有机地结合起来。

8. 多传感器的集成与融合

由于单传感器不可避免存在不确定或偶然不确定性，缺乏全面性和鲁棒性，所以偶然的故障就会导致系统失效。多传感器集成与融合技术正是解决这些问题的良方。多个传感器不仅可以描述同一环境特征的多个冗余的信息，而且可以描述不同的环境特征。它的特点是冗余性、互补性、及时性和低成本性。

多传感器的集成与融合技术已经成为智能机器与系统领域的一个重要的研究方向，它涉及信息科学的多个领域，是新一代智能信息技术的核心基础之一。从 20 世纪 80

年代初以军事领域的研究为开端，多传感器的集成与融合技术迅速扩展到军事和非军事的各个应用领域，如自动目标识别、自主车辆导航、遥感、生产过程监控、机器人、医疗应用等。

传感器和传感器技术是现代检测与控制系统的关键，其应用已深入到社会中各个领域的方方面面，传感器和传感器技术的研究和开发工作具有广阔的前景。

习 题

1-1 什么是传感器？它由哪几部分组成的？各部分的作用是什么？

1-2 传感器有几种常用的分类方式？

1-3 说明什么是结构型传感器和物性型传感器，它们有什么区别？

1-4 传感器的静态特性是什么？它有哪些性能指标？

1-5 传感器的动态特性是什么？它有哪些性能指标？

1-6 为了改善传感器的性能，可采用哪些技术途径？

1-7 简述传感器的发展趋势。

1-8 有一温度传感器，其特性可用一阶微分方程 $60\frac{dy}{dx} + 4y = 0.3x$ 表示，其中 y 为输出电压 (mV)， x 为输入温度 ($^{\circ}\text{C}$)。试求该温度传感器的时间常数和静态灵敏度。

1-9 某传感器给定相对误差 2%，满量程输出为 50mV，求可能出现的最大误差 δ (以 mV 计)。当传感器使用在满刻度的 1/2 和 1/8 时，计算可能产生的相对误差，并由此说明使用传感器选择适当量程的重要性。

1-10 有一力传感器，可简化为质量-弹簧-阻尼二阶系统，已知该传感器的固有频率 $f_0 = 1\text{kHz}$ ，阻尼比为 0.65，试求用它测量频率为 600Hz、400Hz 的正弦交变力时，振幅的相对误差和相位的相对误差是多少？若要求传感器的输出幅值误差小于 5%，试确定该传感器的工作频率范围。

1-11 试计算表 1-3 所列一组静态校准所得试验数据（多次测量的平均值）的零基直线及零基线性度。

表 1-3 静态校准试验数据

输入量 x	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
输出量 y	0.03	10.05	20.20	29.60	39.90	50.00

1-12 试计算表 1-4 所列一组静态校准所得试验数据（多次测量的平均值）的最佳直线和独立线性度。并比较独立线性度与端基线性度、平移端基线性度、零基线性度、前端基线性度、最小二乘线性度及平移最小二乘线性度的大小，由此说明需要精确评定线性度时采用何种评定方法。

表 1-4 静态校准试验数据

输入量 x	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
输出量 y	2.02	4.00	5.98	7.90	10.10	12.05

1-13 表 1-5 列出某线性传感器校准所得的数据（经检验，无可疑数据和不合理数据）。请给出最佳直线方程，并求其线性度、迟滞、重复性及传感器的总不确定度。

表 1-5 某线性传感器校准数据

行程	传感器的输入量 (x)	传感器的输出量 (y)				
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
正行程 u	0.0	0.66	0.65	0.78	0.67	0.80
	2.0	190.9	191.1	190.3	190.8	190.4
	4.0	382.8	382.3	383.5	381.8	382.8
	6.0	574.5	576.4	576.0	576.2	575.4
	8.0	769.4	769.2	770.4	769.8	771.5
	10.0	963.9	965.1	965.2	964.7	966.0
反行程 d	10.0	964.2	965.1	966.5	965.7	967.2
	8.0	770.6	772.4	771.0	770.8	772.1
	6.0	577.9	577.4	577.1	578.1	578.3
	4.0	384.0	384.8	384.2	384.9	384.2
	2.0	191.6	192.2	191.8	191.5	191.9
	0.0	1.66	1.65	1.54	1.47	1.66

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 传感器命名法及代码: GB/T 7666—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 传感器通用术语: GB/T 7665—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [3] 国家技术监督局. 传感器图用图形符号: GB/T 14479—1993 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 传感器主要静态性能指标计算方法: GB/T 18459—2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [5] 周真, 苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [6] 梁福平. 传感器原理及检测技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [7] 唐文彦. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [8] 陈建元. 传感器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [9] 何道清, 张禾, 湛海云. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] 吕勇军. 传感器技术实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [11] 徐科军, 马修水, 李晓林. 传感器与检测技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [12] 金篆芷, 王明时. 现代传感技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
- [13] 梁福平. 传感器原理及检测技术学习与实践指导 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014.

第2单元

电阻式传感器

学习要点

- ◆ 电阻式传感器的工作原理；
- ◆ 电阻应变片的温度误差及其补偿方法；
- ◆ 电阻式传感器的测量电路。

相关知识链接

- ◆ GJB 2433—1995 -70 ~ 300℃ 军用电阻式温度传感器规范；
- ◆ GB/T 18806—2002 电阻应变式压力传感器总规范；
- ◆ GB/T 7551—2008 称重传感器；
- ◆ GB/T 26807—2011 硅压阻式动态压力传感器。

引导案例

电阻式传感器在称重行业中的应用

应用电阻式传感器总量最大的行业是称重行业，可以说称重行业的发展离不开电阻式传感器的发展和广泛应用。目前，较为先进的称重仪器当属数字式称重仪器，是将电阻应变式传感器与微电子技术、微型计算机技术集成发展起来的一种新型电子称重技术，其中电子秤是典型代表，大多数电子秤都是用电阻应变片作为称重传感器的。

高速公路是现代化的标志，然而高速公路造价昂贵，一旦损坏维修将耗费大量的人力物力，同时也会对交通运输等带来诸多不便和负面影响，而车辆超载是导致路面凹陷、桥梁断裂、疲劳，从而大大缩短高速公路使用年限的重要原因之一；此外，车辆超载也是引发交通事故的最主要原因，因此国内外对高速公路行驶车辆的允许载重均做出一定限制，并在高速公路入口处安设车辆载重检测系统。可以说正是高速公路上发生的一次次惨剧和高昂的维修费用促进着行驶车辆称重设备的快速发展。当载重卡车驶过动态称重设备时，称重传感器和电子衡将立即进行检测判断，同时给出信号以控制交通信号灯。目前，数字式电子汽车衡因其明显优势被广泛应用在车辆载重检测领域，较为先进的数字式电子汽车衡利用多个称重传感器实现对动态车辆载重测量，且能对温度系数、非线性、滞后和蠕变等实现自动的数字化补偿，从而准确高效的测得车辆的重量，限制超载违规车辆的行驶，不仅保证了车辆的安全运行同时也大大延长了高速公路的使用寿命。

电阻式传感器是一种能把非电物理量（如位移、力、压力、加速度、扭矩等）转换成

与之有确定对应关系的电阻量，再经过转换元件转换成便于传送和记录的电压（电流）信号的一种装置。电阻式传感器在检测中应用十分广泛。

电阻式传感器具有结构简单、输出精度较高、线性和稳定性好等一系列的特点；但它受环境条件（如温度）影响较大，且有分辨力不高不足之处。电阻式传感器种类较多，主要有变阻器式、电阻应变式和固态压阻式传感器等三种类型。前两种传感器一般采用的敏感元件是弹性敏感元件，转换元件分别是电位器和电阻应变片，而压阻式传感器的敏感元件和传感元件均为半导体（如硅）。变阻器式传感器结构简单、价格便宜、输出信号功率大、被测量与转换量间容易实现线性或某些确定的函数关系。但由于电位器可靠性差、干扰（噪声）大、使用寿命短，比其他类型的电阻式传感器性能要差一些，故其应用范围在逐渐缩小；应变式传感器是利用金属的电阻应变效应将被测量转换为电量输出的一种传感器。这类传感器结构简单、尺寸小、重量轻、使用方便、性能稳定可靠、分辨力高、灵敏度高、价格便宜，工艺较成熟，因此在航空航天、机械、化工、建筑、医学、汽车工业等领域有广泛的应用。压阻式传感器灵敏度大，分辨力高，可测微小应变，特别是固态压阻式传感器采用半导体集成工艺，可以制作成微型传感器，应用越来越广泛。但压阻式传感器对温度比较敏感，必须对温度误差进行补偿。

2.1 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器具有悠久的历史，是应用最广泛的传感器之一。将电阻应变片（resistance strain gage）粘贴到各种弹性敏感元件特定表面上，当加速度、力、力矩、压力及流量等物理量作用于弹性元件时，会导致元件应力和应变的变化，进而引起电阻应变片电阻的变化，电阻的变化经电路处理后以电信号的方式输出，这就是电阻应变式传感器的工作原理。利用应变式变换原理实现的传感器称为应变式传感器（strain gage transducer/sensor）。

2.1.1 金属电阻应变效应

电阻应变片的工作原理是基于金属的应变效应。金属丝的电阻随着它所受的机械变形（拉伸或压缩）的大小而发生相应变化的现象称为金属的电阻应变效应。

由物理学已知，一根金属丝的电阻为

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-1)$$

式中 R ——金属丝的电阻（ Ω ），
 ρ ——金属丝的电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）
 l ——金属丝的长度（ m ）；
 A ——金属丝的截面积（ m^2 ）。

取一段金属丝如图 2-1 所示。当金属丝受拉而伸长 dl 时，其横截面将相应减小 dA ，电阻率则必然因金属晶格发生变形等因素的影响引起变化 $d\rho$ ，从而引起电阻 R 变化为 dR ，即

$$dR = \frac{l}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA \quad (2-2)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-3)$$

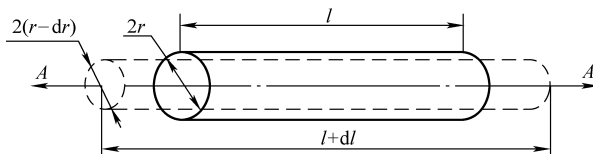


图 2-1 金属丝的圆截面

根据材料学的知识，杆件在轴向受拉或受压时，其纵向应变与横向应变的关系为

$$\frac{\frac{dr}{r}}{\frac{dl}{l}} = -\mu \quad (2-4)$$

式中 r ——金属丝材料的半径；

μ ——金属丝材料的泊松系数；

$\frac{dl}{l}$ ——金属丝材料的应变，记作 ε 。

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} \quad (2-5)$$

将式 (2-4) 和式 (2-5) 代入式 (2-3) 得

$$\frac{dR}{R} = \left(1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon} \right) \varepsilon \quad (2-6)$$

令 $K_s = \left(1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon} \right)$ ，则有

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon \quad (2-7)$$

K_s 称为金属丝的灵敏系数，表示金属丝产生单位变形时，电阻的相对变化量。

由式 (2-6) 与式 (2-7) 可以看出，金属丝的灵敏系数 K_s 受两个因素影响，第一项 $(1 + 2\mu)$ 是由于金属丝受拉伸后，材料的几何尺寸发生变化而引起的；第二项是由于材料发生变形时，其自由电子的活动能力和数量均发生了变化，导致材料的电阻率 ρ 发生变化。对于金属材料而言，第一项远远大于第二项，即 $K_s \approx 1 + 2\mu$ ；实验表明，在金属电阻丝拉伸比例极限内，电阻相对变化 dR/R 与轴向应变 ε 成正比，因而 K_s 为一常数，通常金属丝的灵敏系数 $K_s = 2$ 左右。式 (2-7) 可以表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \varepsilon \quad (2-8)$$

2.1.2 应变片的基本结构和测量原理

1. 应变片的结构

电阻丝应变片是用直径为 0.01 ~ 0.05mm 具有高电阻率的电阻丝制成的。为了获得高的阻值，将电阻丝排列成栅网状，称为敏感栅，并粘贴在绝缘的基片上，电阻丝的两端焊接引线。敏感栅上面粘贴有保护作用的覆盖层，如图 2-2 所示。

应变片的结构形式很多，但其主要组成部分基本相同。

1) 敏感栅——应变片中实现应变 - 电阻转换的转换元件。它通常由直径为 $0.01 \sim 0.05\text{mm}$ 的金属丝绕成栅状, 或用金属箔腐蚀成栅状。图中 l 表示栅长, b 表示栅宽。其电阻值一般在 100Ω 以上。

2) 基底——为保持敏感栅固定的形状、尺寸和位置, 通常用黏结剂将其固结在纸质或胶质的基底上。工作时, 基底起着把试件应变准确地传递给敏感栅的作用。为此, 基底必须很薄, 一般为 $0.02 \sim 0.04\text{mm}$ 。

3) 引线——它起着敏感栅与测量电路之间的过渡连接和引导作用。通常取直径约 $0.15 \sim 0.30\text{mm}$ 的低阻镀锡铜线, 并用钎焊与敏感栅端连接。

4) 盖层——用纸、胶作成覆盖在敏感栅上的保护层, 起着防潮、防蚀、防损等作用。

5) 黏结剂——在制造应变片时, 用它分别把盖层和敏感栅粘贴于基底; 在使用应变片时, 用它把应变片基底再粘贴在试件表面的被测部位。因此它也起着传递应变的作用。

2. 测量原理及其特点

用应变片测量时, 将其粘贴在被测对象表面上。当被测对象受力变形时, 应变片的敏感栅也随同变形, 其电阻值发生相应变化, 通过转换电路转换为电压或电流的变化, 从而实现应变的测量。

通过弹性敏感元件, 将位移、力、力矩、加速度、压力等物理量转换为应变, 则可用应变片测量上述各量, 做成各种应变式传感器。

应变片具有如下的优点:

- 1) 测量应变时的灵敏度和准确度高, 性能稳定、可靠, 可测 $1 \sim 2\mu\epsilon$, 误差小于 1% 。
- 2) 应变片尺寸小、重量轻、结构简单、使用方便、测量速度快。测量时对被测件的工作状态和应力分布基本上无影响。既可用于静态测量, 又可用于动态测量。
- 3) 测量范围大。既可测量弹性变形, 也可测量塑性变形。变形范围为 $1\% \sim 2\%$ 。
- 4) 适应性强。可在高温、超低温、高压、水下、强磁场以及核辐射等恶劣环境下使用。
- 5) 便于多点测量、远距离测量和遥测。
- 6) 价格便宜, 品种多, 工艺较成熟, 便于选择和使用, 可以测量多种物理量。

2.2 应变片的静态特性

要正确使用电阻应变片, 必须了解其工作特性和主要参数。

1. 应变片的电阻值 R_0

应变片的电阻值指应变片在未使用和不受力的情况下, 在室温条件下测定的电阻值, 也称原始阻值。应变片的电阻值已趋于标准化, 有 60Ω 、 120Ω 、 350Ω 、 600Ω 和 1000Ω 等多

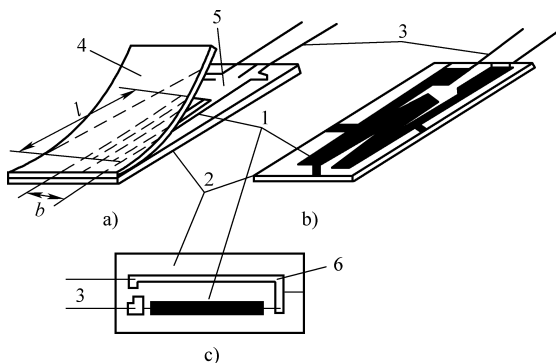


图 2-2 典型应变片的结构及组成

a) 丝式 b) 箔式 c) 半导体

1—敏感栅 2—基底 3—引线 4—盖层

5—黏结剂 6—电极

种阻值,其中 120Ω 最常用。应变片的电阻值大,可以加大应变片承受的电压,从而可以提高输出信号,但一般情况下其相应的敏感栅的尺寸也要随之增大。

2. 绝缘电阻

敏感栅和基底之间的电阻值,称之为绝缘电阻,一般应大于 $50M\Omega$ 。绝缘电阻过低,会造成应变片与试件之间漏电而产生测量误差,因此应避免应变片受潮,受潮后其绝缘电阻会大幅降低。

3. 横向效应及横向效应系数 H

金属应变片的敏感栅通常都呈栅状,它由轴向纵栅和圆弧横栅两部分组成,如图 2-3a 所示。由于试件承受单向应力 σ 时,其表面处于平面应变状态中,即轴向拉伸 ε_x 和横向收缩 ε_y 。粘贴在试件表面上的应变片,其纵栅和横栅各自主要分别感受 ε_x 和 ε_y (见图 2-3b),从而引起总的电阻相对变化为

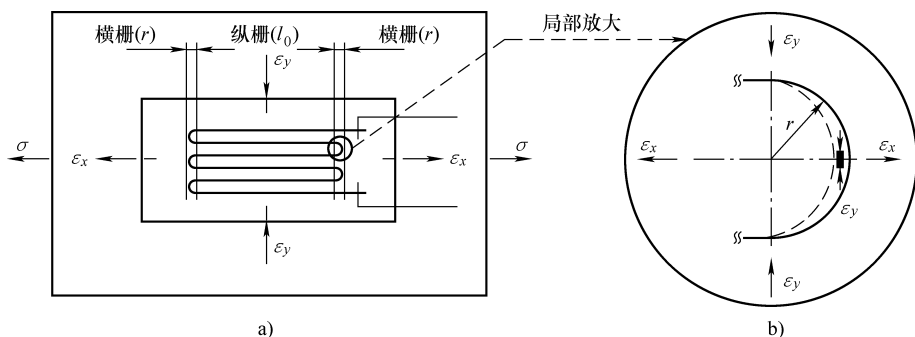


图 2-3 横向效应

a) 应变片敏感栅的组成 b) 横向效应

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y = K_x (1 + aH) \varepsilon_x \quad (2-9)$$

式中 K_x ——纵向灵敏系数,它表示当 $\varepsilon_y = 0$ 时,单位轴向应变 ε_x 引起的电阻相对变化;

K_y ——横向灵敏系数,它表示当 $\varepsilon_x = 0$ 时,单位横向应变 ε_y 引起的电阻相对变化;

$a = \varepsilon_y / \varepsilon_x$ ——双向应变比;

$H = K_y / K_x$ ——双向应变灵敏系数比。

式 (2-9) 为一般情况下应变-电阻转换公式。它表明:

1) 在标定条件下,有 $a = \varepsilon_y / \varepsilon_x = -\mu_0$, 则

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x (1 - \mu_0 H) \varepsilon_x = k \varepsilon_x \quad (2-10)$$

其中 $k = K_x (1 - \mu_0 H)$, μ_0 是金属材料的泊松系数, $\mu_0 = 0.285$ 。

由式 (2-10) 可见,在单位应力、双向应变情况下,横向应变总是起着抵消纵向应变的作用。应变片这种既敏感纵向应变,又同时受横向应变影响而使灵敏系数及相对电阻比都减小的现象,称为横向效应。其大小用横向效应系数 H (百分数) 来表示,即

$$H = \frac{K_y}{K_x} \times 100\% \quad (2-11)$$

2) 由于横向效应的存在,在非标定条件下,试件取泊松比 $\mu_0 \neq 0.285$ 的一般材料,主

应力与应变片轴向不一致,由此引起的应变场为任意的 ε_x 和 ε_y ,倘若仍用标定灵敏系数 K 的应变片进行测试,将会产生较大误差。其相对误差为

$$e = \frac{H}{1 - \mu_0 H} (\mu_0 + a) \times 100\% \quad (2-12)$$

若单向应力与应变片轴向一致,则有 $a = -\mu$, 则式 (2-12) 变成

$$e = \frac{H}{1 - \mu_0 H} (\mu_0 - \mu) \times 100\% \quad (2-13)$$

由此可见,要消减横向效应产生的误差,有效的办法是减小横向效应系数 H 。对丝式应变片,纵栅 l_0 越长,横栅 r 越小,则 H 越小。

4. 灵敏系数 K

当应变片应用于试件表面时,在其轴线方向的单向应力作用下,应变片的电阻值相对变化与试件表面上粘贴应变片区域的轴向应变之比,称为应变片灵敏系数。必须指出,应变片灵敏系数 K 并不等于金属单丝的灵敏系数 K_s ,一般情况下, $K < K_s$ 。这是因为,在单向应力产生双向应变的情况下, K 除受到敏感栅结构形状、成型工艺、黏结剂和基底性能的影响外,尤其受到栅端圆弧部分横向效应的影响。

应变片灵敏系数 K 直接关系到应变片的测量准确度,其误差大小是衡量应变片质量优劣的主要指标。通常从批量生产中每批抽样,进而对所抽取的若干批样品进行实测来确定 K 值,该过程即应变片的标定,故 K 又被称为标定灵敏系数。应变片的标定必须按规定的统一标准来进行,规定条件是:①试件材料取泊松比 $\mu_0 = 0.285$ 的钢;②试件单向受力;③应变片轴向与主应力方向一致。

5. 机械滞后 Z_j

这是指粘贴的应变片在一定温度下受到增(加载)、减(卸载)循环机械应变时,同一应变量下应变指示值的最大差值。而产生机械滞后的主要原因是由于敏感栅、基底和黏合剂在承受机械应变之后留下的残余变形所致。应变片第一次承受应变载荷时常常发生较大的机械滞后,经过几次加载、卸载循环后,机械滞后会明显减少。如图 2-4 所示,通常在室温条件下,对不同等级的应变片要求机械滞后 $Z_j < 3、5、10$ 及 $20 \mu\text{m}/\text{m}$ 。因此,在正式使用之前都预先加载、卸载若干次,以减少机械滞后对测量结果的影响。

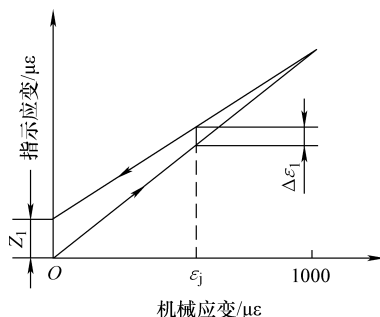


图 2-4 应变片的机械滞后特性

6. 最大工作电流 ($I_{\max}$)

对于已经安装的应变片,允许通过敏感栅而不影响其工作特性的最大电流值。它与应变片本身、试件、黏合剂和使用环境等有关,要根据应变片的阻值和具体电路来计算。为了保证测量精度,在静态测量时,允许电流一般为 25mA ;动态测量可达 $75 \sim 100\text{mA}$ 。通常箔式应变片允许的电流较大。

7. 应变极限 ($\varepsilon_{\lim}$)

应变片所能测量的应变范围是有一定限度的,误差超过一定限度则认为应变片已经开始失去了工作能力。

应当指出,应变片的线性(灵敏系数为常数)特性,只有在一定的应变限度范围内才

能保持。当试件输入的真实应变超过某一限值时,应变片的输出特性将出现非线性。在恒温条件下,使非线性误差达到10%时的真实应变值,称为应变极限 ε_{lim} ,如图2-5所示。

应变极限是衡量应变片测量范围和过载能力的指标,通常要求 $\varepsilon_{\text{lim}} \geq 6000 \mu\varepsilon$ 。

8. 蠕变和零漂

如果在一定温度下使应变片承受一恒定的机械应变,则这时指示应变随时间而变化的特性,称为应变片的蠕变,如图2-6中 θ 所示。当试件初始空载时,应变片示值仍会随时间变化的现象称为零漂,如图2-6中的 P_0 所示。蠕变反映了应变片在长时间工作中对时间的稳定性,通常要求 $\theta < 3 \sim 15 \mu\varepsilon$ 。引起蠕变的主要原因是制作应变片时内部产生的内应力和工作中出现的剪应力,使丝栅、基底,尤其是胶层之间产生的“滑移”所致。选用弹性模量较大的黏结剂和基底材料,适当减薄胶层和基底,并使之充分固化,有利于蠕变性能的改善。

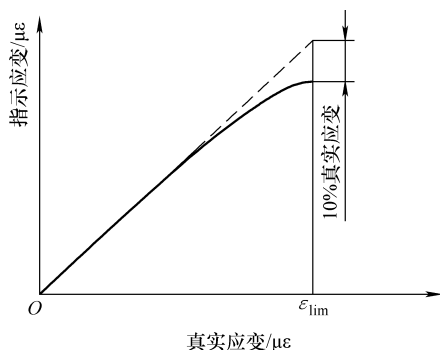


图 2-5 应变片的应变极限特性

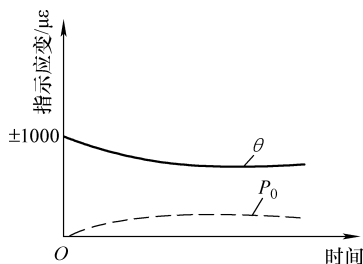


图 2-6 应变片的蠕变和零漂特性

可以看出这两项指标都是用来衡量应变片特性对时间的稳定性的,对于长时间测量的应变片才有意义。实际上,无论是标定或用于测量,蠕变值中都已经包含零漂,而零漂在空载时就会出现。

2.3 应变片的动态特性

当使用电阻应变片测量变化频率较高的动态应变时,要考虑其动态响应特性。应变片的动态响应特性就是其感受随时间变化的应变时的响应特性。

2.3.1 应变波的传播过程

应变以波的形式从被测试件(弹性元件)中经过基底、黏合层,最后传播到敏感栅上,并由应变片将试件变形的应变波全部反映出来。

表2-1给出了应变波在不同材料中的传播速度,应变波在试件材料中的传播速度与声波速度相同,其速度可以按下式计算

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-14)$$

式中 v ——应变波在试件中的传播速度;

E ——试件材料的纵向弹性模量；

ρ ——试件材料的密度。

表 2-1 应变波在不同材料中的传播速度

材料名称	传播速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	材料名称	传播速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
混凝土	2800 ~ 4100	有机玻璃	1500 ~ 1900
水泥砂浆	3000 ~ 3500	赛璐珞	850 ~ 1400
石膏	3200 ~ 5000	环氧树脂	700 ~ 1450
钢	4500 ~ 5100	环氧树脂合成物	500 ~ 1500
铝合金	5100	橡胶	30
镁合金	5100	电木	1500 ~ 1700
铜合金	3400 ~ 3800	型钢结构物	5000 ~ 5100

由于黏接层和基片的总厚度非常小，所以它的传播时间是极短的，可以忽略不计。

当应变波在敏感栅长度方向上传播时，情况与前两者大不一样。应变片反映出来的应变波形，是应变片丝栅长度内所感受应变量的平均值，即只有当应变波通过应变片全部长度后，应变片所反映的波形才能达到最大值。这就会有一定时间延迟，将对动态测量产生影响。

2.3.2 应变片工作频率的估算

从应变波的传播过程可以看出，影响应变片频率响应特性的主要因素是应变片的基长和应变波在试件材料中的传播速度。应变片的可测频率或称截止频率可分下面两种情况分析。

1. 正弦应变波

当应变波按正弦规律变化时，由于应变片具有一定的长度，在同一瞬间沿基长方向各点上所感受的应变是不同的。当应变片所反应的平均应变相对应变片中心点处的真实应变相差太大时，就会使测量失真，产生测量误差。

下面讨论应变片的基长与测量时所能允许的极限工作频率的关系。假设应变波为正弦波，固有频率为 f ，如图 2-7 所示。

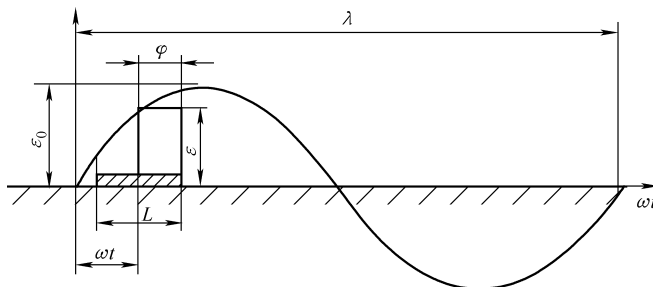


图 2-7 应变片对正弦应变波的响应

为了计算方便，令应变波方程为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (2-15)$$

此时应变片反应的平均应变值为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2\varphi} \int_{\omega t - \varphi}^{\omega t + \varphi} \varepsilon_0 \sin \omega t d(\omega t) = \varepsilon_0 \sin \omega t \frac{\sin \varphi}{\varphi} \quad (2-16)$$

当 φ 较小时, 函数 $\frac{\sin \varphi}{\varphi}$ 可用展开级数的前两项来代替, 即

$$\frac{\sin \varphi}{\varphi} \approx 1 - \frac{\varphi^2}{6} \quad (2-17)$$

所以, 应变片中点处的真实应变值与整个应变片所反应的平均应变值的相对误差为

$$\delta = \frac{\varepsilon - \bar{\varepsilon}}{\varepsilon} = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon} = 1 - \frac{\sin \varphi}{\varphi} \approx \frac{\varphi^2}{6} \quad (2-18)$$

将 $\varphi = \frac{\pi L}{\lambda}$ 代入式 (2-18) 中, 得到

$$\delta = \frac{1}{6} \left(\frac{\pi L}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{\pi L f}{v} \right)^2 \quad (2-19)$$

其中 $v = \lambda f$ 为应变波传播速度, 因此

$$f = \frac{v}{\pi L} \sqrt{6\delta} \quad (2-20)$$

或

$$L = \frac{v}{\pi f} \sqrt{6\delta} \quad (2-21)$$

由此可知, 当允许误差 δ 及应变波的传播速度 v 为一定时, 所测应变的极限频率 (最高工作频率) 是由基长来决定的。一般取基长为应变波长的 $1/10 \sim 1/20$, 即

$$f = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20} \right) \frac{v}{L} \quad (2-22)$$

表 2-2 为利用式 (2-22) 求出的不同基长所对应的极限频率。

表 2-2 不同基长应变片的最高工作频率 ($v = 5000 \text{ m/s}$)

应变片基长/mm	1	2	3	5	10	15	20
最高工作频率/kHz	250	125	83.3	50	25	16.6	12.5

2. 阶跃应变波

阶跃应变波的情况如图 2-8 所示, 图中 a 表示试件产生的阶跃机械应变波; b 表示传播速度为 v 的应变波, 滞后一段时间 $t_h = L/v$ 的理论响应特性; c 表示应变片对应变波的实际响应特性。

由于应变片所反映的变形有一定的时间延迟才能达到最大值, 所以, 应变片的理论与实际输出波形如图 2-8 所示, 以输出从稳态的 10% 上升到稳态值的 90% 的这段时间作为上升时间 t_r , 则有如下估算式:

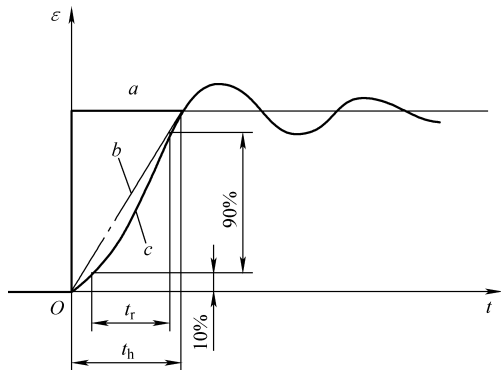


图 2-8 应变片对阶跃应变的响应特性

$$t_r = \frac{0.8L}{v} \quad (2-23)$$

式中 L ——应变片的基长。

以上讨论的应变片对动态应变的频响特性，当在 $(1/\lambda) \ll 1$ （通常为 $1/\lambda = 1/10 \sim 1/20$ ）的前提下，是能满足一般工程测试要求的。实际衡量应变片动态工作性能的另一个重要指标是疲劳寿命。它是指粘贴在试件上的应变片，在恒幅交变应力作用下，连续工作直至疲劳损坏时的循环次数。它与应变片的取材、工艺和引线焊接、粘贴质量等因素有关，一般要求 $N = 10^5 \sim 10^7$ 次。

2.4 应变片电桥测量电路

电阻应变片将应变的变化转换成电阻的变化后，由于应变值及其应变电阻变化一般都很微小，既难以直接精确测量，又不便直接处理。因此，必须采用转换电路，把应变片的电阻变化转换成电压或电流变化。通常采用电桥电路实现这种转换。根据电源的不同，电桥分直流电桥和交流电桥。

2.4.1 直流电桥测量电路

1. 单臂直流电桥

直流电桥如图 2-9 所示，图中 U 为电桥电源电压，有四个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 作为桥臂。在初始状态，当满足平衡条件 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 时，电桥达到平衡，输出电压为零。当只有一个桥臂为应变片时，称为单臂电桥。

设 R_1 为工作应变片，它随被测参数变化而变化，而 R_2 、 R_3 和 R_4 为固定电阻， U_o 为输出电压。当被测参数的变化引起了电阻 R_1 变化 ΔR_1 时，即 $R_1 = R_1 + \Delta R_1$ ，电桥平衡被破坏，产生电桥输出不平衡电压，输出电压 U_o 为

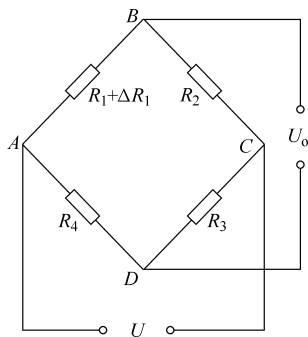


图 2-9 直流电桥

$$U_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U = \frac{R_1 R_3 + \Delta R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (2-24)$$

2. 直流电桥输出电压灵敏度

由电桥平衡条件式(2-24)变为

$$U_o = \frac{\Delta R_1 R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U = \frac{\frac{R_3}{R_4} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)} U \quad (2-25)$$

设桥臂比 $R_2/R_1 = R_3/R_4 = n$ ，略去分母中的 $\Delta R_1/R_1$ ，可得

$$U_o = \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} U \quad (2-26)$$

定义 $S_u = \frac{U_o}{\Delta R_1 / R_1}$ 为单臂工作应变片电桥输出电压灵敏度，其物理意义就是单位电阻相对变化量引起电桥输出电压的大小。

可得单臂工作应变片的电桥电压灵敏度为

$$S_u = \frac{n}{(1+n)^2} U \quad (2-27)$$

显然， S_u 与电桥电源电压成正比，同时与桥臂比 n 有关。

U 值的选择受应变片功耗的限制。 U 值确定后，为使电压灵敏度 S_u 达到极大值，取 $\frac{dS_u}{dn} = 0$ ，即 $\frac{1-n}{(1-n)^3} = 0$ ，可知 $n = 1$ 时，即 $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_4$ 时，电桥的电压灵敏度 S_u 最高。此时，由式 (2-26) 和式 (2-27) 得

$$U_o = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-28)$$

$$S_u = \frac{U}{4}$$

式 (2-28) 说明，当电源电压 U 及应变片电阻相对变化一定时，电桥的输出电压及其电压灵敏度与各桥臂的阻值无关。电桥电源电压越高，输出电压的灵敏度越高。但提高电源电压使应变片和桥臂电阻功耗增加，温度误差增大。一般电源电压取 3 ~ 6V 为宜。

3. 输出电压非线性误差

上面在讨论电桥的输出特性时，应用了 $R_1 \gg \Delta R_1$ 的近似条件，才得出 U_o 对 ΔR_1 的线性关系。当 ΔR_1 过大而不能忽略时，桥路输出电压将存在较大的非线性误差。下面以全等臂四分之一电桥 ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$) 电压输出为例，计算桥路输出非线性误差的大小。全等臂四分之一电桥实际输出电压 U'_o 为

$$U'_o = \frac{U}{2} \frac{\frac{\Delta R}{R}}{2 + \frac{\Delta R}{R}} \quad (2-29)$$

输出电压的非线性误差为

$$e_\varphi = \frac{U_o - U'_o}{U_o} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{1 + n + \frac{\Delta R}{R}} \quad (2-30)$$

如果 $n = 1$ ，则

$$e_\varphi = \frac{\frac{\Delta R}{2R}}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \quad (2-31)$$

将 $\frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}}$ 按幂级数展开

$$e_{\varphi} = \frac{\Delta R}{2R} \left[1 - \frac{\Delta R}{2R} + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^3 + \dots \right] \quad (2-32)$$

略去高次项, 可以得到

$$e_{\varphi} \approx \frac{\Delta R}{2R} \quad (2-33)$$

故

$$e_{\varphi} \approx \frac{1}{2} K \varepsilon \quad (2-34)$$

对于一般应变片, 其灵敏度系数 $K=2$, 当承受的应变 $\varepsilon < 5000 \mu\varepsilon$ 时, $e_{\varphi} = 0.5\%$ 。当要求测量的精度较高时, 或应变量更大时, 非线性误差就不能忽略。

由于产生非线性误差的原因之一是在工作过程中, 一个桥臂电阻产生 ΔR 的变化, 使通过桥臂的电流不恒定, 所以可采用差动电桥和恒流源电桥消除非线性误差。

直流电桥的优点是, 高稳定度的直流电源易于获得, 电桥调节平衡电路简单, 传感器至测量仪表连线导线的分布参数影响小等。

4. 差动电桥

采用差动电桥是消除非线性误差影响的有效措施。将两个工作应变片接入电桥的相邻臂, 并使他们一个受拉, 一个受压, 如图 2-10a 所示, 称为半桥差动电桥。

半桥差动电桥电路的输出电压为

$$U_o = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U \quad (2-35)$$

设初始时 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, $\Delta R_1 = \Delta R_2$, 则

$$U_o = \frac{U}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-36)$$

比较式 (2-28) 和式 (2-36) 可见, 半桥差动电路不仅没有非线性误差, 而且电桥灵敏度也比单一应变片提高了 1 倍, 还具有温度补偿作用。同样的全桥差动电桥的输出电压灵敏度是单一应变片工作时的 4 倍。如图 2-10b 为全桥电路, 如果 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$, 则等臂全桥的输出电压为

$$U_o = U \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-37)$$

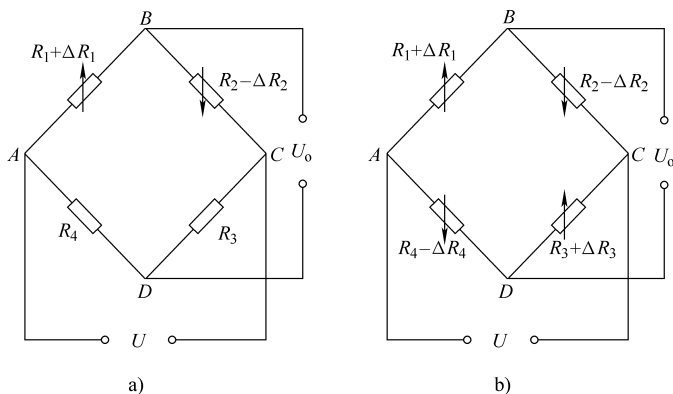


图 2-10 差动电桥

利用电桥的特性不仅可以提高灵敏度，还可以抑制干扰信号，因为当电桥的各臂或相邻两臂同时有某一个增量时，对电桥的输出没有影响。

[示例] 平面膜片式压力传感器，应变片连接成直流全桥，且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ， $R_1 = R_3 = R + \Delta R$ ， $R_2 = R_4 = R - \Delta R$ 。如图 2-11 所示，应变片的 $K=2.0$ ，膜片允许测试的最大应变 $\varepsilon = 800\mu\varepsilon$ 对应的压力为 100kPa，电桥电压 U 为 5V，试求最大应变时，测量电路输出端电压为多少？当输出端电压为 3.2V 时，所测压力为多少， A_4 的作用是什么？

该例为恒压源供电，且为全桥等臂，那么电桥输出电压

$$U'_o = \frac{\Delta R}{R} U = S_u U$$

则电桥输出电压灵敏度

$$S_u = \frac{U'_o}{U} = K\varepsilon = 2.0 \times 800 \times 10^{-6} \text{V/V} = 1.6 \text{mV/V}$$

该输出电压灵敏度意味着加 100kPa 压力时，每 1V 电桥电压 U 对应的输出电压为 1.6mV。故电桥输出电压

$$U'_o = 1.6 \text{mV/V} \times 5 \text{V} = 8 \text{mV}$$

电路中 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为 OP07 运放，组成同相输入差动放大器，放大倍数为

$$K_F = \left(1 + \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_b}\right) \frac{R_f}{R_5} = \left[1 + \frac{(20 + 20) \times 1000}{128.4}\right] \times \frac{20}{10} = 625$$

则最大应变时电路输出端输出电压 $U_o = 8 \text{mV} \times 625 = 5000 \text{mV} = 5 \text{V}$ ，又因 0 ~ 100kPa 压力对应输出电压 0 ~ 5V，则当输出端电压为 3.2V 时，有 $100:5 = P:3.2$ ，则 $P = 64 \text{kPa}$ 。从电路图中可知， A_4 构成为电压跟随器，通过调整正输入端电位器，从而调整 A_4 输出端电压，与 A_2 的输出相加，使压力传感器压力为零时，电路输出端电压也为零，即对电路进行调零。

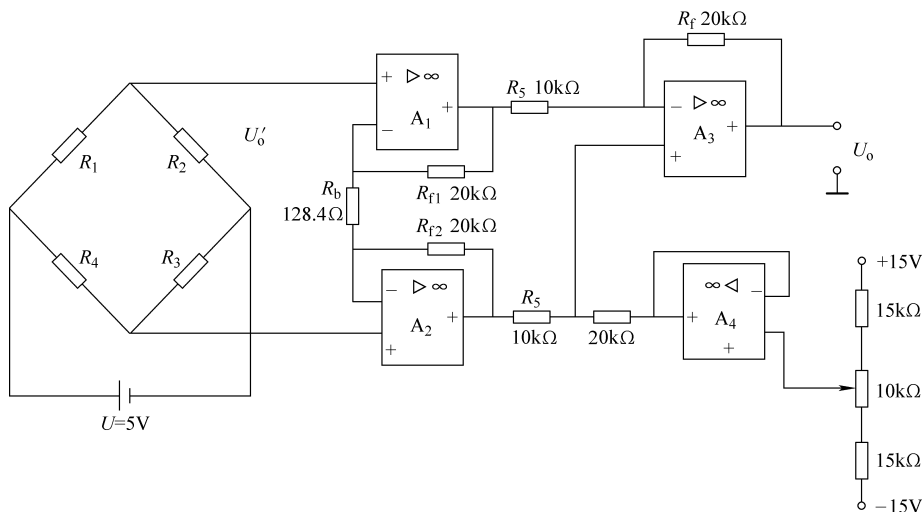


图 2-11 应变式传感器应用

2.4.2 交流电桥测量电路

交流电桥的供桥电源为正弦交流电，而且 4 个桥臂不是纯电阻。即 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 为

复阻抗, 其等效电路如图 2-12 所示。 $\dot{U}$ 为交流电压源, 开路输出电压为 $\dot{U}_o$ 。

设

$$Z_i = R_i + jX_i = z_i e^{j\varphi_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2-38)$$

式中 R_i, X_i ——各桥臂电阻和电抗;

z_i, φ_i ——各桥臂复阻抗的模和幅角。

输出电压为

$$\dot{U}_o = \dot{U} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} = \dot{U} \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \quad (2-39)$$

根据交流电路分析 (和直流电路类似) 可得平衡条件为

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (2-40)$$

因此, 式 (2-39) 的平衡条件必须同时满足

$$\begin{cases} z_1 z_3 = z_2 z_4 \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \end{cases} \quad (2-41)$$

得到交流电桥的平衡条件为相对桥臂阻抗模之积相等, 相对桥臂阻抗角之和相等。当工作应变片 R_1 改变 ΔR_1 , 引起 Z_1 变化 ΔZ_1 , 可得出

$$\dot{U}_o = \frac{\frac{Z_3}{Z_4} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{\Delta Z_1}{Z_1}\right) \left(1 + \frac{Z_3}{Z_4}\right)} \dot{U} \quad (2-42)$$

并设初始时 $Z_1 = Z_2, Z_3 = Z_4$, 因 $\Delta Z_1 / Z_1 \ll 1$, 故可略去分母中的 $\Delta Z_1 / Z_1$, 则

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{4} \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \quad (2-43)$$

上述结论与直流电桥的情况相似。

2.5 应变片的温度效应和补偿

2.5.1 温度误差

用应变片测量时, 希望其电阻只随应变而变, 而不受其他因素的影响。但实际上环境温度变化时, 对应变片电阻会有很大的影响。把应变片安装在一个弹性试件上, 使试件不受任何外力的作用; 环境温度发生变化, 应变片的电阻也随之发生变化。在应变测量中如果不排除这种影响, 则会给测量带来很大的误差。这种由于环境温度带来的误差称为应变片的温度误差, 又称为热输出。下面分析温度误差产生的原因。

1. 温度变化引起应变片敏感栅电阻变化而产生附加应变

电阻的热效应, 即敏感栅金属丝电阻自身随温度产生的变化。电阻与温度的关系可以写成

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \Delta t) = R_0 + \Delta R_{t\alpha} \quad (2-44)$$

式中 R_t ——温度为 t 时的电阻值;

R_0 ——温度为 t_0 时的电阻值;

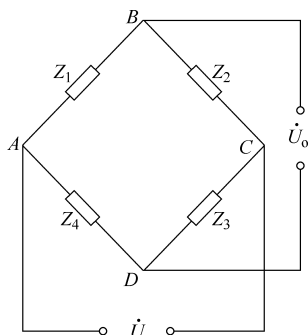


图 2-12 交流电桥

Δt ——温度的变化值；

$\Delta R_{t\alpha}$ ——温度变化 Δt 时的电阻变化， $\Delta R_{t\alpha} = R_t - R_0 = R_0 \alpha \Delta t$ ；

α ——敏感栅材料的电阻温度系数。

温度变化 Δt 时，将电阻变化折合成应变 $\varepsilon_{t\alpha}$ ，则

$$\varepsilon_{t\alpha} = \frac{\frac{\Delta R_{t\alpha}}{R_0}}{K} = \frac{\alpha \Delta t}{K} \quad (2-45)$$

式中 K ——应变片的灵敏系数。

2. 试件材料与敏感栅材料的线膨胀系数不同，使应变片产生附加应变

如果粘贴在试件上一段长度为 l_0 的应变丝，当温度变化为 Δt 时，应变丝受热膨胀至 l_{t1} ，而在应变丝 l_0 下的试件受热膨胀至 l_{t2} 。

$$l_{t1} = l_0 (1 + \beta_s \Delta t) \quad (2-46)$$

$$\Delta l_{t1} = l_{t1} - l_0 = l_0 \beta_s \Delta t \quad (2-47)$$

$$l_{t2} = l_0 (1 + \beta_g \Delta t) \quad (2-48)$$

$$\Delta l_{t2} = l_{t2} - l_0 = l_0 \beta_g \Delta t \quad (2-49)$$

式中 l_0 ——温度为 t_0 时的应变丝长度；

l_{t1} ——温度为 t 时的应变丝长度；

l_{t2} ——温度为 t 时的应变丝下试件的长度；

β_s, β_g ——分别为应变丝和试件材料的线膨胀系数；

$\Delta l_{t1}, \Delta l_{t2}$ ——分别为温度变化时应变丝和试件膨胀量。

由式 (2-47) 和式 (2-49) 可知，如果 β_s 和 β_g 不相等，则 Δl_{t1} 和 Δl_{t2} 也不相等，但是应变丝和试件是粘结在一起的，若 $\beta_s < \beta_g$ ，则应变丝被迫从 Δl_{t1} 拉长至 Δl_{t2} ，这就使应变丝产生附加变形 $\Delta l_{t\beta}$ ，即

$$\Delta l_{t\beta} = \Delta l_{t2} - \Delta l_{t1} = l_0 (\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (2-50)$$

由此使应变片产生的附加电阻为

$$\Delta R_{t\beta} = R_0 K (\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (2-51)$$

折算为应变

$$\varepsilon_{t\beta} = \frac{\Delta l_{t\beta}}{l_0} = (\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (2-52)$$

设工作温度变化为 Δt ，则由此引起粘贴在试件上的应变片总电阻的变化为

$$\Delta R_t = \Delta R_{t\alpha} + \Delta R_{t\beta} = R_0 \alpha \Delta t + R_0 K (\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (2-53)$$

折算成响应的应变量为

$$\varepsilon_t = \frac{\left(\frac{\Delta R_t}{R_0} \right)}{K} = \left[\frac{\alpha}{K} + (\beta_g - \beta_s) \right] \Delta t \quad (2-54)$$

由式 (2-54) 可知，由于温度变化引起的附加电阻变化带来了附加应变变化，从而给测量带来误差。这个误差除了与环境温度变化有关外，还与应变片本身的性能参数 (K, α, β_s) 以及试件的线膨胀系数 β_g 有关。

当然，温度对应变片特性的影响，不只上述两个因素，例如还将会影响黏合剂传递变形

的能力等。但在常温下，上述两个因素是造成应变片温度误差的主要原因。

2.5.2 温度误差补偿方法

温度补偿就是消除温度对测量应变的干扰。常采用自补偿法和桥路补偿法。

1. 自补偿法

粘贴在被测部位上的是一种特殊的应变片，当温度变化时，产生的附加应变为零或相互抵消，这种特殊应变片称为温度自补偿应变片。利用温度自补偿应变片来实现温度补偿的方法称为温度自补偿法。

(1) 单丝自补偿应变片 由式 (2-54) 可知，要实现温度自补偿的条件就是热输出 $\varepsilon_t = 0$ ，只要满足条件

$$\alpha = -K(\beta_g - \beta_s) \quad (2-55)$$

在研制和选用应变片时，若选择敏感栅的合金材料，其 α 、 β_g 能与试件材料的 β_s 相匹配，即满足式 (2-55)，就能达到温度自补偿的目的。这种自补偿应变片的最大优点是结构简单，制造和使用方便。缺点是只适用于特定的试件材料，温度补偿范围也较窄。

(2) 双丝自补偿应变片 这种应变片的敏感栅是由两种电阻温度系数不同的合金丝串接而成，如图2-13所示。应变片电阻 R 由两部分电阻 R_a 和 R_b 组成，即 $R = R_a + R_b$ 。当工作温度变化时，若 R_a 栅产生正的热输出 ε_{at} 与 R_b 栅产生负的热输出 ε_{bt} 能大小相等或相近，就可达到自补偿的目的。

2. 桥路补偿法

桥路补偿法是利用电桥的和、差原理来达到补偿的目的。

(1) 双丝半桥式 这种应变片的结构与双丝自补偿应变片相近。不同的是，敏感栅是由同符号电阻温度系数的两种合金丝串接而成，而且栅的两部分电阻 R_1 和 R_2 分别接入电桥的相邻两臂上。工作栅 R_1 接入电桥

工作臂，补偿栅 R_2 外接串接电阻 R_B （不敏感温度影响）后接入电桥补偿臂；另两臂照例接入平衡电阻 R_3 和 R_4 ，如图2-14所示。当温度变化时，只要电桥工作臂和补偿臂的热输出相等或相近，就能达到热补偿目的，即

$$\varepsilon_{1t} = \frac{\Delta R_{1t}}{K R_1} \approx \frac{\Delta R_{2t}}{K(R_2 + R_B)} = \varepsilon_{2t} \frac{R_2}{R_2 + R_B} \quad (2-56)$$

而外接补偿电阻为

$$R_B \approx R_2 \left[\frac{\varepsilon_{2t}}{\varepsilon_{1t}} - 1 \right] \quad (2-57)$$

式中 ε_{1t} 、 ε_{2t} ——分别为工作栅和补偿栅的热输出。

双丝半桥式热补偿法的最大优点是通过调整 R_B 值，不仅可使热补偿达到最佳状态，而且还适用于不同线膨胀系数的试件。缺点是对 R_B 的精度要求高，而且当有应变时，补偿栅同样起着抵消工作栅有效应变的作用，使应变片输出灵敏度降低。为此应变片必须使用 ρ

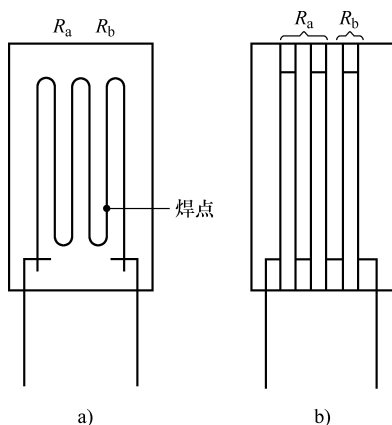


图 2-13 双丝自补偿应变片

a) 丝绕式 b) 短接式

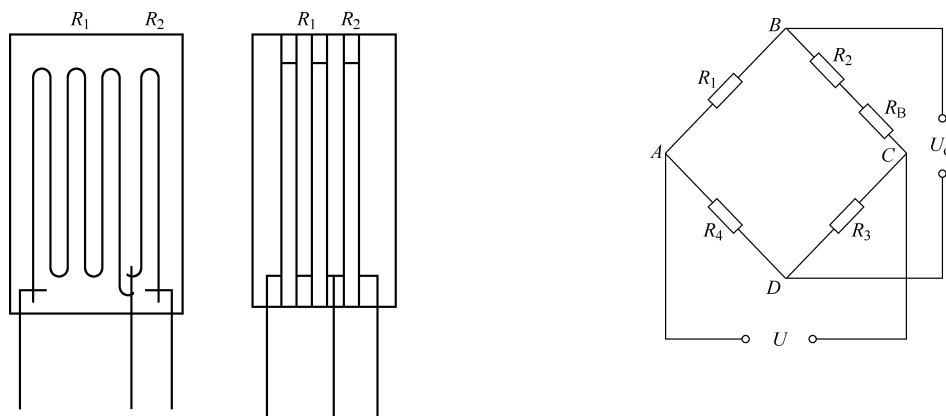


图 2-14 双丝半桥式热补偿应变片

大、 α_t 小的材料做工作栅，选 ρ 小、 α_t 大的材料做补偿栅。

(2) 补偿块法 这种方法是用两个参数相同的应变片 R_1 、 R_2 ， R_1 贴在试件上，接入电桥工作臂， R_2 贴在与试件同材料、同环境温度，但不参与机械应变的补偿块上，接入电桥相邻臂作补偿臂（ R_3 、 R_4 同样为平衡电阻），如图 2-15 所示。这样，补偿臂产生与工作臂相同的热输出，通过差动电桥，起了补偿作用。这种方法简便，但补偿块的设置受到现场环境条件的限制。

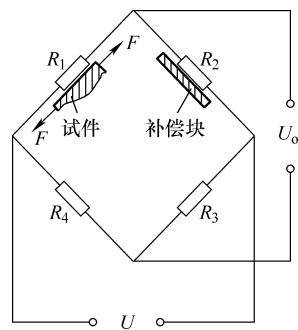


图 2-15 补偿块半桥热补偿应变片

(3) 差动电桥补偿 巧妙地安装应变片并接入差动电桥就可以实现温度补偿。如图 2-16 所示，测量悬梁的弯曲应变时，将两个应变片分别贴于上下两面对称位置， R_1 与 R_B 特性相同，所以两电阻变化值相同而符号相反。将 R_1 与 R_B 按图 2-15 接入电桥 R_1 和 R_2 的位置，因而电桥输出电压比单片时增加 1 倍。当梁上下温度一致时， R_B 与 R_1 可起温度补偿作用。

这种方法简单可行，使用普通应变片可对各种试件在较大范围内进行补偿，因而最为常用。

(4) 热敏电阻补偿 如图 2-17 所示，负温度系数的热敏电阻 R_t 与应变片处在相同的温度下，当温度升高时，应变片的温度误差使电桥输出电压下降，此时热敏电阻 R_t 的阻值下降，

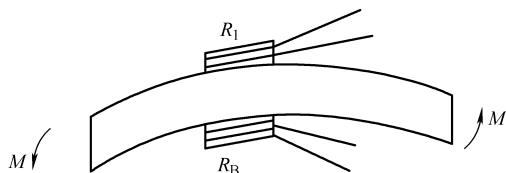


图 2-16 差动电桥补偿法

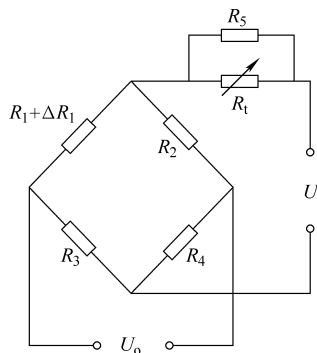


图 2-17 热敏电阻补偿电路

使电桥的输入电压随温度升高增加，从而提高电桥的输出电压。选择分流电阻 R_5 的值，可以使应变片灵敏度下降对电桥输出的影响得到很好的补偿。

2.6 应变片的选用与粘贴

2.6.1 应变片的类型

常见的金属应变片有下列几种。

1. 金属丝式应变片

金属丝式应变片是将金属丝弯曲后用黏合剂贴在衬底上，按使用基片材质又可以分为纸基、纸浸胶基和用黏结剂和有机树脂薄膜制成的胶基。

纸基应变片制造简单、价格便宜、易于粘贴，但耐热性和耐潮湿性不好，一般多在短期的室内实验使用。若在其他恶劣环境中使用，应采取有效的防护措施。使用温度一般在 70°C 以下。如用酚醛树脂、聚酯树脂等胶将纸进行渗透、硬化等处理后，可使纸基应变片的特性得到改善，使用温度可提高到 180°C ，抗潮湿性也得到了提高，可以长期使用。但粘贴时应注意将应变片粘贴牢固，防止翘曲。

胶基应变片是用环氧树脂、酚醛树脂或聚酯树脂等有机聚合物的薄片直接制成，其耐湿性和绝缘性能较好，弹性系数高，使用温度范围为 $-50 \sim 170^{\circ}\text{C}$ 。长时间使用的测量仪表多用此种基底的应变片。

电阻丝两端焊有引出线，使用时只要将应变片贴于弹性体上就可构成应变式传感器。它结构简单，价格低，强度高，但允许通过的电流较小，测量精度较低，适用于测量要求不高的场合使用。

电阻丝是电阻应变片受力后引起电阻值变化的关键部件，它是一根具有很高电阻率的金属细丝，直径约为 $0.01 \sim 0.05\text{mm}$ 。由于电阻丝很细，故要求电阻丝材料具有温度系数小、温度稳定性良好、电阻率大等特性。同时，金属电阻丝的相对灵敏系数要大，且能在相当大的应变范围内保持常数。金属丝式应变片有回线式和短接式二种，如图 2-18 所示。但回线式最为常用，制作简单，性能稳定，成本低，易粘贴，但其应变横向效应较大。短接式应变片两端用直径比栅线直径大 $5 \sim 10$ 倍的镀银丝短接。优点是克服了横向效应，但制造工艺复杂。常用的电阻丝材料有铜镍（康铜）合金、镍铬合金、铂、铂铬合金、铂钨合金、卡玛丝等。

2. 金属箔式应变片

箔式应变片的工作原理和结构与丝式应变片基本相同，但制作方法不同。它是利用照相制版或光刻技术代替丝式应变片的绕线工艺。在厚约 $0.003 \sim 0.01\text{mm}$ 的金属箔底面上涂绝缘层作为应变片的基底。然后在箔片表面涂上一层感光胶剂，经过照相制版后，印晒到箔片表面的感光胶剂上，再经过腐蚀等工艺，制成所需图形的敏感栅，也称为应变花。其结构如图 2-19 所示。

箔式应变片与丝式应变片相比有如下优点：

1) 可制成多种复杂形状尺寸准确的敏感栅，最小可做到 0.2mm ，以适应不同的测量要求。

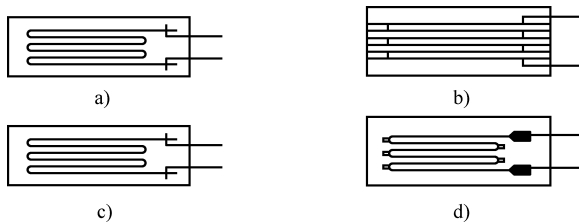


图 2-18 金属丝式应变片

a)、c) 回线式 b)、d) 短接式

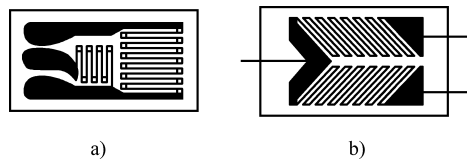


图 2-19 金属箔式应变片

- 2) 与被测件粘贴接触面积大。
- 3) 散热条件好, 允许电流大, 提高了输出灵敏度。
- 4) 横向效应小。
- 5) 蠕变和机械滞后小, 疲劳寿命长。
- 6) 生产效率高, 便于生产工艺自动化。

缺点: 电阻值的分散性比金属丝的大, 有的相差几十欧姆, 需做阻值调整 (可做激光修阻)。在常温下, 金属箔式应变片已逐步取代了金属丝式应变片。

3. 金属薄膜应变片

金属薄膜应变片是薄膜技术发展的产物。采用真空蒸发或真空沉积等镀膜技术在薄的绝缘基片上形成厚度在 $0.1\mu\text{m}$ 以下的金属电阻材料薄膜的敏感栅, 最后再加上保护层。它灵敏度系数高, 易于实现工业化; 特别是它可以直接制作在弹性敏感元件上, 形成测量元件或传感器。由于这种方法免去了应变片的粘贴工艺过程, 因此具有一定优势。

2.6.2 应变片的选用

现代应变片已发展成为一个很大的品种系列, 尺寸长的有几百毫米, 短的仅 0.1mm ; 形式上有丝式应变片、箔式应变片等; 使用环境条件有高温、低温、水下、高压、辐射、强磁场等。美国维希公司仅箔式片一项, 即有四万余种, 可见面对种类繁多的应变片, 如何选用是一个重要问题。

所有应变片中, 金属丝式应变片属于最基本的传统结构。在我国由于箔式片原材料和工艺等问题, 目前金属丝式应变片 (尤其是高温和低温片) 还占比较重要的地位。箔式应变片因其特有的优点, 应用日益增多。在有些国家箔式应变片几乎全部取代金属丝式应变片, 是应变式传感器用片的主要品种。薄膜片是目前高精度传感器中很有发展前途的新型电阻应变片, 这种片的优点是阻值比箔式高, 形状和尺寸也比箔式片更小、更准确; 没有箔式应变片由于腐蚀引入的疵病; 制成的结构导热良好, 对于较宽的工作温度范围也可达到较完善的补偿; 尤其突出的是, 陶瓷绝缘代替了胶接, 既避免了复杂的分选和粘贴, 又避免了由胶接所引入的漂移及疲劳等, 制成的传感器可以达到较高的水平。应变片的各项指标是按规在较大应变 ($1000 \sim 3000\mu\epsilon$) 下给出的, 而在实际使用时, 应变较小, 往往无法直接引用。所以选择应变片时, 必须注意传感器的特点, 否则即使等级很高的应变片, 完全有可能得不到性能优良的传感器。

一般情况下, 选用应变片应根据试件的材质、受力状态、工作环境条件、测量精度要求等因素, 权衡后而定。试件的材质主要应考虑材料的弹性模量, 材质的均匀程度等。对于弹性模量高的均质材料, 可选小标距应变片; 对弹性模量低或试件较薄的材料, 由于应变片端

部附近产生应力集中（即加强效应），应考虑其对测试精度的影响；对材质不均的材料，宜选用大标距的应变片。工作环境条件主要是考虑温度、湿度、压力、电磁场、核辐射、腐蚀等的影响。例如：潮湿环境可选用酚醛树脂或聚酰亚胺胶基应变片；核辐射环境中应选用聚酰亚胺或无机粘结剂及康铜或镍铬合金制成的应变片；强磁场下应选用镍铬合金或铂钨合金制成的应变片。试件的应变状态，主要考虑应变梯度的大小，以及应变性质（静态应变还是动态应变）等，使所测得的平均应变尽可能反映测点的实际应变。应变梯度大的应变场中，应尽量选用小标距应变片，同时要考虑小标距应变片受横向效应影响，而进行适当补偿或修正。大应变测量时应选用应变极限高的应变片或大应变片；微小应变，应选灵敏度高的应变片；动态应变测量一般都选频响高的应变片。从保证测试精度来看选用康铜、卡玛等材料制成的箔式片为宜；考虑价格低廉，粘贴方便，纸基应变片也可使用。应变片电阻值选择通常为 120Ω ，以便与目前生产出的仪器相配合；动态测量时，为提高输出信号，阻值也可选得较大，可根据具体需要在阻值系列中灵活选用。应变片灵敏系数通常选 $K=2$ 的，以便与仪器配合；当然为得到大的输出，也可选用灵敏系数大的应变片。

2.6.3 应变片的粘贴

应变片是用黏结剂粘贴到被测件上的。黏结剂形成的胶层必须迅速地将被测件的应变传递到敏感栅上。黏结剂的性能及粘贴工艺的质量直接影响着应变片的工作特性，如零漂、蠕变、滞后、灵敏系数等。可见选择黏结剂和正确的黏结工艺与应变片的测量精度有着极其重要的关系。

1. 黏结剂材料的选择

黏结剂的主要功能是要在切向准确传递试件的应变。因此，黏结剂材料应具有以下特点：

- 1) 黏结强度好，固化内应力小（固化收缩小且膨胀系数要与试件的相接近等）。
- 2) 机械强度好，挠性好，即抗剪弹性模量要大，一般抗剪强度应大于 $9.8 \times 10^6 \text{Pa}$ 。
- 3) 良好的电绝缘性。
- 4) 耐老化性好，耐湿、耐油、耐老化、动态应力测量时耐疲劳性好等。
- 5) 弹性模量大，蠕变、滞后小，温度和力学性能参数要尽量与试件匹配。
- 6) 对被黏结的材料不起腐蚀作用。
- 7) 对使用者没有毒害或毒害很小。
- 8) 有较大的使用温度范围。

一般情况下，粘贴与制作应变片的黏结剂是可以通用的。但是，粘贴应变片时受到现场加温、加压条件的限制，在实际应用中很难找到一种黏结剂能同时满足上述全部要求。所以，在选用时要根据基片材料、工作温度、潮湿程度、稳定性、是否加温加压、粘贴时间等因素合理选择黏结剂。通常在室温工作的应变片多采用常温、常压固化条件的黏结剂；非金属基应变片若用在高温工作时，可将其先粘贴在金属基底上，然后再焊接在试件上。

常用的黏结剂类型有硝化纤维素型、氰基丙烯酸型、聚酯树脂型、环氧树脂类和酚醛树脂类等。

2. 应变片的粘贴

粘贴工艺包括被测件粘贴表面处理（研磨和清洗）、贴片位置的确定、贴片、干燥固

化、贴片质量检查、引线的焊接与固定，以及防护与屏蔽等。

应变片的粘贴工艺步骤为：

1) 应变片的检查与选择。首先要对采用的应变片进行外观检查，观察应变片的敏感栅是否整齐、均匀，是否有锈斑以及短路和折弯等现象。其次要对选用的应变片的阻值进行测量，阻值选取合适将对传感器的平衡调整带来方便。

2) 试件的表面处理。为了获得良好的粘合强度，必须对试件表面进行处理，清除试件表面杂质、油污及疏松层等。一般的处理办法可采用砂纸打磨，较好的处理方法是采用无油喷砂法，这样不但能得到比抛光更大的表面积，而且可以获得质量均匀的结果。为了表面的清洁，可用化学清洗剂如氯化碳、丙酮、甲苯等进行反复清洗，也可采用超声波清洗。值得注意的是，为避免氧化，应变片的粘贴应尽快进行。如果不立刻贴片，可涂上一层凡士林暂作保护。

3) 底层处理。为了保证应变片能牢固地贴在试件上，并具有足够的绝缘电阻，改善胶接性能，可在粘贴位置涂上一层底胶。

4) 贴片。将应变片底面用清洁剂清洗干净，然后在试件表面和应变片底面各涂上一层薄而均匀的黏结剂。待稍干后，将应变片对准划线位置迅速贴上，然后盖一层玻璃纸，用手指或胶辊加压，挤出气泡及多余的胶水，保证胶层尽可能薄而均匀。

5) 固化。黏结剂的固化是否完全，直接影响到胶的物理机械性能。关键是要掌握好温度、时间和循环周期。无论是自然干燥还是加热固化都要严格按照工艺规范进行。为了防止强度降低、绝缘破坏以及电化腐蚀，在固化后的应变片上应涂上防潮保护层，防潮层一般可采用稀释的粘合胶。

6) 粘贴质量检查。首先是从外观上检查粘贴位置是否正确，粘合层是否有气泡、漏粘、破损等。然后测量应变片敏感栅是否有断路或短路现象，测量敏感栅的绝缘电阻以及线和试件之间的绝缘电阻。一般情况下，绝缘电阻为 $50\text{M}\Omega$ 即可，有些高精度测量，则需要 $200\text{M}\Omega$ 以上。

7) 引线焊接与组桥连线。检查合格后既可焊接引出导线，引线应适当加以固定。应变片之间通过粗细合适的漆包线连接组成桥路。连接长度应尽量一致，且不宜过多。

8) 防护和屏蔽。为了保证应变片工作的长期稳定性，应采取防潮、防水等措施，如在应变片及其引出线上涂以石蜡、石蜡松香混合剂、环氧树脂、有机硅、清漆等保护层。

2.7 电阻应变式传感器的应用

电阻应变式传感器主要有各种力传感器、压力传感器、加速度传感器及各种应变测量仪等。电阻应变式传感器的应用可概括为两个方面：①直接用来测定结构的应变或应力。例如，为了研究机械、桥梁、建筑等某些构件在工作状态下的受力、变形情况，可利用不同形状的应变片，粘贴在构件的预定部位，测得构件的拉、压应力及扭矩、弯矩等，为结构设计、应力校核或构件破坏的预测等提供可靠的实验数据；②将应变片粘贴于弹性元件上，作为测量力、位移、压力、加速度等物理参数的传感器。在这种情况下，通过弹性元件得到与被测量成正比的应变，再由应变片转换为电阻的变化。在运用电阻应变式传感器时，应注意

到一些问题,例如机械滞后、零漂、绝缘电阻等。出现这些问题的原因往往与应变片的粘贴工艺有关,如黏结剂的选择、应变片的保护、弹性体的表面加工与清洗等。此外,由于应变片电阻的温度敏感性,当周围环境温度变化或自身工作电流的影响,均会由于温升导致阻值变化,带来测量误差,在这种情况下还需进行温度补偿。电阻应变片已是一种使用方便、适应性强、比较完备的器件,具有广阔应用前景。

2.7.1 应变式传感器的种类

1. 应变式测力传感器

力传感器是试验技术和工业测量中用的较多的一种传感器,其中又以采用应变片的应变式力传感器为最多,传感器量程从 $0.1 \sim 10^7 \text{ N}$ 。测力传感器主要作为各种电子秤和材料试验机的测力元件,或用于飞机和航空发动机的地面测试等,按照弹性元件结构型式(如柱形、筒形、环形、梁式、轮辐式等)和受力性质(如拉、压、弯曲和剪切等)分为许多种类型。

应变式传感器中使用四个相同的应变片。当被测力变化时,其中两个应变片感受拉伸应变,电阻增大,另外两个应变片感受压缩应变,电阻减小。通过四臂电桥将电阻转换为电压的变化。这样将获得最大的灵敏度,同时具有良好的线性度及温度补偿性能。

2. 应变式压力传感器

压力传感器主要用来测量流体的压力,视其弹性体的结构形式有单一式和组合式之分。单一式是指应变片直接粘贴在受压弹性膜片或筒上。膜片式应变压力传感器的结构、应力分布及布片,与固态压阻式传感器相似。

组合式压力传感器则由受压弹性元件(膜片、膜盒或波纹管)和应变弹性元件(如各种梁)组合而成。前者承受压力,后者粘贴应变片。两者之间通过传力件传递压力作用。这种结构的优点是受压弹性元件能对流体高温、腐蚀等影响起到隔离作用,使传感器具有良好的工作环境。

3. 应变式位移传感器

应变式位移传感器是把被测位移量转变成弹性元件的变形和应变,然后通过应变片应变电桥,输出正比于被测位移的电量。它可用来测量静态与动态的位移量。因此,既要求弹性元件刚度小,对被测对象的影响反力小,又要求系统的固有频率高,动态频响特性好。按弹性元件结构形式的不同,应变式位移传感器可分为弹簧组合式、梁式、弓形等几类。

4. 其他应变式传感器

利用应变片除可构成上述几种主要传感器外,还可构成其他应变式传感器。如通过弹性元件和应变片,可构成应变式扭矩传感器等。应变式传感器结构与设计的关键是弹性体型式的选择与计算、应变片的合理布片与接桥。

2.7.2 应变式传感器的应用

1. 手提电子秤

手提式电子秤,成本低,称重精度高,携带方便,适于购物时用。手提式电子秤采用准S形双孔弹性体,如图2-20所示,重力 P 作用在中心线上。弹性体双孔位置贴四片箔式电阻应变片。双孔弹性体可简化为在一线受一力偶 M ,其大小与 P 及双孔弹性体长度有关。

测量电路主要由测量电桥、差动放大电路、A/D转换及显示电路等组成。这里主要介绍测量电桥电路:电阻应变片组成全桥测量电路。当传感器的弹性元件受到被称重物的重力

作用时引起弹性体的变形,使得粘贴在弹性体上的电阻应变片 $R_1 \sim R_4$ 的阻值发生变化。不加载荷时电桥处于平衡,加载时,电桥将产生输出。选择 $R_1 \sim R_4$ 为特性相同的应变片,其输出为

$$U_o = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

由于 R_1 、 R_3 受拉, R_2 、 R_4 受压,故 $\Delta R_1 \Delta R_3$ 为正值, $\Delta R_2 \Delta R_4$ 为负值,又由于四个应变片的特性相同,故电桥的输出为

$$U_o = 4 \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R} = UK_u$$

输出的电压 U_o 经过差动放大电路、A/D 转换及显示电路后,最终将测量结果显示出来。

2. 筒形结构的称重传感器

筒形结构称重传感器的弹性元件设计成图 2-21a 所示的筒形结构,4 片应变片采用差动布片和全桥连线,如图 2-21b 所示。这种布片和接桥的最大优点是可排除载荷偏心或侧向力引起的干扰。

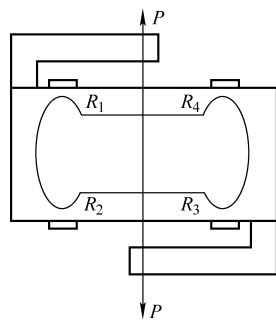


图 2-20 准 S 形称重传感器

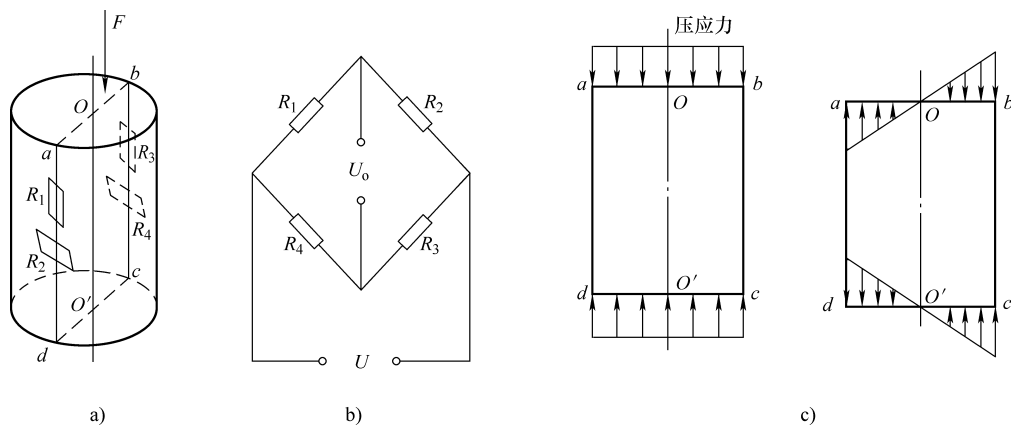


图 2-21 筒形结构称重传感器接桥

a) 布片 b) 接桥 c) 受力分析

假设筒形结构的弹性元件受偏心力 F 的作用,这时产生的应力可分为压应力和弯应力,受力分析如图 2-21c 所示。各应变片感受的应变 ε_i 为相应的压应变 ε_{Fi} 与弯应变 ε_{Mi} 的代数和,即

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{Mi} + \varepsilon_{Fi}$$

则传感器的输出为

$$\begin{aligned} U_o &= \frac{U}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \\ &= \frac{U}{4} K [(\varepsilon_{F1} - \varepsilon_{M1}) + u(\varepsilon_{F2} - \varepsilon_{M2}) + (\varepsilon_{F3} + \varepsilon_{M3}) + u(\varepsilon_{F4} + \varepsilon_{M4})] \end{aligned}$$

因

$$\begin{cases} \varepsilon_{F1} = \varepsilon_{F2} = \varepsilon_{F3} = \varepsilon_{F4} = \varepsilon_F \\ \varepsilon_{M1} = \varepsilon_{M2} = \varepsilon_{M3} = \varepsilon_{M4} = \varepsilon_M \end{cases}$$

所以

$$\Delta U_o = \frac{U}{4} K [2(1+u) \varepsilon_F]$$

可见，偏心力的干扰被消除了。

2.8 压阻式传感器

固体受到作用力后，电阻率就要发生变化，这种效应称为压阻效应。半导体材料的这种效应特别强。压阻式传感器的灵敏系数大，分辨力高，频率响应高，体积小。它主要用于测量压力、加速度和载荷等参数。

2.8.1 压阻式传感器工作原理

根据式 (2-6) 有

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2-58)$$

对于半导体材料，式中的 $\Delta \rho / \rho$ 项相对于前两项很大，电阻的变化主要由其决定。所以式 (2-58) 可写为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2-59)$$

半导体材料的电阻率相对变化 $\Delta \rho / \rho$ ，与条形半导体材料纵向所受的应力 σ 之比为一常数，即

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma = \pi E \varepsilon \quad (2-60)$$

式中 π ——沿某晶向的压阻系数；

ε ——应变；

E ——半导体材料的弹性模量。

如半导体硅材料， $\pi = (40 \sim 80) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ， $E = 1.67 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，则 $\Delta \rho / \rho = 50 \sim 100$ 。

半导体电阻材料有结晶的硅和锗，掺入杂质形成 P 型和 N 型半导体。其压阻效应是因在外力作用下，原子点阵排列发生变化，导致载流子迁移率及浓度发生变化。由于半导体（如单晶硅）是各向异性材料，因此它的压阻系数不仅与掺杂浓度、温度和材料类型有关，而且还与晶向有关。

2.8.2 压阻式传感器的结构

压阻式传感器分为两种类型：一种是利用半导体材料的体电阻制成的粘贴式半导体电阻应变片，称为体型半导体电阻应变片；另一种是在半导体材料的基片上用集成电路工艺制成扩散电阻，称为扩散型压阻传感器。

1. 体型半导体电阻应变片

体型半导体电阻应变片是从单晶硅或锗上切下薄片制成敏感栅，粘贴在基底上并安装外引线，制成应变片，结构形式如图 2-22 所示。敏感栅的形状可制成直条形、U 形或 W 形。

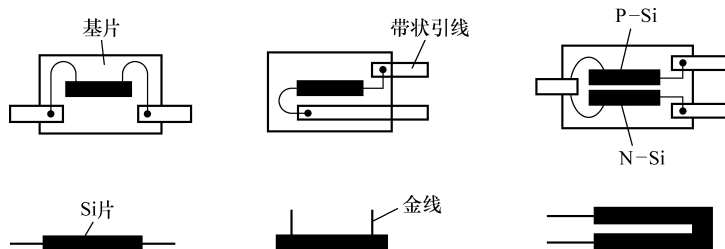


图 2-22 体型半导体应变片的结构形式

2. 扩散型压阻式传感器

为了克服半导体应变片粘贴造成的缺点, 采用 N 型单晶硅作为传感器的弹性元件, 在它上面直接蒸镀半导体电阻应变薄膜, 制成扩散型压阻式传感器。图 2-23 所示为扩散型压阻式压力传感器结构示意图。它是由外壳、硅杯和引线等组成, 其核心部分是一块圆形的硅膜片。通常将膜片制作在硅杯上, 形成一体结构, 以减小膜片与基座连接所带来的性能变化。在膜片上利用集成电路工艺方法扩散上四个阻值相等的电阻。用导线将其构成平衡电桥。膜片的两边有两个压力腔, 一个是与被测系统相连的高压腔, 另一个是低压腔, 一般与大气相通。当膜片两边存在压力差时, 膜片上各点就有压力。四个扩散电阻的阻值发生变化使电桥失去平衡, 电桥输出的电压和膜片两边的压力差成正比。

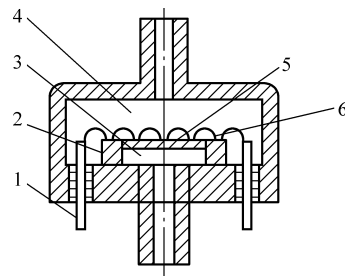


图 2-23 压阻式压力传感器结构示意图

1—引线 2—硅环 3—高压腔

4—低压腔 5—硅膜片 6—扩散电阻

2.8.3 压阻式传感器的测量电路

压阻式传感器利用半导体平面集成电路工艺, 通过光刻、扩散等技术, 在硅膜片上制作了 n 组半导体应变电阻 (每组四个等值电阻), 并从中筛选出一组构成惠斯登平衡电桥。测量电路一般都采用四臂差动等臂等应变全桥检测电路, 供电方式可以分为恒压源和恒流源两种形式, 如图 2-24 所示。假设四个扩散电阻的初始电值都为 R , 当受到应力作用时, 有两个电阻受拉, 电阻值增加 ΔR , 而另两个电阻受压, 电阻值减小 ΔR ; ΔR_T 为温度变化引起的阻值变化值。

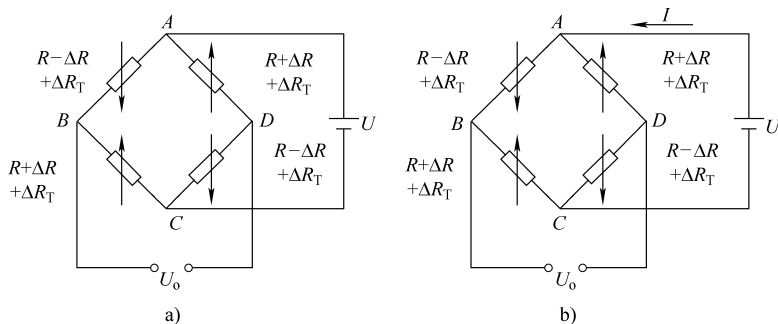


图 2-24 压阻传感器的测量电路

a) 恒压源供电电桥 b) 恒流源供电电桥

当用恒流源供电时, 假设电桥两个支路的电阻相等, 即 $R_{ABC} = R_{ADC} = 2(R + \Delta R_T)$, 所以流过两支路的电流相等, $I_{ABC} = I_{ADC} = I/2$ 。电桥的输出为

$$U_o = U_{BD} = \frac{I}{2}(R + \Delta R + \Delta R_T) - \frac{I}{2}(R - \Delta R + \Delta R_T) = I\Delta R \quad (2-61)$$

由式 (2-61) 可见, 电桥的输出与电阻的变化量成正比, 即与被测量成正比; 也与供电电源的电流成正比, 即输出与恒流源供给的电流大小、精度有关。但是, 电桥的输出与温度的变化无关, 这是恒流源供电的优点。用恒流源供电时, 一个传感器最好独立配备电源。

2.8.4 压阻式传感器的温度误差及补偿

压阻式传感器和金属应变片一样, 温度变化也会引起电阻值和灵敏系数变化, 进而引起零点漂移和灵敏度漂移。

1. 零点漂移的温度补偿

压阻式传感器一般扩散四个电阻, 并接入电桥。当四个扩散电阻阻值相等或相差不大, 温度系数也一样, 则电桥零漂和灵敏度漂移会很小, 但工艺上很难实现。

零点温度漂移是由于四个扩散电阻值及它们的温度系数不一致造成的。一般可用串、并联电阻的方法进行补偿。如图 2-25 所示, 串联电阻 R_S 起调零作用, 并联电阻 R 则主要起温度补偿作用, R 是负温度系数电阻, 也可在 R_4 上并联正温度系数电阻。 R_S 、 R 的阻值和温度系数必须合适, 要根据四臂电桥在低温和高温下实测电阻值计算出来, 才能取得较好的补偿效果。

2. 灵敏度温度漂移的补偿

传感器的灵敏度温度漂移是由于压阻系数随温度变化引起的, 压阻系数的温度系数为负值。在

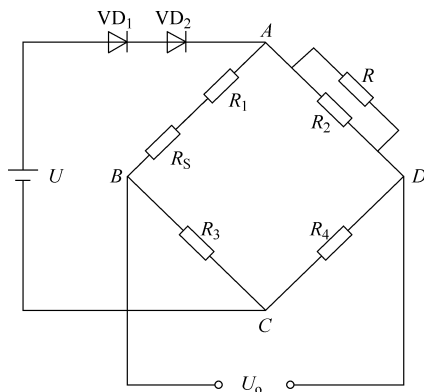


图 2-25 温度误差补偿

图 2-25 中电桥的电源回路中串联二极管 VD_1 和 VD_2 可以补偿灵敏度温度漂移, 因为二极管的 PN 结压降为负温度特性, 温度每升高 1°C , 正向压降减小 $1.9 \sim 2.4\text{mV}$ 。若电源采用恒流源, 电桥电压随温度升高而提高, 可以补偿灵敏度的下降。串联二极管的个数依实测结果而定。

2.8.5 压阻式传感器的应用

压阻式传感器具有许多优点, 它的频率响应高, 固有振动频率可达 1.5MHz ; 体积小, 重量轻, 传感器外径可做到 0.8mm , 目前最小可达 0.25mm , 可做成微型传感器。灵敏度高, 比金属应变片高出几十倍; 没有运动组件, 所以工作可靠、耐振、耐冲击、耐腐蚀、抗干扰力强, 可工作在较恶劣的环境之中; 由于压阻式传感器的独特优点, 它在航天航空、航海、石油、化工、生物、医学工程、气象、地震等许多领域获得了广泛应用。

1. X 形硅压力传感器

在硅片上采用扩散或离子注入法制成的硅压阻式压力传感器, 由于四个桥臂不匹配将产生测量误差, 且零点偏移较大, 不易调整。X 形硅压力传感器是利用离子注入工艺, 将单个 X 形压敏电阻元件制作在硅膜上, 并采用了激光修正技术与温度补偿技术, 使 X 形硅压力

传感器的精度达到较高水平，具有极好的线性度，且灵敏度高，长期重复性好。

X 形硅压力传感器的结构如图 2-26 所示，其敏感元件是边缘固定的方形硅膜片，压力均匀垂直作用于膜片上。一只 X 形压敏电阻器被置于硅膜边缘，感受由压力产生的剪切力。其中，1 脚接地，3 脚加电源电压，激励电流流过 3 脚和 1 脚。加在硅膜上的压力与电流方向垂直，该压力在电阻器上建立了一个横向电场，该电场穿过电阻器中点，所产生的电压差由 2 脚和 4 脚引出。X 形硅压力传感器的符号如图 2-27 所示。

这种传感器结构简单，其模拟输出电压正比于输入的压力值和电源偏置电压，使用单个的 X 形电阻器作应变仪不仅避免了构成电桥的电阻由于不匹配产生的误差，而且简化了进行校准和温度补偿所需的外接电路。

2. 微型生物体内压力传感器

压阻式压力传感器由于尺寸小，可靠性高而成为生物学上的理想传感器。图 2-28 所示为一种微型生物体内压力传感器结构示意图。在厚度仅为 $10\mu\text{m}$ ，外径为 0.5mm 的硅膜片制成的压阻式压力传感器可装入一支注射针管中插入生物体内，做体内压力测试。

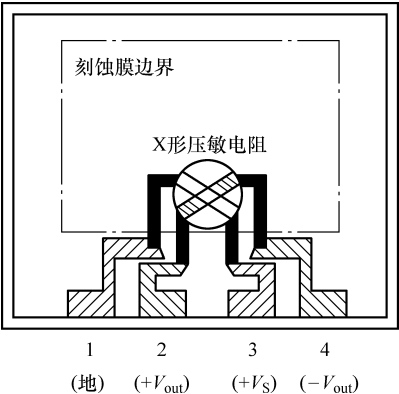


图 2-26 X 形硅压力传感器的结构

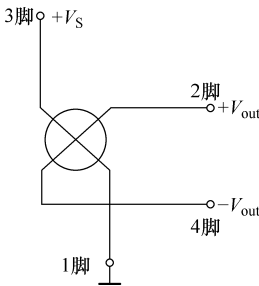


图 2-27 X 形硅压力传感器的符号

图 2-29 所示是一种能插入人心内导管中的压力传感器，该类型传感器可测量心血管、颅内、尿道、子宫和眼球内的压力。目前已研制出脑压传感器、脉搏传感器、食道、尿道压力传感器、肾脏内血液压力传感器等。

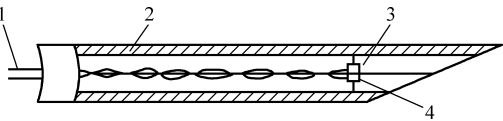


图 2-28 注射型压阻式压力传感器
1—引线 2—25 号注射针 3—硅膜片 4—绝缘材料

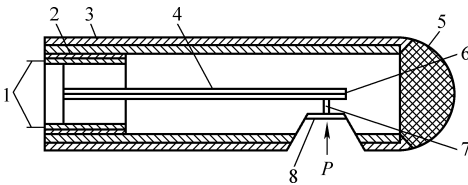


图 2-29 心内导管中的压阻式压力传感器
1—引出线 2—硅橡胶导管 3—圆柱形金属外壳
4—硅梁 5—塑料囊 6—金属插片
7—推杆 8—金属波纹膜片

3. 压阻式加速度传感器

压阻式加速度传感器采用单晶硅作悬臂梁，在其近根部扩散四个电阻，构成测量电桥，

在悬臂梁的自由端装有惯性质量块,如图 2-30 所示。传感器采用玻璃-硅-玻璃三层结构,中间的硅层是传感器核心部件,它是一片很薄的硅片悬臂梁,四周围绕着厚度约 $200\mu\text{m}$ 的凸缘边框,边框刚性地支撑着悬臂。上下两片玻璃的安装面平行于悬臂梁表面,每片上都刻蚀出凹坑,以形成悬臂梁和惯性质量运动所需要的空间。惯性质量可以是高密度的物质如金等,也可以是硅梁本身。

当传感器受到垂直于悬臂梁表面方向的加速度作用时,质量块的惯性力作用在梁上,产生弯矩和应力,使四个扩散电阻的阻值发生变化。由于应力与加速度成正比,所以电阻相对变化与加速度成正比。由四个电阻组成的电桥将产生与加速度成正比例电压输出。在设计时,恰当地选择传感器尺寸及阻尼系数,则可用来测量低频加速度与直线加速度。

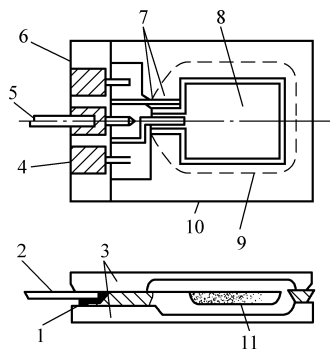


图 2-30 压阻式微加速度传感器结构示意图

1—导电树脂 2、5—引线 3、6—玻璃 4—焊点
7—电阻 8—硅梁和惯性质量块
9—玻璃板上腐蚀的空腔 10—硅 11—质量块

2.9 电位器式传感器

电位器式传感器也称为变阻器式传感器,它把机械位移转换为与之成一定函数关系的电阻变化,可制成位移、压力、加速度传感器等。电位器式传感器结构简单,价格低廉,性能稳定,输出信号大,对环境要求不高,容易实现函数关系的变换,因此应用广泛。其主要缺点是精度不够高,动态响应较差,不适合测量快速变化量。

电位器式传感器的种类很多,按其特性函数可分为线性电位器和非线性电位器;按其结构形式可分为线绕式、薄膜式和光电式电位器等;线绕式又可分为单圈和多圈两种,目前常用的是单圈线绕式电位器。

2.9.1 线绕式电位器

1. 线绕式电位器的工作原理

线绕式电位器是按分压器线路连接的变阻器,它由绕于骨架上的电阻丝和沿着电阻器移动的电刷构成,如图 2-31 所示。按照电阻丝的结构形式,它可以分为直线位移型、角位移型、螺旋形和非线性几种类型。

当电源电压 U 确定后,由于电刷沿着电阻器移动 x ,输出电压 U_o 就产生相应变化, U_o 为 x 的函数。

对于直线位移型,输出电压为

$$U_o = \frac{U}{R_{\max}} x = k_u x \quad (2-62)$$

即输出电压和线位移 x 成正比。

而对于角位移型,输出电压为

$$U_o = \frac{U}{R_{\max}} \alpha = k_u \alpha \quad (2-63)$$

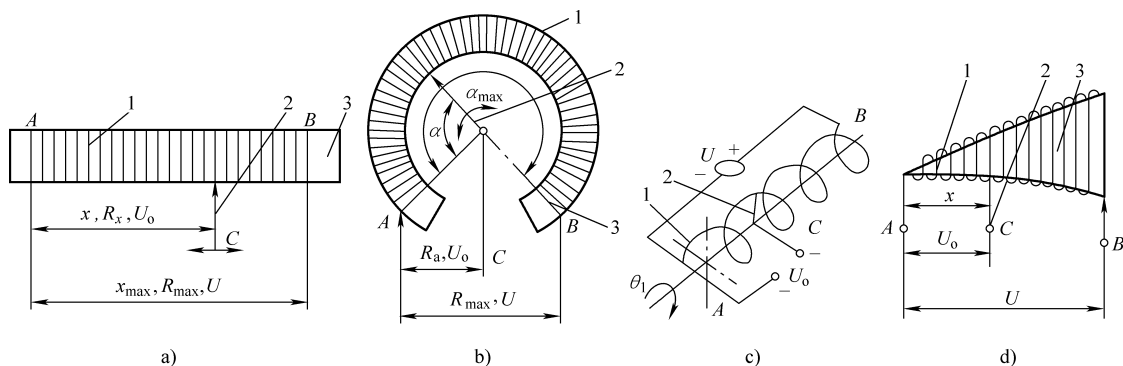


图 2-31 电位计式电阻传感器的结构形式

a) 直线位移型 b) 角位移型 c) 螺旋形 d) 非线性型

1—电阻丝 2—电刷 3—骨架

即输出电压和角位移 α 成正比。

2. 线绕式电位器的主要特性

(1) 阶梯特性及阶梯误差 从理论上讲, 电位器的特性曲线是位移 x 的连续函数。但对线绕式电位器而言, 电刷的直线位移 x 的变化是不连续的, 所以得到的电阻变化也是不连续的, 即输出电压 U_0 的变化是一个阶梯形的曲线, 如图 2-32 所示。这种跳跃式的变化是由于导线长度被分割成有限匝数造成的, 电刷每移动过一匝线圈, 输出电压 U_0 便产生一次阶跃变化, 其阶跃值为 $U_0 = U/N$, N 是线圈总匝数。图中小的跳跃是因相邻两匝短路引起的。

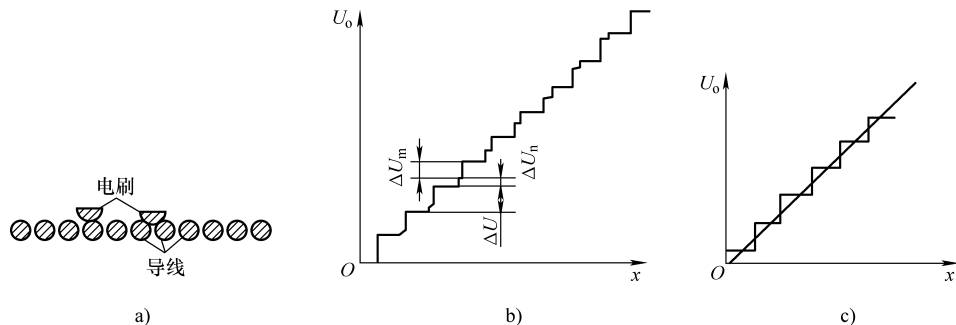


图 2-32 线绕式电位器的阶梯特性

a) 线圈与电刷 b) 阶梯特性 c) 负载特性

分辨率通常以没有小跳跃的理想阶梯特性来定义, 它等于 $(1/N)\%$ 。

阶梯误差是指阶梯特性曲线与理想直线的最大偏差的百分比, 即等于 $\pm(1/N)\%$ 。

(2) 负载特性及负载误差 电位器的输出端接有负载后, 就相当于负载电阻 R_L 与一部分电位器的电阻 R_x 相并联, 从而改变了电位器的空载特性曲线, 如图 2-32c 所示。负载后的输出电压 U_{oL} 为

$$U_{oL} = \frac{U}{\frac{R_x R_L}{R_x + R_L} + (R - R_x)} \cdot \frac{R_x R_L}{R_x + R_L} = \frac{U R_x R_L}{R R_L + R R_x - R_x^2} \quad (2-64)$$

设 $m = \frac{R}{R_L}$, $X = \frac{R_x}{R} = \frac{x}{l}$, 则

$$U_{oL} = U \frac{X}{1 + mX(1 - X)} \quad (2-65)$$

式中 l ——线圈长度。而空载时输出电压 $U_o = UR_x/R = Ux/l = UX$, 于是接负载 R_L 后所引起的相对非线性误差 δ_L 为

$$\delta_L = \frac{U_o - U_{oL}}{U_o} \times 100\% = \left[1 - \frac{1}{1 + mX(1 - X)} \right] \times 100\% \quad (2-66)$$

3. 非线性电位器

非线性电位器有多种形式, 如图 2-33 所示, 使其输出与电刷机械位移之间具有所需要的非线性函数关系。

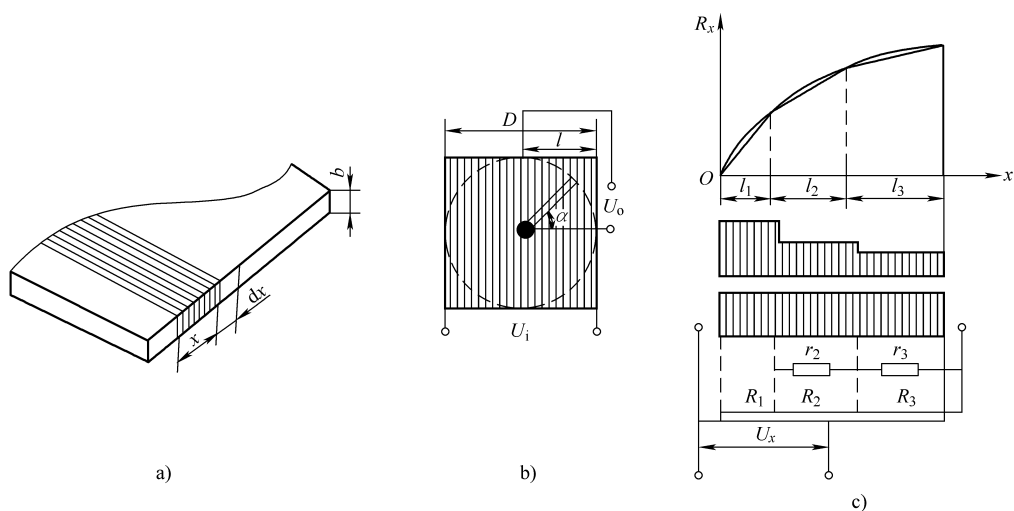


图 2-33 非线性电位器结构示意图

2.9.2 非线绕式电位器

由于线绕式电位器存在阶梯误差、分辨率低、耐磨性差、寿命短等缺点, 因此研制出各种非线绕式电位器。从原理上, 非线绕式电位器没有阶梯特性, 有无限的分辨率。实际上它的分辨率也比线绕式电位器高得多。此外, 它还具有尺寸小、重量轻等特点。非线绕式电位器有金属膜电位器、导电塑料电位器和光电电位器, 其中光电电位器还具有非接触特点。

1. 金属膜电位器

这种电位器是在绝缘基体上用真空蒸发或电镀的方法涂覆一层金属膜或复合金属膜, 如铂铜、铂锗、铑锗等, 它的温度系数很小, 可耐高温 (可达 150°C 以上), 但阻值较低 ($1 \sim 2\text{k}\Omega$)。

2. 导电塑料电位器

这种电位器的电阻体是由塑料粉与导电材料粉经压制而成。其特点是耐磨, 寿命长, 线性好, 阻值范围大, 能承受较大功率。但其阻值易受温度和湿度影响, 接触电阻大, 精度不高。

3. 光电电位器

这是一种无接触式电位器，以光束代替电刷，光电电位器结构如图 2-34 所示。它在氧化铝基体 2 上蒸发一条金属膜电阻带 3 和一条高导电率的集电极 5，在电阻带与导电带之间的窄间隙上沉积一层光电导层 1。当窄光束 4 在光电导层上扫描时，就使电阻带与集电极在该处形成一导电通路，如同电刷移动一样。光电电位器的阻值范围宽 ($500\Omega \sim 15M\Omega$)，无摩擦和磨损，寿命长，分辨力高。缺点是有滞后，工作温度范围窄，线性度也不高。

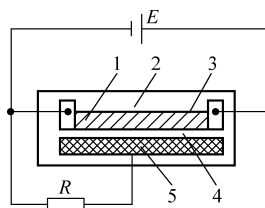


图 2-34 光电电位器原理图

1—光电导层 2—氧化铝基体
3—金属膜电阻带 4—窄光束
5—集电极

2.9.3 电位器式传感器的应用

1. 电位器式位移传感器

电位器式传感器常用于测量位移量和角度量。图 2-35 所示为电位器式位移传感器，量程范围为 $10 \sim 100\text{mm}$ 。电刷 3 固定在测杆 1 上，随着测杆的运动在滑线电阻 2 上移动，改变

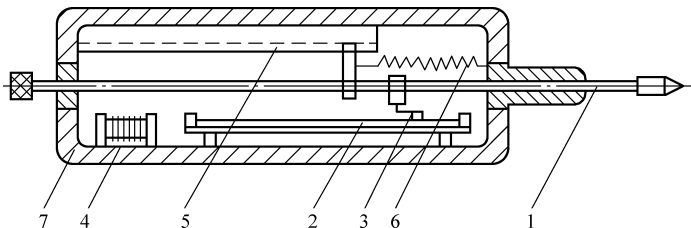


图 2-35 电位器式位移传感器结构示意图

1—测杆 2—滑线电阻 3—电刷 4—精密电阻 5—导轨 6—弹簧 7—壳体

滑线电阻的阻值（接入电桥中的）；精密电阻 4 与滑线电阻构成测量电桥的两个桥臂，则测量电桥的输出与测杆位移成正比。这种传感器的分辨力可达 0.01mm 。

2. 电位器式压力传感器

电位器式传感器也可以测量压力，图 2-36 所示为电位器式压力传感器，弹性敏感元件膜盒 1 的内腔通入被测流体，在流体压力作用下，膜盒膨胀或收缩，将带动连杆上下移动，使曲柄轴带动电位器的电刷在电位器绕组上滑动，因而输出一个与被测压力成比例的电压信号。

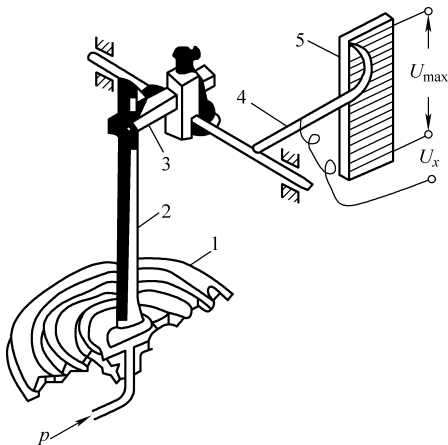


图 2-36 电位器式压力传感器原理示意图

1—膜盒 2—连杆 3—曲柄 4—电刷 5—滑线电阻

习 题

2-1 金属电阻应变片与半导体应变片的工作原理有何区别？

2-2 图 2-37 为直流电桥。说明电桥的工作原理。若按不同的桥臂工作方式,可分为哪几种?各自的输出电压如何计算?

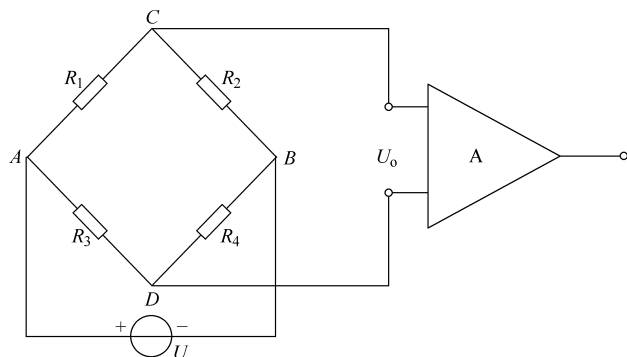


图 2-37 直流电桥

2-3 电阻应变片的阻值为 120Ω , 额定功率为 40mW , 将其接入等臂直流电桥中, 试确定激励电压应该多大。

2-4 简要说明筒式应变压力传感器的工作原理。

2-5 图 2-38 为一直流电桥。图中 $E = 4\text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120\Omega$, 试求:

(1) R_1 为应变片, 其余为外接电阻, 当 R_1 的增量 $\Delta R = 1.2\Omega$ 时, 电桥输出电压 U_0 是多少?

(2) R_1 、 R_2 都是应变片, 型号规格相同, 感应应变的极性和大小都相同, 其余为外接电阻, 电桥输出电压 U_0 是多少?

(3) 如果 R_2 和 R_1 感受应变的极性相反, 且 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = 1.2\Omega$ 时, 电桥输出电压 U_0 是多少?

2-6 将四片相同的应变片粘贴在实心圆柱形弹性元件上, 如图 2-39 所示。应变片的灵敏度系数 $K = 2$, 弹性元件的弹性模量 $E = 2 \times 10^7 \text{N/cm}^2$, 泊松比 $\mu = 0.285$, 它的横截面半径 $r = 10\text{mm}$, 其上作用的拉力 $F = 1000\text{kg}$ 。试回答下列问题:

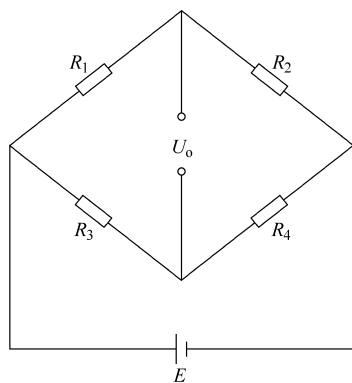


图 2-38 直流电桥

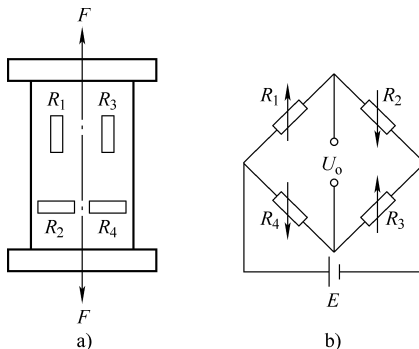


图 2-39 应变片贴在弹性元件上的位置图及相应测量电桥的原理图

(1) 各应变片的应变 ε ;

(2) 若测量电桥供电电压 $E = 6\text{V}$, 桥路输出电压 U_0 为多少?

(3) 说明这种测量方法对环境温度的变化能否具有补偿作用, 其原因是什么?

2-7 简述压阻式传感器的工作原理。

- 2-8 简述压阻式传感器的优、缺点。
- 2-9 简要说明压阻式传感器的主要误差来源及补偿方法。
- 2-10 简述电位器式传感器的结构及工作原理。

参 考 文 献

- [1] 唐贤远, 等. 传感器原理及应用 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000.
- [2] 梁福平. 传感器原理及检测技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [3] 周真, 苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [4] 王化祥. 传感器原理及应用 [M]. 3 版. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [5] 俞阿龙. 传感器原理及其应用 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2010.
- [6] 唐文彦. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [7] 赵学增. 现代传感技术基础及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [8] 何道清, 张禾, 等. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

第3单元

电感式传感器

学习要点

- ◆ 自感式传感器结构、工作原理、基本特性和转换电路；
- ◆ 差动变压器式传感器结构、工作原理、基本特性和转换电路；
- ◆ 零点残余电压产生原因及减小方法。

相关知识链接

- ◆ GB/T 28857—2012 直流差动变压器式位移传感器；
- ◆ 常凯, 李胜军, 李振水. 电感式接近传感器在飞机上的应用及关键技术 [J]. 航空制造技术. 2015 (20);
- ◆ 吴瑜, 张洪朋, 陈海泉, 等. 金属颗粒形态对电感式传感器输出特性影响的研究 [J]. 仪器仪表学报. 2015 (10)。

引导案例

触针式轮廓仪上的电感传感器

表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度, 它属于微观几何形状误差。表面粗糙度一般是由所采用的加工方法和其他因素所形成的, 例如加工过程中刀具与零件表面间的摩擦、切屑分离时表面层金属的塑性变形以及工艺系统中的高频振动等。表面粗糙度与机械零件的配合性质、耐磨性、疲劳强度、接触刚度、振动和噪声等有密切关系, 对机械产品的使用寿命和可靠性有重要影响。

表面粗糙度的测量方法有很多种, 其中触针法的应用比较广泛。触针式轮廓仪上的传感器通常采用电感传感器。在传感器测杆的一端装有金刚石触针, 触针尖端曲率半径很小, 测量时将触针搭在工件上, 与被测表面垂直接触, 利用驱动器以一定的速度拖动传感器。由于被测表面轮廓峰谷起伏, 触针在被测表面滑行时, 将产生上下移动。此运动经支点使磁心同步地上下运动, 从而使包围在磁心外面的两个差动电感线圈的电感量发生变化。传感器的线圈与测量线路是直接接入平衡电桥的, 线圈电感量的变化使电桥失去平衡, 于是就输出一个和触针上下的位移量成正比的信号, 经电子装置将这一微弱电量的变化放大、相敏检波后, 获得能表示触针位移量大小和方向的信号, 该信号经计算机处理即可得到表面粗糙度参数。

电感式传感器是将被测量转换成线圈的自感或互感的变化, 通过转换电路转化成电压或电流输出。这类传感器包括自感式传感器、互感式传感器、电涡流式传感器、压磁式传感器和感应同步器式传感器。

3.1 自感式传感器

3.1.1 工作原理

自感式传感器是将被测量的变化转换成线圈自感的变化。图3-1所示是自感式传感器原理图。在图3-1a、b中,因为在铁心与衔铁之间的空气隙很小,所以磁路是封闭的。根据自感的定义,线圈自感可由式(3-1)确定

$$L = \frac{d\Phi_N}{dI} = \frac{d(N\Phi)}{dI} = \frac{d\left(\frac{N^2 I}{R_m}\right)}{dI} = \frac{N^2}{R_m} \quad (3-1)$$

式中 Φ_N ——回路内磁链数;
 Φ ——每匝线圈的磁通量;
 I ——线圈中的电流;
 N ——线圈匝数;
 R_m ——磁路的总磁阻。

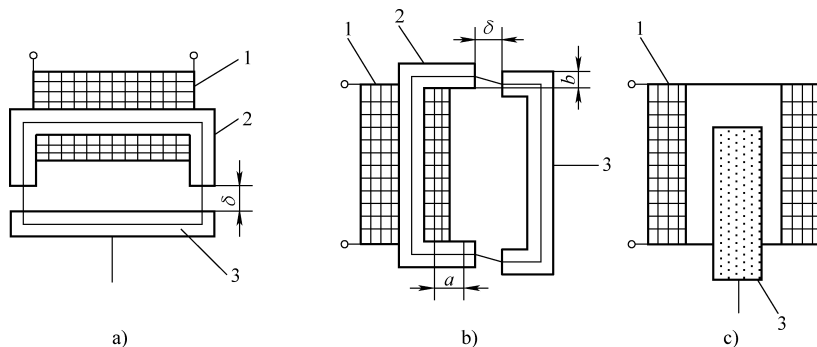


图3-1 自感式传感器原理图

1—线圈 2—铁心 3—衔铁

对于图3-1的情况,因为气隙厚度较小,可以认为气隙磁场是均匀的,若忽略磁路铁损,则总磁阻为

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad (3-2)$$

式中 l_1 ——磁通通过铁心的长度;
 l_2 ——磁通通过衔铁的长度;
 μ_1 ——铁心材料的磁导率;
 μ_2 ——衔铁材料的磁导率;
 μ_0 ——空气的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$;
 S_1 ——铁心的截面积;
 S_2 ——衔铁的截面积;
 S ——空气隙的截面积;

δ ——空气隙的长度。

将式 (3-2) 代入式 (3-1) 得

$$L = \frac{N^2}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S}} \quad (3-3)$$

当铁心的结构和材料确定后, 式 (3-3) 分母的第一项和第二项为常数, 此时自感 L 是气隙厚度 δ 和气隙截面积 S 的函数, 即 $L = f(\delta, S)$ 。如果保持 S 不变, 则 L 为 δ 的单值函数, 可构成变气隙型自感传感器; 如果保持 δ 不变, 使 S 随位移变化, 则构成变截面型传感器。

如图 3-1c 所示, 线圈中放入圆柱形衔铁, 当衔铁上下移动时, 自感量将相应变化, 这就构成了螺线管型自感传感器。

3.1.2 变隙式自感传感器

变隙式自感传感器如图 3-1a 所示, 将 S_0 代入 S , 式 (3-2) 可改写为

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \quad (3-4)$$

式中 S_0 ——空气隙的截面积。其他参数同式 (3-2)。

通常气隙的磁阻远大于铁心和衔铁的磁阻, 即

$$\frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \gg \frac{l_1}{\mu_1 S_1}, \quad \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \gg \frac{l_2}{\mu_2 S_2}$$

则式 (3-4) 可写为

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \quad (3-5)$$

将式 (3-5) 代入式 (3-1) 得

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2\delta} \quad (3-6)$$

由式 (3-6) 可知, L 与 δ 之间是非线性关系, 特性曲线如图 3-2 所示。设自感传感器初始气隙为 δ_0 , 初始电感量为 L_0 , 衔铁位移引起气隙变化量为 $\Delta\delta$, 当衔铁处于初始位置时, 初始电感量为

$$L_0 = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2\delta_0} \quad (3-7)$$

当衔铁上移 $\Delta\delta$ 时, 则将 $\delta = \delta_0 - \Delta\delta$, $L = L_0 + \Delta L$ 代入式 (3-6) 并整理得

$$L = L_0 + \Delta L = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} = \frac{L_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \quad (3-8)$$

当 $\Delta\delta / \delta_0 \ll 1$ 时, 上式用泰勒级数展开成如下形式:

$$L = L_0 + \Delta L = L_0 \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \cdots \right] \quad (3-9)$$

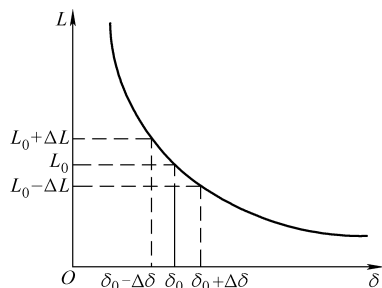


图 3-2 变隙式自感传感器特性曲线

$$\Delta L = L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (3-10)$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (3-11)$$

同理，当衔铁随被测物体的初始位置向下移动 $\Delta \delta$ 时，有

$$\Delta L = L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (3-12)$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (3-13)$$

对式 (3-11) 和式 (3-13) 进行线性化处理，即忽略高次项，得

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (3-14)$$

灵敏度 k_0 为

$$k_0 = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0} \quad (3-15)$$

由此可见，变隙式自感传感器的测量范围与灵敏度及线性度是相互矛盾的，因此变气隙式自感传感器适用于测量微小位移场合。为了减小非线性误差，实际测量中广泛采用差动变隙式自感传感器。

如图 3-3 所示，差动变隙式自感传感器由两个完全相同的电感线圈和一个衔铁组成。测量时，衔铁与被测件相连，当被测体上下移动时，带动衔铁也以相同的位移上下移动，使两个磁回路中的磁阻发生大小相等、方向相反的变化，导致一个线圈的电感量减小，另一个线圈的电感量增加，形成差动形式。使用时，两个电感线圈接在交流电桥的相邻桥臂，另两个桥臂接电阻。

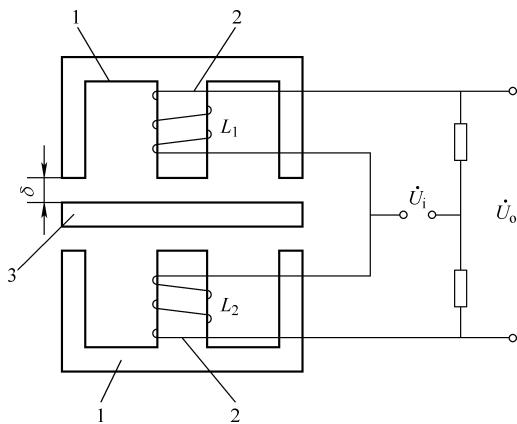


图 3-3 差动变隙式自感传感器

1—铁心 2—线圈 3—衔铁

当衔铁向上移动时，两个线圈的电感变化量分别由式 (3-11) 和式 (3-13) 表示，差动传感器电感的总变化量 $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$ ，即

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 2L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (3-16)$$

对上式线性化，即忽略高次项，得

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (3-17)$$

灵敏度 k_0 为

$$k_0 = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\Delta \delta} = \frac{2}{\delta_0} \quad (3-18)$$

比较式 (3-10) 和式 (3-16), 可以得到以下结论:

1) 差动变气隙式自感传感器的灵敏度是单线圈式自感传感器的 2 倍。

2) 在线性化时, 差动变气隙式自感传感器忽略 $(\Delta\delta/\delta_0)^3$ 及以上的高次项, 单线圈式忽略 $(\Delta\delta/\delta_0)^2$ 以上的所有高次项, 因此差动式自感传感器线性度得到明显改善。

3.1.3 变截面式自感传感器

如图 3-1b 所示的传感器气隙长度 δ 保持不变, 令磁通截面积随被测量而变, 设铁心材料和衔铁材料的磁导率相同, 则此变面积自感传感器自感 L 为

$$L = \frac{N^2}{\frac{\delta_0}{\mu_0 S} + \frac{\delta}{\mu_0 \mu_r S}} = \frac{N^2 \mu_0}{\delta_0 + \frac{\delta}{\mu_r}} S = K' S \quad (3-19)$$

式中 δ_0 ——气隙总长度;

δ ——铁心和衔铁中的磁路总长度;

μ_r ——铁心和衔铁材料相对磁导率;

S ——气隙磁通截面积;

K' —— $K' = \mu_0 N^2 / (\delta_0 + \delta/\mu_r)$ 为常数。

对式 (3-19) 微分得灵敏度 k_0 为

$$k_0 = \frac{dL}{dS} = K' \quad (3-20)$$

由式 (3-20) 可知, 变面积式自感传感器在忽略气隙磁通边缘效应的条件下, 输入与输出呈线性关系。但与变气隙式自感传感器相比, 其灵敏度下降。

3.1.4 螺线管式自感传感器

螺线管式自感传感器有单线圈和差动式两种结构形式。图 3-1c 所示是单线圈螺线管式自感传感器。测量时, 活动铁心随被测体移动, 线圈电感量发生变化, 线圈电感量与铁心插入深度有关。

图 3-4 是差动螺线管式自感传感器的结构原理图。它由两个完全相同的螺线管相连, 铁心初始状态处于对称位置上, 两边螺线管的初始电感量相等。当铁心移动时, 一个螺线管的电感量增加, 另一个的电感量减小, 且增加与减小的数值相等, 形成了差动。

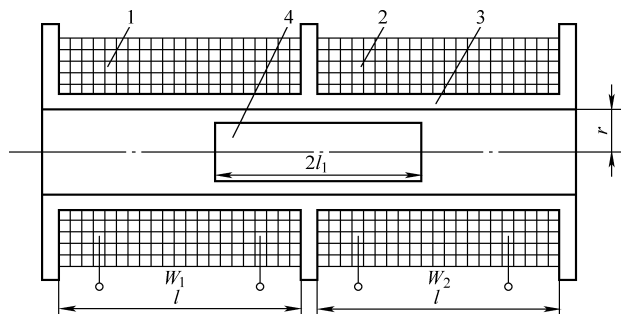


图 3-4 差动螺线管式自感传感器

1—螺线管线圈 I 2—螺线管线圈 II 3—骨架 4—活动铁心

3.1.5 自感式传感器转换电路

自感式传感器把被测量的变化转变成了电感量的变化,为了测出电感量的变化,就要用转换电路把电感量的变化转换成电压(或电流)的变化。最常用的转换电路有调幅、调频和调相电路。

1. 调幅电路

(1) 交流电桥 调幅电路的主要形式是交流电桥。关于交流电桥,已在第2单元中讨论过,在此主要介绍在自感传感器中经常使用的变压器电桥。图3-5所示是变压器电桥, Z_1 和 Z_2 为传感器两个线圈的阻抗,另两臂为电源变压器二次线圈的两半,每半的电压为 $u/2$ 。输出空载电压为

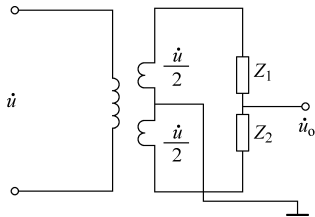


图 3-5 变压器电桥

$$\dot{u}_o = \frac{\dot{u}}{Z_1 + Z_2} Z_1 - \frac{\dot{u}}{2} \quad (3-21)$$

在初始平衡状态, $Z_1 = Z_2 = Z$, $\dot{u}_o = 0$ 。当衔铁偏离中间零点时,设 $Z_1 = Z + \Delta Z$, $Z_2 = Z - \Delta Z$,代入式(3-21)可得

$$\dot{u}_o = \frac{\Delta Z}{2Z} \dot{u} \quad (3-22)$$

式(3-22)表明输出电压的幅值随阻抗的变化 ΔZ 而变化,亦即电压的幅值随电感的变化 ΔL 而变化。同理,当传感器衔铁移动方向相反时,则 $Z_1 = Z - \Delta Z$, $Z_2 = Z + \Delta Z$,代入式(3-21)可得

$$\dot{u}_o = -\frac{\Delta Z}{2Z} \dot{u} \quad (3-23)$$

比较式(3-22)和式(3-23),说明这两种情况的输出电压大小相等,方向相反。由于 u_o 是交流电压,输出指示无法判断位移方向,所以必须配合相敏检波电路来解决。

(2) 谐振式调幅电路 图3-6a是谐振式调幅电路。在谐振式调幅电路中,传感器电感 L 与电容 C ,变压器一次侧串联在一起,接入交流电源,变压器二次侧将有电压 U_o 输出,输出电压的频率与电源频率相同,而幅值随着电感 L 而变化。图3-6b所示为输出电压 U_o 与电感 L 的关系曲线,其中 L_0 为谐振点的电感值,此电路灵敏度很高,但线性差,适用于线性要求不高的场合。

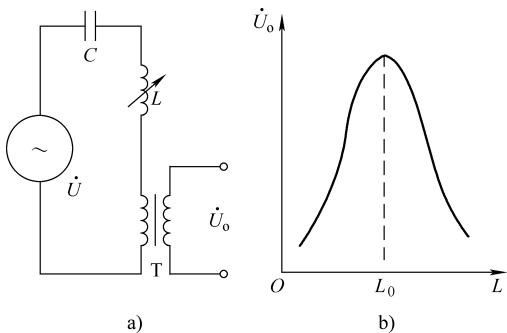


图 3-6 谐振式调幅电路

2. 调频电路

调频电路的基本原理是传感器电感 L 变化将引起输出电压频率的变化。

一般是把传感器电感 L 和电容 C 接入一个振荡回路中,其振荡频率 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 。谐振式调频电路如图3-7所示。当 L 变化时,振荡频率随之变化,根据 f 的大小即可测出被测量的值。图3-7b表示 f 与 L 的特性,它具有明显的非线性关系。

3. 调相电路

调相电路就是把传感器电感 L 变化转换为输出电压相位 φ 的变化。图3-8所示为一个相

位电桥，一臂为传感器 L ，一臂为固定电阻 R 。设计时使电感线圈具有高的品质因数。忽略其损耗电阻，则电感线圈上压降 U_L 与固定电阻上压降 U_R 是两个相互垂直的分量。当电感 L 变化时，输出电压 U_o 的幅值不变，相位角 φ 随之变化。 φ 与 L 的关系为

$$\varphi = -2\arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (3-24)$$

式中 ω ——电源角频率。

在这种情况下，当 L 有了微小变化 ΔL 后，输出相位变化 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi \approx -\frac{2\frac{\omega L}{R}}{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2} \frac{\Delta L}{L} \quad (3-25)$$

图 3-8c 给出了 φ 与 L 的特性关系。

4. 自感传感器的灵敏度

自感传感器的灵敏度是指传感器结构（测头）和转换电路综合在一起的总灵敏度。下面以调幅电路为例讨论传感器灵敏度问题，对调频、调相电路可采用同样方法进行分析。

传感器结构灵敏度 k_0 定义为自感值相对变化与引起这一变化的衔铁位移之比，即

$$k_0 = \frac{(\Delta L/L)}{\Delta x} \quad (3-26)$$

转换电路的灵敏度 k_c 定义为空载输出电压 $\dot{u}_o$ 与自感相对变化之比，即

$$k_c = \frac{\dot{u}_o}{(\Delta L/L)} \quad (3-27)$$

由式 (3-26) 和式 (3-27) 可得总灵敏度为

$$k_z = k_0 k_c = \frac{\dot{u}_o}{\Delta x} \quad (3-28)$$

如果采用气隙型自感传感器，由式 (3-15) 得 $k_0 = 1/\delta_0$ 。采用如图 3-5 所示变压器电桥，由式 (3-22) 得

$$\dot{u}_o = \frac{\dot{u}}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$$

因为一般电感线圈设计时具有较高的品质因数 Q 值，则上式可变为

$$\dot{u}_o = \frac{\dot{u}}{2} \frac{(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2} \frac{\Delta L}{L} \quad (3-29)$$

代入式 (3-27) 可得

$$k_c = \frac{\dot{u}}{2} \frac{(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3-30)$$

则传感器灵敏度 k_z 为

$$k_z = \frac{1}{\delta_0} \frac{\dot{u}}{2} \frac{(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3-31)$$

由式 (3-31) 可见，传感器灵敏度是三部分的乘积，第一部分 $1/\delta_0$ 决定于传感器的类

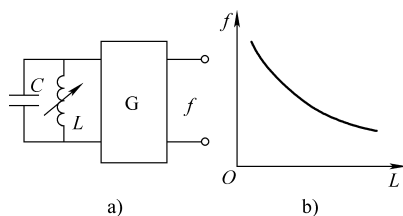


图 3-7 调频电路

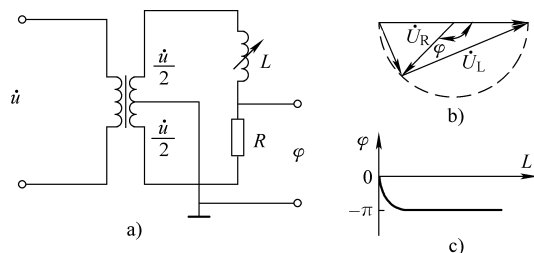


图 3-8 调相电路

型,第二部分决定于供电电压的大小,第三部分决定于转换电路的形式。传感器类型和转换电路不同,灵敏度表达式也就不同。在工厂生产中测定传感器的灵敏度是把传感器接入转换电路后进行的,而且规定传感器灵敏度的单位 $\text{mV}/(\mu\text{m} \cdot \text{V})$, 即当电源电压为 1V , 衔铁偏移 $1\mu\text{m}$ 时, 输出电压为若干 mV 。

3.1.6 自感式传感器应用

图 3-9 所示是一个测量尺寸用的轴向自感式传感器, 轮廓尺寸 $\phi 15\text{mm} \times 94\text{mm}$ 。可换的玛瑙测端 10 用螺纹拧在测杆 8 上, 测杆 8 可在滚珠导轨 7 上作轴向移动。这里滚珠有四排, 每排 8 粒, 尺寸和形状误差都小于 $0.6\mu\text{m}$ 。测杆的上端固定着衔铁 3, 当测杆移动时, 带动衔铁在电感线圈 4 中移动。线圈 4 置于铁心套筒 2 中, 铁心材料是铁氧体, 型号为 MX1000。线圈匝数为 2×800 , 线径 $\phi 0.13\text{mm}$, 每个电感约为 4mH 。测力由弹簧 5 产生, 一般为 $0.2 \sim 0.4\text{N}$ 。防转销 6 用来限制测杆的转动, 以提高示值的重复性。密封套 9 用来防止尘土进入传感器内。1 为传感器的引线。外壳有标准直径 $\phi 8\text{mm}$ 和 $\phi 15\text{mm}$ 两个夹持部分, 便于安装在比较仪座上或有关仪器上使用。

图 3-10 所示为变隙式自感压力传感器结构图, 它由膜盒、衔铁、铁心及线圈组成。膜盒顶端与衔铁固接在一起, 当膜盒内压力发生变化时, 膜盒的顶端在压力作用下发生膨胀, 衔铁也随之发生位移, 从而使传感器的气隙发生变化, 线圈的电感也发生相应的变化, 则传感器的输出反映了被测压力的大小。

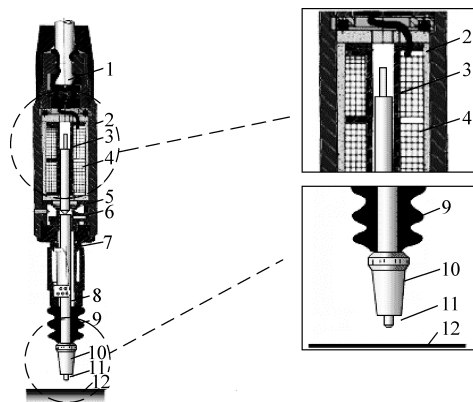


图 3-9 螺管式差动自感传感器

1—引线 2—固定磁筒 3—衔铁 4—线圈 5—弹簧
6—防转销 7—钢球导轨（直线轴承） 8—测杆
9—密封套 10—测端 11—被测工件 12—基准面

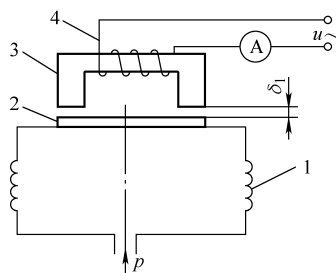


图 3-10 变隙式自感压力传感器结构图

1—膜盒 2—衔铁 3—铁心 4—线圈

3.2 差动变压器式传感器

3.2.1 工作原理

互感式电感传感器是把被测量转换成线圈互感量的变化, 这种传感器是根据变压器的基本原理制成的, 并且二次绕组用差动形式连接, 故称之为差动变压器式传感器, 简称差动变压器。

差动变压器结构形式较多, 如图 3-11 所示, 有改变磁路中空气隙间距的变隙式如图 3-11a 和 b 所示、改变磁路中两个铁心相对截面积的变面积式如图 3-11c 和 d 所示及将线圈绕成螺旋管状的如图 3-11e 和 f 所示的螺管式, 但其工作原理基本一样。

在实际测量中, 应用最多的是螺线管式差动变压器, 它可以测量 $1 \sim 100\text{mm}$ 范围内的机械位移, 并具有测量准确度高, 灵敏度高, 结构简单, 性能可靠等优点。

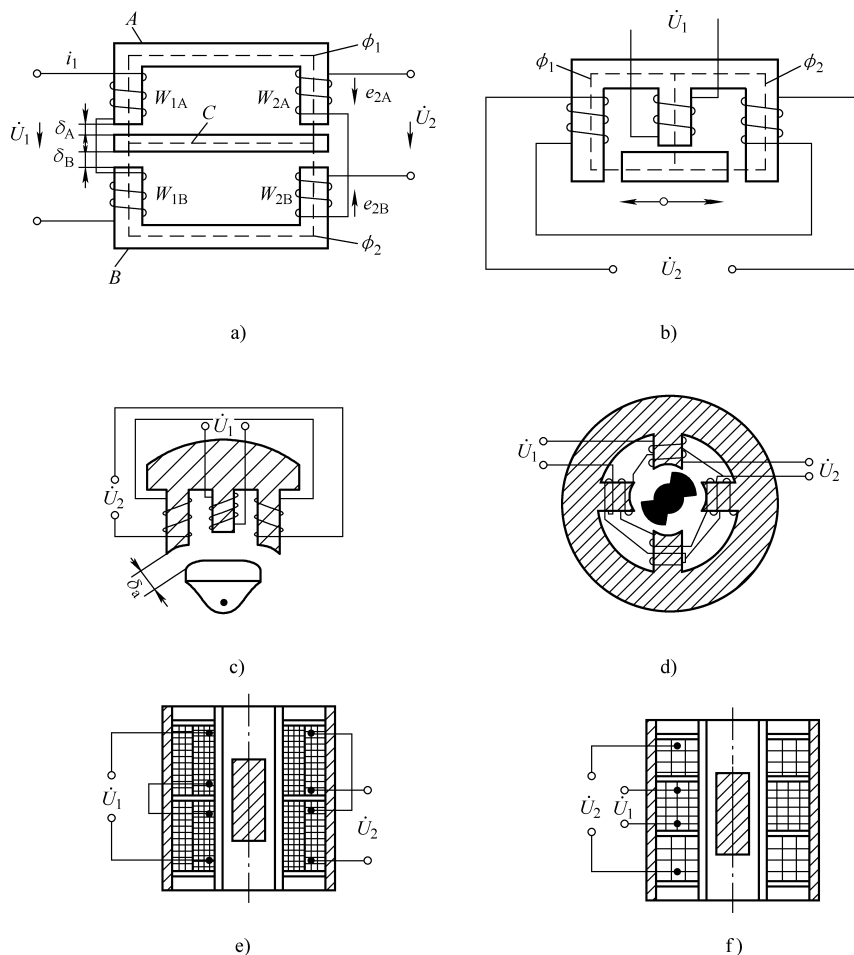


图 3-11 差动变压器式传感器结构示意图

- a) 变隙式差动变压器 1 b) 变隙式差动变压器 2 c) 变面积式差动变压器 1
d) 变面积式差动变压器 2 e) 螺线管式差动变压器 1 f) 螺线管式差动变压器 2

螺线管式差动变压器结构如图 3-12 所示，它由活动铁心、磁筒、骨架、一次绕组和两个二次绕组等组成。

螺线管式差动变压器中的两个二次绕组反向串联，在理想情况下，忽略铁损、导磁体磁阻和绕组的分布电容，其等效电路如图 3-13 所示。当一次绕组加以适当频率的激励电压时，根据变压器的工作原理，在两个二次绕组 N_{2a} 和 N_{2b} 中就会产生感应电动势 $\dot{E}_{2a}$ 和 $\dot{E}_{2b}$ 。

$$\dot{E}_{2a} = -j\omega M_a \dot{I}_1 \quad (3-32)$$

$$\dot{E}_{2b} = -j\omega M_b \dot{I}_1 \quad (3-33)$$

式中 M_a 、 M_b ——分别为一次绕组与两个二次绕组 N_{2a} 和 N_{2b} 的互感；

$\dot{I}_1$ ——一次绕组中的电流，当次级开路时，有 $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1}$ ，其中 $\dot{U}_1$ 为一次绕组激励电压。

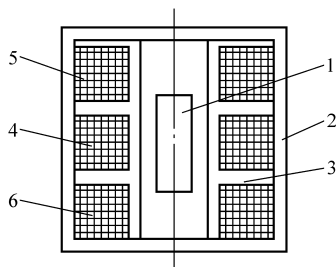


图 3-12 螺线管式差动变压器结构

1—活动衔铁 2—磁筒 3—骨架
4—一次绕组 5, 6—二次绕组

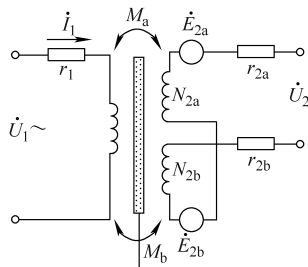


图 3-13 差动变压器等效电路

由于变压器两个二次绕组反向串联，且考虑到二次侧开路，则

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = -\frac{j\omega(M_a - M_b)\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1} \quad (3-34)$$

如果变压器结构完全对称，则当活动铁心处于初始平衡位置时，使两个二次绕组磁回路的磁阻相等、磁通相同、互感系数相等，根据电磁感应原理，有 $\dot{E}_{2a} = \dot{E}_{2b}$ 。因而 $\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = 0$ ，即差动变压器输出电压为零。

当活动铁心向二次绕组 N_{2a} 方向移动时，由于磁阻的影响， N_{2a} 中的磁通将大于 N_{2b} 中的磁通，使 $M_a > M_b$ ，因而 $\dot{E}_{2a}$ 增加， $\dot{E}_{2b}$ 减小；反之， $\dot{E}_{2b}$ 增加， $\dot{E}_{2a}$ 减小。因为 $\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b}$ ，所以当 $\dot{E}_{2a}$ 和 $\dot{E}_{2b}$ 随着铁心位移 Δx 变化时， $\dot{U}_2$ 也随 Δx 而变化。图 3-14 所示是差动变压器输出电压与活动铁心位移 Δx 关系曲线。图中实线为理论特性曲线，虚线为实际特性曲线。

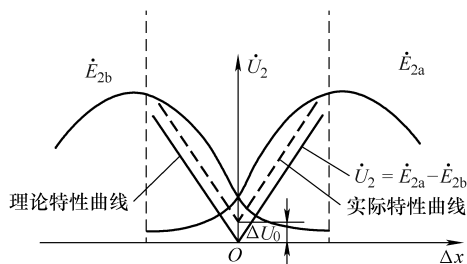


图 3-14 差动变压器输出特性曲线

3.2.2 差动变压器式传感器转换电路

差动变压器式传感器的转换电路一般采用反串电路和桥路两种。

反串电路是直接两个二次绕组反向串接，如图 3-15 所示。在这种情况下，空载输出电压等于两个二次绕组感应电动势之差，即

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} \quad (3-35)$$

电桥电路如图 3-16 所示。图中 R_1 、 R_2 是桥臂电阻， R_p 是调零电位器。暂时不考虑电位器，并设 $R_1 = R_2$ ，则输出电压为

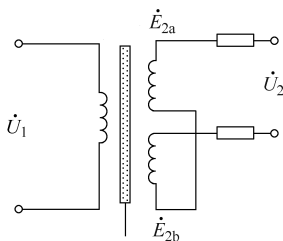


图 3-15 反串电路

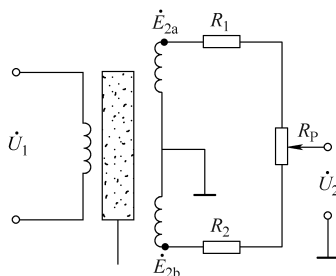


图 3-16 电桥电路

$$\dot{U}_2 = \frac{[\dot{E}_{2a} - (-\dot{E}_{2b})]R_2}{R_1 + R_2} - \dot{E}_{2b} = \frac{\dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b}}{2} \quad (3-36)$$

可见,桥路的灵敏度是反串电路的1/2,其优点是利用 R_p 可进行电学调零,不需要另外配置调零电路。

3.2.3 差动变压器式传感器应用

差动变压器式传感器可以直接用于位移测量,也可以测量与位移有关的任何机械量,如力、力矩、压力、振动、加速度、液位等。下面介绍几种应用实例。

1. 位移的测量

图3-17所示为差动变压器式位移传感器。测端1通过套筒3与测杆5相连,2是防尘罩,弹簧9产生测力。工作时,固定在测杆上的磁心7在线圈8中移动。线圈及其骨架放在磁筒6内,并通过导线10接入电路。

2. 压力的测量

差动变压器式传感器与弹性敏感元件(膜片、膜盒和弹簧管等)相结合,可以组成压力传感器。

图3-18所示为差动变压器式压力传感器,衔铁固定在膜盒中心。在无压力作用时,膜盒处于初始状态,衔铁位于差动变压器线圈的中部,输出电压为零。当被测压力作用在膜盒上使其发生膨胀,衔铁移动,差动变压器输出正比于被测压力的电压。这种微压力传感器可测 $(-4 \sim 6) \times 10^4 \text{ Pa}$ 的压力。

3. 加速度的测量

图3-19所示为差动变压器式加速度传感器。质量块2的材料是导磁的,它由两片片簧1支撑,线圈与骨架固定在基座上。测量时,基座固定在被测体上,与被测体一起运动,质量块在弹簧片作用下相对线圈产生正比于加速度的位移。

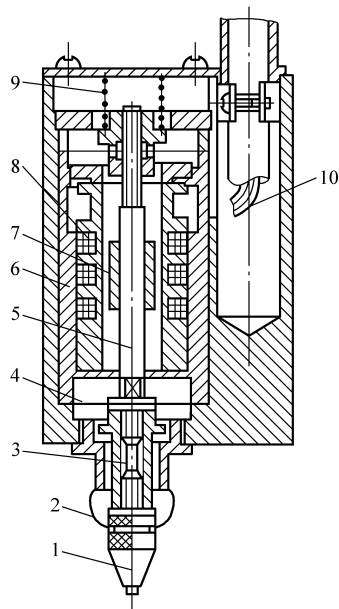


图3-17 差动变压器式位移传感器

1—测端 2—防尘罩 3—套筒 4—圆片簧 5—测杆
6—磁筒 7—磁心 8—线圈 9—弹簧 10—导线

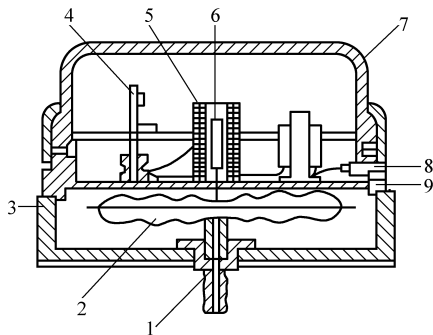


图3-18 差动变压器式压力传感器

1—接头 2—膜盒 3—底座 4—线路板 5—差动变压器线圈
6—衔铁 7—罩壳 8—插头 9—通孔

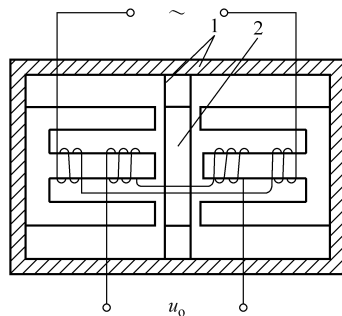


图3-19 差动变压器式加速度传感器

1—片簧 2—质量块

3.3 零点残余电压

3.3.1 零点残余电压产生原因

由式 (3-21) 可得自感传感器交流电桥输出电压为

$$\dot{u}_o = \frac{\dot{u}}{2} \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3-37)$$

而差动变压器的输出电压如式 (3-35) 和式 (3-36) 所示。理论上, 当活动铁心处于中间位置时, 两线圈阻抗相等, 传感器输出电压为零。然而实际上, 由于传感器的阻抗是复数阻抗, 很难做到两线圈电阻和电感完全相等, 这就致使传感器在铁心处于中间位置时, 输出电压不为零。我们把传感器在零位移时的这个输出电压称为零点残余电压。如图 3-14 所示, 实际输出特性曲线和理论输出特性曲线的差值 ΔU_0 就是零点残余电压。零点残余电压过大, 会使传感器的灵敏度下降, 非线性误差增大, 不同档位的放大倍数有显著差别, 甚至造成放大器末级趋于饱和, 致使仪器电路不能正常工作, 甚至不再反映被测量的变化。在仪器的放大倍数较大时, 这点尤其需要注意。

因此, 零点残余电压的大小是判别传感器质量的重要指标之一。在制造传感器时, 要规定其零点残余电压不得超过某一定值。例如某自感测微仪的传感器, 其输出信号经 200 倍放大后, 在放大器末级测量, 零点残余电压不得超过 80mV。仪器在使用过程中, 若有迹象表明传感器的零点残余电压过大, 就要进行调整。

零点残余电压主要是由传感器的两个二次绕组的电气参数与几何尺寸不对称, 以及磁性材料的非线性等问题引起的。零点残余电压的波形十分复杂, 主要由基波和高次谐波组成。基波产生的主要原因是: 传感器的两个二次绕组的电气参数和几何尺寸不对称, 导致它们产生的感应电动势的幅值不等、相位不同, 因此不论怎样调整衔铁位置, 两线圈中感应电动势都不能完全抵消。高次谐波中起主要作用的是三次谐波, 产生的原因是由于磁性材料磁化曲线的非线性 (磁饱和、磁滞)。

3.3.2 零点残余电压补偿方法

为了减小电感传感器的零点残余电压, 可以采取下列措施:

1) 在设计和工艺上, 要求做到磁路对称、线圈对称。铁心材料要均匀, 特性要一致。两线圈绕制要均匀, 松紧一致。

2) 采用拆圈的实验方法, 调整两个线圈的等效参数, 使其尽量相同, 以减小零点残余电压。

3) 在电路上进行补偿。补偿方法主要有: 加串联电阻、加并联电容、加反馈电阻或反馈电容等。

图 3-20 是几个补偿零点残余电压的

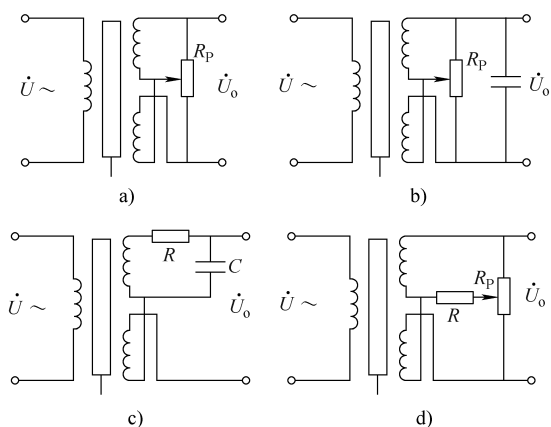


图 3-20 补偿零点残余电压的电路

实例。

图 3-20a 中在输出端接入电位器 R_p ，电位器的动点接两个二次绕组的公共点。调节电位器，可使两个二次绕组输出电压的大小和相位发生变化，从而使零点电压为最小值。 R_p 的电阻一般在 $10\text{k}\Omega$ 左右。这种方法对基波正交分量有明显的补偿效果，但对高次谐波无补偿作用。如果并联一只电容 C ，就可有效地补偿高次谐波分量，如图 3-20b 所示。电容 C 的大小要适当，常在 $0.1\mu\text{F}$ 以下，要通过实验确定。图 3-20c 中，串联电阻 R 调整二次绕组的电阻值不平衡，并联电容改变其中一个输出电动势的相位，也能达到良好的零点残余电压补偿作用。图 3-20d 中，接入 R （几百千欧）减轻了两个二次绕组的负载，可以避免外接负载不是纯电阻而引起较大的零点残余电压。相敏检波可以较好地消除零点残余电压。

3.4 电涡流式传感器

3.4.1 工作原理

电涡流式传感器是基于涡流效应工作的。金属导体置于交变磁场中，在导体内会产生感应电流，这种电流在导体内是闭合的，所以称之为电涡流。这种现象称为涡流效应。

如图 3-21 所示，把一个金属导体置于线圈附近，当线圈中通以交变电流 i_1 时，线圈的周围空间就产生了交变磁场 H_1 ，处于此交变磁场中的金属导体内就会产生涡流 i_2 ，此涡流将产生一个新的交变磁场 H_2 ， H_2 的方向和 H_1 的方向相反，削弱了原磁场 H_1 ，从而导致线圈的电感量、阻抗及品质因数发生变化。

若把导体视为一个线圈，则导体与线圈可以等效为相互耦合的两个线圈，如图 3-22 所示。根据基尔霍夫定律，可以列出方程为

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (3-38)$$

式中 R_1 、 L_1 、 $\dot{I}_1$ ——线圈的电阻、电感和电流；

R_2 、 L_2 、 $\dot{I}_2$ ——金属导体的电阻、电感和电流；

$\dot{U}_1$ 、 ω ——线圈激励电源电压和频率；

M ——导体与线圈之间的互感系数。

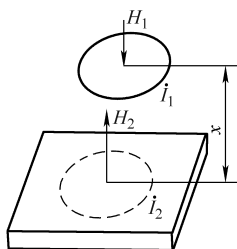


图 3-21 涡流作用原理

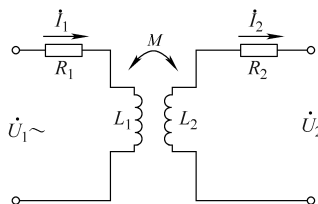


图 3-22 电涡流传感器等效电路

解方程得

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j\omega \left[L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \right]} \\ \dot{I}_2 = \frac{\omega^2 M L_2 + j\omega M R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \dot{I}_1 \end{cases} \quad (3-39)$$

由此得到线圈受到电涡流作用后的等效阻抗为

$$Z = R_1 + R_2 \frac{(\omega M)^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega \left[L_1 - L_2 \frac{(\omega M)^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right] \quad (3-40)$$

线圈的等效电阻、电感分别为

$$R = R_1 + R_2 \frac{(\omega M)^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (3-41)$$

$$L = L_1 - L_2 \frac{(\omega M)^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (3-42)$$

由式(3-40)可知,线圈受到涡流的影响,其阻抗的实数部分增大,虚数部分减小,使得线圈的品质因数下降。

$$Q = \frac{Q_1 \left(1 - \frac{L_2 \omega^2 M^2}{L_1 Z_2^2} \right)}{1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_1 Z_2^2}} \quad (3-43)$$

式中 Q_1 ——无涡流影响时线圈的品质因数;

Z_2 ——金属导体中产生涡流部分的阻抗; $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$ 。

由此可知,金属导体的电阻率 ρ 、磁导率 μ ,线圈激励电压的频率 ω 以及线圈与金属导体之间的距离 x 都将导致线圈的阻抗、电感量及品质因数发生变化。可以写成

$$Z = f(\rho, \mu, \omega, x) \quad (3-44)$$

如果改变其中某个参数,而其他参数保持不变,即可构成关于这个参数的电涡流传感器。

事实上,由于集肤效应,涡流只存在于金属导体的表面薄层中,其穿透深度 h 可表示为

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r \pi f}} \quad (3-45)$$

式中 h ——集肤深度;

μ_0 、 μ_r ——空气磁导率和金属导体相对磁导率;

ρ ——导体的电阻率;

f ——激励电源频率。

由上式可知,集肤深度 h 与激励电源频率 f 有关,频率越低,涡流贯穿深度 h 越大,反之, h 越小。

3.4.2 电涡流传感器类型

电涡流传感器根据激励电源频率的高低,可以分为高频反射式和低频透射式两大类,其中高频反射式电涡流传感器应用较为广泛。

1. 高频反射式电涡流传感器

高频反射式电涡流传感器结构如图 3-23 所示。将一个电感线圈绕制成扁平的圆形线圈,粘贴在框架上,就构成了电涡流式传感器。测量时,将传感器置于金属板附近,并加以高频电流。线圈上产生的高频磁场作用于金属板,在金属板的表面产生电涡流。该电涡流反射作用于传感器线圈,使传感器的电感量减小。当金属板的厚度远大于涡流的贯穿深度时,表面感应的电涡流几乎只取决于线圈与金属板之间的距离 x ,而与金属板的厚度以及电阻率的变化无关。因此,高频反射式电涡流传感器可以测量位移量,也可以测量厚度、振幅、转速等能转换成 x 的各种被测量。

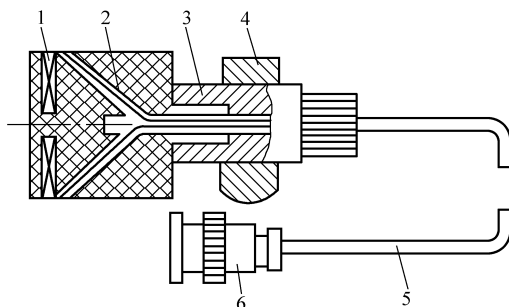


图 3-23 高频反射式电涡流传感器

1—线圈 2—框架 3—框架衬套
4—支架 5—电缆 6—插头

2. 低频透射式电涡流传感器

当加在传感器线圈上的激励电源的频率较低时,涡流的集肤深度将加大。如图 3-24 所示为低频透射式电涡流传感器的工作原理。发射线圈 L_1 和接收线圈 L_2 , 分别位于金属板 M 的上、下方。发射线圈 L_1 通以低频电压信号,在其周围产生交变磁场。如果两线圈中不存在金属板,线圈 L_1 的磁场将直接贯穿 L_2 ,在 L_2 上产生感应电动势 E 。在 L_1 和 L_2 之间放置金属板 M 后,则在 M 中产生涡流。这个涡流损耗了磁场的能量,使 L_2 处的磁场强度减小,从而引起感应电动势 E 的减小。涡流的大小取决于金属板的厚度 h , h 越大,涡流损耗越大, E 就越小。因此, E 的大小反映了金属板的厚度 h ,这就是涡流传感器测厚的原理。

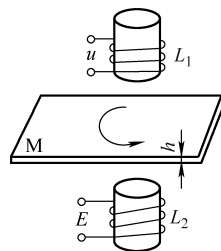


图 3-24 低频透射式电涡流传感器的工作原理

事实上,涡流的大小不仅与金属板的厚度有关,而且还与金属板的电阻率 ρ 、磁导率 μ 有关。金属材料电阻率 ρ 、磁导率 μ 与材料的性质以及温度密切相关,利用这一特性,低频透射式电涡流传感器可以用来测量温度、材质、硬度、应力以及裂纹。

3.4.3 电涡流式传感器转换电路

电涡流式传感器的转换电路主要有调频式电路、调幅式电路和交流电桥式电路。

1. 调频式电路

图 3-25 所示为调频式转换电路原理图。该转换电路由电容三点式振荡器和射极输出器两部分组成。振荡器由晶体管 VT_1 、电容 C_1 、 C_2 、 C_3 和电涡流传感器线圈 L 构成。当被测量变化引起传感器线圈的电感量变化时,振荡器的振荡频率就相应的发生变化,从而实现频

率调制。射极输出器由晶体管 VT_2 和射极电阻 R_6 等元件构成，起阻抗匹配作用。

使用这种调频式转换电路，传感器输出电缆的分布电容的影响是不能忽略的。它会使振荡器的频率发生变化，从而影响测量结果。因此通常将 L 、 C 装在传感器内部。这样电缆的分布电容并联在大电容 C_2 、 C_3 上，因而对振荡器频率的影响就大大减小。

2. 调幅式电路

图 3-26 所示为调幅式电路原理图。

传感器线圈 L 和电容器 C 并联组成谐振回路，石英晶体振荡器给谐振回路提供一个高频激励电流信号。 LC 回路输出电压为

$$U_o = i_0 Z \quad (3-46)$$

式中 i_0 ——高频激励电流；
 Z —— LC 回路的阻抗。

3. 交流电桥式电路

图 3-27 所示为交流电桥电路原理图。图中 Z_1 、 Z_2 为差动式传感器的两个线圈，它们与电容 C_1 、 C_2 电阻 R_1 、 R_2 组成四臂电桥。桥路输出电压幅值随传感器线圈阻抗变化而变化。

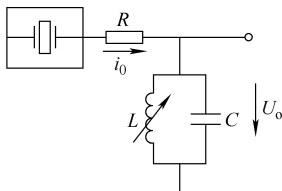


图 3-26 调幅式电路原理图

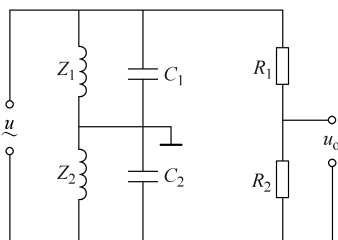


图 3-27 交流电桥电路原理图

3.4.4 电涡流式传感器应用

电涡流式传感器具有结构简单，灵敏度较高，测量范围大，抗干扰能力强，易于进行非接触的连续测量等优点，因此得到广泛的应用。图 3-28 所示为电涡流探头。

1. 位移测量

电涡流式传感器可以测量各种形式的位移量。图 3-29 所示为汽轮机主轴的轴向位移测量示意图。联轴器安装在汽轮机的主轴上，高频反射式电涡流传感器置于联轴器附近。当汽轮机主轴沿轴向存在位移时，传感器线圈与联轴器（金属导体）的距离发生变化，引起线圈阻抗变化，从而使传感器的输出发生改变。根据传感器的输出即可测得汽轮机主轴沿轴向的位移量。

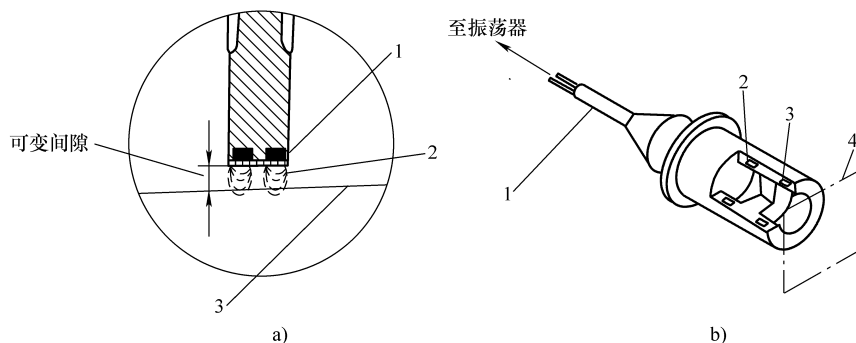


图 3-28 电涡流检测探头

- a) 涡流检测探头 b) 探头结构
- 1—线圈 2—磁场 3—靶 1—绝缘电缆 2—参考线圈 3—检测线圈 4—靶子

2. 厚度测量

图 3-30 所示为高频反射式涡流测厚仪测试系统原理图。

为了克服带材不够平整或运行过程中上下波动的影响，在带材的上、下两侧对称地设置了两个特性完全相同的涡流传感器 S_1 、 S_2 。 S_1 、 S_2 与被测带材表面之间的距离分别为 x_1 和 x_2 。若带材厚度不变，则被测带材上、下表面之间的距离总有 $x_1 + x_2 = \text{常数}$ 的关系存在。两传感器的输出电压之和为 $2U_0$ 数值不变。如果被测带材厚度改变量为 $\Delta\delta$ ，则两传感器与带材之间的距离也改变了一个 $\Delta\delta$ ，两传感器输出电压此时为 $2U_0 + \Delta U$ 。 ΔU 经放大器放大后，通过指示仪表电路即可指示出带材的厚度变化值。带材厚度给定值与偏差指示值的代数 sum 就是被测带材的厚度。

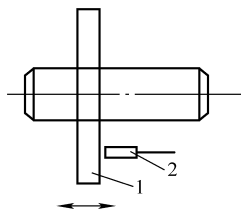


图 3-29 汽轮机主轴的轴向位移测量

1—联轴器 2—高频反射式电涡流传感器

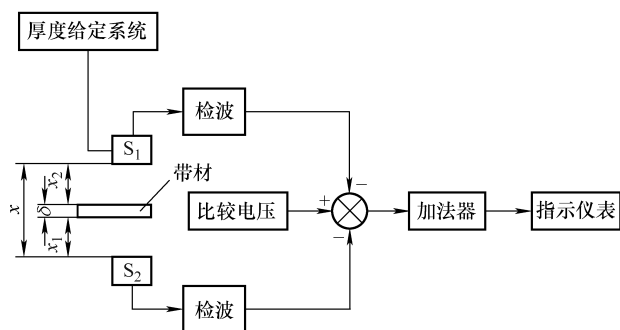


图 3-30 高频反射式涡流测厚仪测试系统

3. 转速测量

如图 3-31 所示，在与被测物体同轴安装的测量轮上开有一个或几个凹槽，或者是凸起的齿，将电涡流式传感器安放在测量轮附近，测量轮在旋转过程中，传感器线圈与导体之间

的距离有规律地变化, 根据输出信号的频率即可得到被测旋转体的转速。

4. 振幅测量

如图 3-32 所示, 将电涡流式传感器安放在被测物体附近, 当被测物体振动时, 测得传感器线圈距离导体的距离即可知被测体振动的振幅。

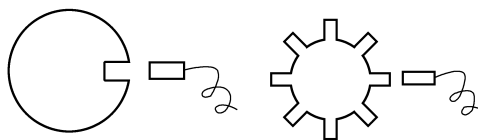


图 3-31 转速测量

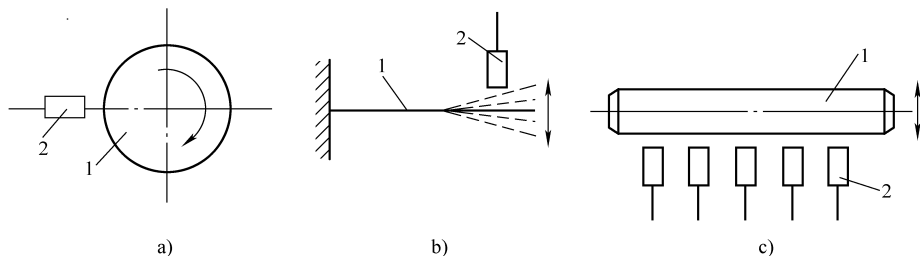


图 3-32 电涡流式传感器测量振幅

- a) 监控汽轮机或空气压缩机主轴的径向振动 b) 测量发动机涡轮叶片的振幅
c) 轴的振动形式, 获得传感器所在位置轴的瞬时振幅

5. 涡流探伤

电涡流式传感器可以用来检查金属表面和内部的裂纹以及焊接部位的缺陷等。使传感器与被测物体保持距离不变, 如果在金属表面或者内部存在裂纹, 金属的电阻率、磁导率就会变化, 这将引起传感器参数的变化, 使输出发生改变, 根据输出的变化即可知裂纹或缺陷的存在。

3.5 压磁式传感器

3.5.1 压磁效应

压磁式传感器是基于压磁效应工作的, 压磁效应是磁致伸缩逆效应。

1. 磁致伸缩效应

某些铁磁体及其合金, 以及某些铁氧体在外磁场作用下产生机械变形的现象称为磁致伸缩效应或称焦耳效应。它是由于这些强磁性体内部的磁畴在其自发磁化方向的长度与其他方向是不同的, 在没有外磁场作用时, 各个磁畴排列杂乱, 磁化均衡, 当有外加磁场时, 均衡被破坏, 各个磁畴转动, 使它们的磁化方向尽量转到与外磁场相一致, 因而磁性体沿外磁场方向的长度发生变化。伸缩量一般很小, 其伸缩量级约为 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ mm}$ 。具有磁致伸缩效应的磁性材料有硅钢片、坡莫合金等。

2. 压磁效应

磁致伸缩材料在外力（或应力、应变）作用下, 引起内部发生形变, 产生应力, 使各磁畴之间的界限发生移动, 磁畴磁化强度矢量转动, 从而使材料的磁化强度和磁导率发生相应的变化。这种由于应力使磁性材料磁性质变化的现象称为压磁效应, 也称逆磁致伸缩

效应。

压磁材料受压力时，在作用力方向磁导率减小，而在与作用力垂直方向磁导率略有增大；作用力是拉力，结果相反。作用力取消后，磁导率恢复原值。其压磁效应还与外磁场有关。

利用压磁效应制成压磁式传感器，可以用来测量拉力、压力、重量、力矩和弯矩等物理量。

3.5.2 压磁式传感器

压磁式力传感器又称为磁弹性传感器，按照其工作原理，可以分为阻流圈式、变压器式、桥式、应变式等几种结构形式，其中阻流圈式、变压器式及桥式应用较多。

1. 阻流圈压磁式传感器

如图 3-33 所示，阻流圈压磁式传感器只有一个线圈，这个线圈既作为励磁线圈也作为测量线圈。给线圈通以交流电，铁心在外力 F 作用下，其磁导率发生变化，磁阻和磁通也相应的发生变化，使线圈的阻抗发生变化。阻流圈压磁式传感器可以用来测量压力，其优点是结构简单，使用可靠。

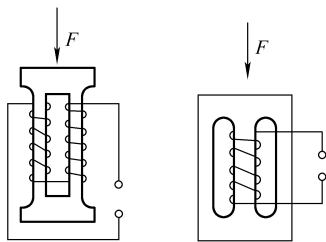


图 3-33 阻流圈压磁式传感器原理图

2. 变压器压磁式传感器

变压器压磁式传感器有两组线圈，一组是励磁线圈，另一组是测量线圈，它们之间通过磁进行耦合。励磁线圈和测量线圈都绕在压磁元件上。压磁元件是由铁磁材料薄片用胶粘剂粘结而成。图 3-34 所示为变压器压磁式传感器的工作原理图。

将硅钢片冲压成一定的形状，中间有四个对称的冲孔 A、B、C、D，在四个冲孔中绕有两个正交的线圈。A、B 孔中是励磁线圈，C、D 孔中是测量线圈，它与测量电路相连。在励磁线圈中通以稳定的交变励磁电流，当压磁元件不受外力作用时，由于铁心的各向同性，励磁线圈产生同心圆状的磁场，其磁力线不与测量线圈交链，测量线圈输出的感应电动势为零。当压磁元件受到外力作用后，沿外力的作用方向磁导率下降，而垂直于作用力方向磁导率增大，磁力线便成椭圆形，一部分磁力线通过 C、D 线圈，从而产生感应电动势。外作用力越大，与 C、D 交链的磁通越多，感应电动势越大。

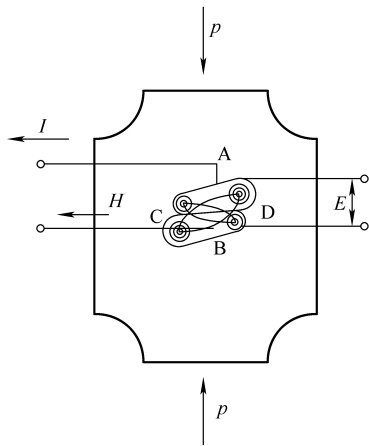


图 3-34 变压器压磁式传感器的工作原理图

3.5.3 压磁式传感器的应用

压磁式传感器具有结构简单、线性好、输出功率大、抗干扰能力强、寿命长、维护方便、适于恶劣的工作环境等优点，广泛应用于冶金、矿山、印刷、造纸、运输等行业。

1. 压磁式测力传感器

图 3-35 所示为一种典型的压磁式测力传感器结构, 它由压磁元件 1、弹性梁 2 及承载钢球 3 组成。弹性梁的作用是对压磁元件施加预压力和减小横向力和弯矩的干扰, 钢球则用来保证力 F 沿垂直方向作用。当力通过钢球作用在压磁元件上, 在压磁元件上的测量线圈中产生与作用力成正比的感应电动势。

2. 非晶带加速度传感器

图 3-36 所示为非晶带加速度传感器的结构示意图, 非晶带粘接在支撑臂上, 振动块将非晶带端部夹紧使其构成一个闭合回路。通过调整支撑臂的距离使非晶带有合适的预紧力。非晶带上有一个励磁线圈和一个测量线圈, 励磁线圈上的交流激励电流, 产生磁场作用在测量线圈上使其产生感应电动势。当非晶带未受力时, 测量线圈产生的感应电动势的大小只与回路中的磁感应强度的变化率成正比。当非晶带受到力的作用, 其磁导率发生变化, 使感应电动势的大小也随之发生变化。非晶带所受到的力与振动块的加速度成正比, 故测量线圈产生的感应电动势幅值就正比于振动块的加速度。

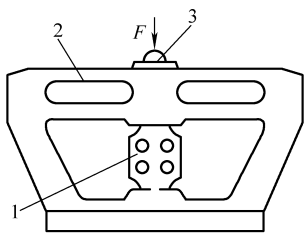


图 3-35 压磁式测力传感器

1—压磁元件 2—弹性梁 3—承载钢球

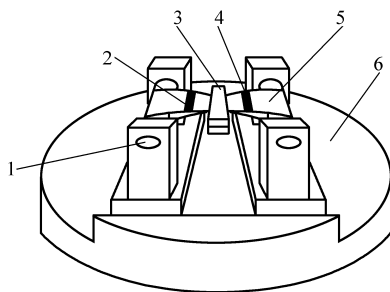


图 3-36 非晶带加速度传感器

1—支撑臂 2—励磁线圈 3—振动块 4—测量线圈
5—非晶带 6—基座

习 题

3-1 什么是电感传感器? 介绍它的主要分类。

3-2 产生零点残余电压的原因是什么? 可以采取哪些措施减小零点残余电压?

3-3 有一只螺管形差动式电感传感器, 已知电源电压 $U = 4V$, $f = 400Hz$, 传感器线圈铜电阻和电感量分别为 $R = 40\Omega$, $L = 30mH$, 用两只匹配电阻设计成 4 臂等阻抗电桥, 如图 3-37 所示, 试求:

(1) 匹配电阻 R_1 和 R_2 的值为多大才能使电压灵敏度达到最大;

(2) 当 $\Delta Z = 10\Omega$ 时, 接成差动电桥后的输出电压值。

3-4 说明什么是电涡流效应。电涡流传感器有什么特点? 举例说明电涡流传感器在实践中的应用。

3-5 请解释压磁效应、磁致伸缩效应与逆磁致伸缩效应。

3-6 利用电涡流法测量板材厚度, 已知激励电源频率 $f = 1MHz$, 被测材料相对磁导率 $\mu_r = 1H/m$, 电阻率 $\rho = 2.9 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$, 被测板厚为 $(1 \pm 0.2) mm$ 。求:

(1) 采用高频反射法测量时, 涡流穿透深度 h 为多少?

(2) 能否用低频透射法测量板厚? 若可以需要采取什么措施? 画出检测示意图。

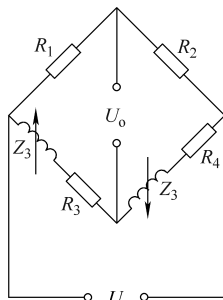


图 3-37 电桥电路

参 考 文 献

- [1] 周真, 苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] 梁福平. 传感器原理及检测技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [3] 唐文彦. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 陈建元. 传感器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 何道清, 张禾, 谌海云. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 吕勇军. 传感器技术实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 徐科军, 马修水, 李晓林. 传感器与检测技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [8] 梁福平. 传感器原理及检测技术学习与实践指导 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014.
- [9] 陶艳红, 余成波. 传感器与现代检测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

第4单元

电容式传感器

学习要点

- ◆ 变极距式电容传感器结构、工作原理、基本特性和转换电路；
- ◆ 差动脉冲调宽电路、双 T 二极管交流电桥；
- ◆ 边缘效应、寄生电容产生原因及减小方法。

相关知识链接

- ◆ GB/T 28854—2012 硅电容式压力传感器；
- ◆ http://www.turek.org.cn/product_info.asp?productid=1140&productname=电容式传感器；
- ◆ 张宇鹏，徐钰蕾，王昱棠．高精度电容式角位移传感器测量方法 [J]．仪器仪表学报，2014，35（6）；
- ◆ 葛川，张德福，李朋志，等．电容式位移传感器的线性度标定与不确定度评定 [J]．光学精密工程，2015，23（9）。

引导案例

电容层析成像技术

经典的电容传感器将位移、介电常数及其相关量值的变化转换为电容值变化，用于测量几何量、机械量、化学量等。同时，电容传感器具有“接近探测”（proximity detection）特性，即感应物体接近而非实际接触。汽车无钥匙进入和无钥匙启动是接近探测的一个应用实例，授权用户用手接近车门，即可将其打开或者启动引擎。近几年来，随着智能手机、平板电脑的兴起，电容式触摸屏市场得到了较快的发展，Win8 推动超级本市场繁荣，同时带来触控屏大屏市场繁荣。手指与屏幕后的电极会形成一个耦合电容，电极产生的电流会流向触点，而电流强弱与手指到电极的距离成正比，就算屏幕沾有污秽、尘埃或油渍，电容式触摸屏依然能准确算出触摸位置。

电容层析成像（electrical capacitance tomography, ECT）是电容传感器更为复杂的应用形式。气（汽）液、气固、液固等两相流或多相流在热能动力、石油、化工、冶金、建筑环境等领域普遍存在，两相流或多相流的流动特性对系统的控制、计量、节能、环保及运行的可靠性具有至关重要的影响，因此，多相流检测技术的研究受到广泛关注。

电容层析成像系统在传输管壁上均匀粘贴着铜质电极板，通过它对管道内流体施加电压。由于被测流体包含的不同相元素具有不同的介电常数，而被测流体的相分布在流动方

向上通常是变化的。流经管道时,极板范围内所测得流体的等价介电常数发生改变。此时由数据采集系统将获取的电容值发送给计算机,由图像重建计算机负责根据适合的反演算法将被测流体的截面进行重建,并以可视化的方式实时显示。在 ECT 研究领域中,常用的极板个数为 6/8/12/16。从电容值角度考虑,传感器的性能由极板之间产生的电容和外界电磁场产生的寄生电容共同决定。由于寄生电容不稳定,它的值过大会影响待测电容,因此管道外部接了金属箔屏蔽罩进行接地以防止干扰。在 ECT 工作过程中要测量极板对间的电容值,同时其他所有极板与该极板对之间也存在寄生电容,因此可在每两个相邻的极板之间插入一块径向极板,与外围屏蔽罩共同接地,以降低寄生电容对传感器性能造成的影响。

ECT 因具有快速、安全、廉价等优点而被认为是一种具有广阔发展前景的过程成像技术。目前,ECT 技术已被应用于气液两相流空隙率测量及流型识别、流化床气固两相浓度分布可视化、气力输送、火焰可视化、冻土水分迁移过程的可视化等多个领域。

电容式传感器是将被测非电量的变化转换为电容量变化的一种传感器。它结构简单,体积小、分辨力高,可非接触式测量,并能在高温、高辐射和强烈振动等恶劣条件下工作,广泛应用于压力、差压、液位、振动、位移、加速度、成分含量等多方面测量。随着材料、工艺、电子技术,特别是集成技术的发展,使电容式传感器的优点得到发扬而缺点不断地得到克服,成为一种很有发展前途的传感器。电容式传感器正逐渐成为一种高灵敏度、高精度,在动态、低压及一些特殊测量方面大有发展前途的传感器。

4.1 电容式传感器的工作原理

4.1.1 工作原理

电容式传感器的基本原理可以用图 4-1 所示平板电容器来说明。当忽略边缘效应时,其电容量 C 为

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{\delta} \quad (4-1)$$

式中 S ——极板间相互覆盖面积 (m^2);

δ ——极板间距离 (m);

ε_r ——相对介电常数;

ε_0 ——真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$;

ε ——电容极板间介质的介电常数 (F/m)。

由式 (4-1) 可知,电容 C 是 δ 、 S 和 ε 的函数,当被测量的变化使 δ 、 S 和 ε 中的任意一个参数发生变化时,电容 C 也随之改变,再通过相应的测量电路,将电容的变化转换为电信号输出,从而反映被测参数的变化。

4.1.2 结构形式

在实际应用时,常常仅改变 δ 、 S 和 ε_r 中的某一个参数使 C 发生变化。由此,电容式传感器可分为三种基本类型:变极距(变间隙)(δ)型、变面积(S)型和变介电常数(ε)型。表 4-1 列出了电容式传感器的三种基本结构形式。它们又可按位移的形式分为线位移和

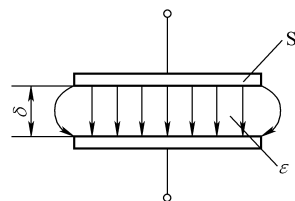


图 4-1 平板电容器

角位移两种。每一种又依据传感器极板形状的不同分成平板或圆板形和圆柱（圆筒）形，虽然还有球面形和锯齿形等其他的形状，但一般很少用，故表中未列出。

表 4-1 电容式传感器的结构形式

基本类型		单组式	差动式
δ 型	线位移		
	角位移		
S 型	线位移		
	角位移		
ε 型	线位移		
	角位移		

每一种类型的传感器又分为单组式和差动式两种。差动式传感器一般优于单组（单边）式，具有灵敏度高、线性范围宽、稳定性高等优点，并且能补偿温度误差。

4.2 电容式传感器的特性

4.2.1 变极距型电容式传感器

图 4-2 为变极距型电容传感器的原理图。当传感器的 ε 和 S 为常数，初始极距为 δ_0 ，由式 (4-1) 可知其初始电容量 C_0 为

$$C_0 = \frac{\varepsilon S}{\delta_0}$$

当动极板因被测量变化而上下移动使 δ_0 变化 $\Delta\delta$ 时，电容的变化量为 ΔC ，则有

$$\Delta C = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 - \Delta\delta} - \frac{\varepsilon S}{\delta_0} = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta} \quad (4-2)$$

由式 (4-2) 可以看出， ΔC 与 $\Delta\delta$ 存在着非线性关系（如图 4-3 所示），所以这种传感器在工作时，动极板的移动范围不能太大，只能在一个较小的范围内移动，即当 $\Delta\delta \ll \delta_0$ （即量程远小于极板间初始距离）时，可认为 ΔC 与 $\Delta\delta$ 之间是线性的。

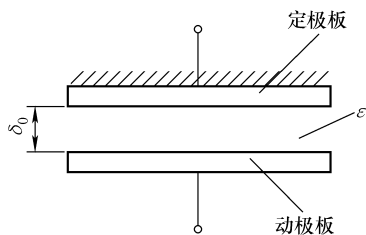


图 4-2 变极距型电容传感器的原理图

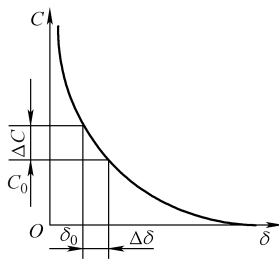


图 4-3 电容 C 与极距 δ 的特性曲线

由式 (4-2) 可得出电容的相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta} = \frac{\frac{\Delta\delta}{\delta_0}}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \quad (4-3)$$

当 $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ 时，可将上式展开为泰勒级数

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (4-4)$$

忽略高次项，得到 $\Delta\delta$ 与 ΔC 之间近似线性的关系

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (4-5)$$

得到

$$K = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\Delta\delta} = \frac{1}{\delta_0} \quad (4-6)$$

式中 K ——电容式传感器的灵敏度，即单位输入引起的电容相对变化量的大小。

如果考虑式 (4-4) 中的线性项及二次项，则

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right) \quad (4-7)$$

因此, 以式 (4-5) 作为传感器的特性使用时, 其相对非线性误差 e_f 为

$$e_f = \frac{\left| \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 \right|}{\left| \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right|} \times 100\% = \left| \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right| \times 100\% \quad (4-8)$$

由以上讨论可知

1) 变极距型电容传感器的灵敏度 K 与初始极距 δ_0 成反比, 要提高灵敏度 K , 应减小初始极距 δ_0 , 但电容极板间最小距离受击穿电压限制。为了避免电容击穿, 可在极板间采用高介电常数的材料 (如云母、塑料膜等) 作介质, 例如云母的相对介电常数 $\varepsilon_g = 7$, 远大于空气的介电常数。

2) 变极距型电容传感器只有在 $|\Delta \delta / \delta_0|$ 很小时, 才有近似的线性输出; 考虑到传感器的灵敏度 K , δ_0 取值不能太大, 因此为保证线性度, 变极距型电容传感器常工作在一个较小的范围内 (0.01 μm 至零点几毫米), 而且最大 $\Delta \delta$ 应小于极板间距 δ_0 的 $1/10 \sim 1/5$ 。

为了提高传感器的灵敏度和改善非线性关系, 变极距型电容传感器一般采用差动式结构 (如图 4-4 所示), 初始位置时, 动极板位于两定极板中间, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$, 两边初始电容相等。当动极板有位移 $\Delta \delta$ 时, 两边极距为 $\delta_1 = \delta_0 - \Delta \delta$, $\delta_2 = \delta_0 + \Delta \delta$; 相应地, 一个电容增加, 另一个电容减少相同的量。容易得到传感器的总电容相对变化量为

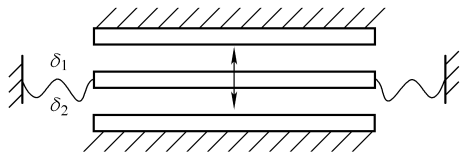


图 4-4 变极距型电容传感器差动式结构

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (4-9)$$

忽略高次项, 电容相对变化量近似为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (4-10)$$

从而得到差动式变极距型电容传感器的灵敏度为

$$K' = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\frac{\Delta \delta}{\delta_0}} = 2 \frac{1}{\delta_0} \quad (4-11)$$

相对非线性误差为

$$e'_f = \frac{\left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2}{\left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)} \times 100\% = \frac{\Delta \delta}{2 \delta_0} \times 100\% \quad (4-12)$$

与式 (4-4) 比较可以看出, 式 (4-9) 的括号中减少了奇次项, 非线性误差减小了; 比较式 (4-12) 与式 (4-8), 差动式变极距电容传感器的非线性误差比单边式的减小了一半; 由式 (4-11) 可知, 差动式变极距电容传感器的灵敏度比单个变极距电容传感器提高了一倍。而且由于结构上的对称性, 它还能有效地补偿温度变化所造成的误差。

4.2.2 变面积型电容式传感器

变面积型电容传感器的工作原理如图 4-5a、b 所示。由于平板形结构对极距变化非常敏感,在一般情况下,变面积型电容传感器常采用圆柱形结构。当忽略边缘效应时,线位移单组式的变面积型电容传感器的电容量 C 为

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(r_2/r_1)} \quad (4-13)$$

式中 l ——外圆筒与内圆筒覆盖部分的长度 (m);

r_2 、 r_1 ——分别为外圆筒内半径和内圆柱外半径 (m),即它们的工作半径。

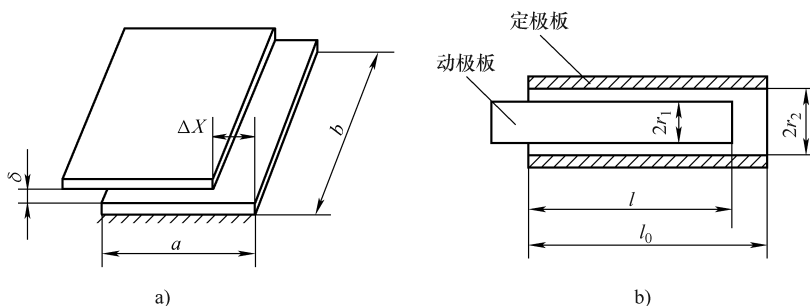


图 4-5 变面积型电容传感器原理图

a) 平板形结构 b) 圆柱形结构

当两圆筒相对移动 Δl 时,忽略边缘效应,电容变化量 ΔC 为

$$\Delta C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(r_2/r_1)} - \frac{2\pi\epsilon(l - \Delta l)}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi\epsilon\Delta l}{\ln(r_2/r_1)} = C_0 \frac{\Delta l}{l} \quad (4-14)$$

式中 C_0 ——传感器初始电容值。

可见,这类传感器具有良好的线性。变面积型电容传感器与变极距型相比,其灵敏度较低。因此,在实际使用中常采用差动结构,以提高灵敏度。这种传感器一般用来测角位移或较大的线位移。

4.2.3 变介质型电容式传感器

变介电常数型电容传感器有较多的结构型式,大多用来测量电介质的厚度(如图 4-6 所示)、位移、液位(如图 4-7 所示),还可根据极间介质的介电常数随温度、湿度的改变而改变的特性来测量介质材料的温度、湿度等。若忽略边缘效应,表 4-1 中 ϵ 型单组式平板形线位移传感器和图 4-6 与图 4-7 中所示传感器的电容量与被测量的关系分别为

$$C = \frac{bl_x}{(\delta - d)/\epsilon_0 + d/\epsilon} + \frac{b(a - l_x)}{\delta/\epsilon_0} \quad (4-15)$$

$$C = \frac{ab}{(\delta - d)/\epsilon_0 + d/\epsilon} \quad (4-16)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0)h_x}{\ln(r_2/r_1)} \quad (4-17)$$

式中 δ 、 h ——分别为两固定极板间的距离 (m) 和极筒重合部分的高度 (m);

d 、 h_x 、 ε ——分别为被测物的厚度 (m)、被测液面高度 (m) 和它的介电常数 (F/m)；
 a 、 b 、 l_x ——分别为固定极板长度 (m) 和宽度 (m) 及被测物进入两极板间的长度 (m)；
 r_1 、 r_2 ——分别为内极筒外半径和外极筒内半径 (m)；
 ε_0 ——空气的介电常数 (F/m)。

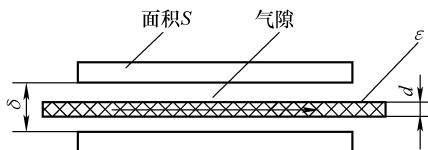


图 4-6 厚度传感器

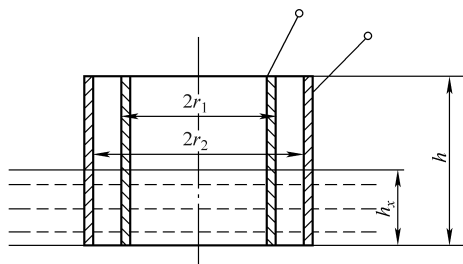


图 4-7 液位传感器

在以上对所有电容式传感器的分析中，均未考虑电场的边缘效应，故实际电容量将与计算值有所不同。这不仅使电容式传感器的灵敏度降低而且增加非线性。为了减少边缘效应的影响，可以适当减小极板间距，但这易引起击穿，并限制了测量范围。较好的办法是采用等位环（如图 4-8 所示）。在使用时，使等位环 3 与被保护的极板 2 在同一平面上并将极板 2 包围，等位环 3 与极板 2 电绝缘但等电位，这就能使极板 2 的边缘电力线平直，极板 1 和 2 之间的电场基本保持均匀，而发散的边缘电场将发生在等位环 3 外周，不影响传感器两极板间电场。

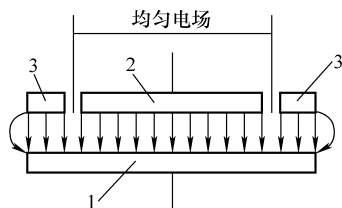


图 4-8 带有等位环的平板电容传感器原理图

1、2—极板 3—等位环

4.3 电容式传感器的测量电路

4.3.1 电容式传感器等效电路

实际上，电容式传感器并不是一个纯电容，其完整的等效电路示于图 4-9a 中， L 包括引线电缆电感和电容式传感器本身电感； r 由引线电阻、极板电阻和金属支架电阻组成； C_0 为传感器本身的电容； C_p 为引线电缆、所接测量电路及极板与外界所形成的总寄生电容； R_g 是极间等效漏电阻，它包括极板间的漏电损耗和介质损耗、极板与外界间的漏电损耗和介质损耗。

所有这些参量的作用因工作的具体情况不同而不同。在低频时，传感器电容的阻抗非常大，因此 L 和 r 的影响可以忽略，其等效电路可简化为图 4-9b，其中等效电容 $C_e = C_0 + C_p$ ，等效电阻 $R_e \approx R_g$ 。

在高频时，传感器电容的阻抗变小，因此 L 和 r 的影响不可忽略，而漏电的影响可忽略，其等效电路可简化为图 4-9c，其中 $C_e = C_0 + C_p$ ，而 $r_e \approx r$ 。引线电缆的电感很小，只有工作频率在 10MHz 以上时，才考虑其影响，而且实际使用时保证与标定时的接线等条件相

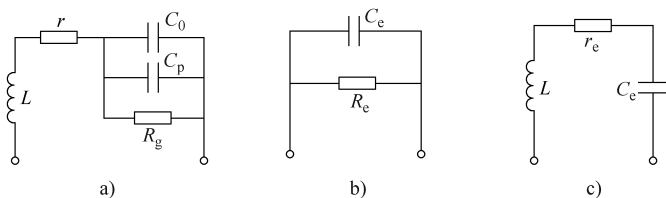


图 4-9 带有等位环的平板电容传感器原理图

a) 完整等效电路 b) 低频等效电路 c) 高频等效电路

同，即可消除 L 的影响。

传感器电容极板之间的有功损耗致使传感器电容电压和电流相位差比 90° 小一个 δ 角，其有功损耗大小用损耗角 $\tan\delta$ 来表示。对于一般以低损耗的空气 ($\tan\delta < 10^{-5}$) 等为介质的电容式传感器，其影响可忽略不计。但对介质损耗大的电容式传感器则不能忽略， $\tan\delta$ 与许多因素有关，如所加电压、工作频率、环境温度及介质的潮湿度等。而电容式传感器利用这些特点又可测量更多的量，如石油的含水量和种子或土壤的湿度等。

电容式传感器的等效电路存在一谐振频率，通常为几十兆赫。供电电源频率必须低于该谐振频率，一般为其 $1/3 \sim 1/2$ ，传感器才能正常工作。

4.3.2 变压器电桥

图 4-10 所示为电容传感器的电桥测量电路，它一般用稳频、稳幅和固定波形的低阻信号源去激励，最后经过电流放大及相敏检波处理得到直流输出信号。

图 4-10 中， C_1 、 C_2 是两个差动电容，也可使其中之一为固定电容，另一为电容式传感器。当传感器极板在中心位置时，电容 $C_1 = C_2 = C_0$ ，电桥平衡，输出 $\dot{U}_o = 0$ ；当传感器极板位移 $\Delta\delta$ 引起其电容变化 ΔC 时，测量电桥有不平衡输出。当电桥输出端开路（负载阻抗为无穷大）时，电桥的空载输出电压为

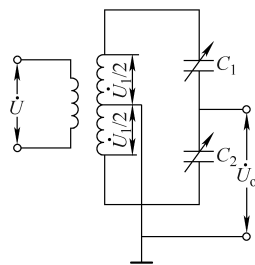


图 4-10 变压器电桥测量电路

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U} Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{\dot{U}}{2} = \frac{\dot{U}}{2} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right) \quad (4-18)$$

式中 Z_1 、 Z_2 ——传感器两个差动电容的复阻抗。

将 $Z_1 = 1/(j\omega C_1)$ ， $Z_2 = 1/(j\omega C_2)$ 代入得

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{2} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta C}{C_0} \quad (4-19)$$

对于变极距型差动电容式传感器，有

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 - \Delta\delta} \\ C_2 = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 + \Delta\delta} \end{cases} \quad (4-20)$$

代入式 (4-19) 可得

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (4-21)$$

由式(4-21)可见,把变极距型差动电容式传感器接入变压器电桥,其电桥的输出电压与输入位移成线性关系。

4.3.3 双 T 二极管交流电桥

双 T 二极管交流电桥(又称二极管 T 形网络)如图 4-11 所示。它是利用电容器充放电原理组成的电路。其中, $\dot{U}$ 是高频电源,提供幅值为 U 的对称方波(正弦波也适用); VD_1 、 VD_2 为特性完全相同的两个二极管, $R_1 = R_2 = R$; C_1 、 C_2 为传感器的两个差动电容。当传感器没有位移输入时, $C_1 = C_2$, R_L 在一个周期内流过的平均电流为零,无电压输出。当 C_1 和 C_2 变化时, R_L 上产生的平均电流将不再为零,因而有信号输出。其输出电压的平均值为

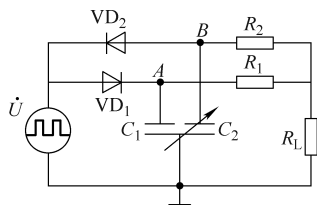


图 4-11 双 T 二极管交流电桥

$$\bar{U}_o = I_L R_L = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T [I_1(t) - I_2(t)] dt \right\} \quad (4-22)$$

由式(4-22)可得

$$\bar{U}_o \approx \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L U f (C_1 - C_2) \quad (4-23)$$

式中 f —— 电源频率。

当 R_L 已知时,令

$$K = \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L \quad (4-24)$$

则

$$\bar{U}_o = K U f (C_1 - C_2) \quad (4-25)$$

该电路适用于各种电容式传感器。其应用特点和要求:

- 1) 电源、传感器电容、负载均可同时在一端接地。
- 2) 二极管 VD_1 、 VD_2 工作于高电平下,因而非线性失真小。
- 3) 其灵敏度与电源频率有关,因此电源频率需要稳定。
- 4) 将 VD_1 、 VD_2 、 R_1 、 R_2 安装在 C_1 、 C_2 附近能消除电缆寄生电容影响;线路简单。
- 5) 输出电压较高。
- 6) 负载电阻 R_L 将影响电容放电速度,从而决定输出信号的上升时间。

4.3.4 差动脉冲调宽电路

差动脉冲调宽电路也称为差动脉宽(脉冲宽度)调制电路,利用对传感器电容的充放电使电路输出脉冲的宽度随传感器电容量变化而变化。通过低通滤波器就能得到对应被测量变化的直流信号。图 4-12 为差动脉冲调宽电路原理图,图中 C_1 、 C_2 为差动式传感器的两个电容,若用单组式,则其中一个为固定电容,其电容值与传感器电容初始值相等; A_1 、 A_2

是两个比较器, U_r 为其参考电压。设接通电源时, 双稳态触发器的 Q 端为高电位, $\bar{Q}$ 端为低电位, 并分别控制开关 S_1 和 S_2 使电容 C_1 充电、 C_2 放电。同时利用 $\bar{Q}$ 控制开关 S_3 使输出电压 U_o 为 $+U$ 。直至 C_1 的电位 U_{C1} 等于参考电压 U_r 时, 比较器 A_2 输出脉冲, 使双稳态触发器翻转, Q 端变为低电位, $\bar{Q}$ 端变为高电位, 并控制开关 S_1 、 S_2 、 S_3 动作, 使电容 C_1 放电、 C_2 充电, 输出电压 U_o 为 $-U$ 。如此周而复始, 则输出电压 U_o 为宽度受 C_1 、 C_2 调制的矩形脉冲。当 $C_1 = C_2$ 时, U_o 电压波形如图 4-13a 所示, 其平均值为零。但当 C_1 、 C_2 值不相等时, C_1 、 C_2 充电时间常数就发生改变, 若 $C_1 > C_2$, 则 U_o 波形如图 4-13b 所示, 其平均值不为零。

U_o 经低通滤波后, 就可得到一直流电压 U'_o 为

$$U'_o = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U - \frac{T_2}{T_1 + T_2} U = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U \quad (4-26)$$

式中 T_1 、 T_2 ——分别为 C_1 和 C_2 的充电时间;

U ——输出电压 U_o 正反向幅值。

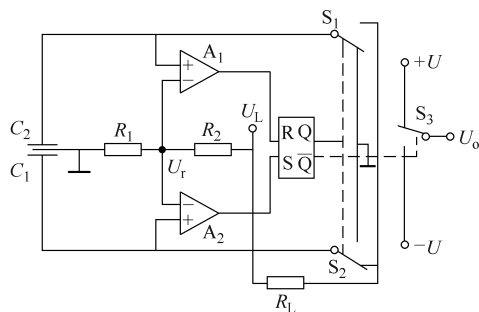


图 4-12 差动脉冲调宽电路原理图

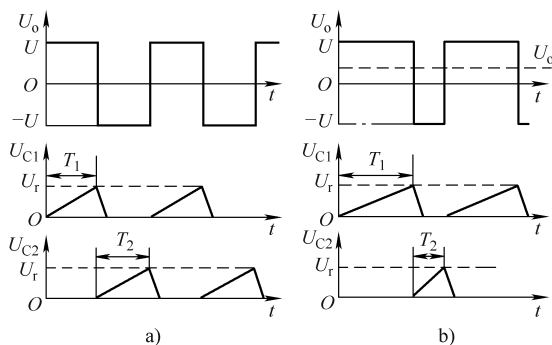


图 4-13 差动脉冲调宽电路各点电压波形

a) $C_1 = C_2$ 时输出波形 b) $C_1 > C_2$ 时输出波形

C_1 、 C_2 的充电时间 T_1 、 T_2 为

$$T_1 = R_L C_1 \ln \frac{U_L}{U_L - U_r}$$

$$T_2 = R_L C_2 \ln \frac{U_L}{U_L - U_r}$$

则得

$$U'_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U \quad (4-27)$$

因此, 输出的直流电压与传感器两电容差值成正比。

设电容 C_1 和 C_2 的极间距离和面积分别为 δ_1 、 δ_2 和 S_1 、 S_2 , 将式 (4-1) 代入式 (4-27), 对差动式变极距型和变面积型电容式传感器可分别得

$$U'_o = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_2 + \delta_1} U, U'_o = \frac{S_1 - S_2}{S_2 + S_1} U \quad (4-28)$$

可见差动脉冲调宽电路能适用于任何差动式电容式传感器, 并具有理论上的线性特性。

这是十分重要的性质。在此指出：具有这个特性的电容测量电路还有差动变压器式电容电桥和由二极管 T 形电路经改进得到的二极管环形检波电路等。

另外，差动脉冲调宽电路采用直流电源，其电压稳定度高，不存在稳频、波形纯度的要求，也不需要相敏检波与解调等；对元件非线性要求；经低通滤波器可输出较大的直流电压，对输出矩形波的纯度要求也不高。

4.3.5 运算放大器电路

图 4-14 为运算放大器电路原理图，它由传感器电容 C_x 和固定电容 C 以及运算放大器 A 组成。其中 U_i 是信号源电压， U_o 为输出电压信号。这实质上是一种反相输入比例放大电路，只不过用电容代替了其中的电阻。这种电路的最大特点是能够克服变极距型电容传感器的非线性。由理想运算放大器工作原理可知，在深度负反馈条件下，运算放大器的输入电流 $I_i = 0$ ，则

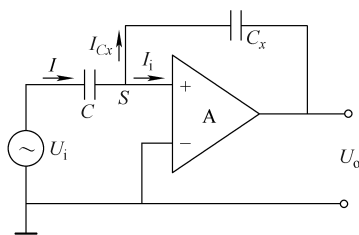


图 4-14 运算放大器式电路原理图

$$\dot{U}_o = -\frac{Z_f}{Z_i} \dot{U}_i = -\frac{-j\frac{1}{\omega C_x}}{-j\frac{1}{\omega C_0}} \dot{U}_i = -\frac{C}{C_x} \dot{U}_i \quad (4-29)$$

将 $C_x = \varepsilon S / \delta$ 代入上式，得

$$\dot{U}_o = -\frac{\dot{U}_i C}{\varepsilon S} \delta \quad (4-30)$$

式中的负号表明输出电压与电源电压反相。很显然，输出电压与电容极板间距呈线性关系，这就从原理上解决了变极距型电容式传感器的非线性问题。而式（4-30）是在假定放大器开环放大倍数 $A \rightarrow \infty$ 、输入阻抗 $Z_i \rightarrow \infty$ 的条件下导出的，对实际运算放大器来说，由于不能完全满足理想运放条件，非线性误差仍将存在，但是在增益和输入阻抗足够大时，这种误差是相当小的。这种电路结构不易采用差动测量。

此外由式（4-30）可知，输出信号的电压 U_o 还与信号源电压 U_i 、固定电容 C 及电容式传感器其他参数 ε 、 S 等有关，这些参数的波动都将使输出产生误差。因此该电路要求固定电容 C 必须稳定，信号源电压 U_i 必须采取稳压措施，这将使整个测量电路变得较为复杂。

4.3.6 调频电路

调频测量电路将电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分，当输入量导致电容量发生变化时，振荡器的振荡频率就发生变化。若将频率作为测量系统的输出量，用以判断被测非电量的大小，此时系统是非线性的，不易校正，因此必须加入鉴频器，将频率的变化转换为电压振幅的变化，经放大后显示或输出。调频测量电路的原理框图如图 4-15 所示。

调频振荡器的振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (4-31)$$

$$C = C_1 + C_0 \pm \Delta C + C_2$$

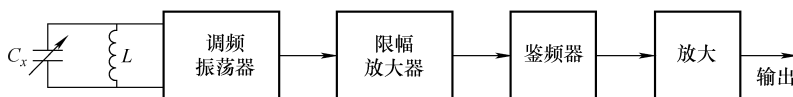


图 4-15 调频测量电路原理框图

式中 L ——振荡回路的电感；

C ——振荡回路的总电容，其中 C_1 为振荡回路固有电容 (μF)， C_2 为传感器引线分布电容 (μF)， $C_x = C_0 \pm \Delta C$ 为传感器的电容 (μF)。

当被测信号为零时， $\Delta C = 0$ ，则 $C = C_1 + C_0 + C_2$ ，所以振荡器有一个固有频率 f_0

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_1 + C_2 + C_0)}} \quad (4-32)$$

当被测信号不为零时， $\Delta C \neq 0$ ，振荡器频率有相应变化，此时频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_1 + C_2 + C_0 \mp \Delta C)}} = f_0 \pm \Delta f \quad (4-33)$$

调频电容传感器测量电路具有较高的灵敏度，可以测量高至 $0.01\mu\text{m}$ 级位移变化量。信号的输出频率易于用数字仪器测量，并与计算机通信，抗干扰能力强，可以发送、接收，以达到遥测遥控的目的。

4.4 电容式传感器的特点及设计要点

4.4.1 电容式传感器特点

1. 电容式传感器的优点

电容式传感器与电阻式、电感式等传感器相比具有以下优点：

(1) 测量范围大 金属应变丝由于应变极限的限制， $\Delta R/R$ 一般低于 1%，而半导体应变片可达 20%，电容传感器相对变化量可大于 100%。

(2) 温度稳定性好 电容式传感器的电容值一般与电极材料无关，有利于选择温度系数低的材料，又因电容器本身功耗非常小，所以发热极小，因此传感器具有良好的零点稳定性，由自身发热而引起的零漂可以认为是不存在的。

(3) 结构简单、适应性强 电容式传感器结构简单，易于制造，易于保证高的精度；可以做得非常小巧，以实现某些特殊的测量；电容式传感器一般用金属作电极、以无机材料（如玻璃、石英、陶瓷等）作绝缘支承，因此能工作在高低温、强辐射及强磁场等恶劣的环境中，可以承受很大的温度变化，承受高压、高冲击、过载等；能测超高压和低压差，也能对带磁工件进行测量。

(4) 动态响应好 电容式传感器由于极板间的静电引力很小（约几个 10^{-5}N ），需要的作用能量极小，它的可动部分可以做得很小很薄，即质量很轻，因此其固有频率很高，动态响应时间短，能在几兆赫的频率下工作，特别适合动态测量。又由于其介质损耗小可以用较高频率供电，因此系统工作频率高。它可用于测量高速变化的参数，如测量振动、瞬时压力等，且具有很高的灵敏度。

(5) 可以实现非接触测量、具有平均效应 对于回转轴的振动或偏心、小型滚珠轴承的径向间隙等,当采用非接触测量时,电容式传感器具有平均效应,可以减小工件表面粗糙度等对测量的影响。

2. 电容式传感器的缺点

(1) 输出阻抗高、负载能力差 电容式传感器的电容量受其电极几何尺寸等限制,一般为几十到几百皮法,使传感器的输出阻抗很高,尤其当采用音频范围内的交流电源时,输出阻抗高达 $10^6 \sim 10^8 \Omega$ 。因此传感器带负载能力差,易受外界干扰影响而产生不稳定现象,严重时甚至无法工作,必须采取屏蔽措施,从而给设计和使用带来不便。容抗大还要求传感器绝缘部分的电阻值极高(几十兆欧以上),否则绝缘部分将作为旁路电阻而影响传感器的性能(如灵敏度降低),为此还要特别注意周围环境如温湿度、清洁度等对绝缘性能的影响。高频供电虽然可降低传感器输出阻抗,但放大、传输远比低频时复杂,且寄生电容影响加大,难以保证工作稳定。

(2) 寄生电容影响大 电容式传感器的初始电容量很小,而传感器的引线电缆电容(1~2m导线可达数十甚至上百皮法)、测量电路的杂散电容以及传感器极板与其周围导体构成的电容等“寄生电容”却较大,这一方面降低了传感器的灵敏度;另一方面这些电容(如电缆电容)常常是随机变化的,将使传感器工作不稳定,影响测量精度,其变化量甚至超过被测量引起的电容变化量,致使传感器无法工作。因此对电缆的选择、安装、接法都要有要求。

上述不足直接导致电容式传感器测量电路复杂。但随着材料、工艺、电子技术,特别是集成电路的高速发展,已经可以把复杂的测量电路与电容传感器做成一体形成集成式电容传感器,使电容式传感器的优点得到发扬而缺点不断得到克服,成为一种大有发展前途的传感器。

4.4.2 电容式传感器设计要点

对于电容式传感器,设计时可以从下面几个方面考虑:

1. 减小环境温湿度变化的影响并保证绝缘材料的绝缘性能

温度变化使传感器内各零件的几何尺寸和相互位置及某些介质的介电常数发生变化,从而改变传感器的电容量,产生温度误差。湿度也影响某些介质的介电常数和绝缘电阻值。因此必须从选材、结构、加工工艺等方面来减小温度等误差并保证绝缘材料具有高的绝缘性能。

电容式传感器的金属电极材料以选用温度系数低的铁镍合金为好,但较难加工。也可采用在陶瓷或石英上喷镀金或银的工艺,这样电极可以做得极薄,对减小边缘效应极为有利。

传感器内电极表面不便经常清洗,应加以密封,用以防尘、防潮。若在电极表面镀以极薄的惰性金属(如铱等)层,则可代替密封件起保护作用,可防尘、防湿、防腐蚀,并在高温下可减少表面损耗、降低温度系数,但成本较高。

传感器内,电极的支架除要有一定的机械强度外还要有稳定的性能。因此选用温度系数小和几何尺寸长期稳定性好,并具有高绝缘电阻、低吸潮性和高表面电阻的材料,例如石英、云母、人造宝石及各种陶瓷等做支架。虽然这些材料较难加工,但性能远高于塑料、有机玻璃等。在温度不太高的环境下,聚四氟乙烯具有良好的绝缘性能,可以考虑选用。

尽量采用空气或云母等作为电容式传感器的电介质, 这些电介质的介电常数的温度系数接近为零, 而且也不受湿度变化的影响。若用某些液体如硅油、煤油等作为电介质, 当环境温度、湿度变化时, 它们的介电常数随之改变, 产生误差。这种误差虽可用后续电路加以补偿, 但无法完全消除。

在可能的情况下, 传感器内尽量采用差动对称结构, 再通过某些类型的测量电路来减小温度等误差。可以用数学关系式来表达温度等变化所产生的误差来作为设计依据。

尽量选用高的电源频率, 一般为 50kHz 至几兆赫, 以降低对传感器绝缘部分的绝缘要求。

传感器内所有的零件应先进行清洗、烘干后再装配。传感器要密封以防止水分侵入内部而引起电容值变化和绝缘性能下降。传感器的壳体刚性要好, 以免安装时变形。

2. 消除和减小边缘效应

边缘效应不仅使电容式传感器的灵敏度降低而且产生非线性, 应尽量减小和消除。

适当减小极间距, 使电极直径或边长与间距比很大, 可减小边缘效应的影响, 但易产生击穿并有可能限制测量范围。电极应做得极薄使之与极间距相比很小, 这样也可减小边缘效应的影响。此外, 可在结构上增设等位环来消除边缘效应, 如图 4-16 所示。等位环 3 与电极 2 在同一平面上并将电极 2 包围, 且与电极 2 电绝缘但等电位, 这就能使电极 2 的边缘电力线平直, 电极 1 和 2 之间的电场基本均匀, 而发散的边缘电场发生在等位环 3 外周不影响传感器两极板间电场。

应该指出, 边缘效应所引起的非线性与变极距型电容式传感器原理上的非线性恰好相反, 因此在一定程度上起了补偿作用, 但传感器灵敏度同时下降。

3. 减小和消除寄生电容的影响

由前述可知, 寄生电容与传感器电容相并联影响传感器灵敏度, 而它的变化则为虚假信号, 影响传感器的精度。为减小和消除它, 可采用如下方法:

(1) 增加传感器原始电容值 采用减小极板或极筒间的间距 (平板式间距为 0.2 ~ 0.5mm, 圆筒式间距为 0.15mm), 增加工作面积或工作长度来增加原始电容值, 但受加工及装配工艺、精度、示值范围、击穿电压、结构等限制, 一般电容值变化在 $10^{-3} \sim 10^3 \text{ pF}$ 范围内。

(2) 注意传感器的接地和屏蔽 图 4-17 为采用接地屏蔽的圆筒形电容式传感器。图中可动极筒与连杆固定在一起随被测量移动, 并与传感器的屏蔽壳 (良导体) 同为地。因此当可动极筒移动时, 它与屏蔽壳之间的电容值将保持不变, 从而消除了由此产生的虚假信号。

引线电缆也必须屏蔽在传感器屏蔽壳内。为减小电缆电容的影响, 应尽可能使用短的电引线, 缩短传感器至后续电路前置级的距离。

(3) 集成化 将传感器与测量电路本身或其前置级装在一个壳体内, 这样寄生电容大

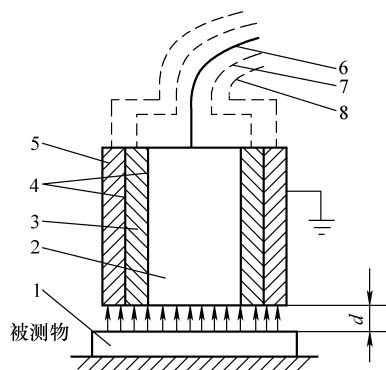


图 4-16 带有等位环的平板电容传感器原理图

1, 2—电极 3—等位环 4—绝缘层
5—套筒 6—芯线 7, 8—内、外屏蔽层

为减小，其变化也小，使传感器工作稳定。但因电子元器件的特点而不能在高、低温或环境差的场合工作。

(4) 采用“驱动电缆”技术 当电容式传感器的电容值很小，而因某些原因（如环境温度较高），测量电路只能与传感器分开时，可采用“驱动电缆”技术，如图 4-18 所示。

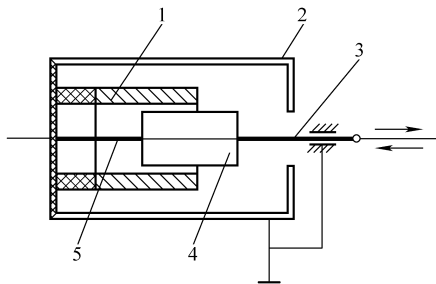


图 4-17 圆筒形电容式传感器的接地屏蔽示意图

1—固定极筒 2—屏蔽壳 3—连杆 4—可动极筒 5—导杆

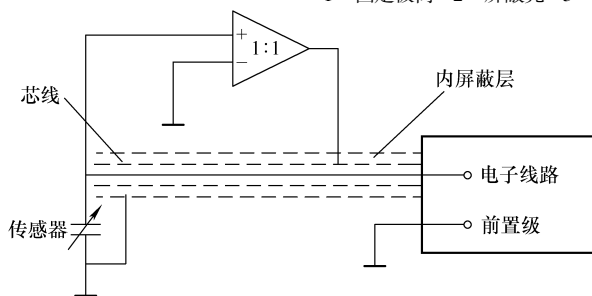


图 4-18 “驱动电缆”技术原理图

传感器与测量电路前置级间的引线为双屏蔽层电缆，其内屏蔽层与信号传输线（即电缆芯线）通过 1:1 放大器而为等电位，从而消除了芯线与内屏蔽层之间的电容。由于屏蔽线上有随传感器输出信号变化而变化的电压，因此称为“驱动电缆”。采用这种技术可使电缆线长达 10m 之远也不影响传感器的性能。外屏蔽层接大地（或接传感器地）用来防止外界电场的干扰。内外屏蔽层之间的电容是 1:1 放大器的负载。1:1 放大器是一个输入阻抗要求很高、具有容性负载、放大倍数为 1（准确度要求达 1/1000）的同相（要求相移为零）放大器。因此“驱动电缆”技术对 1:1 放大器要求很高，电路复杂，但能保证电容式传感器的电容值小于 1pF 时，也能正常工作。

(5) 整体屏蔽 将电容式传感器和所采用的转换电路、传输电缆等用同一个屏蔽壳屏蔽起来，正确选取接地点可减小寄生电容的影响和防止外界的干扰。图 4-19 所示是差动电容式传感器交流电桥所采用的整体屏蔽系统，屏蔽层接地点选择在两固定辅助阻抗臂 R_3 和 R_4 中间，使电缆芯线与其屏蔽层之间的寄生电容 C_3 和 C_4 分别与 R_3 和 R_4 相并联。如果 R_3 和 R_4 比 C_3 和 C_4 的容抗小得多，则寄生电容 C_3 和 C_4 对电桥的平衡状态的影响就很小。

最易满足上述要求的是变压器电桥，这时 R_3 和 R_4 是具有中心抽头并相互紧密耦合的两个电感线圈，流过 R_3 和 R_4 的电流大小基本相等但方向相反。因为 R_3 和 R_4 在结构上完全对称，所以线圈中的合成磁通近于零， R_3 和 R_4 仅为其绕组的铜电阻及漏感抗，它们都很小。因此寄生电容 C_3 和 C_4 对 R_3 和 R_4 的分路作用即可被削弱到很低的程度而不致影响交流电桥的平衡。还可以再加一层屏蔽，所加外屏蔽层接地点则选在差动式电容传感器两电容 C_{x1} 和 C_{x2} 之间。

这样进一步降低了外界电磁场的干扰，而内外屏蔽层之间的寄生电容等效作用在测量电路前置级，不影响电桥的平衡，因此在电缆线长达 10m 以上时仍能测出 1pF 的电容。当电容式传感器的原始电容值较大（几百皮法）时，只要选择适当的接地点仍可采用一般的同

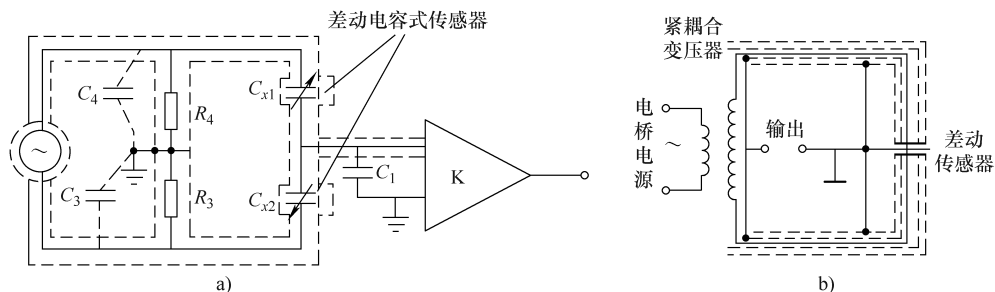


图 4-19 整体屏蔽示意图

轴屏蔽电缆。电缆长达 10m 时，传感器也能正常工作。

4. 防止和减小外界干扰

电容式传感器是高阻抗传感元件，易受外界干扰的影响。当外界干扰（如电磁场）在传感器上和导线之间感应出电压并与信号一起输送至测量电路时就会产生误差，甚至使传感器无法正常工作。此外，接地点不同所产生的接地电压差也是一种干扰信号，也会带来误差和故障。防止和减小干扰的某些措施已在上面有所讨论，现归纳如下：

1) 用良导体做传感器壳体，将传感元件包围起来，并可靠接地；用金属网套住导线彼此绝缘（即屏蔽电缆），金属网可靠接地；用双层屏蔽线可靠接地；用双层屏蔽罩且可靠接地；传感器与测量电路前置级一起装在良好屏蔽壳体内并可靠接地等。

2) 增加原始电容量以降低容抗。

3) 导线间的分布电容有静电感应，因此导线和导线之间要离远些，线要尽可能短，最好成直角排列，若必须平行排列时可采用同轴屏蔽电缆线。

4) 尽可能一点接地，避免多点接地。地线要用粗的良导体或宽印制线。

5) 尽量采用差动式电容传感器，可减小非线性误差，提高传感器灵敏度，减小寄生电容的影响和温度、湿度等其他环境因素导致的测量误差。

4.5 电容式传感器的应用

电容式传感器可用来测量直线位移、角位移、振动振幅，尤其适合测量高频振动振幅、精密轴系回转精度、加速度等机械量，还可用来测量压力、压差、液位、料面、成分含量（如油、粮食中的含水量）、非金属材料的涂层、油膜等的厚度，测量电介质的湿度、密度、厚度等，在自动检测和控制系统中也常常用来作为位置信号发生器。

1. 传统变极距式电容传感器

传统变极距式电容传感器结构简单，被广泛应用于工业现场，测量距离或与距离相关的物理量。非接触电容位移传感器结构形式和测量原理如图 4-20 所示，传感器测量电极和被测物体电极组成平板电容器的两个电容极板。当交流电源加在传感器测量电极上时，传感器测量电极上产生的交流电压与平板电容器电极之间的距离成正比，该交流电压经检波、放大后，作为模拟信号输出。

该类传感器可测量各种导电材料的间隙、长度、尺寸或位置以及纳米级要求的金属箔、绝缘材料薄膜的厚度，还可以用作金属、非金属零件尺寸精密检验。

图 4-21 是电容式差压传感器结构示意图。这种传感器结构简单、灵敏度高、响应速度快（约 100ms）、能测微小压差（0 ~ 0.75Pa）。它是由两个玻璃圆盘和一个金属（不锈钢）膜片组成。两玻璃圆盘上的凹面深约 25 μm ，其上各镀以金作为电容式传感器的两个固定极板，而夹在两凹圆盘中的膜片则为传感器的可动电极，则形成传感器的两个差动电容 C_1 、 C_2 。当两边压力 p_1 、 p_2 相等时，膜片处在中间位置与左、右固定电容间距相等，因此两个电容相等；当 $p_1 > p_2$ 时，膜片弯向 p_2 ，那么两个差动电容一个增大、一个减小，且变化量大小相同；当压差反向时，差动电容变化量也反向。这种差压传感器也可以用来测量真空或微小绝对压力，此时只要把膜片的一侧密封并抽成高真空（ 10^{-5}Pa ）即可。

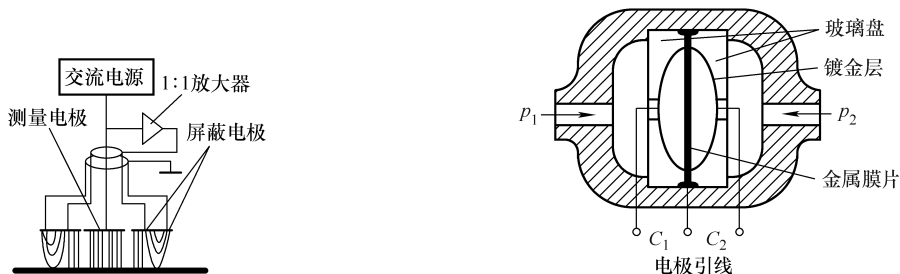


图 4-21 电容式差压传感器结构示意图

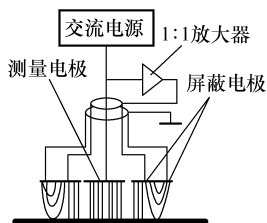


图 4-20 电容式位移传感器测量原理图

2. 容栅式传感器

容栅式传感器是在变面积型电容传感器的基础上发展起来的一种传感器。它在具有电容式传感器优点的同时，又具有多极电容带来的平均效应，而且采用闭环反馈式等测量电路减小了寄生电容的影响、提高了抗干扰能力、提高了测量准确度（可达 5 μm ）、扩展了量程（可达 1m），现已应用于数显卡尺、测长机等数显量具。

将电容传感器中的电容极板刻成一定形状和尺寸的栅片，再配以相应的测量电路就构成了容栅测量系统。正是特定的栅状电容极板和独特的测量电路使其超越了传统的电容传感器，适宜进行大位移测量。最为典型容栅结构形式是反射式，其安装示意图如图 4-22 所示。图中动栅上排列一系列尺寸相同、宽度为 l_0 的小发射电极片 1 ~ 8，R 为公共接收极，定栅上均匀排列着一系列尺寸相同、宽度和间隙之和各为 $4l_0$ 的反射电极片 M_1 、 M_2 、... 和屏蔽极片 S。电极片间互相绝缘。动栅和定栅的电极片相对、平行安装。当发射电极片 1 ~ 8 分别加以激励电压 $U_1 \sim U_8$ 时，通过电容耦合在反射电极片上产生电荷，再通过电容在公共接收极上产生电荷输出。采用不同的激励电压和相应的测量电路，则可得到幅值或相位与被测位移成比例关系的调幅信号或调相信号。此结构形式简单，使用方便，但移动过程中，导轨的误差对测量准确度影响较大。

图 4-22 所示线位移容栅传感器的测量原理和结构形式，可移植到测量角位移的电容传感器中，形成所谓的圆容栅。

容栅式传感器的工作原理主要有以下 3 种。

(1) 开环调幅式测量原理 开环调幅式传感器电容极板的基本结构如图 4-23 所示。在图 4-23a 中，一个极板由均匀排列电极的长栅（定栅）组成，另一个极板由一对相同尺寸的交错对插电极梳（动栅对）组成。运行时，传感器的两个电极栅片相对安装如图 4-23b，其中暗区域是两个电极栅的重叠面积，从而形成一对随位移反向变化的差动电容器 C_1 和 C_2 。

传感器仍采用传统差动变压器测量电路,但通过将电容极板刻成栅状提高了测量准确度并实现了大位移测量。

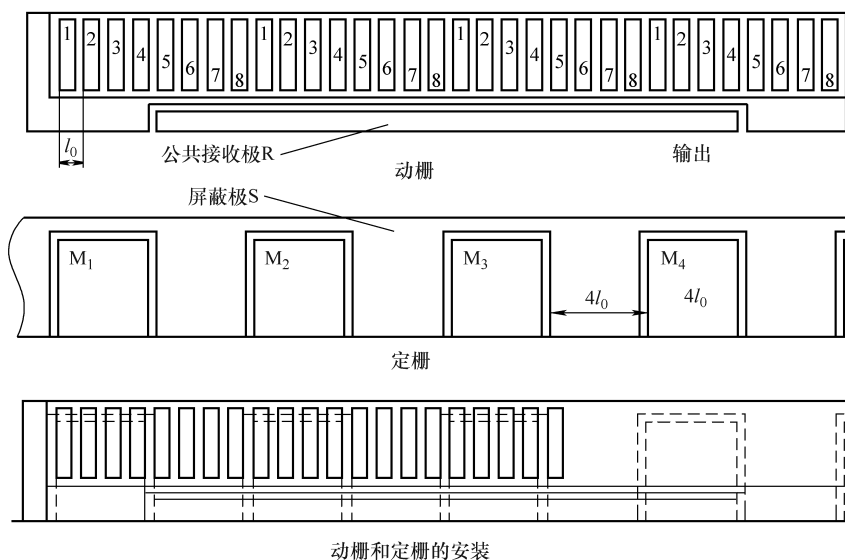


图 4-22 反射式容栅传感器结构和安装示意图

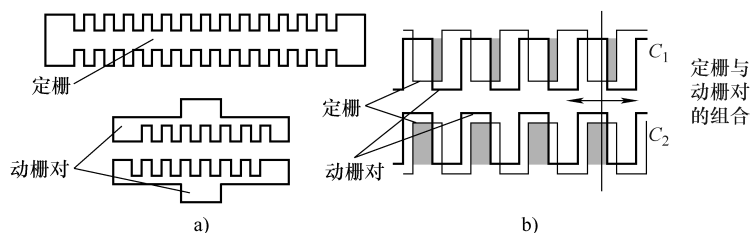


图 4-23 开环调幅式容栅传感器原理

a) 定栅与动栅 b) 定栅与动栅的安装

(2) 闭环调幅式测量原理 其测量原理如图 4-24 所示,其中图 4-24a 是系统原理图,图 4-24b 是电极栅片结构原理。图中 A、B 为动尺上的两组电极片, P 为定尺上的一片电极片,它们之间构成差动电容器 C_A 、 C_B 。两组电极片 A 和 B 各由四片小电极片组成,在位置 a 时,一组为小电极片 1~4,另一组为 5~8。方波脉冲控制开关 S_1 和 S_2 轮流将参考直流电压 $\pm U_0$ 和测量转换系统的直流输出电压 U_m 分别接入两个小电极组 A 和 B。

若系统保证电容极板 P 为虚地,则在一个周期内,激励信号通过差动电容 C_A 和 C_B 在电容极板 P 上产生的电荷量 Q_P 为 $(C_A U_0 - C_B U_0 + C_A U_m + C_B U_m)$ 。当 Q_P 为零时,测量转换电路保证 U_m 不变;否则导致测量转换电路使 U_m 改变,并保证其变化使 Q_P 的值减小,直至为零。这时,由上面可推导出

$$U_m = \frac{U_0}{C_A + C_B} (C_B - C_A) \quad (4-34)$$

则输出直流电压与位移呈线性关系。

当相对位移量超过 l_0 (小电极片的间距) 即 $L_0/4$ 时,由控制电路自动改变小电极片组的接线,见图中位置 b,这时电极片组 A 由小电极片 2~5 构成;电极片组 B 由小电极片 6~

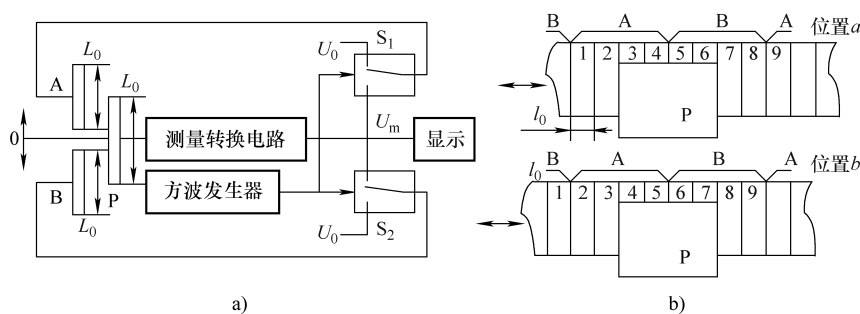


图 4-24 闭环调幅式容栅传感器原理

a) 系统原理图 b) 电极栅片结构原理

9 构成。这样，在电极片 P 相对移动的过程中，能保证始终与不同的小电极片形成同样的差动电容器，重复前述过程，而得到与位移成线性关系的输出电压。

该测量系统由输出电压来调节激励电压，形成闭环反馈式测量系统。因而具有下节所述闭环反馈系统的优点，而且还使寄生电容的影响大为减小。电路复杂是其主要缺点。

(3) 调相式测量原理 调相式测量原理如图 4-25 所示。容栅传感器一个极板 K 由数个发射极片组组成，每个极片组中有 8 个宽度均为 l_0 的发射极片，分别加以 8 个幅值为 U_m 、频率为 ω 、相位依次相差 $\pi/4$ 的正弦激励电压；另一个极板由许多反射极片 M 和接地的屏蔽极片 S 组成；还有一个接收极片 R。图中给出其中一组说明测量原理，当两个极板处于相对位置 a 时，每个发射极片与反射极片完全覆盖，所形成的电容均为 C_0 。当两个极板相对移动 x ($< l_0$) 而处于位置 b 时，若将反射极片的电压记为 U_M 、接收极片的电压记为 U_R ，反射极片与接收极片之间的电容记为 C_{MR} 、接收极片与地之间的电容记为 C_{RG} ，则有

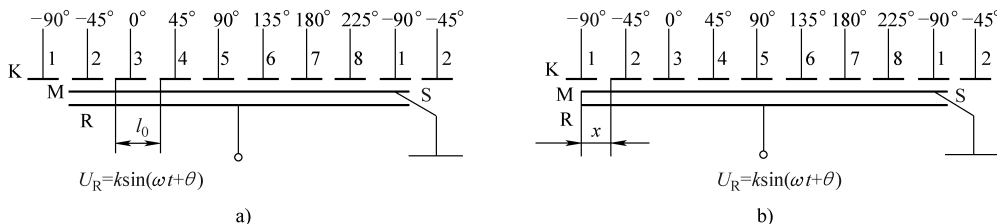


图 4-25 调相式容栅传感器原理

a) 位置 a 时 b) 位置 b 时

$$\begin{aligned}
 \frac{\dot{U}_R}{j\omega C_{RG}} &= \frac{\dot{U}_M - \dot{U}_R}{j\omega C_{MR}} \\
 &= \frac{(U_m e^{j(-\pi/2)}) - \dot{U}_M}{\frac{1}{j\omega C_0} \frac{x}{l_0}} + \frac{(U_m e^{j(-\pi/4)}) - \dot{U}_M}{\frac{1}{j\omega C_0}} + \frac{U_m - \dot{U}_M}{\frac{1}{j\omega C_0}} \\
 &\quad + \frac{(U_m e^{j(\pi/4)}) - \dot{U}_M}{\frac{1}{j\omega C_0}} + \frac{(U_m e^{j(\pi/2)}) - \dot{U}_M}{\frac{1}{j\omega C_0} \frac{l_0 - x}{l_0}}
 \end{aligned} \quad (4-35)$$

由上式可以推导出

$$\dot{U}_R = \left(\frac{C_0 U_m C_{MR}}{C_{MR} C_{RG} + 4C_0 (C_{MR} + C_{RG})} \right) e^{j \arctan \left(\frac{1 - (2x/l_0)}{1 + \sqrt{2}} \right)} = k e^{j\theta} \quad (4-36)$$

可见, 传感器输出一个与激励同频的正弦波电压, 其幅值近似为常数 k , 而其相位 θ 则与被测位移 x 近似呈线性关系。通常采用相位跟踪法测出相位角 θ 。

当被测位移 x 超过 l_0 时, 则重复上述过程, 无需改变发射极片的接线即可实现大位移测量。显然, 调相式测量系统具有很强的抗干扰能力, 但由式 (4-36) 可知它在原理上存在非线性误差 ($0.01l_0$), 而且当用方波电压激励时还存在高次谐波的影响, 结果导致测量准确度下降。

3. 力平衡式电容传感器

图 4-26 所示为一种零位平衡式电容式加速度传感器结构示意图和原理图, 该传感器运用硅微加工技术或 LIGA 技术将电容敏感元件微型化并与测量电路制作在一起, 构成了集成式电容传感器。传感器芯片由玻璃-硅-玻璃结构构成, 硅悬臂梁的自由端设置有敏感加速度的质量块, 并在其上、下两侧面淀积有金属电极, 形成电容的活动极板, 安装在两固定极板之间, 金属电极与中间的掺杂硅片有 $2\mu\text{m}$ 间隙, 构成 10pF 的差动电容, 差动电容的上下固定极板分别接入信号 U_E 和 $\bar{U}_E$ 。

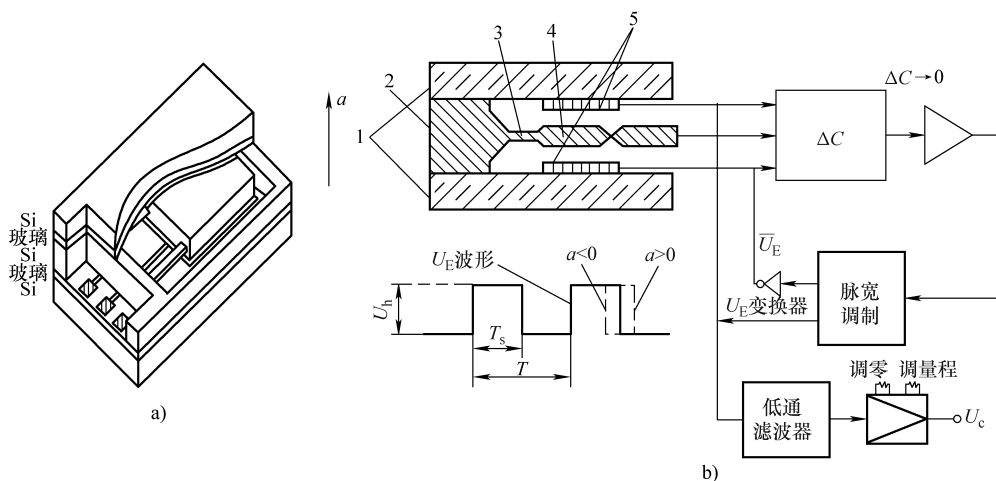


图 4-26 零位平衡式电容加速度传感器

a) 微型硅电容式加速度传感器芯片结构示意图 b) 硅电容式加速度传感器原理图

1—玻璃 2—硅 3—悬臂梁 4—活动极板 5—固定极板

当加速度为 0 时, 活动极板处于两固定极板的中间位置 (零位置), 差动电容变化量 ΔC 为 0, 此时脉宽调制信号的占空比为 50%, 则活动极板受到来自于上下固定极板的静电力合力 F_Y 为 0, 同时传感器输出信号 U_c 为 0; 当质量为 m 的活动极板感受加速度 a 时, 其惯性力 $F = ma$ 导致中间极板产生微小位移, 引起的电容变化 ΔC 由开关-电容电路检测出来并控制两路脉宽调制信号 U_E 和 $\bar{U}_E$ 的占空比, 则 F_Y 的作用趋向于使活动极板回复零位置。当活动极板回复到零位置时, 加速度 a 与传感器输出信号 U_c 有如下关系:

$$ma = \frac{\varepsilon S}{2\delta^2} A_{UE} (2U_C - A_{UE}) \quad (4-37)$$

式中的 ε 、 S 、 δ 与式 (4-1) 中定义相同； A_{UE} 为信号 U_E 的幅值。

该硅电容式集成加速度传感器是惯性导航系统中最重要传感器之一，例如用于惯性导航平台系统的调平和运动状态参数的测量时，是在导弹的惯性导航平台上，沿 3 个坐标轴安装 3 只力平衡式加速度传感器，分别测出 3 个轴向的加速度。再通过积分器和计算机求出 3 轴方向的速度和位移，从而确定运动物体在空间的坐标位置并提供速度、位置等各种反馈控制信号。

这类将广泛应用的“反馈”技术引入组成闭环系统的传感器被称为平衡式传感器，它采用的比较和平衡方式有力和力矩平衡、电流平衡、电压平衡、电荷平衡、热流量平衡、温度平衡等。闭环式传感器不仅可以大大地改善系统性能，提高测量准确度，而且能解决某些开环测量系统无法解决的问题。闭环传感器原理框图如图 4-27 所示，一般是把系统输出（通常为电量）通过反馈环节变化成反馈量（通常为非电量），然后与输入进行比较产生一个偏差信号。此偏差信号经前向环节放大后调节反馈量，直至偏差信号为零的平衡状态，此时输出即为测得值。

为保证闭环系统的稳定或满足传感器不同的频响要求，往往需要加入复合反馈环节和在放大环节中加入校正环节等。

闭环传感器的系统框图可简化为图 4-28。图中， $W_0(s)$ 为前向环节的传递函数， $W_f(s)$ 为反馈环节的传递函数，则系统的传递函数 $W(s)$ 为

$$W(s) = \frac{W_0(s)}{1 + W_f(s)W_0(s)} \quad (4-38)$$

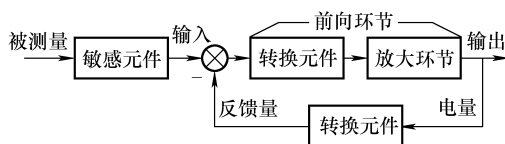


图 4-27 闭环传感器原理框图

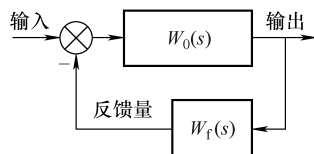


图 4-28 闭环系统框图

实际中容易保证 $W_0(s)W_f(s) \gg 1$ ，且系统稳定。根据自控理论知，闭环系统静态增益为 $1/W_f(s)$ 、时间常数（一阶系统）是开环系统的 $1/(1 + W_0(s)W_f(s))$ ，固有频率（二阶系统）为开环系统的 $\sqrt{1 + |W_0(s)W_f(s)|}$ 倍。因此，闭环传感器具有如下优点：①精度高。传感器的精度和稳定性主要取决于反馈环节，而与前向环节无关；②灵敏度高，线性好、量程大。传感器工作于平衡状态附近，相对初始状态的偏移量很小；③动态特性好。时间常数小，固有频率高。但同时具有复杂、加工要求高、成本高、体积大等缺点。

例如，最为常用的力平衡式传感器就是先将被测量转换成力或力矩，然后用反馈力与其平衡的闭环传感器，它广泛应用于测量加速度、角速度、压力、重量、电功率、高电压等。

4. 湿度传感器

湿度传感器主要用来测量环境的相对湿度。传感器的感湿组件是高分子薄膜式湿敏电容，其结构如图 4-29 所示。它的两个上电极是梳状金属电极，下电极是一网状多孔金属电极，上下电极间是亲水性高分子介质膜。两个梳状上电极、高分子薄膜和下电极构成两个串

联的电容器,如图4-29c所示。当环境相对湿度改变时,高分子薄膜通过网状下电极吸收或放出水分,使高分子薄膜的介质常数发生变化,从而导致电容量变化。

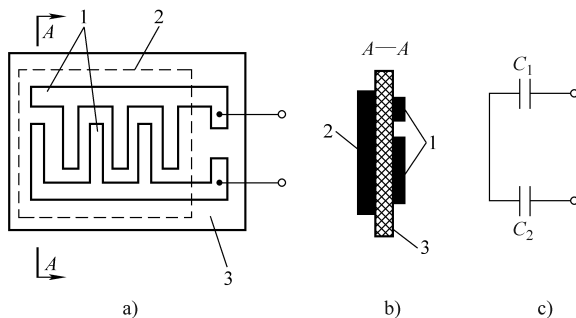


图4-29 湿敏电容器结构示意图

a) 平面结构 b) 侧面结构 c) 等效电路

1—上电极 2—下电极 3—介质膜

习 题

4-1 如何改善单组式变极距型电容传感器的非线性?

4-2 单组式变面积型平板形线位移电容传感器,两极板相对覆盖部分的宽度为4mm,极板的间隙为0.5mm,极板间介质为空气,试求其静态灵敏度?若两极板相对移动2mm,试求其电容变化量。

4-3 电容式传感器常用的有哪几类测量转换电路?差动脉冲调宽电路用于电容传感器测量电路具有什么特点?

4-4 已知圆盘形电容极板直径 $D = 50\text{mm}$,极板间距 $d_0 = 0.2\text{mm}$,在电极间置一块厚度 $d_g = 0.1\text{mm}$ 的云母片,其相对介电常数 $\varepsilon_{r1} = 7$,空气的相对介电常数 $\varepsilon_{r2} = 1$ 。

(1) 求无云母片及有云母片两种情况下的电容值 C_1 、 C_2 各为多少?

(2) 当间距变化 $\Delta d = 0.025\text{mm}$ 时,电容相对变化量 $\Delta C_1/C_1$ 与 $\Delta C_2/C_2$ 各为多少?

4-5 如图4-30所示,在压力比指示系统中采用差动式变极距型电容式传感器作为敏感元件,采用电桥电路作为其转换电路。已知原始极距 $\delta_1 = \delta_2 = 0.25\text{mm}$;极板直径 $D = 38.2\text{mm}$;电阻 $R = 5.1\text{k}\Omega$;两固定电容 $C = 0.001\mu\text{F}$;电源电压幅值 $U = 60\text{V}$,其频率 $f = 400\text{Hz}$ 。试求

(1) 该电容传感器的电压灵敏度;

(2) 若电容传感器的活动极板位移 $\Delta\delta = 10\mu\text{m}$ 时,输出电压的有效值。

4-6 电容式传感器在实际应用中主要存在哪些问题,对其理想特性产生较大影响?分别采用什么方法加以解决?

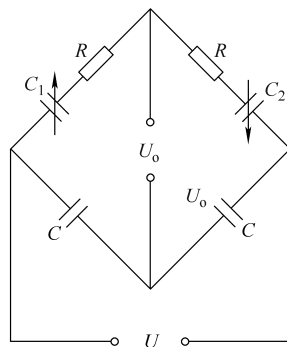


图4-30 电桥电路

参 考 文 献

- [1] 周真,苑惠娟.传感器原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [2] 梁福平.传感器原理及检测技术[M].武汉:华中科技大学出版社,2010.
- [3] 唐文彦.传感器[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [4] 金篆芷,王明时.现代传感技术[M].北京:电子工业出版社,1995.
- [5] 梁福平.传感器原理及检测技术学习与实践指导[M].武汉:华中科技大学出版社,2014.

第5单元

压电式传感器

学习要点

- ◆ 压电效应原理、压电材料机理；
- ◆ 电荷放大电路、电压放大电路特性，误差计算与电路参数计算；
- ◆ 压电材料的典型应用。

相关知识链接

- ◆ GB/T 9532—2012 压电单晶材料型号命名方法；
- ◆ GB/T 15156—2015 压电陶瓷换能元件总规范；
- ◆ http://www.turck.org.cn/product_info.asp?productid=1140&productname=超声波传感器；
- ◆ 李敏，刘俊，秦岚，等．平板式压电六维力传感器静态性能研究 [J]．机械工程学报，2014，50（6）；
- ◆ 范志强，马宏昊，沈兆武，等．夹心式 PVDF 压力传感器压电特性及标定装置研究 [J]．振动与冲击，2014，33（16）；
- ◆ 于润祥，石庚辰，隋丽．等．一种新型压电加速度传感器研究 [J]．北京理工大学学报，2014，34（3）。

引导案例

压电薄膜传感器监测生命特征

聚偏氟乙烯（PVDF）压电薄膜是 20 世纪 70 年代在日本问世的一种新型高分子压电材料，它具有独特的介电效应、压电效应、热电效应。与传统的压电材料相比，具有频响宽、动态范围大、机电转换灵敏度高、机械性能强度高、声阻抗易匹配等特点，并具有重量轻、柔软不脆、耐冲击、不易受水和化学药品的污染、易制成任意形状及面积不等的片或管等优势，在安保、医疗、军事、交通、勘探等领域受到广泛应用。

在监测生命特征方面，压电薄膜拥有独一无二的特性，非常适合应用于人体皮肤表面或植入人体内部的生命信号监测。

利用压电薄膜对人体微弱生理信号的有效采集和处理一直是医疗器械领域的研究热门。传统的压电陶瓷传感器、多普勒效应传感器的成本和体积制约了其使用，利用压电薄膜的特性，可以轻松地将压电薄膜直接固定在人体皮肤上（例如手腕内侧）。

类似的传感器已在睡眠紊乱研究中用于探测胸部、腿部、眼部肌肉和皮肤的运动。另外，传感器可以通过探测肌肉（例如拇指和食指之间的肌肉）对电击的反应作为检验麻醉效果的指示器（神经肌肉传导）。

压电薄膜和压电电缆还可以安装在床垫上探测病人的心跳、呼吸和身体运动。病人坐或躺在监护床上时，传感器可以隔着衣服和被单准确测量收集患者的生命特征信息。柔性开关用于采集静态信号，病患所有的动态信号都由压电薄膜采集并转换成相应的电信号，在病床边上的显示器显示。病人的心率和呼吸速率不正常，或病人擅自下床时，系统可以提前报警。这一切都由传感器完成，而无需与病人直接接触。

利用压电薄膜开发的婴儿呼吸监控仪，把传感器夹在纸尿裤贴近婴儿腰部的位置，监控婴儿心跳，在设定的时间内如果没探测到婴儿在活动，振动蜂鸣器将被启动，轻轻地拨动婴儿，刺激他呼吸。如果在此后的一段时间内婴儿仍没有反应，报警器将被启动。

压电式传感器工作原理是基于压电材料的压电效应，它是一种发电式传感器。压电效应是可逆的，因此压电式传感器是典型的“双向传感器”。石英晶体的压电效应早在 1880 年即已发现，1948 年制作出第一个石英传感器。在石英晶体的压电效应被发现后，一系列的单晶、多晶陶瓷材料和近些年发展起来的有机高分子聚合材料，也都具有相当强的压电效应。压电效应自发现以来，在电子、超声、通信、引爆等许多技术领域均得到广泛的应用。压电式传感器具有使用频带宽、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠、质量轻、测量范围广等许多优点，因此在压力冲击和振动等动态参数测试中，是主要的传感器品种，它可以把加速度、压力、位移、温度、湿度等许多非电量转换为电量。近年来由于电子技术飞跃发展，随着与之配套的二次仪表，以及低噪声、小电容、高绝缘电阻电缆的出现，使压电传感器使用更为方便，集成化、智能化的新型压电传感器也正在被开发出来。

5.1 压电效应

某些单晶体或多晶体陶瓷电介质，当沿着一定方向对其施加力而使它变形时，内部就产生极化现象，同时在它的两个对应晶面上便产生符号相反的等量电荷，当外力取消后，电荷也消失，又重新恢复不带电状态，这种现象称为压电效应。当作用力方向改变时，电荷的极性也随着改变。相反，当在电介质的极化方向上施加电场作用时，这些电介质晶体会在一定的晶轴方向产生机械变形，外加电场消失，变形也随之消失，这种现象称为逆压电效应。具有这种压电效应的物质称为压电材料，常用的压电材料有石英、钛酸钡、锆钛酸铅等。在 32 类结晶材料中，有 20 类存在压电特性，但真正被利用的压电材料仅有为数不多的几种。非晶铁电材料也存在压电特性。在存在压电特性的 20 类结晶材料中，仅有 10 类呈现铁电特性。各向同性晶体由于具有中心对称的结构，无论外力是否作用，晶体正负电荷的中心总是重合。所以，压电材料必定是各向异性，在受到外加力时，才会产生电极化。

压电材料的压电特性常用压电方程来描述

$$q = d_{ij}\sigma \quad \text{或} \quad Q = d_{ij}F \quad (5-1)$$

式中 q ——电荷的表面密度 (C/cm^2)；

σ ——单位面积上的作用力 (N/cm^2)

d_{ij} ——压电常数 (C/N), ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4, 5, 6$);

F ——压电元件受到的作用力;

Q ——表面电荷。

压电常数有两个下角标, 其中第一个角标 i 表示晶体的极化方向。当产生电荷的表面垂直于 x 轴 (y 轴或 z 轴) 时, 记作 $i=1$ (或 2、3)。第二个下角标 $j=1$ (或 2, 3, 4, 5, 6), 分别表示沿 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的单向应力和在垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面内作用的剪切力。单向应力的符号规定拉应力为正而压应力为负; 剪切力的符号用右螺旋定则确定。

晶体在任意受力状态下所产生的表面电荷密度可由下列方程组决定

$$\begin{cases} q_1 = d_{11}\sigma_1 + d_{12}\sigma_2 + d_{13}\sigma_3 + d_{14}\sigma_4 + d_{15}\sigma_5 + d_{16}\sigma_6 \\ q_2 = d_{21}\sigma_1 + d_{22}\sigma_2 + d_{23}\sigma_3 + d_{24}\sigma_4 + d_{25}\sigma_5 + d_{26}\sigma_6 \\ q_3 = d_{31}\sigma_1 + d_{32}\sigma_2 + d_{33}\sigma_3 + d_{34}\sigma_4 + d_{35}\sigma_5 + d_{36}\sigma_6 \end{cases} \quad (5-2)$$

式中 q_1 、 q_2 、 q_3 ——分别为垂直于 x 轴、 y 轴和 z 轴的表面上电荷密度;

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——分别为沿着 x 轴、 y 轴和 z 轴的拉或压应力;

σ_4 、 σ_5 、 σ_6 ——分别为垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面内的剪切力;

这样, 压电材料的压电特性可以用压电常数矩阵表示如下:

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

5.2 压电材料

5.2.1 石英晶体

石英晶体是最常用的压电晶体之一。图 5-1 所示为天然结构的石英晶体, 它是个六角形晶柱。在直角坐标系中, z 轴表示其纵向轴, 称为光轴; x 轴平行于正六面体的棱面, 称为电轴; y 轴垂直于正六面体棱面, 称为机械轴。通常沿电轴 (x 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”; 把沿机械轴 (y 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”; 在光轴 (z 轴) 方向受力时则不产生压电效应。

从晶体上沿轴线切下的薄片称为晶体切片, 图 5-1c 所示为石英晶体切片的示意图。当晶片在沿电轴方向受到外力 F_1 作用时, 在与电轴垂直的平面上产生电荷 Q_1 , 它的大小为

$$Q_1 = d_{11}F_1 \quad (5-4)$$

式中 d_{11} ——压电系数 (C/g 或 C/N)。

从式 (5-4) 中可以看出, 当晶体受到电轴方向外力作用时, 晶面上产生的电荷 Q_1 与作用力 F_1 成正比, 而与晶片的几何尺寸无关。当 F_1 是拉力时, 电荷 Q_1 为正; 当 F_1 是压力时, 电荷 Q_1 为负, 如图 5-2a、b 所示。

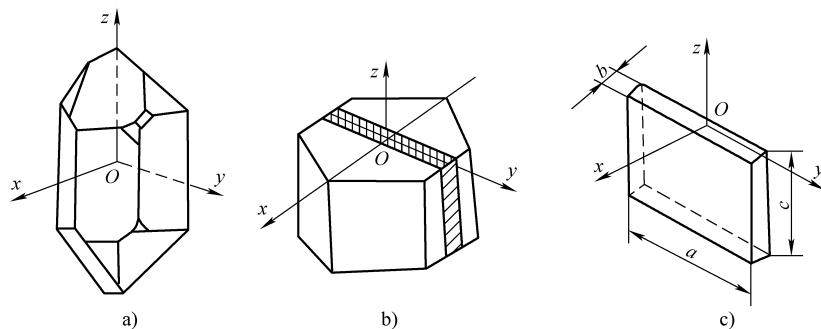


图 5-1 石英晶体

a) 石英晶体外形 b) 石英晶体晶轴 c) 石英晶体切片

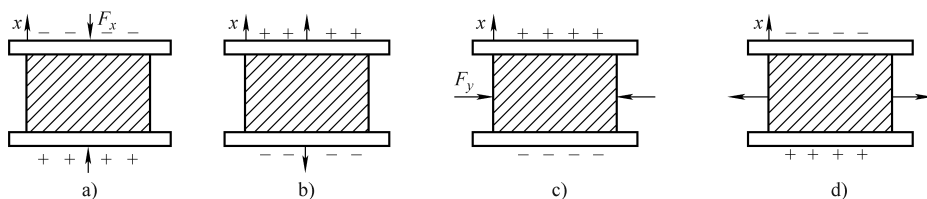


图 5-2 晶体切片上电荷符号与受力方向的关系

如果在同一晶片上,作用的力是沿着机械轴(y 轴)方向的,其电荷仍在与 x 轴垂直的平面上出现,而极性方向相反,如图 5-2c、d 所示。此时电荷量为

$$Q_1 = d_{12} \frac{a}{b} F_2 = -d_{11} \frac{a}{b} F_2 \quad (5-5)$$

式中 a 、 b ——晶体切片的长度和厚度;

d_{12} —— y 轴方向受力时的压电系数。

由于石英晶体轴对称,有 $d_{12} = -d_{11}$ 。

从式 (5-5) 可见,沿机械轴(y 轴)方向的力作用在晶体上时产生的电荷与晶体切片的尺寸有关。式中的负号说明沿 y 轴的压力所引起的电荷极性与沿 x 轴的压力所引起的电荷极性是相反的。

此外,石英晶体除了纵向、横向压电效应外,在切向应力作用下也会产生电荷。

石英晶体的上述特性与其内部分子结构有关。将一个单元组体中构成石英晶体的硅离子和氧离子,在垂直于 z 轴的 xy 平面上的投影,等效为一个正六边形排列,如图 5-3 所示。图中阳离子代表 Si^{+4} 离子,阴离子代表氧离子 O^{-2} 。

当石英晶体未受外力作用时,正、负离子正好分布在正六边形的顶角上,形成三个互成 120° 夹角的电偶极矩 $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_2$ 、 $\mathbf{P}_3$,如图 5-3a 所示。因为电偶极矩的定义为电荷 q 与间距 l 的乘积,即 $\mathbf{P} = ql$,其方向是从负电荷指向正电荷,是矢量。此时正负电荷重心重合,电偶极矩的矢量和等于零,即 $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_3 = 0$,所以晶体表面不产生电荷,即呈中性。

当石英晶体受到沿 x 轴方向的压力(σ_1)作用时,晶体沿 x 轴方向将产生压缩变形,正、负离子中心不再重合,电偶极矩在 x 轴方向上的分量,由于相对位置也随之变动。如图

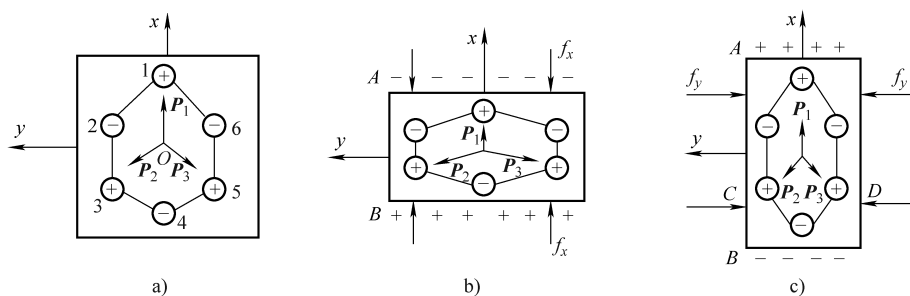


图 5-3 石英晶体的压电效应

5-3b 所示, 此时正负电荷重心不再重合, 电偶极矩在 x 轴方向上的分量由于 P_1 的减小和 P_2 、 P_3 的增大而不等于零, 即 $(P_1 + P_2 + P_3)_x > 0$ 。在 x 轴的正方向出现正电荷, 电偶极矩在 y 轴方向上的分量仍为零 (因为 P_2 、 P_3 在 y 轴方向上的分量大小相等而方向相反), 不出现电荷。由于 P_1 、 P_2 和 P_3 在 z 轴方向上的分量为零, 不受外力作用的影响, 所以在 z 轴方向上也不出现电荷。从而使石英晶体的压电常数为

$$d_{11} \neq 0, d_{21} = d_{31} = 0$$

当石英晶体受到沿 y 轴方向的压力 (σ_2) 作用时, 晶体沿 y 轴方向将产生压缩变形, 其离子排列结构如图 5-3c 所示。与图 5-3b 情况相似, 此时 P_1 增大, P_2 、 P_3 减小, 在 x 轴方向出现电荷, 其极性如图 5-3c 所示, 而在 y 轴和 z 轴方向上则不出现电荷。因此, 压电常数为

$$d_{12} = -d_{11} \neq 0, d_{22} = d_{32} = 0$$

当沿 z 轴方向上施加作用力 (σ_3) 时, 因为晶体在 x 轴方向和 y 轴方向产生的变形完全相同, 所以其离正、负电荷中心保持重合, 电偶极矩矢量和为零, 晶体表面无电荷呈现。这表明沿 z 轴方向施加作用力, 晶体不会产生压电效应, 其相应压电常数为

$$d_{13} = d_{23} = d_{33} = 0$$

当切应力 $\sigma_4(\tau_{yz})$ 作用于晶体时产生切应变, 同时在 x 轴方向有伸缩应变, 故在 x 轴方向上有电荷出现而产生压电效应, 其相应的压电常数为

$$d_{14} \neq 0, d_{15} = d_{16} = 0$$

当切应力 $\sigma_5(\tau_{zx})$ 和 $\sigma_6(\tau_{xy})$ 作用时都产生切应变, 这种应变改变了 y 轴方向上 $P = 0$ 的状态。所以 y 轴方向上有电荷出现, 存在 y 轴方向上的压电效应, 其相应的压电常数为

$$d_{15} = 0, d_{25} \neq 0, d_{35} = 0$$

$$d_{16} = 0, d_{26} \neq 0, d_{36} = 0$$

而且有 $d_{25} = -d_{14}$, $d_{26} = -d_{11}$ 。所以, 对于石英晶体, 如前所述, 其压电常数矩阵为

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5-6)$$

所以实际上只有 d_{11} 和 d_{14} 两个常数才是有意义的。

5.2.2 压电陶瓷

1. 压电陶瓷的压电机理和压电常数

压电陶瓷是人工制造的多晶体，它的压电机理与石英晶体不同。压电陶瓷材料内的晶粒有许多自发极化的电畴，在极化处理以前，各晶粒内电畴按任意方向排列，自发极化作用相互抵消，陶瓷内极化强度为零，如图 5-4a 所示。

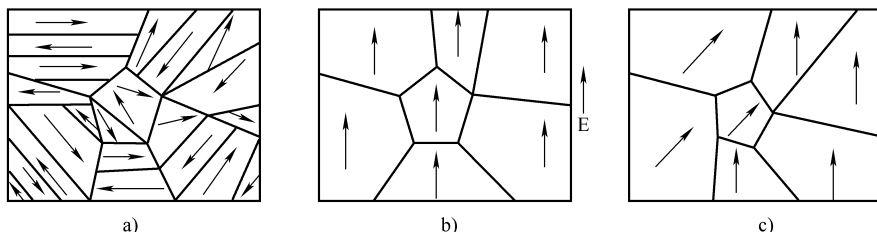


图 5-4 压电陶瓷的极化

a) 未极化的陶瓷 b) 正在极化的陶瓷 c) 极化后的陶瓷

当陶瓷上施加外电场时，电畴自发极化方向转到与外加电场方向一致，如图 5-4b 所示。既然进行了极化，此时压电陶瓷就具有一定极化强度，当外加电场撤销后，各电畴的自发极化在一定程度上按原外加电场方向取向，陶瓷极化强度并不立即恢复到零，如图 5-4c 所示。这种极化强度称为剩余极化强度，这样的陶瓷片极化的两端就出现束缚电荷，一端为正电荷，另一端为负电荷，如图 5-5 所示。由于束缚电荷的作用，在陶瓷片的电极表面上很快吸附了一层来自外界的自由电荷。这些自由电荷与陶瓷片内的束缚电荷符号相反而数值相等，它起着屏蔽和抵消陶瓷片内极化强度对外的作用，因此陶瓷片对外不表现极性。

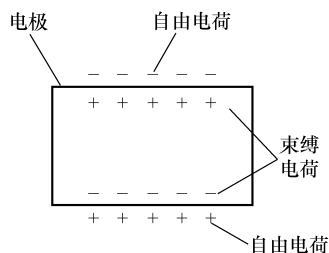


图 5-5 压电陶瓷片内的束缚电荷与电极上吸附的自由电荷示意图

如果在压电陶瓷片上加一个与极化方向平行的外力，陶瓷片将产生压缩变形，片内的正、负束缚电荷之间距离变小，电畴发生偏转，极化强度也变小。因此，原来吸附在极板上的自由电荷，有一部分被释放而出现放电现象。当压力撤销后，陶瓷片恢复原状，片内的正、负电荷之间的距离变大，极化强度也变大，因此电极上又吸附一部分自由电荷出现充电现象，这种由机械能转变为电能的现象，就是压电陶瓷的正压电效应，放电电荷的多少与外力的大小成正比关系，即

$$Q = d_{33}F \quad (5-7)$$

式中 Q ——电荷量；

d_{33} ——压电陶瓷的压电常数；

F ——作用力。

应该注意，刚刚极化后的压电陶瓷的特性是不稳定的，经过两三个月以后，压电常数才近似保持为一定常数，经过 2 年以后，压电常数又会下降，所以做成的传感器要经常校准。另外，压电陶瓷也存在逆压电效应。

2. 压电陶瓷种类

常见压电陶瓷有以下几种：

(1) 钛酸钡 (BaTiO_3) 压电陶瓷 具有比较高的压电系数 ($d_{33} = (100 \sim 190) \times 10^{-12} \text{C/N}$), 介电常数、机械强度不及石英。

(2) 锆钛酸铅 $\text{Pb}(\text{Zr} \cdot \text{Tr})\text{O}_3$ 系压电陶瓷 (PZT) 压电系数较高 ($d_{33} = (200 \sim 500) \times 10^{-12} \text{C/N}$), 各项机电参数随温度、时间等外界条件的变化而变化, 在锆钛酸铅中添加一、两种微量元素, 如 La、Nb、Sb、Sn、Mn、W 等, 可以得到不同性能的 PZT 材料。

(3) 铌酸盐系压电陶瓷 这一系列的压电陶瓷是以铌酸钾 (KNbO_3) 和铌酸铅 (PbNb_2O_3) 为基础的。由于铌酸铅的介电常数比较低, 所以在铌酸铅中用钽或锶替代一部分铅, 可引起性能的根本变化, 从而得到具有较高机械品质因数的铌酸盐压电陶瓷。铌酸钾是通过热压过程制成的, 适用于 $10 \sim 40\text{MHz}$ 的高频换能器。

(4) 铌镁酸铅 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3$ 压电陶瓷 (PMN) 具有较高的压电系数 ($d_{33} = (800 \sim 900) \times 10^{-12} \text{C/N}$), 在压力为 400kg/cm^2 ($1\text{kg} = 9.8\text{N}$) 时仍能继续工作, 可作为高温下的力传感器。

5.2.3 PVDF 压电薄膜

聚偏氟乙烯 PVDF (polyvinylidene fluoride) 是 20 世纪 70 年代在日本问世的一种新型的高分子聚合物型压电材料, 它具有如下优点:

- 1) 压电常数比石英高十多倍。
- 2) 柔性和加工性能好, 可制成 $5\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ 厚度不等、形状不同的大面积的薄膜, 因此适于做大面积的传感阵列器件。
- 3) 声阻抗低, 为 $3.5 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s/m}$, 仅为 PZT 压电陶瓷的 $1/10$, 它的声阻抗与水、人体肌肉的声阻抗很接近, 并且柔顺性好, 便于贴近人体, 与人体接触, 安全舒适, 因此适于用作水听器 and 医用仪器的传感元件。
- 4) 频响宽, 室温下在 $10^{-5} \sim 10^9 \text{Hz}$ 范围内响应平坦, 可在准静态、低频、高频、超声及超高频范围内应用。
- 5) 由于 PVDF 的分子结构链中有氟原子使得它的化学稳定性和耐疲劳性高, 吸湿性低, 并有良好的热稳定性。
- 6) 可耐受强电场作用 ($75\text{V}/\mu\text{m}$)。
- 7) 质量轻, 它的密度只是 PZT 压电陶瓷的 $1/4$, 做成传感器对被测量的结构影响小。
- 8) 容易加工和安装, 可以根据实际需要来制定形状。

图 5-6 为应用 PVDF 制成的血压传感器结构图。传感器制成圆柱体的纵切形状, 可以很好地与上腕部动脉沟吻合, 使用起来十分方便。这种血压传感器具有结构简单、性能可靠、灵敏度高、抗干扰能力强、易于小型化的特点。

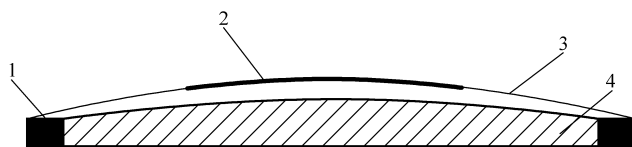


图 5-6 血压传感器结构图

1—塑料骨架 2—PVDF 薄膜 3—硅凝胶弹性体 4—硬质衬底

5.2.4 压电材料的主要特性参数

压电材料的主要特性参数有：

- 1) 压电系数。衡量材料压电效应强弱的参数，它直接关系到压电输出灵敏度。
- 2) 弹性常数。压电材料的弹性常数（刚度）决定着压电器件的固有频率和动态特性。
- 3) 介电常数。对于一定形状、尺寸的压电元件，其固有电容与介电常数有关，而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。
- 4) 机电耦合系数。它定义为：在压电效应中，转换输出的能量（如电能）与输入的能量（如机械能）之比的二次方根。它是衡量压电材料机电能量转换效率的一个重要参数。
- 5) 电阻。压电材料的绝缘电阻将减少电荷泄漏，从而改善压电传感器的低频特性。
- 6) 居里点。即压电材料开始丧失压电特性的温度。

压电效应实际上并不真正产生电荷，而只是表现为存在表面电荷。真正产生的是沿偶极子方向的电场。通过晶体外接金属电极将该电场转换为流动的电子，由一个电极经过信号检测电路流向对面的电极，从而抵消产生的电场。流动的电子数目取决于敏感元件所产生的电压以及电极之间的电容。因此，压电传感器的一个重要的特点是：它只能用于测量动态变化的力或加速度，而不能用于测量静态的力或加速度。当敏感元件受到静态力时，电极上产生电子电荷，电压检测电路的内阻会导致这些电子流失，因此尽管所施加的是恒定大小的力，输出信号会随着时间延长而逐渐消失。

5.3 压电元件

5.3.1 压电元件的基本变形

由压电常数矩阵可以看出，对能量转换有意义的石英晶体变形方式有以下几种：

1. 厚度变形（简称为 TE 方式）

如图 5-7a 所示。这种变形方式利用石英晶体的纵向压电效应，产生的表面电荷密度或表面电荷为

$$q_1 = d_{11}\sigma_1 \text{ 或 } Q_1 = d_{11}F_1 \quad (5-8)$$

2. 长度变形（简称 LE 方式）

如图 5-7b 所示，利用石英晶体的横向压电效应，表面电荷密度或表面电荷为

$$q_1 = d_{12}\sigma_2 \text{ 或 } Q_1 = d_{12}F_2 \frac{S_x}{S_y} \quad (5-9)$$

式中 S_x ——压电元件垂直于 x 轴的表面积；
 S_y ——压电元件垂直于 y 轴的表面积。

3. 面剪切变形（简称 FS 方式）

如图 5-7c 所示。相应的计算公式为

$$q_1 = d_{14}\tau_{yz} \quad (\text{对于 } x \text{ 切晶片}) \quad (5-10)$$

$$q_2 = d_{25}\tau_{zx} \quad (\text{对于 } y \text{ 切晶片}) \quad (5-11)$$

4. 厚度剪切变形 (简称 TS 方式)

如图 5-7d 所示。计算公式为

$$q_2 = d_{26} \tau_{xy} \quad (\text{对于 } y \text{ 切晶片}) \quad (5-12)$$

5. 弯曲变形 (简称 BS 方式)

弯曲变形不是基本的变形方式,而是拉、压应力和剪切应力共同作用的结果,应根据具体的晶体切割及弯曲情况选择合适的压电常数进行计算。

6. 体积变形方式 (简称 VE 方式)

对钛酸钡陶瓷,还有体积变形方式 (简称 VE 方式) 可以利用,如图 5-7e 所示,此时产生的表面电荷按下式计算

$$q_3 = d_{31} \sigma_1 + d_{32} \sigma_2 + d_{33} \sigma_3 \quad (5-13)$$

由于此时 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$, 同时对钛酸钡压电陶瓷有 $d_{31} = d_{32}$, 所以

$$q_3 = (2d_{31} + d_{33}) \sigma = d_h \sigma \quad (5-14)$$

式中 $d_h = 2d_{31} + d_{33}$ 为体积压缩的压电常数。这种变形方式可用来进行液体或气体压力的测量。

因为对石英晶体各个方向施加相同的作用力 (如液体压力、应力等), 石英晶体始终保持电中性不变, 所以石英晶体没有体积形变的压电效应。

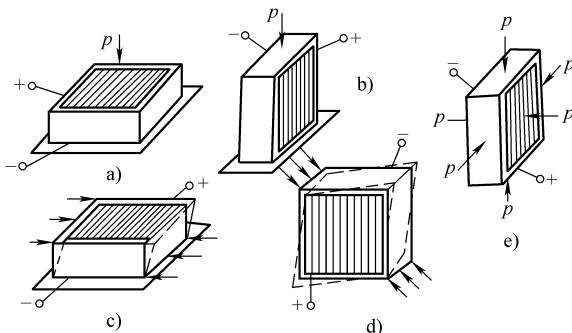


图 5-7 压电元件的受力状态和变形方式

a) 厚度变形 b) 长度变形 c) 面剪切变形 d) 厚度剪切变形 e) 体积变形

5.3.2 连接方式

在压电式传感器中,压电材料一般不用一片,而常常采用两片 (或是两片以上) 粘结在一起。由于压电材料的电荷是有极性的,因此接法也有两种,如图 5-8 所示,图 5-8a 所示接法叫作“并联”,其输出电容 C' 为单片电容的两倍,但输出电压 U' 等于单片电压 U ,极板上的电荷量 Q' 为单片电荷量 Q 的两倍,即

$$Q' = 2Q, U' = U, C' = 2C$$

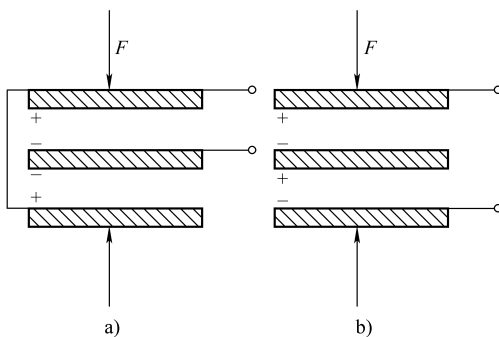


图 5-8 两个压电片的连接方式

a) 并联 b) 串联

图 5-8b 所示接法称为两压电片的“串联”，从图中可知，输出的总电荷 Q' 等于单片电荷 Q ，而输出电压 U' 为单片电压 U 的两倍，总电容 C' 为单片电容 C 的一半，即

$$Q' = Q, U' = 2U, C' = \frac{C}{2}$$

上述两种连接方式可根据测试要求合理选用。

5.4 测量电路

压电式传感器要求高的负载电阻 R_L ，因此常在压电式传感器输出端后面，先接入一个高输入阻抗的前置放大器，然后再接一般的放大电路及其他电路。前置放大器有两个作用：第一是把压电传感器的微弱信号放大；第二是把传感器的高阻抗输出变换为低阻抗输出。

一般来说，压电式传感器的绝缘电阻 $R_a \geq 10^{10} \Omega$ ，为了尽可能保持压电传感器的输出值不变，要求前置放大器的输入电阻要尽量高，一般最低在 $10^{11} \Omega$ 以上，这样才能减小由于漏电造成的电压（或电荷）的损失，不致引起过大的测量误差。

5.4.1 压电式传感器等效电路

压电元件是压电传感器的敏感元件，根据压电效应，当它受到外力作用时，就会在两个电极上产生极性相反、电量相等的电荷 Q 。这样可以把压电传感器看成一个静电发生器。两个极板上聚集电荷，中间为绝缘体，它又可以看成一个电容器，如图 5-9a 所示，其电容量为

$$C_a = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \quad (5-15)$$

式中 A ——极板面积 (m^2)；

d ——压电晶片厚度 (m)；

ε ——介质介电常数 (F/m)；

ε_r ——压电材料的相对介电常数；

ε_0 ——真空介电常数， $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。

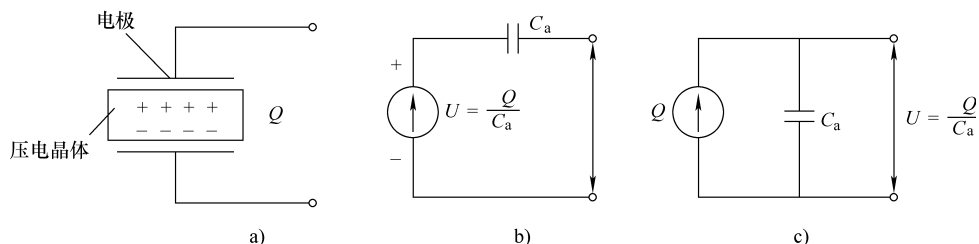


图 5-9 压电传感器的等效电路

a) 压电元件 b) 电压源 c) 电荷源

电容上的开路电压为

$$U = Q/C_a \quad (5-16)$$

压电传感器输出可以是电压，也可以是电荷。因此，压电传感器可以等效为一个电压源 U 和一个电容器 C_a 的串联电路，如图 5-9b 所示；也可以等效为一个电荷源 Q 和一个电容器 C_a 的并联电路，如图 5-9c 所示。

若将压电传感器接入测量电路，必须考虑电缆电容 C_c ，后续电路输入阻抗 R_i ，输入电容 C_i 以及压电传感器的漏电阻 R_a ，所以压电传感器实际的等效电路如图 5-10 所示。

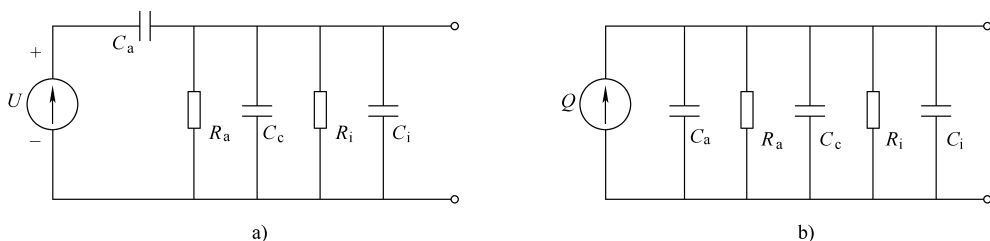


图 5-10 压电传感器实际的等效电路

a) 电压源 b) 电荷源

压电传感器的一个最大优点是可以自身产生电压，与压阻、电容传感元件不同，压电敏感元件不需要外加电源，本身就可产生一个可测量的电信号。在需要低能耗的应用场合，这是一个非常突出的优点。压电传感器本身所产生的电荷量很小，而传感器本身的输出电阻又很大，因此其输出信号十分微弱。根据传感器输出，前置放大器有两种形式：一种是电压放大器，其输出电压与输入电压成正比；另一种是电荷放大器，其输出电压与输入电荷成正比。

5.4.2 电压放大器

典型的压电传感器放大电路如图 5-11 所示。图中压电传感器等效为电压源，前置放大器为高增益的反相放大电路，为了实现传感器高阻抗变换，输入端采用 MOSFET 或 JFET，其中 C_c 为电缆电容， R_a 为传感器及电缆的漏电阻。考虑负载影响时，根据电荷平衡建立方程式有

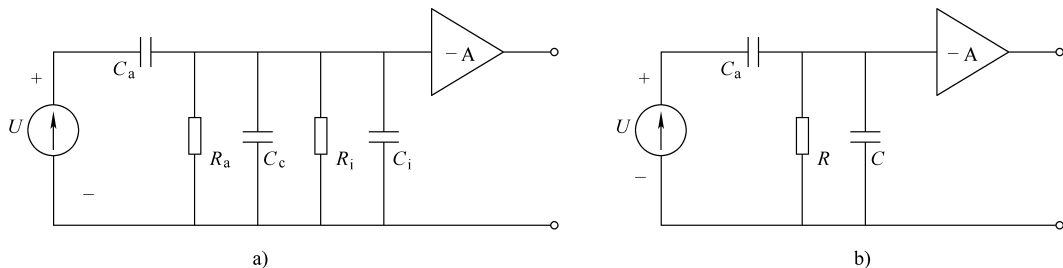


图 5-11 电压放大器

a) 等效电路 b) 简化后的等效电路

$$Q = CU + \int idt = CRi + \int idt \quad (5-17)$$

式中 Q ——压电元件所产生的电荷量 (C);
 C ——等效电路总电容 (F), $C = C_a + C_c + C_i$;
 U ——压电元件所建立的电压 (V);
 R ——等效电路电阻 (Ω), $R = R_a // R_i$;
 i ——漏电流 (A)。

当测量的外力为一动态交变力 $F = F_m \sin \omega t$ 时, 若压电元件所用压电材料为石英, 其压电系数为 d_{11} , 则在 x 正方向外力作用下, 输出电荷量为

$$Q = d_{11} F_m \sin \omega t = Q_m \sin \omega t \quad (5-18)$$

由此可得

$$CRi + \int idt = Q_m \sin \omega t \quad \text{或} \quad CR \frac{di}{dt} + i = Q_m \omega \cos \omega t \quad (5-19)$$

上式的稳态解为

$$i = \frac{\omega Q_m}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \sin(\omega t + \phi) \quad (5-20)$$

其中 $\phi = \arctan \frac{1}{\omega RC}$ 。

则电容上电压为

$$U = Ri = \frac{Q_m}{C} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \sin(\omega t + \phi) \quad (5-21)$$

图 5-11 中, A 为放大器的开环增益, $-A$ 表示放大器的输出与输入反相。当开环增益足够大时, 电缆电容及传感器电容可以忽略, 输出电压仅为输入电荷及反馈电容的函数, 则放大器的输出

$$U_o = -ARi = -\frac{AQ_m}{C} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \sin(\omega t + \phi) \quad (5-22)$$

由此可见压电传感器输出与外力的频率有关, 下面就不同的频率输入加以讨论。

1) 若作用在压电元件上的力为静态力, $\omega \rightarrow 0$, 则前置放大器的输出为零。

因为电荷会通过放大器的输入阻抗和传感器本身的泄漏电阻泄漏掉, 所以压电传感器不能测量静态物理量。

2) 令 $\omega_0 = 1/(RC)$, 当 $\omega/\omega_0 > 1$ 时, 压电传感器的电压幅值为

$$U_m \approx \frac{d_{11} F_m}{C} = \frac{d_{11} F_m}{C_a + C_c + C_i} \quad (5-23)$$

也就是说前置放大器的输入电压与外力的变化频率无关, 传感器的高频响应很好。一般认为 $\omega/\omega_0 \geq 3$, 可近似看作与频率无关。此时, 传感器的电压灵敏度为

$$A_u = \frac{U_m}{F_m} = \frac{d_{11}}{C} \quad (5-24)$$

由于电容 C 中包括电缆形成的杂散电容 C_c 和放大器输入电容 C_i , 因而传感器对电缆对

地形成的电容十分敏感。电缆过长或位置变化时会造成输出的不稳定,从而影响仪器的灵敏度。解决这一问题可采用短的电缆以及驱动电缆来降低电容的影响。

3) 压电传感器的低频响应取决于由传感器、连接电缆和负载电阻组成的电路的时间常数 RC 。为了不失真测量缓慢变化的动态量,需要扩大传感器工作频带的低频端,必须提高系统的时间常数 RC 。因此,压电传感器的测量电路应具有高输入阻抗,并在输入端并联一定的电容以加大时间常数 RC ,但并联电容不能过大,不然会使输出电压降低。

5.4.3 电荷放大器

电荷放大器实质上是负反馈放大器,它可将高内阻的电荷源转换为低内阻的电压源,而且输出电压正比于输入电荷,因此,电荷放大器同样也起着阻抗变换的作用。电荷放大器等效电路如图 5-12 所示,其中 C_f 、 R_f 为反馈电路参数。

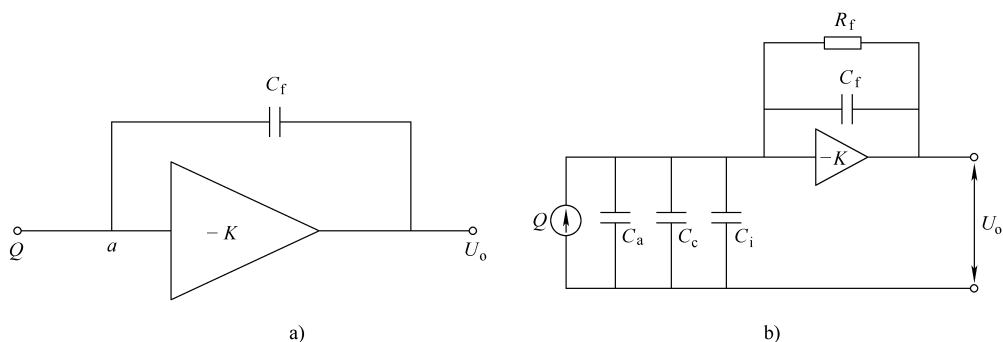


图 5-12 电荷放大器原理图

a) 电荷放大器原理示意图 b) 电荷放大器等效电路

在高频时,忽略电阻 R_a 、 R_i 和 R_f 的影响,则输入到放大器的电荷量为

$$Q_i = Q - Q_f$$

所以

$$Q_f = (U_i - U_o)C_f = \left(-\frac{U_o}{K} - U_o\right)C_f = -(1+K)\frac{U_o}{K}C_f$$

$$Q_i = U_i(C_i + C_c + C_a) = -\frac{U_o}{K}(C_i + C_c + C_a)$$

式中 K ——开环放大倍数。所以有

$$-\frac{U_o}{K}(C_i + C_c + C_a) = Q - \left[-(1+K)\frac{U_o}{K}C_f\right] = Q + (1+K)\frac{U_o}{K}C_f$$

故放大器的输出电压为

$$U_o = \frac{-KQ}{C_a + C_c + C_i + (1+K)C_f} \quad (5-25)$$

当 $K \gg 1$, 而 $(1+K)C_f \gg C_i + C_c + C_a$ 时, 放大器输出电压可以表示为

$$U_o = -\frac{Q}{C_f} \quad (5-26)$$

由式 (5-26) 可知, 电荷放大器的输出电压只与反馈电容有关, 而与连接电缆电容无关, 更换电缆时不会影响传感器的输出灵敏度, 这是电荷放大器最突出的一个优点。

在实际电路中, 考虑到被测物理量的不同量程, 反馈电容的容量可选用可调的, 一般在 $100 \sim 1000\text{pF}$ 之间。为减小零漂, 使电荷放大器工作稳定, 通常在反馈电容的两端, 并联一个大电阻 R_f (约 $10^8 \sim 10^{10}\Omega$), 其功能是提供直流反馈。

当低频时, 电阻 R_f 的影响不能忽略。此时电荷放大器的输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{j\omega\dot{Q}}{\frac{1}{R_f} + j\omega C_f} \quad (5-27)$$

由此可得, 电荷放大器的截止频率为

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (5-28)$$

如果 $C_f = 1000\text{pF}$, $R_f = 10^{10}\Omega$, 则 $f_L = 0.016\text{Hz}$, 这说明电荷放大器低频响应也是十分良好的。

5.5 压电式传感器应用

广义地讲, 凡是利用压电材料各种物理效应构成的各种传感器, 都可称为压电式传感器。它们已被广泛地应用在工业、军事和民用等领域, 表 5-1 给出了其主要应用类型。在这些应用类型中力敏类型应用最广, 可直接利用压电传感器测量力、压力、加速度、位移以及振动等物理量。

表 5-1 压电传感器的主要应用类型

传感器类型	转换关系	用途	压电材料
力敏型	力转换为电	声纳、应变仪、点火器、血压计、压电陀螺、压力、加速度传感器、微拾音器	SiO_2 、 ZnO_2 、 BaTiO_3 、PZT
热敏型	热转换为电	压电温度计	BaTiO_3 、PZO、TGS、 LiTiO_3
光敏型	光转换为电	热电红外探测器	BaTiO_3 、 LiTiO_3
声敏	声转换为电	振动器、微音器、超声探测器、助听器	SiO_2 、压电陶瓷

1. 压电式加速度传感器

图 5-13 为压缩式压电加速度传感器的结构原理图, 压电元件一般由两片压电片组成。在压电片的两个表面上镀银层, 并在银层上焊接输出引线, 或在两个压电片之间夹一片金属, 引线就焊接在金属上, 输出端的另一根引线直接与传感器基座相连。在压电片上放置一个比重较大的质量块, 然后用一硬弹簧或螺栓、螺帽对质量块预加载荷。整个组件装在一个厚基座的金属壳体中, 为了隔离试件的任何应变传递到压电元件上去, 避免产生假信号输出, 所以一般要加厚基座或选用刚度较大的材料来制造。

测量时, 将传感器基座与试件刚性固定在一起。当传感器感受振动时, 由于弹簧的刚度相当大, 而质量块的质量相对较小, 可以认为质量块的惯性很小。因此质量块感受与传感器基座相同的振动, 并受到与加速度方向相反的惯性力的作用。这样, 质量块就有一正比于加

速度的交变作用在压电片上。由于压电片具有压电效应，因此在它的两个表面上就产生交变电荷（电压），当振动频率远低于传感器的固有频率时，传感器的输出电荷（电压）与作用力成正比，并与试件的加速度成正比，输出电量由传感器输出端引出，输入到前置放大器后就可以用普通的测量仪器测出试件的加速度，如在放大器中加进适当的积分电路，就可以测出试件的振动速度或位移。

2. 压电式测力传感器

图 5-14 给出单向压电式测力传感器的结构图，传感器用于机床动态切削力的测量。两压电晶片以并联方式连接，被测力通过传力上盖作用在石英晶片上，在石英晶片表面上产生与被测力成正比的电荷。

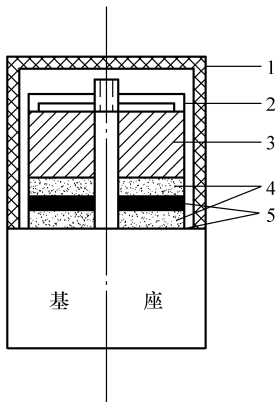


图 5-13 压缩式压电加速度传感器的结构原理图
1—壳体 2—弹簧 3—质量块 4—压电片 5—输出端

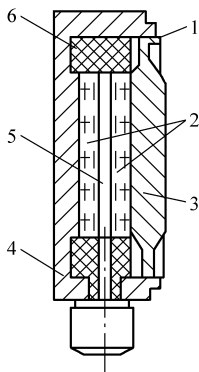


图 5-14 压电式单向测力传感器
1—电子束焊接 2—晶片 3—上盖
4—基座 5—电极 6—绝缘套

3. 压电式玻璃破碎报警器

在很多安全场合比如文物防盗、博物馆防盗和重要机密或重要物件保存都需要设置玻璃破碎报警器来保证其安全。而目前采用最多的就是压电式玻璃破碎报警器，它具有使用频带宽、灵敏度高、结构简单、工作可靠、质量轻、测量范围广等许多优点。

目前，电子报警技术正广泛应用于各行各业及人们的日常生活中。由于应用的范围很广，电子报警电路只能根据监控的对象进行设计，所以电子报警电路的形式是各种各样的。图 5-15 所示为检测系统原理框图。

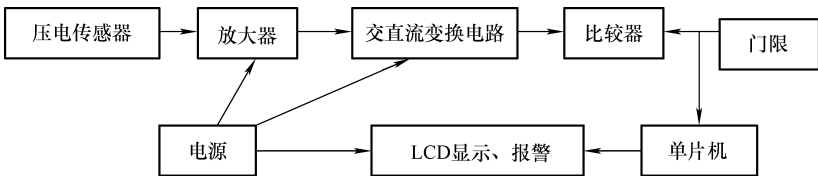


图 5-15 检测系统原理框图

玻璃破碎报警器采用压电传感器件，当它的表面受振动的时候，压电传感器就会产生一定的电压脉冲。但是这种脉冲电压很小只有几十毫伏，所以在其后应有放大器将振动电压脉

冲放大到一定的大小,放大器的输入阻抗很高,输出阻抗较低。这个信号还不可以直接送到单片机引起中断,必须经过比较器使它变成标准的下降电位,在下降沿的作用下引起单片机的中断执行工作。因为蜂鸣片产生的是交流信号,所以在送比较器之前必须把它变成直流电压,因此还得有个交流变直流的电路,单片机由软件控制可以实现报警与显示的功能。

4. 超声波传感器

超声波传感器是利用超声波的特性,实现检测的测量元件,也属于压电传感器的一种。探头是超声波传感器的关键部分,主要由压电晶片组成,常用有石英晶体、压电陶瓷 PZT 等。在超声发生器中,通过对压电材料切片上施加交变电压,产生正压电效应使得晶片发生交替的压缩和拉伸形变,由此产生超声波。超声波的接收器利用逆压电效应,当超声波作用到压电晶体片上,使晶片振动,从而产生与之对应的电荷。实际应用中根据结构不同,还可分为直探头(纵波)、斜探头(横波)、表面波探头(表面波)和聚焦探头(将声波聚焦为一细束)、水浸探头(可浸在液体中)以及其他专用探头等。

超声波直探头结构如图 5-16a 所示,压电式探头多为圆板形,两面镀有银层作为导电的极板,底面接地,顶面接至引出线。吸收块的作用是降低晶片的机械品质,吸收声能量。如果没有吸收块,当电脉冲信号停止时,晶片将会继续振荡,使超声波的脉冲宽度增加,分辨率变差。来源于工业噪声的寄生振动可能对接收探头产生干扰,利用窄声束系统可以降低来自背景噪声的干扰。

图 5-16b 发射与接收横波。压电片产生纵波,经斜契块倾斜入射到被测工件中,并转换为横波。如斜探头的入射角增大到某一角度,使得工件中横波的折射角为 90° 时,在工件中可产生表面波。双探头把两块压电片装在一个探头架内,一块压电晶片发射时,另一块接收。双探头可发射与接收纵波,其结构原理图如图 5-16c 所示。水浸探头的结构原理图如图 5-16d 所示。

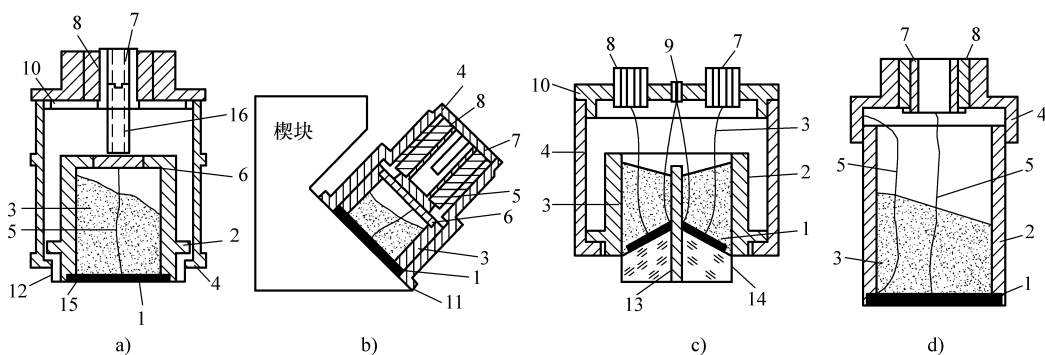


图 5-16 几种典型探头的结构

a) 直探头 b) 斜探头 c) 双探头 d) 水浸探头

1—压电晶片 2—晶片座 3—吸收块 4—金属壳 5—导线 6—接线片 7—接线座 8—绝缘柱
9—接地点 10—盖 11—接地铜箔 12—接地铜环 13—隔声层 14—延迟块 15—保护膜 16—导电螺杆

利用超声波传感器可制成压电式流量计,利用超声波在顺流方向和逆流方向的传播速度不同进行测量。其测量装置是两个收发两用的压电超声换能器。测量时,将两个换能器安装在管道壁上,如图 5-17 所示。每间隔一段时间(例如 $1/100\text{s}$),两个换能器交替发射和接

收超声波。在顺流方向和逆流方向所接收的超声波相位差与流速成正比。根据这个关系，便可精确测定流速，而流速与管道横截面积的乘积等于流量。

这种流量计可以测量各种液体的流量，及中压和低压气体的流速，不受该流体的电导率、黏度、密度、腐蚀性以及成分的影响。

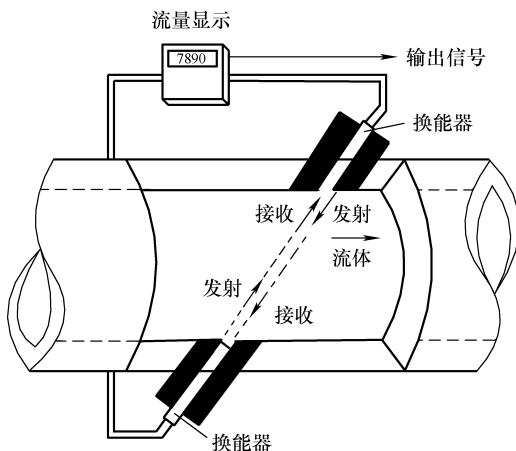


图 5-17 压电式流量计

习 题

- 5-1 什么是正压电效应？什么是逆压电效应？常用的压电材料有哪些种类？
- 5-2 试说明为什么不能用压电传感器测量变化比较缓慢的信号？
- 5-3 压电式传感器测量电路中为什么要加入前置放大器？电荷放大器有何特点？
- 5-4 某压电晶体的电容为 1000pF ，电荷灵敏度 $K_q = 3\text{pC/N}$ ，电缆电容 $C_c = 2000\text{pF}$ ，示波器的输入阻抗为 $1\text{M}\Omega$ ，并联电容为 100pF 。求
 - (1) 压电晶体的电压灵敏度 K_u ；
 - (2) 若系统允许的测量幅值误差为 5% ，可测最低频率是多少？
 - (3) 若可测最低频率为 10Hz ，允许误差为 5% ，需并联多大电容？

参 考 文 献

- [1] 周真，苑惠娟．传感器原理与应用 [M]．北京：清华大学出版社，2011.
- [2] 梁福平．传感器原理及检测技术 [M]．武汉：华中科技大学出版社，2010.
- [3] 唐文彦．传感器 [M]．北京：机械工业出版社，2011.
- [4] 金篆芷，王明时．现代传感技术 [M]．北京：电子工业出版社，1995.
- [5] 梁福平．传感器原理及检测技术学习与实践指导 [M]．武汉：华中科技大学出版社，2014.
- [6] 吕勇军．传感器技术实用教程 [M]．北京：机械工业出版社，2012.

第6单元

磁电式传感器

学习要点

- ◆ 磁电感应式传感器工作原理与结构；
- ◆ 霍尔效应及霍尔电动势产生的原理；
- ◆ 霍尔元件、测量电路及误差补偿；
- ◆ 霍尔式传感器的应用。

相关知识链接

- ◆ GB/T 30242—2013 磁电式速度传感器通用技术条件；
- ◆ JJG 134—2003 磁电式速度传感器检定规程；
- ◆ JB/T 7490—2007 霍尔电流传感器。

引导案例

霍尔式速度传感器与汽车 ABS 系统

随着汽车电子技术的发展，汽车的安全性能技术受到人们的重视，制动系统作为主要安全件更是备受关注，防抱死刹车系统（Anti - locked Braking System, ABS）是一种具有防滑、防锁死等优点的汽车安全控制系统，它既有普通制动系统的制动功能，又能在制动过程中防止车轮被制动抱死。ABS 对汽车性能的影响主要表现在减少制动距离、保持转向操纵能力、提高行驶方向稳定性以及减少轮胎的磨损，是目前汽车上最先进、制动效果最佳的制动装置。

在 ABS 中，速度传感器是十分重要的部件。ABS 由车轮速度传感器、液压控制单元和电控单元 ECU 等组成，在制动时，车轮速度传感器测量车轮的速度，如果一个车轮有抱死的可能时，车轮减速度增加很快，车轮开始滑转。如果该减速度超过设定的值，控制器就会发出指令，让电磁阀停止或减少车轮的制动压力，直到抱死的可能消失为止。在这个系统中，霍尔传感器作为车轮转速传感器，是制动过程中的实时速度采集器，是 ABS 中的关键部件之一。

磁电式传感器是通过磁电作用将被测量转换成电信号的一种传感器。磁电式传感器包括磁电感应式传感器、霍尔式传感器和磁栅式传感器。

6.1 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器是利用导体和磁场发生相对运动而在导体两端输出感应电动势的，故简称感应式传感器，也称为电动式传感器。它是一种机 - 电能量变换型传感器，具有不需要

供电电源, 电路简单, 性能稳定, 输出阻抗小等优点, 适合于振动、转速、扭矩等测量。

6.1.1 工作原理

磁电感应式传感器是以电磁感应原理为基础的。根据法拉第电磁感应定律可知, 当线圈在磁场中做切割磁力线运动时所产生的感应电动势与通过线圈的磁通量对时间的变化率成正比, 即

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (6-1)$$

式中 N ——线圈匝数;

Φ ——通过线圈的磁通量;

E ——线圈中所产生的感应电动势。

由于 $\Phi = BS$, 所以式 (6-1) 可以写成

$$E = -N \frac{d(BS)}{dt} = -N \left(S \frac{dB}{dt} + B \frac{dS}{dt} \right) \quad (6-2)$$

式中 S ——闭合线圈所围成的面积;

B ——线圈处的磁感应强度。

根据式 (6-2) 可将磁电感应式传感器分为两种类型, 一种类型是由于闭合线圈围成的面积 S 变化, 引起通过线圈的磁通量变化, 从而使线圈产生感应电动势; 另一种类型是由于线圈处的磁感应强度发生变化, 引起通过线圈的磁通量变化, 从而使线圈产生感应电动势。

6.1.2 相对运动式磁电感应式传感器

如果磁感应强度为 B , 每匝线圈的平均长度为 l , 线圈相对磁场运动的速度为 v , 则 N 匝线圈中所产生的感应电动势为

$$E = -NBlv \quad (6-3)$$

由式 (6-3) 当磁感应强度 B 、线圈的平均长度 l 、线圈的匝数 N 恒定时, 感应电动势 E 就与线圈相对于磁场运动速度 v 成正比, 因此磁电感应式传感器可以用来测量速度。由于速度与位移、加速度间是积分与微分的关系, 因此, 只要在后续电路里增加积分电路和微分电路, 磁电感应式传感器就可以测量位移与加速度。

如图 6-1 所示, 这种相对运动式磁电感应式传感器由永久磁铁 1、线圈 2、金属骨架 3、弹簧 4 和壳体 5 等组成。当线圈与磁铁之间存在相对运动时, 通过线圈内的磁通量发生变化, 线圈中将产生感应电动势。运动部件可以是线圈也可以是磁铁, 因此又分为动圈式和动铁式两种结构类型。

动圈式和动铁式的工作原理是完全相同的, 主要用来测量振动速度。当壳体 5 随被测振动体一起振动时, 由于弹簧 4 较软, 运动部件质量相对较大, 因此振动频率足够高 (远高于传感器的固有频率) 时, 运动部件的惯性很大, 来不及跟随振动体一起振动, 近于静止不动, 振动能量几乎全被弹簧 4 吸收, 永久磁铁 1 与线圈 2 之间的相对运动速度接近于振动体振动速度。磁铁 1 与线圈 2 相对运动使线圈 2 切割磁力线, 产生与运动速度 v 成正比的感应电动势 E 如式 (6-3)。

如果线圈与磁场没有相对运动, 这就是磁阻式磁电感应传感器。

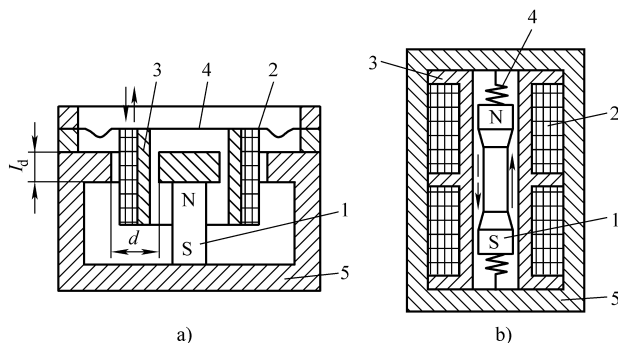


图 6-1 相对运动式磁电感应式传感器原理

a) 动圈式 b) 动铁式

1—永久磁铁 2—线圈 3—金属骨架 4—弹簧 5—壳体

6.1.3 磁阻式磁电感应传感器

磁阻式磁电感应传感器线圈和磁铁部分都是静止的，运动部件安装在被测物体上，是用导磁材料制成的。在物体运动过程中，运动体改变通过线圈的磁感应强度 B ，从而使通过线圈的磁通量发生变化，在线圈中产生感应电动势。磁阻式磁电感应传感器一般用来测量旋转体的转速，线圈中感应电动势的频率作为传感器的输出，它取决于磁通变化的频率。

磁阻式磁电感应传感器的结构分为开磁路和闭磁路两种。图 6-2 所示是开磁路磁阻式转速传感器结构示意图。传感器由永久磁铁 1、软铁 2、线圈 3 和齿轮 4 组成。线圈、永久磁铁以及软铁都静止不动，齿轮安装在被测旋转体上随其一起转动。当齿轮旋转时，齿的凸凹引起磁路磁阻的变化，使通过线圈的磁通量变化，在线圈中产生感应电动势，其频率等于齿轮的齿数 Z 和转速 n 的乘积，即

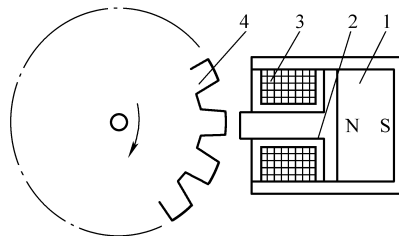


图 6-2 开磁路磁阻式转速传感器结构示意图

1—永久磁铁 2—软铁 3—线圈 4—齿轮

$$f = \frac{Zn}{60} \quad (6-4)$$

式中 Z ——齿轮的齿数；

n ——被测旋转体转速 (r/min)；

f ——感应电动势频率。

当已知测量齿轮的齿数时，测得感应电动势的频率，就可求得被测旋转体的转速了。

图 6-3 所示为闭磁路磁阻式转速传感器结构示意图，它由内齿轮和外齿轮、永久磁铁和感应线圈组成。内、外齿轮齿数相同，内齿轮装在转轴上。当转轴连接到被测转轴上时，外齿轮不动，内齿轮随被测轴而转动，内、外齿轮的相对转动使气隙磁阻产生周期性变化，从而引起磁路中磁通的变化，使线圈内产生周期性变化的感应电动势。如式 (6-4)，与开磁

路磁阻式转速传感器类似,感应电动势的频率与被测转速成正比。

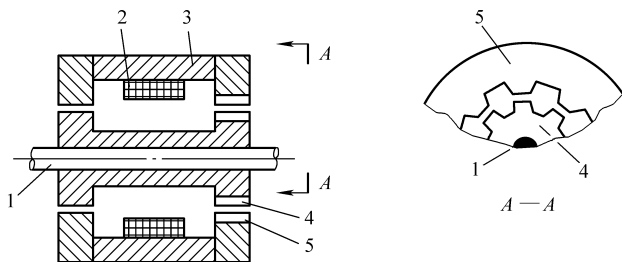


图 6-3 闭磁路磁阻式转速传感器结构示意图

1—转轴 2—感应线圈 3—永久磁铁 4—内齿轮 5—外齿轮

6.2 霍尔式传感器

霍尔式传感器是基于霍尔效应工作的,可用来测量位移、转速、加速度、压力、电流和磁场等。由于霍尔式传感器结构简单,体积小,频率响应宽,动态范围大,使用寿命长,可靠性高,因此得到广泛的应用。

6.2.1 霍尔效应

当电流垂直于外磁场方向通过导体或半导体薄片时,在薄片垂直于电流和磁场方向的两侧表面之间产生电位差的现象,称为霍尔效应。所产生的电位差称作霍尔电势,如图 6-4 所示,它是由于运动载流子受到磁场作用力即洛伦兹力 F_L ,在薄片两侧分别形成电子和正电荷的积累导致的。

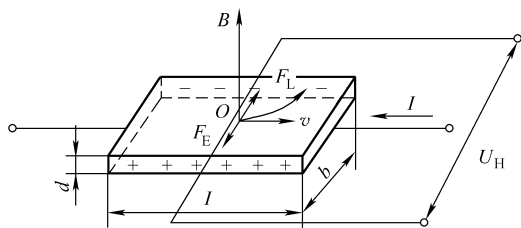


图 6-4 霍尔效应原理图

洛伦兹力 $F_L = evB$, 其中 e 为电子电荷量, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$, v 为电子平均运动速度, B 为磁感应强度。而 $v = -I/(nebd)$, 其中 I 为加在薄片左右两端的电流 I (称为控制电流), n 为电子浓度, 即单位体积中的电子数, 负号表示电子运动速度的方向与电流方向相反, b 、 d 分别为薄片宽度和厚度。

由于电子在半导体的后端面上电子有所积累而带负电, 前端面则因缺少电子而带正电, 在前后端面间形成电场。该电场产生的电场力 $F_E = -eE_H = -eU_H/b$ 阻止电子继续偏转, 其中 U_H 为霍尔电势。当 $F_L = F_E$ 时, 电子积累达到动态平衡, 即

$$U_H = \frac{IB}{ned} = R_H \frac{IB}{d} \quad (6-5)$$

式中 R_H ——霍尔系数, 由载流材料的物理性质所决定。 $R_H = \pm \gamma/(ne)$, 其正负号由载流子导电类型决定, 电子导电为负值, 空穴导电为正值, γ 是与温度、能带结构等有关的系数, 若运动载流子的速度分布为费米分布, 则 $\gamma = 1$; 若为波尔兹曼分布, 则 $\gamma = 3\pi/8$ 。 R_H 单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$ 。

将式 (6-5) 写成

$$U_H = k_H IB \quad (6-6)$$

式中

$$k_H = \frac{R_H}{d} \quad (6-7)$$

k_H 称为霍尔元件的灵敏度系数, 它与载流材料的物理性质和几何尺寸有关, 表示在单位激励电流和单位磁感应强度时产生的霍尔电势的大小。

如果磁场与薄片法线之间有 α 角, 那么

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \cos \alpha \quad (6-8)$$

霍尔系数 R_H 与载流子的电阻率 ρ 和迁移率 μ 的关系为

$$R_H = \rho \mu \quad (6-9)$$

半导体材料具有很高的迁移率和电阻率, 其霍尔系数远大于金属, 具有显著的霍尔效应。具有霍尔效应的元件称为霍尔元件。因此, 常用半导体材料制作霍尔元件。霍尔电势 U_H 与导体厚度 d 成反比, 为了提高霍尔电势, 霍尔元件制作成薄片。

6.2.2 霍尔元件

霍尔元件结构如图 6-5 所示, 从矩形半导体基片长度方向上的两端面引出一对电极 1、1', 用于施加控制电流, 称为控制电极。在与这两个端面垂直的另两侧端面引出电极 2、2', 用于输出霍尔电势, 称为霍尔电极。在基片外面用金属或陶瓷、环氧树脂等封装作为外壳。

霍尔电极在基片上的位置及它的宽度 b 对霍尔电势数值影响很大。通常霍尔电极位于基片长度的中间, 其宽度 b 远小于基片的长度 l , 要求 $b/l < 0.1$, 如图 6-6 所示。

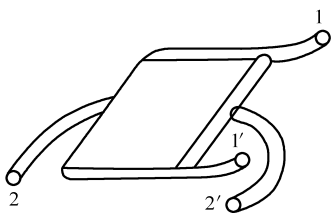


图 6-5 霍尔元件

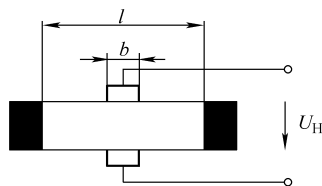


图 6-6 霍尔电极的位置

目前最常用的霍尔元件材料是锗 (Ge)、硅 (Si)、锑化铟 (InSb)、砷化铟 (InAs)、砷化镓 (GaAs) 和不同比例亚砷酸铟和磷酸铟组成的 $\text{In}(\text{As}_y\text{P}_{1-y})$ 型固熔体 (其中 y 表示百分比) 等半导体材料。其中 N 型锗容易加工制造, 其霍尔系数、温度性能和线性度都较好。N 型硅的线性度最好, 其霍尔系数、温度性能同 N 型锗。锑化铟对温度最敏感, 尤其在低温范围内温度系数大, 但在室温时其霍尔系数较大。砷化铟的霍尔系数较小, 温度系数也较小, 输出特性线性度好。 $\text{In}(\text{As}_y\text{P}_{1-y})$ 型固熔体的热稳定性最好。砷化镓的温度特性和输出特性好, 但价格较贵。不同材料适合用于不同的要求和应用场合, 锑化铟适用于作为敏感元件, 锗和砷化铟霍尔元件适用于测量指示仪表, N 型硅可将霍尔元件与集成电路制

作在一起。图 6-7 为霍尔元件符号。

霍尔元件的测量电路很简单,如图 6-8 所示。控制电流 I 由电压源提供,其大小由可变电阻 R_p 调节。霍尔电势 U_H 加在负载电阻 R_L 上, R_L 代表测量放大电路的输入电阻。

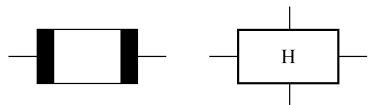


图 6-7 霍尔元件符号

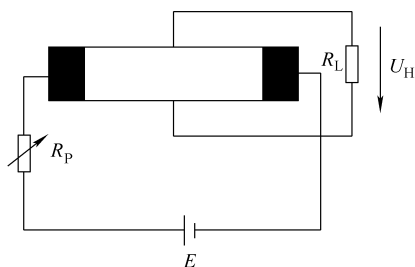


图 6-8 霍尔元件的测量电路

6.2.3 霍尔元件的主要特性参数

1. 额定激励电流和最大允许激励电流

当霍尔元件自身温升 10°C 时所流过的激励电流称为额定激励电流。以元件允许最大温升为限制所对应的激励电流称为最大允许激励电流。因霍尔电势随激励电流增加而线性增加,所以使用中希望选用尽可能大的激励电流,因而需要知道元件的最大允许激励电流,改善霍尔元件的散热条件,可以使激励电流增加。

当激励电流采用交流时,由于建立霍尔电势的时间极短,因此交流电流的频率可达几千兆赫,且信噪比较大。

2. 输入电阻和输出电阻

激励电极间的电阻值称为输入电阻。霍尔电极输出电势对外电路来说相当于一个电压源,其电源内阻即为输出电阻。以上电阻值是在磁感应强度为零且环境温度在 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 时确定的。

3. 不等位电势 U_0 和不等位电阻 r_0

当霍尔元件的激励电流为 I_H 时,若元件所处位置磁感应强度为零,则它的霍尔电势 U_0 应该为零,但实际不为零。这时测得的空载霍尔电势 U_0 称为不等位电势。产生这一现象的原因有:

- 1) 霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位面上,如图 6-9a 所示。
- 2) 半导体材料不均匀造成了电阻率不均匀或是几何尺寸不均匀使等位面倾斜,如图 6-9b 所示。

- 3) 激励电极接触不良造成激励电流不均匀分布等。

不等位电势也可用不等位电阻 r_0 表示

$$r_0 = \frac{U_0}{I_H}$$

式中 U_0 ——不等位电势;

r_0 ——不等位电阻;

I_H ——激励电流。

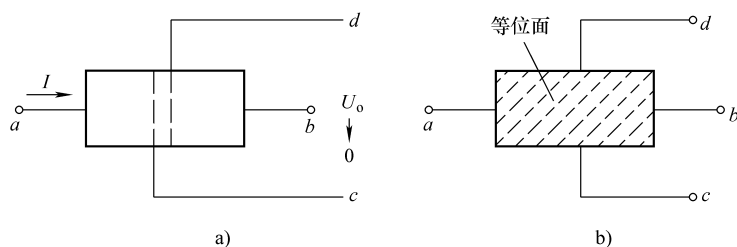


图 6-9 不等位电势产生示意图

a) 两电极点不在同一等位面上 b) 等位面歪斜

由上式可以看出, 不等位电势 U_0 是由激励电流流经不等位电阻 r_0 所产生的电压。

4. 寄生直流电势

在外加磁场为零, 霍尔元件用交流激励时, 霍尔电极输出除了交流不等位电势外, 还有一直流电势, 称为寄生直流电势。其产生的原因有:

- 1) 激励电极与霍尔电极接触不良, 形成非欧姆接触, 造成整流效果。
- 2) 两个霍尔电极大小不对称, 则两个电极点的热容不同, 散热状态不同, 形成极间温差电动势。寄生直流电动势一般在 1mV 以下, 它是影响霍尔片温漂的原因之一。

5. 霍尔电势温度系数

在一定磁感应强度和激励电流下, 温度每变化 1°C 时, 霍尔电势变化的百分率称霍尔电势温度系数。它同时也是霍尔系数的温度系数。

6.2.4 霍尔元件的误差补偿

1. 不等位电势误差的补偿

不等位电势是零位误差中最主要的一种, 它与霍尔电势具有相同的数量级, 有时甚至超过霍尔电势。如图 6-10 所示, 霍尔元件可以等效为一个四臂电桥, 不等位电势就相当于电桥的初始不平衡输出电压。因此可以通过在某个桥臂上并联电阻而将不等位电势降到最小, 甚至为零。

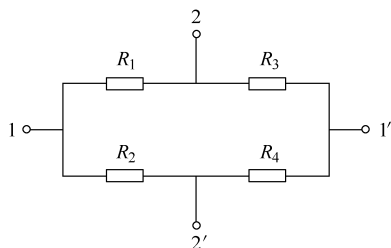


图 6-10 霍尔元件等效电路

图 6-11 给出了两种常用的不等位电势的补偿电路。图 6-11a 为单臂补偿法, 即在某个桥臂上并联可调电阻; 图 6-11b 为双臂补偿法, 即在相邻两个桥臂上分别并联一个电阻, 其中一个为可调电阻。两种补偿方法中, 不对称补偿电路比较简单, 而对称补偿电路温度稳定性好。

2. 霍尔元件温度误差的补偿

霍尔元件由半导体材料制成, 因而它的性能参数对温度很敏感, 都是温度的函数。当温度变化时, 霍尔元件的电阻率、迁移率和载流子浓度、输入和输出电阻以及霍尔系数等都会发生变化, 致使霍尔电势变化, 产生温度误差。为了减小温度误差, 除选用温度系数较小的材料如砷化钢外, 还可以采用适当的补偿电路。

因为霍尔元件的输入电阻会随着温度变化而发生变化, 所以在稳压源供电时, 就使控制

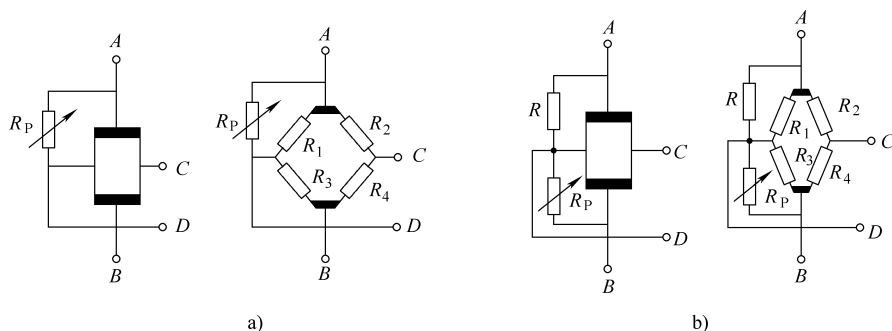


图 6-11 不等位电势补偿电路

a) 单臂补偿法及等效电路 b) 双臂补偿法及等效电路

电流发生变化, 进而带来温度误差。采用恒流源 (稳定度 $\pm 0.1\%$) 提供控制电流, 可以减小这种误差。

霍尔元件的灵敏度系数 k_H 也是温度的函数, 因此即使采用恒流源供电, 也存在温度误差。

大多数霍尔元件的温度系数是正的, 即温度升高, 霍尔电势也增大。对于具有正温度系数的霍尔元件, 可采用在其输入回路中并联电阻 R_P 的办法补偿温度误差, 如图 6-12 所示。

设初始温度为 t_0 , 霍尔元件的输入电阻为 R_{i0} 、灵敏度系数为 k_{H0} , 当温度变化到 t 时, 霍尔元件的输入电阻为 R_{it} 、灵敏度系数为 k_{Ht} 。它们之间的关系为

$$k_{Ht} = k_{H0} [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (6-10)$$

$$R_{it} = R_{i0} [1 + \beta(t - t_0)] \quad (6-11)$$

式中 α ——霍尔元件灵敏度温度系数;

β ——元件的电阻温度系数。

由图 6-12 可知, $I = I_P + I_H$, $I_P R_P = I_H R_{it}$, 所以

$$I_H = \frac{R_P I}{(R_{it} + R_P)} \quad (6-12)$$

由式 (6-12), 当温度为 t_0 时, 有

$$I_{H0} = \frac{R_P I}{(R_{i0} + R_P)} \quad (6-13)$$

当温度为 t 时, 有

$$I_{Ht} = \frac{R_P I}{(R_{it} + R_P)} \quad (6-14)$$

将式 (6-11) 代入式 (6-14), 得

$$I_{Ht} = \frac{R_P I}{\{R_{i0} [1 + \beta(t - t_0)] + R_P\}} \quad (6-15)$$

为了使霍尔电势不随温度而变化, 必须保证 t_0 和 t 时的霍尔电势相等, 即 $k_{H0} I_{H0} B =$

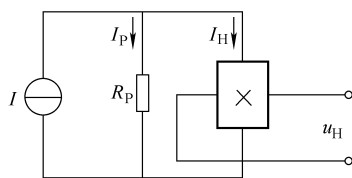


图 6-12 恒流源温度补偿电路

$k_{Ht} I_{Ht} B$ 。将式 (6-10)、式 (6-13)、式 (6-15) 代入, 则可得

$$1 + \alpha(t - t_0) = \frac{R_{i0} [1 + \beta(t - t_0)] + R_p}{R_{i0} + R_p}$$

所以

$$R_p = \frac{(\beta - \alpha) R_{i0}}{\alpha} \quad (6-16)$$

霍尔元件的 R_{i0} 、 α 和 β 值均可在产品说明书中查到。通常 $\beta \gg \alpha$, 所以式 (6-16) 可简化为

$$R_p = \frac{\beta}{\alpha} R_{i0} \quad (6-17)$$

根据式 (6-17) 选择输入回路并联电阻 R_p , 可使温度误差减到极小而不影响霍尔元件的其他性能。实际上 R_p 也随温度而变化, 但因其温度系数远比 β 值小, 故可以忽略不计。

也可采用稳压电源供电, 且霍尔输出开路状态下工作时, 可在输入回路中串入适当电阻来补偿温度误差。其分析过程同上, 结果同式 (6-17)。

6.3 磁栅式传感器

磁栅式传感器主要由磁栅和磁头两部分组成。磁栅上录制等间距的磁信号, 它是将等节距的周期变化信号用录磁的方法记录在磁性尺子或圆盘上而制成的, 磁头沿磁栅尺 (盘) 运动检测磁信号, 并转换成电信号, 从而测量出位移量。磁栅式传感器制作简单, 成本低廉, 使用方便, 可以在仪器或机床上安装后再录制磁栅, 因而可以避免安装误差或机床本身的几何误差。

6.3.1 磁栅式传感器的结构和工作原理

如图 6-13 所示, 磁栅由磁尺基体、磁头和检测电路组成。磁栅是用不导磁的金属做基体, 在基体表面上均匀地涂覆一层厚度为 0.1 ~ 0.2mm 的磁性薄膜, 常用材料为镍钴磷合金。在上面录制节距均匀的磁信号, W 为磁信号的节距。磁头是用来读取磁尺上的记录信号的, 可以分为动态磁头和静态磁头。

动态磁头又称速度响应式磁头, 如图 6-14 所示。动态磁头的铁心采用厚度为 0.2mm 的铁镍合金片, 叠成需要的厚度, 其上绕有一组绕组。当磁头相对磁尺运动时, 在线圈中产生感应电动势。运动速度不同, 输出的感应电动势大小也不同, 静止时没有信号输出, 故不适合长度测量, 只适合于位移。

静态磁头又称磁通响应式磁头, 它在磁头与磁尺间没有相对运动的情况下也有信号输出。静态磁头由高磁导率材料薄片叠合而成, 薄片厚度等于节距的 1/4。磁头铁心上绕有励磁绕组 N_1 和输出绕组 N_2 。

如图 6-15 所示, 当励磁绕组 N_1 通以交流励磁电流, 磁通的一部分通过铁心, 在输出绕组 N_2 上产生感应电动势。磁尺漏磁通 Φ_0 的一部分 Φ_2 通过磁头铁心, 则有

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_0 R_\sigma}{R_\sigma + R_T} \quad (6-18)$$

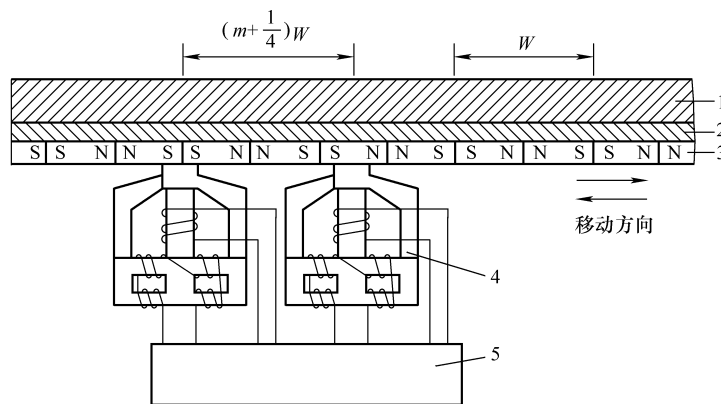


图 6-13 磁栅式传感器结构示意图

1—磁尺基体 2—抗磁镀层 3—磁性涂层 4—磁头 5—控制电路

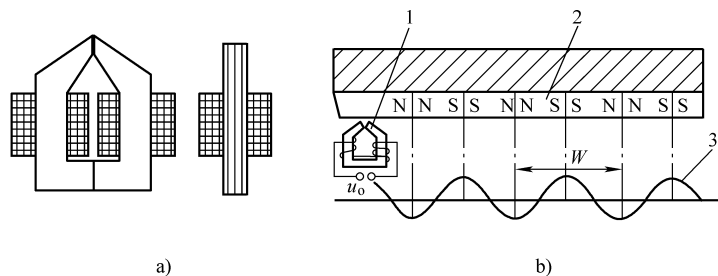


图 6-14 动态磁头结构与读出信号

a) 动态磁头结构 b) 读出信号

式中 R_σ ——气隙磁阻；

R_T ——铁心磁阻。

一般情况下，可以认为 R_σ 不变， R_T 则与励磁线圈所产生的励磁磁通 Φ_1 有关。在励磁电压 u 变化的一个周期内，铁心被励磁电流所产生的磁通 Φ_1 饱和两次， R_T 变化两个周期。由于铁心饱和时其 R_T 很大， Φ_2 不能通过，因此在 u 的一个周期内， Φ_2 也变化两个周期，可近似认为

$$\Phi_2 = \Phi_0 (a_0 + a_2 \sin 2\omega t) \quad (6-19)$$

式中 a_0 、 a_2 ——与磁头结构参数有关的常数；

ω ——励磁电源的角频率。

在磁尺不动的情况下， Φ_0 为一常量，输出绕组中产生感应电动势 e_0 为

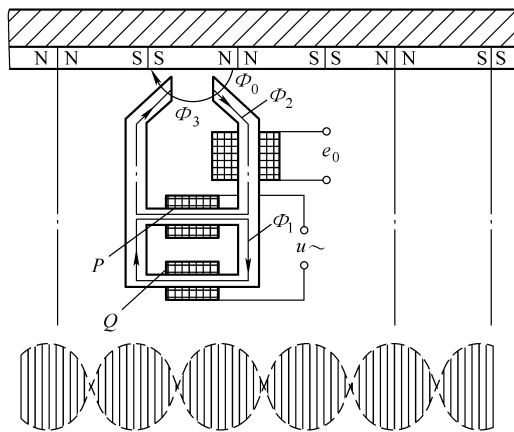


图 6-15 静态磁头读出原理

$$e_0 = N_2 \left(\frac{d\Phi_2}{dt} \right) = 2N_2 \Phi_0 a_2 \omega \cos 2\omega t = k\Phi_0 \cos 2\omega t \quad (6-20)$$

式中 N_2 ——输出绕组匝数；

k ——常数， $k = 2N_2 a_2 \omega$ 。

漏磁通 Φ_0 是磁尺位置的周期函数。当磁尺与磁头相对移动一个节距 W 时， Φ_0 就变化一个周期。因此 Φ_0 可近似为

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin(2\pi x/W)$$

于是可得

$$e_0 = k\Phi_m \sin(2\pi x/W) \cos 2\omega t \quad (6-21)$$

式中 x ——磁栅与磁头之间的相对位移；

Φ_m ——漏磁通的峰值。

由此可见，静态磁头的磁尺是利用它的漏磁通变化来产生感应电动势的。静态磁头输出信号的频率为励磁电源频率的两倍，其幅值则与磁尺和磁头之间的相对位移成正弦（或余弦）关系。

检测电路主要用来提供给磁头电压并把磁头检测到的信号转换为脉冲信号输出。

6.3.2 磁栅式传感器的信号处理方法

为了辨别方向，通常将两只相距 $(m+1/4)W$ 的磁头做成一体，其中 m 为正整数， W 为节距。两个磁头输出信号相位差为 $\pi/2$ 。其信号处理方式分为鉴相和鉴幅两种方式。

1. 鉴相方式

两个磁头的输出为

$$\begin{cases} e_1 = U_m \sin(2\pi x/W) \cos 2\omega t \\ e_2 = U_m \cos(2\pi x/W) \cos 2\omega t \end{cases} \quad (6-22)$$

把某一磁头的输出信号移相 $\pi/2$ ，则两磁头的输出分别为

$$\begin{cases} e_1 = U_m \sin(2\pi x/W) \cos 2\omega t \\ e_2 = U_m \cos(2\pi x/W) \sin 2\omega t \end{cases} \quad (6-23)$$

将两路输出用求和电路相加后得到的输出电压为

$$u_0 = U_m \sin(2\pi x/W + 2\omega t) \quad (6-24)$$

由式 (6-24) 可知，输出信号是一个幅值不变、相位随磁头与磁尺相对位置而变化的信号。这样只要检测出信号的相位 $2\pi x/W$ ，就可得到磁头和磁尺的相对位移量 x ，这种方式称为鉴相方式。

2. 鉴幅方式

两个磁头输出信号如式 (6-22) 所示，它们是两个幅值与磁头位置 x 成正比的信号。经检波器去掉高频载波后可得

$$\begin{cases} e'_1 = U_m \sin(2\pi x/W) \\ e'_2 = U_m \cos(2\pi x/W) \end{cases} \quad (6-25)$$

此两路相位差 90° 的两相信号送至有关电路进行细分辨向后输出，通过其幅值得到 x 值，这种方式称为鉴幅方式。对应磁尺上一个节距的磁信号，磁头输出一个周期信号，即一个脉冲信号。所谓细分就是在一个周期里输出多个脉冲信号，以提高测量分辨率。而辨向就是根据

两个磁头输出的两个信号超前与落后情况判断出位移的方向。

6.4 磁电式传感器应用

6.4.1 磁电感应式传感器应用

1. 磁电感应式振动传感器

图 6-16 所示为磁电感应式振动传感器结构原理图。永久磁铁 3 和圆筒形导磁材料制成的外壳 7 固定在一起，形成磁路系统，壳体还起屏蔽作用。工作线圈 6 和圆环形阻尼器 2 用心轴 5 连在一起组成质量块，用圆形弹簧片 1 和 8 支承在壳体上。使用时，把传感器固定在被测振动体上，永久磁铁、铝架和壳体一起随被测体振动，由于质量块有一定的质量，产生惯性力，而弹簧片又非常柔软，因此当振动频率远大于传感器固有频率时，线圈在磁路系统的环形气隙中相对永久磁铁运动，以振动体的振动速度切割磁力线，产生感应电动势，通过引线 9 接到测量电路。该感应电动势与速度成正比，经过微分或积分电路可以测量振动加速度和位移。

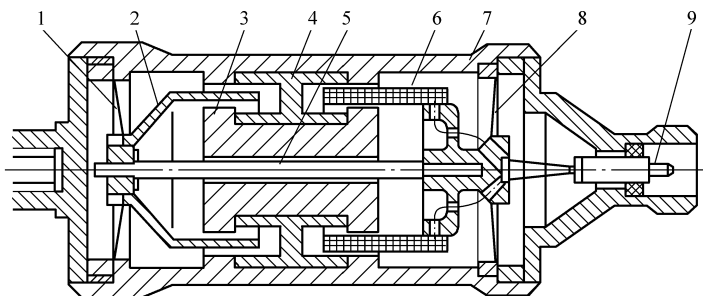


图 6-16 磁电感应式振动传感器

1、8—圆形弹簧片 2—圆环形阻尼器 3—永久磁铁
4—铝架 5—心轴 6—工作线圈 7—壳体 9—引线

2. 磁电感应式转速传感器

图 6-17 是一种磁电感应式转速传感器的结构原理图。转子 2 安装在转轴 1 上，它和定子 5、永久磁铁 3 组成磁路系统。工作时，转轴 1 与被测物转轴相连接，当转子 2 随转轴 1 转动时，转子 2 上的齿相对于定子运动，磁路系统的磁通呈周期性的变化，在线圈 4 中产生近似正弦的感应电动势，其频率与转速成正比。

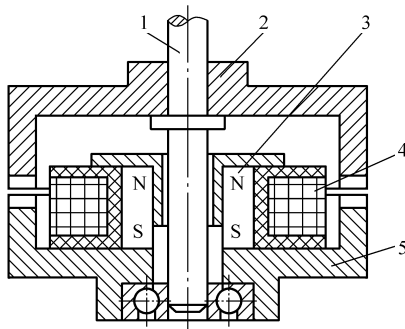


图 6-17 磁电感应式转速传感器

1—转轴 2—转子 3—永久磁铁 4—线圈 5—定子

3. 磁电感应式扭矩仪

它属于磁阻式磁电感应传感器，结构示意图如图 6-18 所示。它由定子、转子、线圈和传感器轴组成。转子和定子上有一一对应的齿和槽。

定子固定在传感器外壳上,转子和线圈一起固定在传感器轴上。

测量扭矩时,需用两个传感器,将它们的传感器轴分别固定在被测轴的两端,它们的外壳固定不动。安装时,一个传感器的定子齿与其转子齿相对,另一个传感器的定子槽与其转子齿相对。当被测轴无外加扭矩时,扭转角为零,若传感器轴以一定角速度旋转,则两个传感器输出相位差为 0° 或 180° 的两个近似正弦波的感应电动势。当被测轴感受扭矩时,轴的两端产生扭转角 φ ,因此两个传感器输出的两个感应电动势将因扭矩而有附加相位差 φ_0 。扭转角 φ 与感应电动势相位差 φ_0 的关系为

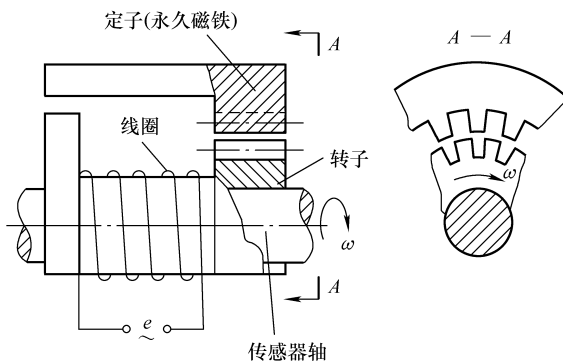


图 6-18 磁电感应式扭矩仪结构示意图

式中 z ——传感器定子、转子的齿数。

经测量电路,将相位差转换成时间差,就可测出扭矩。

磁电感应式传感器除了上述一些应用外,还可构成电磁流量计,用来测量具有一定电导率的液体流量。其优点为反应快、易于自动化和智能化,但结构较复杂。

6.4.2 霍尔式传感器应用

由式(6-6),霍尔电势与输入控制电流及磁感应强度呈线性关系,因此可形成三种应用方式。

1. 当输入电流恒定不变时,传感器的输出正比于磁感应强度

凡是能转换为磁感应强度变化的物理量均可以进行测量和控制,如位移、角度、转速及加速度等。

(1) 霍尔式位移传感器 图 6-19 所示为霍尔式位移传感器。

保持霍尔元件的控制电流恒定,而使霍尔元件在一个均匀梯度的磁场中沿 x 方向移动。则输出的霍尔电势为

$$U_H = kx$$

式中 k ——位移传感器的灵敏度。

霍尔电势的极性表示了元件位移的方向。磁场梯度越大,灵敏度越高;磁场梯度越均匀,输出线性度就越好。这种位移传感器位移量很小,适用于微位移、机械振动等测量。

(2) 霍尔式加速度传感器 如图 6-20 所示,霍尔元件固定在一个扁平长弹簧片的自由端,并处于磁场中。弹簧片的另一端固定在传感器壳体上,中间固定一个惯性体。将加速度传感器固定在被测物体上,当被测物体做加速度运动时,在惯性力的作用下,惯性体使弹

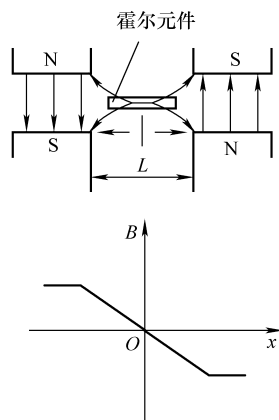


图 6-19 霍尔式位移传感器

簧片自由端产生位移, 根据霍尔电势输出即可得被测物体加速度的大小。

2. 当磁感应强度恒定不变时, 传感器的输出正比于电流的变化

凡是能转换为电流变化的物理量均可以进行测量和控制。

如图 6-21 所示, 当被测电流 I 通过一根长导线时, 在导线周围产生磁场, 磁场的强弱与通过导线的电流成正比。利用由软磁性材料制作的聚磁环收集磁场到霍尔元件上, 霍尔元件检测出磁场的大小, 即可测得被测电流。

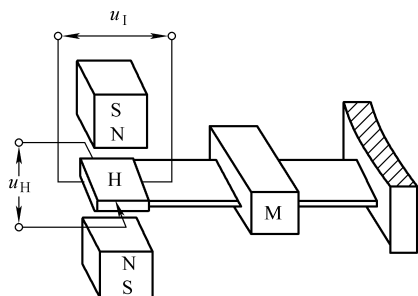


图 6-20 霍尔式加速度传感器

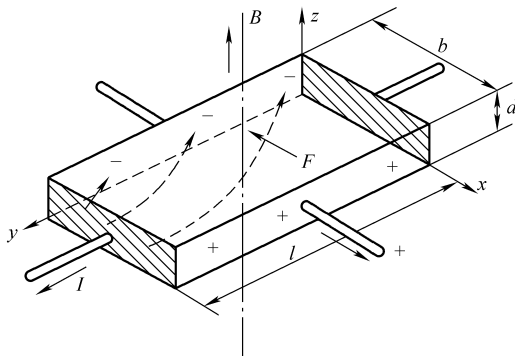


图 6-21 霍尔电流传感器原理

3. 能转换为电流与磁感应强度乘积的物理量

由于霍尔电势正比于电流与磁感应强度的乘积, 所以凡是能转换为乘法的物理量都可以进行测量, 如功率。

图 6-22 为霍尔式功率传感器原理图。负载 Z_L 所取电流 i 流过铁心线圈以产生交变磁感应强度 B , 电源电压 u 经过降压电阻 R 得到的交流电流 i_c 流过霍尔元件, 则霍尔元件输出电压 u_H 与电功率 P 成正比, 即

$$\begin{aligned} u_H &= K_H i_c B = K_H K_i u_m \sin \omega t K_B i_m \sin(\omega t + \varphi) \\ &= K u_m i_m \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (6-26)$$

则霍尔电压 u_H 平均值为

$$\begin{aligned} \bar{u}_H &= \frac{1}{T} \int_0^T u_H dt = \frac{1}{T} \int_0^T K u_m i_m \frac{1}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] dt \\ &= \frac{1}{2} K u_m i_m \cos \varphi = K_p u i \cos \varphi = K_p P \end{aligned} \quad (6-27)$$

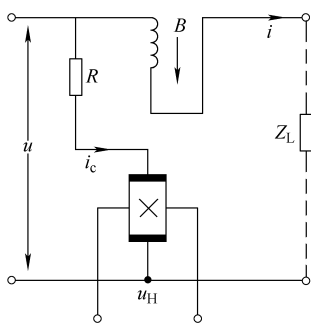


图 6-22 霍尔式功率传感器

式中 K_H ——霍尔灵敏度;

K_i ——与降压电阻 R 有关的系数;

K_B ——与线圈有关的系数;

K ——总系数, $K = K_H K_i K_B = K_p$;

u_m 、 i_m ——电源电压与负载电流幅值;

φ ——与负载有关的功率角;

P ——有功功率, $P = u i \cos \varphi$ 。

若将图 6-22 中的电阻 R 换成电容 C , 使移相 90° , 则可测无功功率 Q , 即

$$u'_H = \frac{1}{2} K_p u_m i_m \sin \varphi = K_p Q \quad (6-28)$$

6.4.3 磁栅式传感器的应用

目前,磁栅传感器主要有两方面应用。

1) 高精度测量长度和角度的测量仪器。由于可以采用激光定位录磁,而不需要采用感光、腐蚀等工艺,因而可以得到较高的精度。

2) 自动控制系统中的检测元件。例如在三坐标测量机、数控机床、重型和中型机床等控制系统中,均得到了应用。

习 题

6-1 什么是磁电感应式传感器?它的主要优点是什么?

6-2 试证明类似于图 6-23 所示的角速度测量传感器,在磁感应强度为 B_d 的磁场中旋转的 N 匝线圈产生感应电动势表示式为

$$e = NB_d A \omega \sin \theta$$

式中 A ——线圈面积 (长 $l \times$ 宽 b);

ω ——线圈的角速度;

θ ——测量线圈相对于图 6-23 所示位置的角度。

6-3 螺管线圈产生的磁感应强度 B (Wb/m^2) 可表示为

$$B = 12.57 \times 10^{-7} NI/L$$

其中 N 为线圈匝数, I 为电流 (A), L 为螺管线圈长度 (m)。图 6-24 所示的环形磁铁,其 $B = 0.1 \text{ Wb}/\text{m}^2$,螺管线圈由 2000 匝导线均匀地绕满 10mm 直径钢环的一半。求所需要的电流 I ,并计算当单位长度的导线以 1 m/s 的速度通过磁铁间隙时会产生多大的感应电动势?

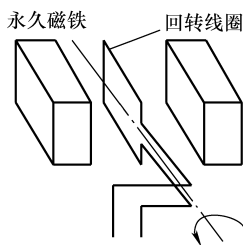


图 6-23 角速度测量传感器

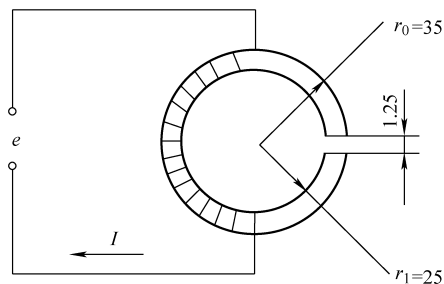


图 6-24 环形磁铁

6-4 霍尔元件的温度补偿原理如图 6-25 所示,试分析霍尔元件输出电阻为 R_L 时,利用在输入回路中串联电阻 R 进行温度补偿的条件。

6-5 为测量某霍尔元件的灵敏度系数 k_H ,构成图 6-26 所示的实验线路,现施加 $B = 0.1 \text{ T}$ 的外磁场,方向如图所示。调节 R_p 使 $I_C = 50 \text{ mA}$,测得输出电压 $U_H = 25 \text{ mV}$ (设表头内阻为 ∞),试求该霍尔元件的灵敏度系数。

6-6 速度响应式和磁通响应式磁栅传感器的不同点有哪些?

6-7 某霍尔元件 l 、 b 、 d 尺寸分别为 1.0 cm 、 0.35 cm 、 0.1 cm ,沿 l 方向通以电流 $I = 1.0 \text{ mA}$,在垂直 lb 面方向加有均匀磁场 $B = 0.3 \text{ T}$,传感器的灵敏度系数为 $22 \text{ V}/\text{A} \cdot \text{T}$,试求其输出霍尔电势及载流子浓度。

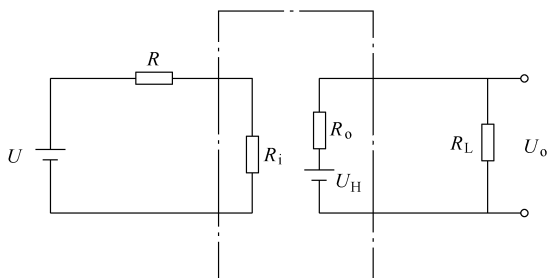


图 6-25 霍尔元件的温度补偿原理图

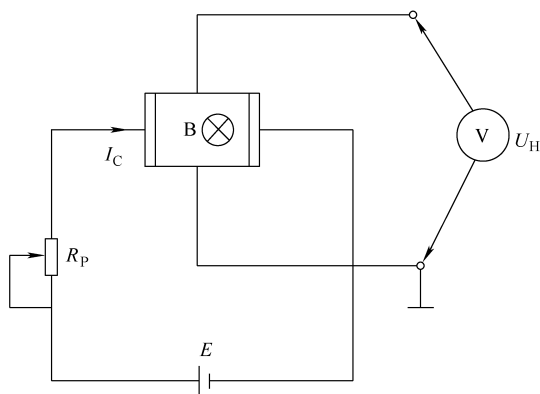


图 6-26 霍尔元件测量线路图

参 考 文 献

- [1] 周真, 苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] 梁福平. 传感器原理及检测技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [3] 唐文彦. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 陈建元. 传感器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 何道清, 张禾, 湛海云. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 吕勇军. 传感器技术实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 徐科军, 马修水, 李晓林. 传感器与检测技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [8] 梁福平. 传感器原理及检测技术学习与实践指导 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014.
- [9] 陶艳红, 余成波. 传感器与现代检测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

第7单元

热电式传感器

学习要点

- ◆ 热电偶工作原理及基本定律；
- ◆ 热电偶温度补偿方法；
- ◆ 热电阻工作原理及常用热电阻；
- ◆ 铂电阻传感器三线制与四线制测量电路原理；
- ◆ 热敏电阻的工作原理；
- ◆ 热敏电阻与热电阻在温度特性上的差别。

相关知识链接

- ◆ 中华人民共和国国家计量检定规程 JJG141—2013 《工作用贵金属热电偶》；
- ◆ 中华人民共和国国家计量技术规范 JJF1262—2010 《铠装热电偶校准规范》；
- ◆ 中华人民共和国国家标准 GB/T 30121—2013/IEC 60751：2008 工业铂热电阻及铂感温元件。

引导案例

汽车上的温度传感器

汽车上装有很多温度传感器，如发动机的进气温度传感器、冷却液温度传感器、机油温度传感器、自动变速器和无级变速器的油温传感器、空调的车内温度传感器、环境温度传感器、蒸发器温度传感器、悬架空气泵温度传感器等。

进气温度传感器可以装在空气流量传感器或进气压力传感器内，也可以装在进气道上某个部位。进气温度传感器测得的温度越高则进入发动机的混合气越浓，如果传感器断路或搭铁不良，则会造成混合气过稀，导致发动机起动困难。

冷却液温度传感器一般装在发动机后侧节温器或散热器出水孔处，负责喷油脉宽、暖机、点火提前角、自动变速器变矩器锁止和超速档的控制以及空调的控制。如果发动机冷却液温度传感器短路，数据流会显示 100℃ 以上的高温，造成混合气过稀而无法起动；传感器断路或搭铁线接触不良，数据流会显示 -30℃ 以下的低温，造成混合气过浓，排气管冒黑烟。

自动变速器油温传感器装在控制阀上，对变速器主要进行高温控制。变速器油温高于 150℃ 时变矩器立即进入锁止工况，30s 后如果变速器油温仍不下降，变矩器解除锁止工况，变速器退出超速挡。油温传感器自身或线束短路，数据流会显示变速器油温高于 150℃，所以油温传感器自身或线束短路后，变矩器不进入锁止工况，变速器没有超速挡，汽车没有高速。

空气悬架在氮气空气压缩机上装有温度传感器，当压缩机温度达到 130°C ，临时中断压缩机的工作，以防止温度过高发生烧蚀。一旦空气泵烧蚀，车身高度总是停留在最低位置，不再升高。

自动空调系统温度传感器包括发动机冷却液温度传感器、车内温度传感器、环境温度传感器、蒸发器温度传感器、日光辐射传感器、制冷剂温控开关等。控制单元根据这些传感器信号，计算出吹入车内空气所需的温度，选择所需的空气量，然后控制空气混合入口，水阀、进出气口转换板等，在驾驶员设定的温度范围内自动调节车内的温度，使其达到最佳，并自动控制空调的开启和关闭。当发动机冷却液温度超过 120°C 时，为了保护发动机，会让空调停止工作。空调压缩机内制冷剂温度过高，温度开关会切断压缩机电磁离合器的电路。装在蒸发器中央的蒸发器温度传感器或温度开关通过控制空调压缩机的运转来控制蒸发器的温度。蒸发器温度控制的目的是防止蒸发器结霜。如果蒸发器的温度低于 0°C ，凝结在蒸发器表面的水分就会结霜或结冰，严重时堵塞蒸发器的空气通道，导致冷却系统制冷效果明显降低。为了避免蒸发器结霜，就必须将蒸发器的温度控制在 0°C 以上。蒸发器温度过低，低于设定值 0°C 以下时，空调放大器会切断压缩机电磁离合器的电路。蒸发器出口温度传感器失效，会导致空调压缩机离合器频繁吸合和分离。膨胀阀到蒸发器之间管路结霜，会导致空调出风量小。空调系统制冷的条件之一是环境温度高于室内温度，环境温度传感器断路，端子进水、接触不良或接地不良，数据流会显示环境温度 -30°C 以下，将造成空调不制冷。同时，发动机冷却液温度传感器断路或接地线接触不良，信号失准时，散热风扇不转，导致空调散热不良，也会进入失效保护，让空调停止工作。

热电式传感器是利用某种材料或元件与温度有关的物理特性，将温度的变化转换为电量变化的装置或器件。在测量中常用的温度传感器是热电偶和热电阻，热电偶是将温度变化转换为电动势变化，而热电阻是将温度变化转换为电阻值变化。此外，热敏电阻和集成温度传感器也得到迅速的发展和广泛的应用。如上述案例中汽车上的温度传感器多为负温度系数的热敏电阻。

7.1 热电偶传感器

热电偶是将温度转换为电动势的热电式传感器。自 19 世纪发现热电效应以来，热电偶便被广泛用来测量 $100 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度，还可以用来测量更高或更低的温度。它具有结构简单、使用方便、精度高、热惯性小、便于远距离传送和自动记录等优点。

7.1.1 热电偶的工作原理

将两种不同材料的导体 A、B 串接成一个闭合回路，如图 7-1 所示，如果两接合点处的温度不同 ($T_0 \neq T$)，则在两导体间产生热电动势，并在回路中有一定大小的电流，这种现象称为热电效应。在此闭合回路中两种导体称为热电极；两个结点中，一个称为工作端或热端 (T)，另一个称为参比端或冷端 (T_0)。由这两种导体的组合并将温度转换成热电动势的传感器叫作热电偶。

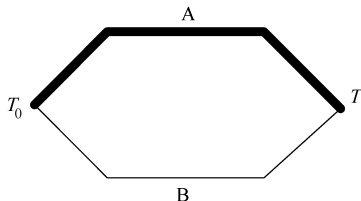


图 7-1 热电效应

热电动势是由两种导体的接触电动势和单一导体的温差电动势所组成。热电动势的大小与两种导体材料的性质及结点温度有关。

1. 接触电动势

由于不同的金属材料所具有的自由电子密度不同,当两种不同的金属导体接触时,在接触面上就会发生电子扩散。电子的扩散速率与两导体的电子密度有关并和接触区的温度成正比。设导体 A 和 B 的自由电子密度为 N_A 和 N_B ,且有 $N_A > N_B$,电子扩散的结果使导体 A 失去电子而带正电,导体 B 获得电子而带负电,在接触面形成电场。这个电场阻碍了电子继续扩散,达到动态平衡时,在接触区形成一个稳定的电位差,即接触电动势,其大小可表示为

$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (7-1)$$

式中 $e_{AB}(T)$ ——导体 A、B 的结点在温度 T 时形成的接触电动势;

e ——电子电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$;

k ——玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$;

N_A 、 N_B ——导体 A、B 的自由电子密度。

2. 单一导体中的温差电动势

对于单一导体,如果两端温度不同,在两端间会产生电动势,即单一导体的温差电动势,这是由于导体内自由电子在高温端具有较大的动能,因而向低温端扩散的结果。高温端因失去电子而带正电,低温端由于获得电子而带负电,在高低温端之间形成一个电位差。温差电动势的大小与导体的性质和两端的温差有关,可表示为

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT \quad (7-2)$$

式中 $e_A(T, T_0)$ ——导体 A 两端温度为 T 、 T_0 时形成的温差电动势;

T 、 T_0 ——导体 A 两端的绝对温度;

σ_A ——汤姆逊系数,表示导体 A 两端的温度差为 1°C 时所产生的温差电动势,例如在 0°C 时,铜的 $\sigma = 2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

对于图 7-2 中导体 A、B 组成的热电偶回路,当温度 $T > T_0$ 时,回路总的热电动势可表示为

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) - e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0) \\ &= \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{N_{AT_0}}{N_{BT_0}} + \int_{T_0}^T (-\sigma_A + \sigma_B) dT \end{aligned} \quad (7-3)$$

式中 N_{AT} 、 N_{AT_0} ——导体 A 在结点温度为 T 和 T_0 时的电子密度;

N_{BT} 、 N_{BT_0} ——导体 B 在结点温度为 T 和 T_0 时的电子密度;

σ_A 、 σ_B ——导体 A 和 B 的汤姆逊系数。

由此可得出有关热电偶回路的几点结论:

1) 如果构成热电偶的两个热电极材料相同的均质导体,即 $\sigma_A = \sigma_B$, $N_A = N_B$,则无论两结点温度如何,热电偶回路内的总热电动势为零。因此,热电偶必须采用两种不同的材料作为热电极。

2) 如果热电偶两结点温度相等,即 $T = T_0$,则尽管导体 A、B 的材料不同,热电偶回

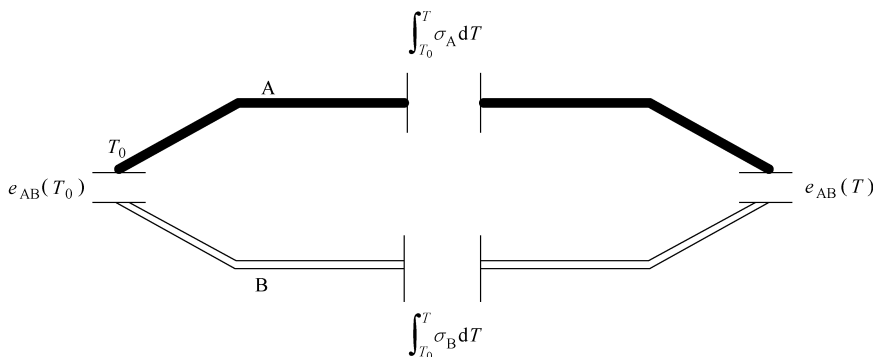


图 7-2 闭合回路温差电动势

路内的总电动势也为零。

3) 热电偶的热电势与 A、B 材料的中间温度无关，只与结点温度有关。

7.1.2 热电偶基本定律

1. 中间导体定律

在热电偶回路中接入第三种材料的导线，只要其两端的温度相等，第三导线的引入不会影响热电偶的热电势，称为中间导体定律。

若在图 7-1 的 T_0 处断开，接入第三导体 C，如图 7-3 所示，当 A、B 结点温度为 T ，其余结点温度为 T_0 ，且 $T > T_0$ 时，则回路中总热电势为

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) - e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0) \quad (7-4)$$

由于在 $T = T_0$ 的情况下回路中总电动势为零，即

$$E_{ABC}(T_0) = e_{AB}(T_0) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = 0 \quad (7-5)$$

将此式代入式 (7-4) 中，可得

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) - e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0) = E_{AB}(T, T_0) \quad (7-6)$$

注意推导过程利用了 $e_A(T_0, T_0) = 0$ ， $e_B(T_0, T_0) = 0$ ， $e_C(T_0, T_0) = 0$ 。

这就是中间导体定律。根据这个定律，可以将第三导线换成测试仪表或连接导线，只要保持两结点温度相同，就可以对热电势进行测量而不影响原热电势的数值。

2. 参考电极定律

当两个结点温度分别为 T 、 T_0 时，用导体 A、B 组成的热电偶的热电势等于 AC 热电偶和 CB 热电偶的热电势的代数和，即

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0) \quad (7-7)$$

导体 C 称为标准电极（一般由铂制成），这个定律称为参考电极定律。

图 7-4 为参考电极定律示意图，图中标准电极 C 接在 A、B 之间，形成三个热电偶组成的回路。对于 AC 热电偶有热电势

$$E_{AC}(T, T_0) = e_{AC}(T) - e_{AC}(T_0) - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_C) dT \quad (7-8)$$

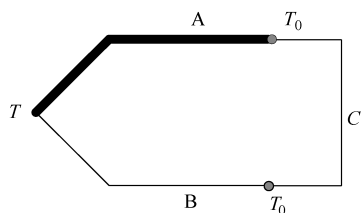


图 7-3 具有第三导体的热电偶回路

对于 BC 热电偶有热电动势

$$E_{BC}(T, T_0) = e_{BC}(T) - e_{BC}(T_0) - \int_{T_0}^T (\sigma_B - \sigma_C) dT \quad (7-9)$$

于是

$$\begin{aligned} E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) &= E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0) \\ &= e_{AC}(T) - e_{AC}(T_0) - e_{BC}(T) + e_{BC}(T_0) - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_C) dT + \\ &\quad \int_{T_0}^T (\sigma_B - \sigma_C) dT \end{aligned} \quad (7-10)$$

利用式 (7-1) 可得

$$e_{AC}(T) - e_{BC}(T) = e_{AB}(T), -e_{AC}(T_0) + e_{BC}(T_0) = -e_{AB}(T_0)$$

因此, 式 (7-10) 可写为

$$\begin{aligned} E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0) &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) + \int_{T_0}^T (-\sigma_A + \sigma_B) dT \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned} \quad (7-11)$$

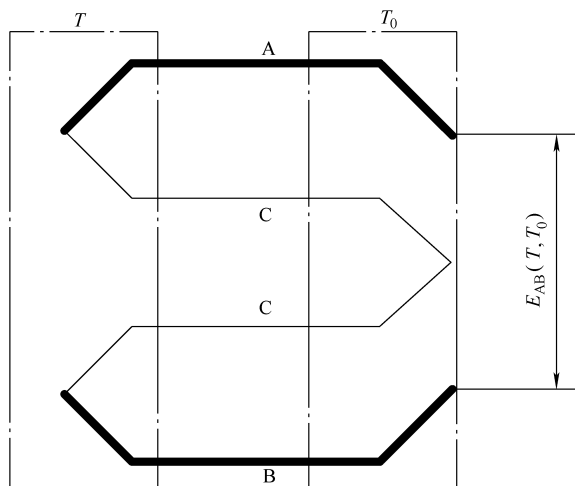


图 7-4 参考电极定律示意图

这就是参考电极定律。由于纯铂丝的物理化学性能稳定, 熔点较高, 易提纯, 所以目前常用纯铂丝作参考电极。如果已求出各种热电极对铂极的热电特性, 可大大简化热电偶的选配工作。

3. 中间温度定律

如图 7-5 所示, 当热电偶的两个结点温度分别为 T 、 T_1 时, 热电动势为 $E_{AB}(T, T_1)$; 当热电偶的两个结点温度为 T_1 、 T_0 时, 热电动势为 $E_{AB}(T_1, T_0)$, 当热电偶的两个结点温度为 T 、 T_0 时热电动势为

$$E_{AB}(T, T_1) + E_{AB}(T_1, T_0) = E_{AB}(T, T_0) \quad (7-12)$$

同一种热电偶, 当两结点温度 T 、 T_0 不同时, 产生的热电动势也不同。要将对应各种 (T, T_0) 温度的热电动势 - 温度关系都列成图表是不能实现的。中间温度定律为热电偶制

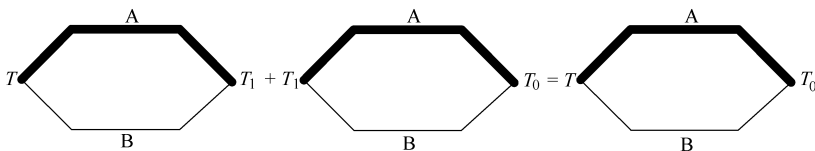


图 7-5 用连接导线的热电偶回路

定温度表提供了理论依据。根据这一定律，只要列出参考温度为 0°C 的热电动势 - 温度关系，那么参考温度不等于 0°C 的热电动势都可以由式 (7-12) 求出。

7.1.3 热电偶的冷端处理及补偿

热电偶输出的电动势是两结点温度差的函数。为了使输出的电动势是被测温度的单一函数，一般将 T 作为被测温度端， T_0 作为参比温度端（冷端）。热电偶的标准分度表是在其冷端处于 0°C 的条件下测得的电动势值。所以使用热电偶时，通常要求 T_0 保持为 0°C ，但在实际中做到这一点很困难。于是产生了热电偶冷端处理及补偿问题。在工业使用时，解决冷端补偿问题有多种方法，一般根据使用条件和测量准确度的要求来确定所使用的具体方法。

1. 补偿导线法

在实际测温时，需要把热电偶输出的电动势信号传输到远离现场数十米的控制室里的显示仪表或控制仪表，这样参考端温度 T_0 也比较稳定。热电偶一般做得较短，需要用导线将热电偶的冷端延伸出来。工程中采用一种补偿导线，它通常由两种不同性质的廉价金属导线制成，而且在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，要求补偿导线和所配热电偶具有相同的热电特性；保持延伸电极与热电偶两个结点温度相等，图 7-6 所示为补偿导线法示意图。



图 7-6 补偿导线法示意图

2. 参考端 0°C 恒温法

在实验室及精密测量中，通常把参考端放入装满冰水混合物的容器中，以便参考端温度保持 0°C ，这种方法又称冰浴法，如图 7-7 所示。

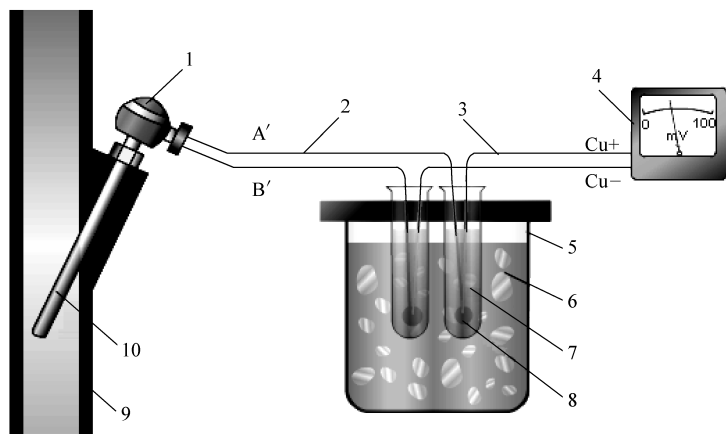


图 7-7 冰浴法接线原理

1—接线盒 2—补偿导线 3—铜质导线 4—毫伏表 5—冰瓶 6—冰水混合物 (0°C) 7—试管
8—新的冷端 9—被测流体管道 10—热电偶

3. 电位补偿法

电位补偿法是用电桥温度变化时的不平衡电压（补偿电压）消除冷端温度变化对热电偶电动势的影响，这种装置称为冷端温度补偿器。

如图 7-8 所示，冷端补偿器内有一个不平衡电桥，其输出端串联在热电偶回路中。桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和限流电阻 R_p 用锰铜电阻，其电阻值几乎不随温度变化， R_{Cu} 为铜电阻，其电阻温度系数大，电阻值随温度升高而增大。使用中应使 R_{Cu} 与热电偶的冷端靠近，使其处于同一温度下。电桥由直流稳压电源供电。

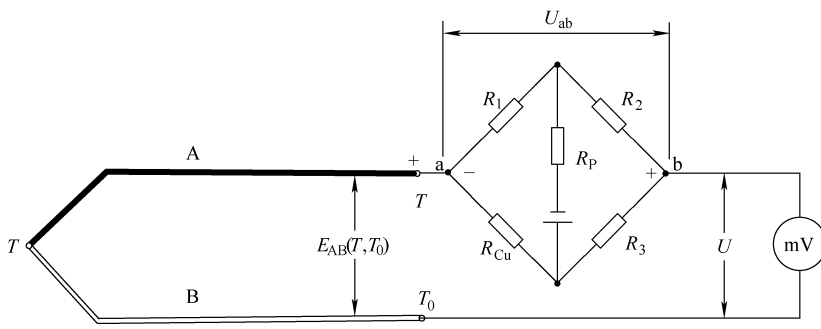


图 7-8 冷端温度补偿器线路

设计时使 R_{Cu} 在 0°C 下的阻值与其余三个桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 完全相等，这时电桥处于平衡状态，电桥输出电压 $U_{ab} = 0$ ，对热电动势没有影响。此时温度 0°C 称为电桥平衡温度。

当热电偶冷端温度随环境温度变化，若 $T_0 > 0$ ，热电动势将减小 ΔE 。但这时 R_{Cu} 增大，使电桥不平衡，出现 $U_{ab} > 0$ ，而且其极性是 a 点为负，b 点为正，这时的 U_{ab} 与热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 同向串联，使输出值得到补偿。如果限流电阻 R_p 选择适合，可使 U_{ab} 在一定温度范围内增大的值恰恰等于热电动势所减小的值即 $U_{ab} = \Delta E$ ，就完全避免了 $T_0 = 0$ 的变化对测量的影响。

冷端补偿器一般用 4V 直流供电，它可以在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 或 $-20 \sim 20^\circ\text{C}$ 的范围内起补偿作用。只要 T_0 的波动不超出此范围，电桥不平衡输出信号可以自动补偿冷端温度波动所引起的热电动势的变化。从而可以直接利用输出电压 U 查热电偶分度表以确定被测温度的实际值。

要注意的是，不同材质的热电偶所配的冷端补偿器，其限流电阻 R_p 不一样，互换时必须重新调整。此外，大部分补偿电桥的平衡温度不是 0°C ，而是室温 20°C 。

也可以利用 PN 结或集成温度传感器 AD590 作为冷端温度补偿器件，实现热电偶的冷端温度补偿。

4. 冷端温度修正法

当热电偶冷端温度不为 0°C 时，但能保持恒定不变且可以测得冷端温度 T_n ，则可以采用修正法。

(1) 热电动势修正法 热电偶实际测温时，由于冷端温度 $T_0 \neq 0^\circ\text{C}$ ，而是某一温度 T_n ，则热电偶工作于温度 (T, T_n) 之间，实际测得的热电动势是 $E_{AB}(T, T_n)$ 。为了利用标准分度表由热电动势查相应热端温度值，必须知道热电偶相对于 0°C 时的热电动势 E_{AB}

($T, 0$)。根据中间温度定律，有

$$E_{AB}(T,0) = E_{AB}(T,T_n) + E_{AB}(T_n,0)$$

因此，只要知道冷端温度 T_n ，便可以查标准分度表得到 $E_{AB}(T, 0)$ ，并将实测的热电势 $E_{AB}(T, T_n)$ 修正到相对于 0°C 时的热电势 $E_{AB}(T, 0)$ 。

(2) 温度修正法 令 T' 为仪表指示温度（即由仪表测得的热电势 $E_{AB}(T, T_n)$ ，查标准分度表所得温度）， T_n 为冷端温度，则被测温度 T 为

$$T = T' + kT_n \tag{7-13}$$

式中 k ——热电偶的修正系数，决定于热电偶种类和被测温度范围，如表 7-1 所示。

另外还有其它一些补偿方法，在此不一一列举。

表 7-1 几种常用热电偶修正系数 k 值表

测量端温度/ $^{\circ}\text{C}$	热电偶类型				
	铜－康铜	镍铬－考铜	铁－康铜	镍铬－镍硅	铂铑 10－铂
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	0.86	0.90	1.00	1.00	0.82
200	0.77	0.83	0.99	1.00	0.72
300	0.70	0.81	0.99	0.98	0.69
400	0.68	0.83	0.98	0.98	0.66
500	0.65	0.79	1.02	1.00	0.63
600	0.65	0.78	1.00	0.96	0.62
700	—	0.8	0.91	1.00	0.60
800	—	0.8	0.82	1.00	0.59
900	—	—	0.84	1.00	0.56
1000	—	—	—	1.07	0.55
1100	—	—	—	1.11	0.53
1200	—	—	—	—	0.53
1300	—	—	—	—	0.52
1400	—	—	—	—	0.52
1500	—	—	—	—	0.53
1600	—	—	—	—	0.53

7.1.4 热电偶结构及常用热电偶

1. 热电偶结构

将两电极的一个端点紧密的焊接在一起组成结点就构成热电偶，要求焊点具有金属光泽、表面圆滑、无沾污变质、夹渣和裂纹；焊点尺寸应尽量小，一般为热电偶丝直径 2 倍。在热电偶的两电极之间通常用耐高温材料绝缘，如图 7-9 所示。

工业用热电偶必须长期工作在恶劣环境下，根据被测对象不同，热电偶的结构形式是多种多样的，这里介绍几种比较典型的结构形式。

(1) 普通工业热电偶 工业用普通热电偶由热电极、绝缘管、保护套管和接线盒盖组成。如图 7-10 所示。热电极亦称热电偶丝，是热电偶的基本组成部分；绝缘管亦称绝缘子，是进行绝缘保护的部件；保护套管是保护元件免受被测介质的化学腐蚀和机械损伤的部件；接线盒则用于固定接线座和连接补偿导线的部件。普通型热电偶多用于测量气体、液体等介质的温度，测量时将测量端插入被测介质的内部，在实验室使用时，也可不加保护套管，以减小热惯性。

(2) 铠装热电偶 铠装热电偶是把热电极、绝缘材料和保护套管三者组合成一体的一种特殊结构的热电偶，也称为套管热电偶或缆式热电偶。铠装热电偶按测量端结构形式分为绝缘型、接壳型、露端型和分离式绝缘型。按感温元件材料分为铠装镍铬-镍硅热电偶（K 型）、铠装镍铬硅-镍硅镁热电偶（N 型）、铠装镍铬-铜镍热电偶（E 型）、铠装铁-铜镍热电偶（J 型）及铠装铜-铜镍热电偶（T 型）。铠装热电偶特点是：热惯性小，动态响应快；有良好的柔性，便于弯曲；抗振性能好；耐冲击；适用于测量位置狭小的对象上各点的温度，测温范围在 $-40 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 薄膜热电偶 薄膜热电偶的结构可分为片状、针状和把热电极材料直接蒸镀在被测对象表面上三种。片状、针状薄膜热电偶采用真空蒸镀在绝缘板上，热电极是一层厚度为 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 金属薄膜，如图 7-11 所示。薄膜热电偶的特点是热惯性小，时间常数可达微妙，动态响应快，适用于测量表面和微小面积的瞬时变化温度。目前我国采用的薄膜热电偶主要有铁-镍、铁-康铜和铜-康铜，尺寸为 $60\text{mm} \times 6\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ ，基板采用云母、陶瓷、玻璃及酚醛塑料等，测温范围在 300°C 以内。

除上述热电偶外，还有特殊和专用热电偶，如多点式铠装热电偶，烟道、风道热电偶，耐磨热电偶等。

2. 常用热电偶

适于制作热电偶的材料有 300 多种，到目前为止，国际电工委员会已将其中七种推荐为标准化热电偶。下面介绍几种广泛使用的热电偶。

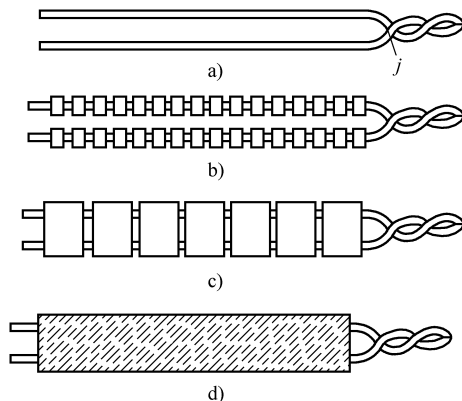


图 7-9 热电偶导线的绝缘方法

a) 裸线热电偶 b) 珠型绝缘热电偶
c) 双孔绝缘热电偶 d) 石棉绝缘热电偶

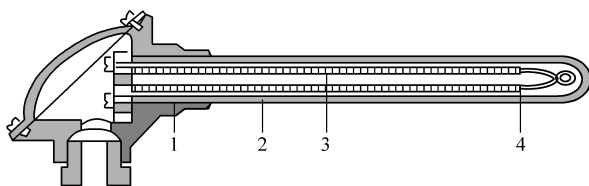


图 7-10 普通工业热电偶结构示意图

1—接线盒 2—保护套管 3—绝缘套管 4—热电偶丝

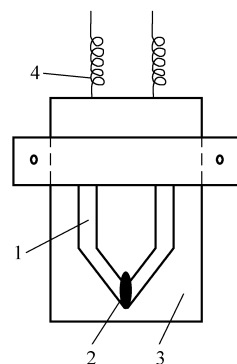


图 7-11 快速反应薄膜热电偶

1—热电极 2—热接点
3—绝缘基板 4—引出线

(1) 铂铑 10—铂热电偶 由 $\phi 0.5\text{mm}$ 的纯铂丝和相同直径的铂铑丝 (铂 90%, 铑 10%) 制成, 代号为 S。铂铑丝为正极, 纯铂丝为负极。这种热电偶可在 1400°C 以下范围内长期使用, 短期可测 1600°C 高温。在所有的热电偶中, 它的准确度等级最高, 通常用作标准或测量高温的热电偶, 其使用温度范围广 ($0 \sim 1600^{\circ}\text{C}$), 均质性及互换性好; S 型热电偶材料为贵金属, 成本较高, 此外, 其输出热电动势较小, 需配灵敏度高的显示仪表。

(2) 镍铬—镍硅热电偶 镍铬为正极, 镍硅为负极, 热偶丝直径为 $\phi 1.2 \sim 2.5\text{mm}$, 代号为 K。K 型热电偶化学稳定性较高, 测量范围为 $-50 \sim 1312^{\circ}\text{C}$ 。其复制性好, 产生热电动势大, 线性好, 价格便宜, 是工业生产中最常用的一种热电偶。

(3) 镍铬—铜镍热电偶 它由镍铬材料与镍、铜合金材料组成, 代号为 E。热偶丝直径为 $\phi 1.2 \sim 2.0\text{mm}$, 镍铬为正极, 康铜为负极。适于在 $-250 \sim 870^{\circ}\text{C}$ 范围内的氧化性或惰性介质中使用, 长期使用温度不要超过 600°C 。尤其适宜在 0°C 以下使用, 其输出热电动势大, 灵敏度高, 价格便宜。

(4) 钨铼₅—钨铼₂₀热电偶 它是非标准化热电偶, 钨铼₅作正极, 钨铼₂₀作负极。一般使用在超高温场合。国产钨铼₅—钨铼₂₀热电偶使用温度范围为 $300 \sim 2000^{\circ}\text{C}$ 。可在氢气中连续使用 100h, 真空中使用 8h, 性能稳定。钨铼系热电偶是一种较好的超高温热电偶, 其最高使用温度受绝缘材料的限制, 一般可达 2400°C , 在真空中用裸丝可测量更高的温度。

7.2 热电阻温度传感器

热电阻温度传感器是利用物质的电阻率随温度变化的特性制成的电阻式测温元件。由纯金属热敏元件制作的热电阻称为金属热电阻, 由半导体材料制作的热电阻称为半导体热敏电阻。

7.2.1 金属热电阻

金属热电阻传感器是利用导体的电阻随温度变化的特性, 对温度和温度有关的参数进行检测的装置。实践证明, 大多数电阻在温度升高 1°C 时电阻值将增加 $0.4\% \sim 0.6\%$ 。金属热电阻传感器的主要优点有: 测量精度高; 有较大的测量范围, 尤其在低温方面; 易于使用在自动测量和远距离测量中。热电阻传感器之所以有较高的测量精度, 主要是一些材料的电阻温度特性稳定, 复现性好。其次, 与热电偶相比, 它没有参比端误差问题。

金属热电阻传感器一般常用于 $-200 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 的温度测量, 随着技术的发展, 金属热电阻传感器的测温范围也在不断的扩展, 低温方面已成功地应用于 $1 \sim 3\text{K}$ 的温度测量中, 高温方面也出现了多种用于 $1000 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 的金属热电阻传感器。

1. 热电阻材料与工作原理

作为测量温度用的金属热电阻材料必须具有以下特点:

- 1) 高且稳定的温度系数和大的电阻率, 以便提高灵敏度和保证测量精度。
- 2) 良好的输出特性, 即电阻温度的变化接近于线性关系。
- 3) 在使用范围内, 其化学、物理性能应保持稳定。
- 4) 良好的工艺性, 以便于批量生产, 降低成本。

根据上述要求, 纯金属是制造热电阻的主要材料。目前, 广泛应用的热电阻材料有铂、

铜、镍、铁等。这些材料的电阻率与温度的关系一般都可近似用一个二次方程描述,即

$$\rho = A + Bt + Ct^2 \quad (7-14)$$

式中 ρ ——电阻率;

t ——温度;

A 、 B 、 C ——由实验确定的常量。

对于绝大多数金属导体, A 、 B 、 C 等并不是一个常数,而是温度的函数。但在一定的温度范围内, A 、 B 、 C 可以近似地视为一个常数。不同的金属导体, A 、 B 、 C 保持常数所对应的温度范围不同。

2. 常用热电阻

(1) 铂热电阻 铂是一种贵金属,其主要优点是物理化学性能极为稳定,并且有良好的工艺性,易于提纯,可以制成极细的铂丝或极薄的铂箔。它的缺点是电阻温度系数较小。

我国已采用 IEC 标准制作工业铂电阻温度计。按 IEC 标准,铂的使用温度范围为 $-200 \sim 650^\circ\text{C}$ 。铂电阻温度计除作温度标准外,还广泛用于高精度的工业测量。铂电阻一般由直径为 $0.02 \sim 0.07\text{mm}$ 的铂丝绕在片形云母骨架上且采用无感绕法,如图 7-12a 所示,然后装入玻璃或陶瓷管等保护管内,铂丝的引线采用银线,银线用双孔瓷绝缘套管绝缘,如图 7-12b 所示。目前,亦有采用丝网印制方法来制作铂膜电阻,或采用真空镀膜方法制作铂膜电阻。

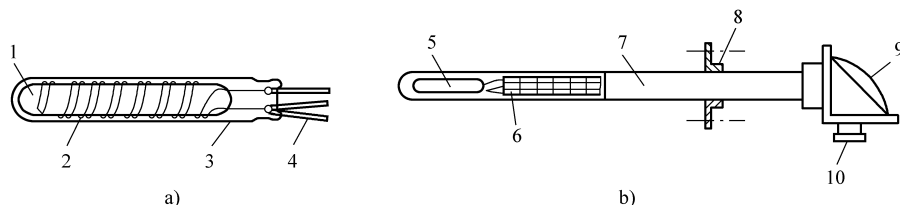


图 7-12 铂电阻的结构

1—芯柱 2—电阻丝 3—保护膜 4—引线端 5—电阻体 6—瓷绝缘套管
7—不锈钢套管 8—安装固定件 9—接线盒 10—引线口

铂电阻阻值与温度变化之间的关系可近似用下式表示:

在 $-200 \sim 0^\circ\text{C}$ 范围内

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (7-15)$$

在 $0 \sim 850^\circ\text{C}$ 范围内

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (7-16)$$

式中 R_0 和 R_t ——分别为 0°C 和 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值。

对于常用的工业铂电阻, $A = 3.9083 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$, $B = -5.775 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2}$, $C = -4.183 \times 10^{-12}^\circ\text{C}^{-4}$ 。利用式 (7-15) 和式 (7-16) 以及系数 A 、 B 和 C 导出了标称电阻 $R_0 = 100.00\Omega$ 元件的电阻值表,如表 7-2 所示。

表 7-2 温度 - 电阻关系 ($R_0 = 100.00\Omega$)

$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	t_{90} 对应的电阻值/ Ω									
	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
-200	18.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—
-100	60.26	56.19	52.11	48.00	43.88	39.72	35.54	31.34	27.10	22.83
0	100.00	96.09	92.16	88.22	84.27	80.31	76.33	72.33	68.33	64.30
$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	100.00	103.90	107.79	111.67	115.54	119.40	123.24	127.08	130.90	134.71
100	138.51	142.29	146.07	149.83	153.58	157.33	161.05	164.77	168.48	172.17
200	175.86	179.53	183.19	186.84	190.47	194.10	197.71	201.31	204.90	208.48
300	212.05	215.61	219.15	222.68	226.21	229.72	233.21	236.70	240.18	243.64
400	247.09	250.53	253.96	257.38	260.78	264.18	267.56	270.93	274.29	277.64
500	280.98	284.30	287.62	290.92	294.21	297.49	300.75	304.01	307.25	310.49
600	313.71	316.92	320.12	323.30	326.48	329.64	332.79	335.93	339.06	342.18
700	345.28	348.38	351.46	354.53	357.59	360.64	363.67	366.70	369.71	372.71
800	375.70	378.68	381.65	384.60	387.55	390.48	—	—	—	—

由于铂为贵金属,在测量精度要求不高的场合下,均采用铜电阻。

(2) 铜热电阻 铜仅用来制造 $-50 \sim 180^{\circ}\text{C}$ 范围内的工业用电阻温度计,它的主要特点是在上述使用温度范围内,其电阻与温度的关系是线性的;而且它的电阻温度系数比铂高,但它的电阻率低。在温度不高、测温元件尺寸没有特殊限制时,可以使用铜电阻温度计。

(3) 其他热电阻 镍和铁电阻的温度系数都较大,电阻率也较高,因此也适于作热电阻。镍和铁热电阻的使用温度范围分别是 $-50 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 和 $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。但这两种热电阻目前应用较少,主要是由于铁很容易氧化,化学性能不好;而镍非线性严重,材料提取也困难。但由于铁的线性、电阻率和灵敏度都较高,所以在加以适当保护后,也可作为热电阻元件。镍电阻在稳定性方面优于铁,在自动恒温和温度补偿方面的应用较多。

近年来,一些新颖的、测量低温领域的热电阻材料相继出现。钢电阻适宜在 $-269 \sim -258^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用,测温准确度高,灵敏度是铂电阻的 10 倍,但复现性差。锰电阻适宜在 $-271 \sim -210^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用,灵敏度高,但质脆易损坏。碳电阻适宜在 $-273 \sim -268.5^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用,热容量小,灵敏度高,价格低廉,但热稳定性较差。

3. 热电阻传感器测量电路

热电阻进行温度测量时是安装在工业现场,而检测仪表是安装在控制室,热电阻和控制室之间需用引线相连。引线本身具有一定的阻值,并与热电阻相串联,且引线电阻阻值是随环境温度而变,所以造成测量误差,必须采取相应的测量线路来改善测量精度。

(1) 三线制 热电阻测量电路大多采用电桥电路,所以可以利用电桥的特性来提高测量精度。如图 7-13 所示,热电阻的三线制连接法是热电阻的一端与一根引线相连,另一端同时连接二根引线。图中 R_t 热电阻, r_1 、 r_2 、 r_3 为引线电阻,一根引线连接到电源对角线上,另外两根分别接到电桥两个相邻臂,选用的三根引线完全相同,所以 $r_1 = r_2 = r_3 = r$ 。

在电桥平衡时,有

$$(R_t + r)R_1 = (R_3 + r)R_2 \quad (7-17)$$

由式 (7-17) 可得

$$R_t = \frac{R_3 R_1}{R_2} + \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) r \quad (7-18)$$

由式 (7-18) 可以看出,只要满足 $R_1 = R_2$,则引线电阻 r 在测量中所带来的影响得以消除。

(2) 四线制 一般的工业测量采用三线制就可以满足要求,但精密测量时应采用四线制。四线制是热电阻的两端各用两根引线连接到测量仪表上,测量时的接线如图 7-14 所示。工作原理是在热电阻中通入恒定电流,用输入阻抗大的电压表测量热电阻两端的电压,由此计算出的电阻值将不包括引线电阻,只有热电阻阻值的变化被测量出来。

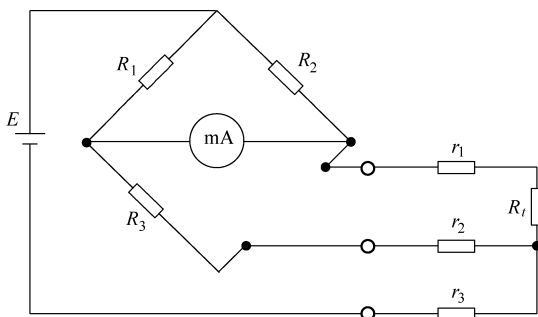


图 7-13 热电阻的三线制测量电路

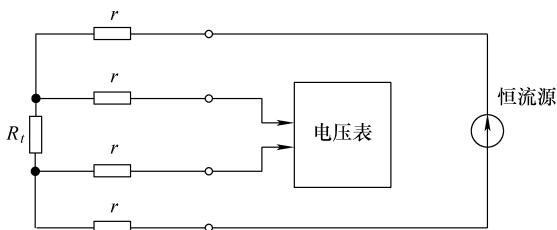


图 7-14 热电阻的四线制测量电路

7.2.2 半导体热敏电阻

1. 半导体热敏电阻特点和类型

热敏电阻是用半导体材料制成的热敏器件。相对于一般的金属热电阻而言,它主要具备如下特点:

- 1) 电阻温度系数大,灵敏度高,比一般金属电阻大 10 ~ 100 倍。
- 2) 结构简单,体积小,可以测量点温度。
- 3) 电阻率高,热惯性小,适宜动态测量。
- 4) 阻值与温度变化呈非线性关系。
- 5) 稳定性和互换性较差。

大部分半导体热敏电阻是由各种氧化物按一定比例混合,经高温烧结而成。根据热敏电阻随温度变化的特性不同,热敏电阻基本可分为正温度系数 (positive temperature coefficient, PTC)、负的温度系数 (negative temperature coefficient, NTC) 和临界温度系数 (critical temperature resistor, CTR) 三种类型,图 7-15 所示为三种热敏电阻的特性曲线。

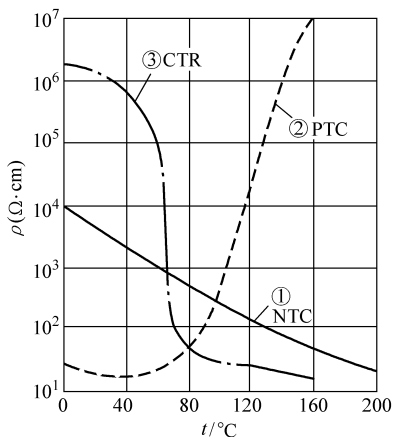


图 7-15 三种热敏电阻的特性曲线

正温度系数热敏电阻主要采用 BaTiO_3 系列材料加入少量 Y_2O_3 和 Mn_2O_3 烧结而成。当温度超过某一数值时,其电阻值随温度升高而迅速增大。其主要用途是各种电器设备的过热保护,发热源的定温控制,也可作为限流元件使用。

负温度系数热敏电阻具有很高的负温度系数,即当温度升高时,其电阻值下降,同时灵敏度也下降。由于这个原因,限制了它在高温下的使用,特别适用于 $-100 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间测温,在点温、表面温度、温差、温场等测量中得到日益广泛的应用,同时也广泛应用于自动控制及电子线路温度补偿线路中。多数热敏电阻具有负的温度系数。

临界温度系数热敏电阻采用 VO_2 系列材料在弱还原气氛中形成的烧结体。在某个温度上其电阻值急剧变化。其主要用途是作为温度开关元件。

2. 热敏电阻的结构形式

热敏电阻是由一些金属氧化物,如钴、锰、镍等的氧化物,采用不同比例的配方,经高温烧结而成,然后采用不同的封装形式制成球状、片状、杆状、垫圈状等各种形状,其结构形式如图 7-16 所示。它主要由热敏探头 1、引线 2、壳体 3 构成如图 7-17 所示。

3. 负温度系数热敏电阻的特性

(1) 温度特性 图 7-18 为负温度系数热敏电阻的电阻-温度特性曲线,在较小的温度范围内,可表示为

$$R_T = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (7-19)$$

式中 R_T ——温度为 T 时的电阻值;

R_0 ——温度为 T_0 时的电阻值;

B ——热敏电阻的材料常数,它与半导体物理性能有关。

一般情况下, $B = 2000 \sim 6000\text{K}$ 。

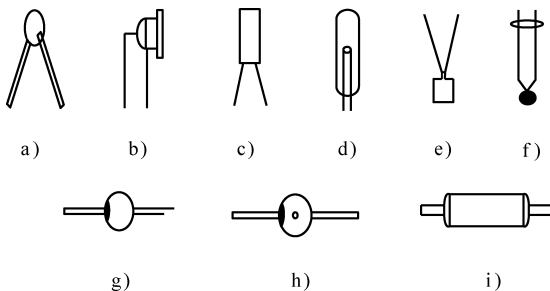


图 7-16 热敏电阻的结构形式

a) 圆片形 b) 薄膜型 c) 柱形 d) 管形 e) 平板形
f) 珠形 g) 扁形 h) 垫圈形 i) 杆形

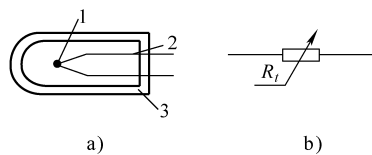


图 7-17 热敏电阻的结构与符号

a) 热敏电阻结构 b) 符号
1—热敏探头 2—引线 3—壳体

(2) 伏安特性 图 7-19 给出了热敏电阻的伏安特性曲线。由图可见,当流过热敏电阻的电流很小时,不足以使之加热,电阻值只决定于环境温度,伏安特性是直线,遵循欧姆定律,主要用来测温。当电流增大到一定值时,流过热敏电阻的电流使之加热,本身温度升高,出现负阻特性。因电阻减小,即使电流增大,端电压反而下降。当电流和周围介质温度一定时,热敏电阻的电阻值取决于介质的流速、流量、密度等散热条件。根据这个原理可用它测量流体的流速和介质的密度。

热敏电阻的应用很广泛，在家用电器、汽车、测量仪器、农业等方面都有广泛的应用。

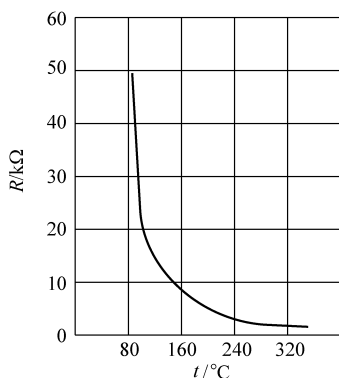


图 7-18 热敏电阻温度特性曲线

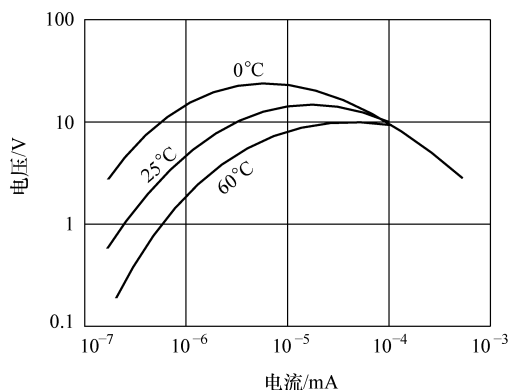


图 7-19 热敏电阻的伏安特性

7.3 PN 结型温度传感器

PN 结温度传感器是一种利用半导体二极管、晶体管的特性与温度的依赖关系制成的温度传感器。

7.3.1 二极管与晶体管温度传感器

1. 二极管温度传感器工作原理

二极管 PN 结的伏安特性可以表示为

$$I = I_S [e^{qU/(kT)} - 1] \quad (7-20)$$

式中 I ——PN 结正向电流；

U ——PN 结正向压降；

I_S ——PN 结反向饱和电流；

q ——电子电荷量 ($1.59 \times 10^{-19} \text{C}$)；

k ——波尔兹曼常数 ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)；

T ——绝对温度。

当 $\exp[qU/(kT)] \gg 1$ 时，上式可写为

$$I = I_S e^{qU/(kT)}$$

则

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_S} \quad (7-21)$$

可见只要通过 PN 结的正向电流 I 恒定，则 PN 结的正向压降 U 与温度的线性关系只受反向饱和电流 I_S 的影响。 I_S 是温度的缓变函数，只要选择合适的掺杂浓度，就可以认为在一定的温度范围内， I_S 近似为常数，因此，正向压降 U 与温度 T 成线性关系，即

$$\frac{dU}{dT} = \frac{k}{q} \ln \frac{I}{I_S} \approx \text{常数} \quad (7-22)$$

这就是二极管 PN 结温度传感器的基本原理。

2. 晶体管温度传感器

二极管温度传感器的非线性误差很大，而晶体管温度传感器的线性度比二极管好很多。把 NPN 晶体管的 be 结短接，利用 be 结作为感温器件，这 and 二极管正向压降情况相同，其基 - 射极电压直接随温度变化，如图 7-20 所示。

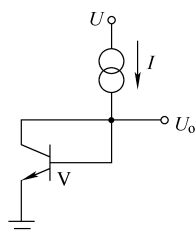


图 7-20 晶体管温度传感器

7.3.2 集成温度传感器

近年来，随着半导体技术的发展，各种集成温度传感器器件越来越多地应用于各种温度计量、温度控制领域。按照输出信号的形式，集成温度传感器可分为电流、电压和数字三类。电流输出型具有输出阻抗高的特点，因此可以配合双绞线进行数百米远的精密温度遥感与遥测，而不必考虑长馈线上引起的信号损失和噪声问题；也可用在多点温度测量系统中，而不必考虑选择开关或多路转换器引入的接触电阻造成的误差。电压输出型的优点是直接输出电压且输出阻抗低，易于读出或控制电路接口。数字输出型的优点是抗干扰能力强，可直接与单片机或 DSP 测试系统接口。

集成温度传感器同热电偶、热电阻等传统传感器相比，其主要特点有：

- 1) 灵敏度高，电压型集成温度传感器通常为 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。而热电偶则为微伏级，灵敏度较低。
- 2) 线性较好，集成温度传感器具有较好的线性，一般不必再进行非线性补偿。
- 3) 重复性好，通常集成温度传感器的重复性好于热电偶和热电阻。
- 4) 温度范围较窄，通常为 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ 之间，而热电偶范围为 $-200 \sim 1600^\circ\text{C}$ ，热电阻范围为 $-200 \sim 500^\circ\text{C}$ 。
- 5) 准确度较低，一般来说，低于热电阻和贵金属热电偶，与廉价金属热电偶相当或略低。

1. 集成温度传感器原理

如图 7-21 所示，一只晶体管的发射极电流密度 J_e 可表示为

$$J_e = \frac{1}{a} J_S (e^{\frac{qU_{be}}{kT}} - 1) \quad (7-23)$$

式中 U_{be} ——基、射极电位差；

J_S ——发射极反向饱和电流密度；

a ——共基极接法的短路电流增益。

通常 $a \approx 1$ ， $J_e \gg J_S$ ，将式 (7-23) 化简，取对数后得

$$U_{be} = \frac{kT}{q} \ln \frac{aJ_e}{J_S} \quad (7-24)$$

如果图 7-21 中两晶体管满足下列条件： $a_1 = a_2$ ， $J_{S1} = J_{S2}$ ， $J_{e1} / J_{e2} = \gamma$ 为常数 (γ 是 V_1 和 V_2 发射极面积比因子，由设计和制造决定，为一常数)，则两晶体管基、射极电位差 U_{be} 之差 ΔU_{be} ，即 R_1 两端之压降为

$$\Delta U_{be} = U_{be1} - U_{be2} = \frac{kT}{q} \ln \gamma \quad (7-25)$$

由 (7-25) 式可知 ΔU_{be} 正比于绝对温度 T ，这就是集成温度传感器的基本原理。

2. 电压型集成温度传感器

电压型集成温度传感器感温部分原理如图 7-22 所示。当电流 I_1 恒定，调整 R_1 的值，使 $I_1 = I_2$ ，当晶体管的 $\beta \geq 1$ 时，电路的输出电压可表示

$$U_{out} = I_2 R_2 = \frac{\Delta U_{be}}{R_1} R_2 = \frac{R_2}{R_1} \frac{kT}{q} \ln \gamma \quad (7-26)$$

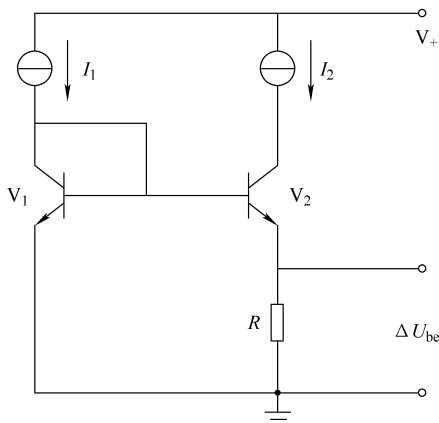


图 7-21 集成温度传感器基本工作原理

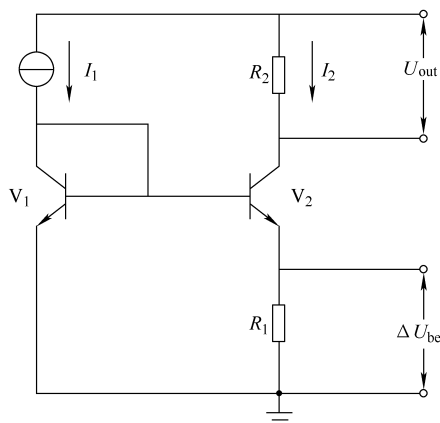


图 7-22 电压输出型集成温度传感器感温部分原理图

取 $R_1 = 940\Omega$ ， $R_2 = 30k\Omega$ ， $\gamma = 37$ ，则温度传感器输出的电压灵敏度为

$$S_T = \frac{dU_{out}}{dT} = \frac{R_2}{R_1} \frac{k}{q} \ln \gamma = 10mV/K$$

电压型集成温度传感器是将温度敏感部分与缓冲放大器集成在同一芯片上，制成一四端器件。因器件有放大器，故输出电压高，其灵敏度为 $10mV/K$ ；另外，由于其具有输出阻抗低的特性，故不适合长线传输；但其抗干扰能力强，特别适合于工业现场测量。常用的有 LM34/35、LM135/235、TMP35/36 和 AN6701S 等型号。

3. 电流输出型集成温度传感器

电流输出型集成温度传感器感温部分的电路基本原理如图 7-23 所示。

V_1 和 V_2 是结构相同作为恒流源负载的晶体管， V_3 和 V_4 是测温用晶体管，其中 V_3 的发射极面积是 V_4 的 8 倍，即 $\gamma = 8$ 。当晶体管的 $\beta \geq 1$ 时，流过电路的总电流可由下式表示

$$I_T = 2I_1 = \frac{2U_{be}}{R} = \frac{2kT}{Rq} \ln \gamma \quad (7-27)$$

在式 (7-27) 中，当 R 和 γ 为定值时，并具有零温度系数，则电路输出的总电流与绝对温度成线性关系。如果 $R = 358\Omega$ ，则温度传感器输出的电流灵敏度为

$$S_T = \frac{dI_T}{dT} = \frac{2k}{Rq} \ln \gamma = 1\mu A/K \quad (7-28)$$

电流型输出集成温度传感器可看作一个理想恒流源，其输出电流值可表述为

$$I = S_T T_k \quad (7-29)$$

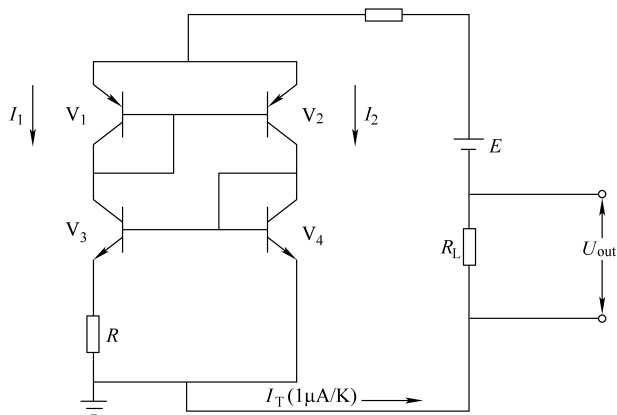


图 7-23 电流输出型感温部分原理图

式中的 S_T 为传感器输出灵敏度，在器件制造时已做好标定，为 $1\mu\text{A/K}$ ，其标定精度和器件的档次有关； T_k 为绝对温度。器件在 $-55^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$ 范围内有较好的线性，其非线性误差也与器件档次而异。如果不考虑器件非线性，其输出电流（单位为 μA ）与摄氏温度（ T_c ）的关系式为

$$I = S_T T_c + 273$$

电流型输出集成温度传感器具有高输出阻抗，其值可达 $\text{M}\Omega$ 级。适用于远距离传输，可用于深井测温等。常用的有 LM134/234、TMP17、AD590 和 AD592 等。

7.4 石英晶体温度传感器

石英晶体温度传感器及构成的温度测量装置具备高分辨力（ 0.0001°C ）、高线性度（ 0.002% ）和高稳定性，极其适合高要求的中低温测量。

1. 工作原理

石英晶体具有优良的频率稳定性。利用这种特性制成的高精度晶振，已广泛应用于通信、检测、控制仪器及微机等领域。石英晶体根据需要可切割成各种水晶板。石英晶体的固有振动频率，可表示为

$$f = \frac{n}{2t} \sqrt{\frac{C_{ii}}{\rho}} \quad (7-30)$$

式中 f ——固有频率；

n ——谐波次数；

t ——振子厚度；

ρ ——石英晶体密度；

C_{ii} ——弹性常数。

式（7-30）中的 t 、 ρ 、 C_{ii} 均是温度的函数。石英晶体温度传感器就是利用石英晶体的固有振动频率随温度变化的特性制成的。

石英晶体的温度系数与其切割形式有关。石英晶体作温度传感器使用时，其切割方式应

使得其频率随温度变化有较大变化。石英晶体固有频率与温度的关系为

$$\frac{f_T - f_{T_0}}{f_{T_0}} = A(T - T_0) + B(T - T_0)^2 + C(T - T_0)^3 \quad (7-31)$$

式中 f_T ——温度为 T 时的固有频率；

f_0 ——温度为 T_0 时的固有频率；

T ——测量温度；

T_0 ——基准温度（任意）；

A 、 B 、 C ——方程式的 1 次、2 次、3 次项的温度系数。

如果方程的 2 次、3 次项的温度系数近似为 0，就可以得到线性石英晶体温度传感器。

2. 石英晶体温度传感器测量电路

石英晶体温度传感器是由石英晶体切片和振荡电路组装在一起制成的，振荡电路原理如图 7-24 所示。电路由非门 G_1 和 G_2 ，电阻 R_1 和 R_2 （ $R_1 = R_2$ ）与电容 C 组成 RC 电路。电阻和电容的值要与晶体的频率相关。电路的时间常数 $\tau = RC$ 应远小于振荡频率 f 。对于石英晶体温度传感器而言，其固有振荡频率是随温度变化的，所以，选择 τ 值时要考虑被测温度上限所对应振荡频率的大小。

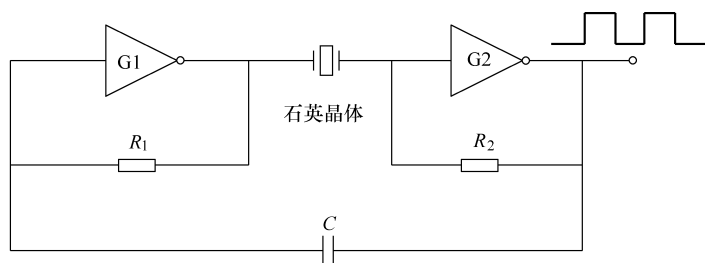


图 7-24 振荡电路原理图

石英晶体温度传感器可广泛用于空调、电子工业、食品加工等领域。由于可用数字显示，所以，可作为高稳定性和高分辨力的温度计使用，图 7-25 为石英晶体温度计测量系统框图。当被测温度变化时，石英晶体温度传感器的固有频率发生变化，使得振荡电路的频率变化。频率计测得的频率变化通过接口电路送给微处理器进行数据处理，由显示器显示测得的温度值。

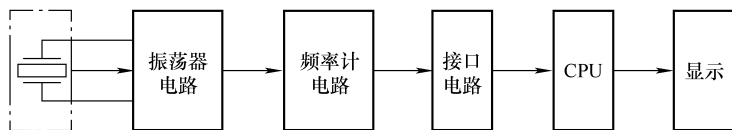


图 7-25 石英晶体温度计原理框图

7.5 热电式传感器的应用

1. 热电偶熄火保护装置

热电偶式熄火保护装置也称为热电式熄火保护装置，包括热电偶和电磁阀两大部分，所

以又称为磁控安全阀,是现代燃气具较多使用的一种熄火保护装置。图 7-26 所示为燃气热水器上的熄火保护装置。两个串联的热电偶分别放置在小火和主燃烧器的火焰范围内。当热电偶 1 热端受热时,产生热电动势,把热电偶产生的电动势接入电磁阀的线圈,产生磁场使电磁阀动作,气阀开启,主气道中的燃气导通,维持主燃烧器正常燃烧。当火焰过大,热电偶 2 也产生热电动势,总热电动势变大,使进气电磁阀动作,进气量减小,维持正常火焰;一旦火焰熄灭,两个热电偶输出的热电动势很快下降至零,电磁阀关断气源通道,中止供气。

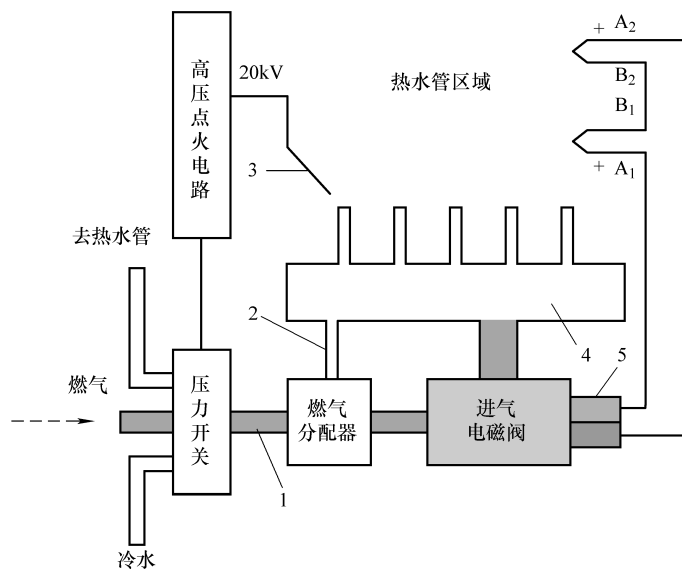


图 7-26 燃气热水器熄火保护装置示意图

1—燃气进气管 2—引火管 3—高压放电针 4—主燃烧器
5—电磁阀线圈 A₁B₁—热电偶 1 A₂B₂—热电偶 2

2. 热敏电阻流量测量

利用热敏电阻上的热量消耗和介质流速的关系可以测量流量、流速、风速等。图 7-27 所示为热敏电阻式流量计，热敏电阻 R_{t1} 和 R_{t2} 分别置于管道中央和不受介质流速影响的小室中，当介质处于静止状态时，调电桥平衡，桥路输出为零，当介质流动时，将 R_{t1} 的热量带走，致使 R_{t1} 的阻值变化，桥路就有输出量。介质从 R_{t1} 上带走的热量多少与介质流量（流速）有关，故可用它来测量流量（流速）。

3. 谷物温度测量仪

谷物温度测量仪由探针、电桥和电源组成，如图 7-28 所示。热敏电阻装在探针的头部，由铜保护帽将被测谷物的温度传给热敏电阻。为保证测量精度，在探针头部还装有绝缘套。热

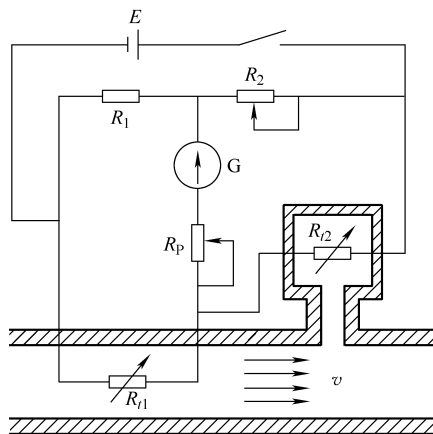


图 7-27 热敏电阻式流量计

敏电阻通过引线和接插件与测温直流电桥连接, 电桥和电池装在一个电路盒内, 电路盒和探针通过连接件组合在一起。当温度改变时, 接在电桥一个臂中的热敏电阻的阻值将会发生变化, 使电桥失去平衡, 接在电桥一条对角线上的直流微安表即指示出相应温度, 图 7-29 所示为谷物温度测量仪的电路图。可变电阻 R_{P1} 的作用是在 -10°C 时调整电桥平衡。电阻 R_1 的阻值等于 $+70^{\circ}\text{C}$ 时热敏电阻 R_T 的阻值, 用于校准仪器。校准时将开关 S_2 放置在校准位置, 调节电位器 R_{P2} , 使表头指针对准 $+70^{\circ}\text{C}$ 的刻度。

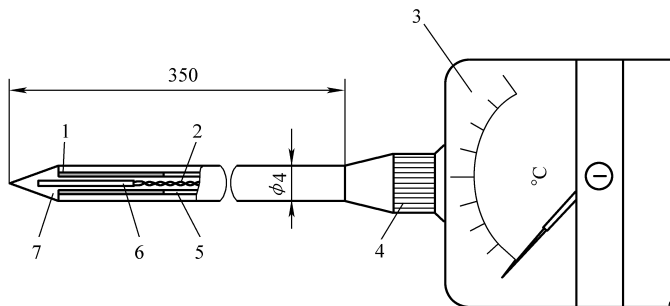


图 7-28 谷物温度测量仪结构示意图

1—绝热套 2—引线 3—电路盒 4—连接件 5—护套 6—热敏电阻 7—铜保护帽

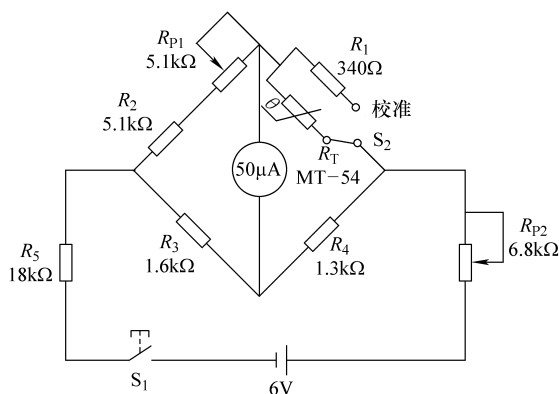


图 7-29 谷物温度测量仪电路图

习 题

- 7-1 将一个灵敏度为 $0.08\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 的热电偶与电压表相连接, 电压表冷端是 50°C , 若电位计上读数是 60mV , 热电偶的热端温度是多少?
- 7-2 参考电极定律有何实际意义? 已知在某特定条件下材料 A 与铂配对的热电势为 13.967mV , 材料 B 与铂配对的热电势为 8.345mV , 求出此特定条件下材料 A 与材料 B 配对后的热电势。
- 7-3 试比较热电偶、热电阻、热敏电阻三种热式传感器的特点及其对测量线路的要求。
- 7-4 金属热电阻的工作机理是什么? 使用时应注意的问题是什么?
- 7-5 选择金属热电阻测温时, 应从哪几个方面考虑?
- 7-6 半导体热敏电阻有哪几种, 各有什么特点?
- 7-7 金属热电阻与半导体热敏电阻有何异同?

7-8 使用热电偶测温时,如何提高测量的灵敏度?

7-9 补偿导线的作用是什么?使用补偿导线的原则是什么?

7-10 为什么在实际应用中要对热电偶进行温度补偿?

7-11 试设计采用二极管作冷端补偿的电路,并说明工作原理。

7-12 用铂铑10-铂热电偶测温度 T ,参考端在室温环境 T_n 中,测得热电动势 $E_{AB}(T, T_n) = 0.465\text{mV}$,又用室温计测得 $T_n = 21^\circ\text{C}$ 。试用热电动势修正法和温度修正法求出所测温度 T 。

7-13 现用一支镍铬-铜镍热电偶测某炉膛温度,热电偶冷端温度为 30°C ,显示仪表机械零位为 0°C ,这时仪表指示值为 400°C ,若认为此时炉膛温度为 430°C ,是否正确?为什么?正确值是多少?

7-14 热电偶温度传感器的输入电路如图7-30所示,已知铂铑-铂热电偶在温度 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 之间变化时,其平均热电动势波动为 $6\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。桥路电源电压为 4V ,三个锰铜电阻(R_1 、 R_2 、 R_3)与铜电阻 R_{Cu} 的阻值均为 1Ω ,铜电阻的电阻温度系数为 $\alpha = 0.004/^\circ\text{C}$,已知电桥在 0°C 平衡。为了使电桥的冷端温度在 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内其热电动势能得到完全补偿,试求可调电阻的 R_5 值。

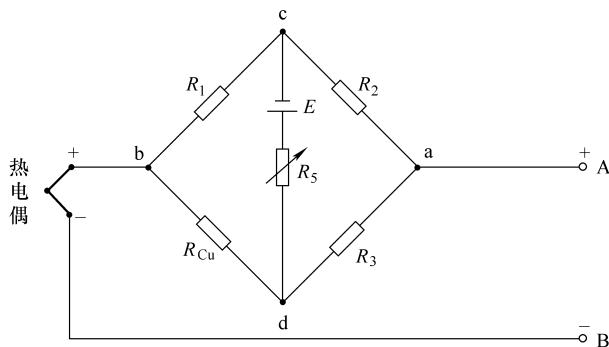


图 7-30 热电偶传感器输入电路

参 考 文 献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 工作用贵金属热电偶检定规程: JJG 141—2013 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 铠装热电偶校准规范: JJF 1262—2010 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [3] 中国国家标准化管理委员会. 工业铂热电阻及铂感温元件: GB/T 30121—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [4] 周真, 苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [5] 何道清, 张禾, 湛海云. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 梁福平. 传感器原理及检测技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [7] 唐文彦. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] 陶艳红, 余成波. 传感器与现代检测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

第8单元

光电式传感器

学习要点

- ◆ 光电效应、色敏传感器工作原理、光栅工作原理及莫尔条纹特性；
- ◆ 光电器件、光纤式传感器、光栅式传感器的工作原理、转换电路、误差分析；
- ◆ 光电式传感器的原理、结构、特性及应用；
- ◆ CCD 的工作原理及应用。

相关知识链接

- ◆ GB/T 18904.3—2002 半导体器件 第 12-3 部分 光电子器件显示用发光二极管空白详细规范；
- ◆ GB/T 15651.2—2003 半导体分立器件和集成电路 第 5-2 部分：光电子器件 基本额定值和特性。

引导案例

光电检测大气雾霾（PM_{2.5}）

在我国工业取得重大进步的同时，却付出了环境遭到破坏的巨大代价，首当是大气污染，特别是近年来的大气雾霾污染。2010 年北京、上海、广州、西安因 PM_{2.5} 污染分别造成早死人数为 2349、2980、1715、726 人，共计 7770 人，分别占当年死亡总人数的比例为 1.9%、1.6%、2.2%、1.5%，经济损失分别为 18.6、23.7、13.6、5.8 亿元，共计 61.7 亿元。值得注意的是，2010 年北京、上海两地因 PM_{2.5} 污染致死的人数分别为 2349 人和 2980 人，而当地当年因交通意外死亡人数分别为 974 人和 1009 人。

PM_{2.5}（Particulate matter 2.5）是一种可吸入颗粒物，是大气雾霾的主要物质成分，其颗粒物包含重金属离子、硫酸盐、多环芳烃等有毒物质，同时大气雾霾造成阳光散射，大气能见度降低，危害交通安全。

PM_{2.5} 产生的主要来源，是日常发电、工业生产、汽车尾气排放等过程中经过燃烧而排放的残留物，大多含有重金属等有毒物质。一般而言，粒径 2.5~10 μm 的粗颗粒物主要来自道路扬尘等；2.5 μm 以下的细颗粒物（PM_{2.5}）则主要来自化石燃料的燃烧（如机动车尾气、燃煤）、挥发性有机物等。

PM_{2.5} 颗粒尺度小，危害大，采用什么检测技术能够实现精准检测呢？

检测大气中粒径小于 2.5 μm 细颗粒物，其基本原理是利用激光经尘埃粒子散射后，激光能量降低，其信号会被超高灵敏的数字电路模块检测到，通过对信号数据进行智能识别分析，得到颗粒计数和颗粒大小。根据专业的标定技术得到粒径分布，通过质量浓度转换公式，最终得到标准的质量浓度，从而实现标准数字化测量。

光电式传感器是将光信号的变化变换为电信号的装置。光电式传感器一般由光源、光学通路和光电器件三部分组成。

被测量通过对光源或者光学通路的影响将待测信息调制到光波上,通常使光波的强度、相位、空间分布和频谱分布发生改变,光电器件将光信号的变化变换为电信号。电信号经后续电路的解调分离出被测量的信息,从而实现对被测量的测量。

光源是光电传感器的一个组成部分,大多数光电传感器都离不开光源。光电式传感器对光源的选择要考虑很多因素,例如波长、谱分布、相干性、体积、造价和功率等。常用的光源可分为热辐射光源、气体放电光源、激光器和电致发光器件四大类。

光学通路是由一定的光学元件,按照一些光学定律和原理构成的各种各样的光路。常用的光学元件有各种反射镜和透镜。

光电器件的作用是将光信号变换为电信号,它的作用原理是基于一些物质的光电效应。

光电式传感器具有频谱宽、不受电磁干扰的影响、非接触测量、体积小、重量轻、造价低等特点。特别是20世纪60年代以来,随着激光、光纤、CCD等技术的起步和发展,光电传感器也得到了飞速发展,在生物、化学、物理和工程技术等领域中获得了广泛的应用。

8.1 光电效应

由光的粒子学说可知,光可以被看成是具有一定能量的粒子组成的,而每个光子所具有的能量 E 正比于其频率。光照射在物体上就可以看成是一连串的具有能量为 E 的粒子轰击在物体上。所谓光电效应就是由于物体吸收了能量为 E 的光后产生的电效应,可分为外光电效应和内光电效应,其中,内光电效应包括光电导效应和光生伏特效应。光电式传感器是以光电效应为基础,将光信号转换成电信号的光电器件。

8.1.1 外光电效应

指在光的照射下,材料中电子逸出表面的现象,也称为光电发射效应。光电管及光电倍增管均属这一类,它们的光电发射极——光阴极就是用具有这种特性的材料制造的。

某些物质吸收了光的能量,电子将逸出表面。根据爱因斯坦假说,一个光子的能量只能给一个电子。因此,如果一个电子要从物体中逸出表面,必须使光子能量 $E = hf$ 大于表面逸出功 A ,这时逸出表面的电子就具有动能 E_k 。

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = hf - A \quad (8-1)$$

式中 m ——电子质量;

v ——电子逸出初速度。

h ——普朗克常数, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;

f ——光的频率。

各种不同的材料具有不同的逸出功 A 。式(8-1)称为爱因斯坦光电效应方程,它说明:

1) 在入射光的频谱成分不变时,发射的光电子数正比于光强。因此,被照射物质中饱和光电流 $I_{\varphi m}$ 正比于照射光强 Φ ,即

$$I_{\varphi m} = K\Phi \quad (8-2)$$

式中 K ——比例系数。

2) 光电子逸出物体表面时, 具有初始动能 E_k , 它与光的频率有关, 频率越高, 则动能越大, 光电子速率 c , 频率 f , 与光波长 λ 之间的关系为 $\lambda = c/f$; 光照电子的逸出功决定于被照材料的性质, 因此对某种特定的材料而言将有一个频率限, 当入射光的频率低于此频率限时, 不论它有多强, 也不能激发电子; 当入射光的频率高于此频率限时, 不论它有多微弱, 也会使被照射的物质激发出电子。因此, 此频率限称为“红限”, 红限的波长可以表示为

$$\lambda_k = \frac{hc}{A} \quad (8-3)$$

式中 λ_k ——红限的波长;

c ——光速。

利用外光电效应制成的光电器件有真空光电管、充气光电管和光电倍增管。

8.1.2 内光电效应

当光照射在物体上, 使物体的电阻率发生变化, 或产生光生电动势的现象称为内光电效应。内光电效应又分为光电导效应和光生伏特效应。

1. 光电导效应

光电导效应指在光的照射下材料的电阻率发生改变的现象, 如光敏电阻。

光电导效应的物理过程是光照射到半导体材料时, 价带中的电子受到能量大于或等于禁带宽度的光子轰击, 并使其由价带越过禁带跃入导带, 使材料中导带内的电子和价带内的空穴浓度增大, 从而使电导率增大。

由以上分析可知, 材料的光电导性能决定于禁带宽度, 光子能量 hf 应大于禁带宽度 E_g (单位为 eV)。由此可得光电导效应的临界波长 λ_0

$$\lambda_0 = hc/E_g \quad (8-4)$$

例如锗的 $E_g = 0.7\text{eV}$, 则可得 $\lambda_0 = 1.8\mu\text{m}$ 。即锗从波长为 $1.8\mu\text{m}$ 的红外光就开始显现光电导特性, 所以可用来检测可见光及红外辐射。

2. 光生伏特效应

光生伏特效应指在光照射下, 物体内部产生一定方向的电动势的现象。光照射 PN 结中, 若能量达到禁带宽度时, 价带中的电子跃迁到导带, 便产生电子空穴对。被光激发的电子在势垒附近电场梯度的作用下向 N 侧迁移, 而空穴则向 P 侧迁移。从而使 N 区带负电, P 区带正电, 形成光生电动势。

还有一种被称为“丹倍效应”的也属于光生伏特效应一类。这是指当光只照射在某种光电导材料的一部分上时, 被照射的部分产生电子空穴对, 使照射到和未被照射到的两部分中载流子的浓度不同, 从而产生载流子扩散, 如果电子的迁移率大于空穴的迁移率, 必将使未被照射到的部分获得过多的电子, 并带负电; 而被照射到的部分失去过多的电子而带正电, 从而产生光生伏特。

8.2 光电元件

8.2.1 光电管

1. 光电管的结构原理

光电管是利用外光电效应制成的光电器件。图 8-1 为光电管典型结构，它是在真空玻璃管内装入两个电极——光阴极和光阳极。光阴极可以有多种形式，最简单的是在玻璃泡内壁涂上阴极涂料作为阴极。或是在玻璃泡内装入柱面形金属板，在此金属板内壁上涂有阴极涂料组成阴极。而阳极为置于光电管中心的环形金属丝或是置于柱面中心轴位置上的金属丝柱。

光电管的阴极受到适当的光线照射后便发射电子，这些电子被具有一定电位的阳极吸引，在光电管内形成空间电子流。如果在外电路中串入一适当阻值的电阻，则在此电阻上将有正比于光电管中空间电流的电压降，其值与照射在光电管阴极上的光强度成函数关系。

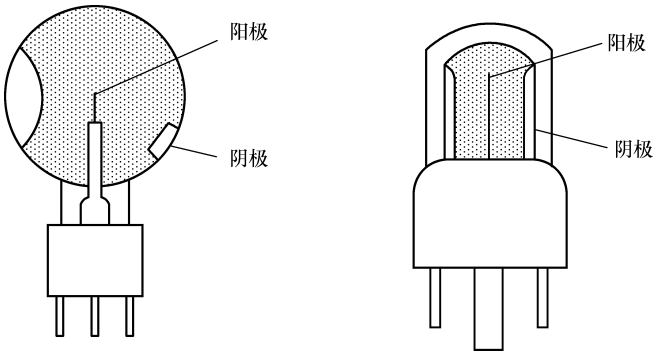


图 8-1 光电管的典型结构

除真空光电管外，还有充气光电管，二者结构相同，只是前者泡内为真空，后者泡内充入惰性气体如氩、氖等。当电子在被吸向阳极的过程中，运动着的电子对惰性气体进行轰击，并使其电离，于是会有更多的自由电子产生，从而提高了光电变换灵敏度。可见充气光电管比真空光电管的灵敏度高。

2. 光电管的基本特性

(1) 光谱特性 在一定光照功率下，光电灵敏度与光频率之间的关系称为光谱特性。光电管的光谱特性主要取决于光电阴极的材料。不同的阴极材料对同一种波长的光有不同的灵敏度；同一种阴极材料对不同波长的光也有不同的灵敏度。这可用光谱特性描述。

图 8-2 为光电管的光谱特性，其中曲线 I 为铯氧阴极光电管的光谱特性；II 为锑铯阴极光电管的光谱特性；III 为正常人的眼睛视觉特性。由此特性可知，对不同颜色的光应选用不同材料的光电管。例如被检测的光主要成分是在红外区，应选用铯氧阴极光电管；而要检测的光其波长较短，主要分布在紫外区，则应选用锑铯阴极光电管；而在其他谱

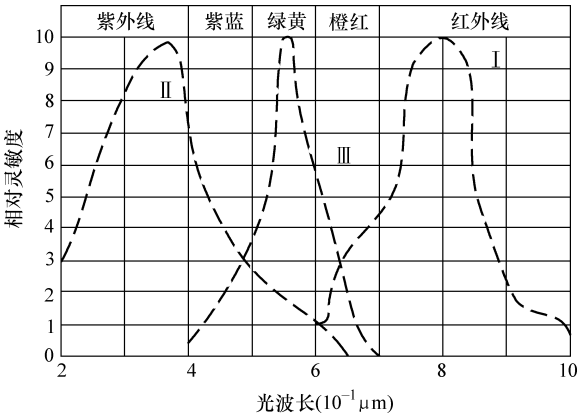


图 8-2 光电管的光谱特性

区则可选用镁镉合金阴极或镍钽合金阴极光电管。

(2) 伏安特性 光电管的伏安特性是指在一定的光通量照射下, 阴极与阳极之间的电压同光电流的关系。图 8-3a 为真空光电管的伏安特性, 当极间电压高于 40 ~ 50V 时光电流开始饱和, 因此在使用真空光电管时极间电压过高是没有益处的。图 8-3b 为充气光电管的伏安特性, 由曲线可见, 极间电压高于 40 ~ 50V 时, 随着电压的提高, 光电流成正比地增长。因此在使用充气光电管时, 极间电压可适当地提高。但不得超过规定极限值, 否则阴极会很快被损坏。

(3) 光照特性 光照特性是指阳极电压不变时光通量与光电流间的关系。图 8-3c 为真空光电管的光照特性。图 8-3d 为充气光电管的光照特性。可见在电压一定时, 光通量 Φ 与光电流之间为线性关系, 转换灵敏度为常数, 此转换灵敏度随极间电压的提高而增加。

真空光电管与充气光电管相比, 后者灵敏度可高出一个数量级, 但惰性较大, 参数随极间电压而变, 在交变光通量下使用时灵敏度出现非线性, 许多参数与温度有密切关系及易老化。因此目前真空光电管比充气光电管受用户欢迎, 而灵敏度低可用其他办法补偿。

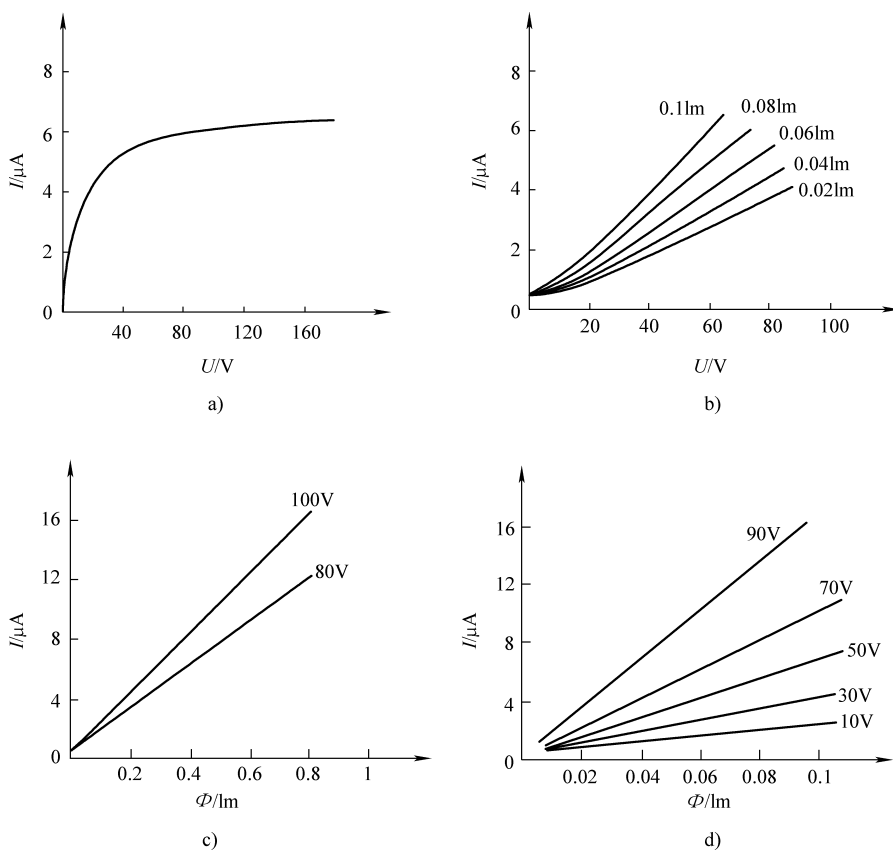


图 8-3 光电管的伏安特性及光照特性

a) 真空光电管的伏安特性 b) 充气光电管的伏安特性 c) 真空光电管的光照特性 d) 充气光电管的光照特性

(4) 暗电流 光电管在全暗条件下, 极间加上工作电压, 光电流并不等于零, 该电流称为暗电流。它对微弱光强测量及精密测量的影响很大, 因此在特定的应用场合下应尽量选用暗电流小的光电管。

(5) 温度特性 光电管输出信号及特性与温度的关系称为温度特性。工作环境温度变化会影响光电管的灵敏度, 因此应严格在各种阴极材料规定的温度下使用。

(6) 频率特性 在同样的极间电压和同样幅值的光强度下, 当入射光强度以不同的正弦交变频率调制时, 光电管输出的光电流 I (或灵敏度) 与频率 f 的关系, 称为频率特性。由于光电发射几乎具有瞬时性, 所以真空光电管的调制频率可高达 1MHz 以上。

(7) 稳定性和衰老 光电管有较好的短期稳定性, 随着工作时间的增加, 尤其是在强光照射下, 其灵敏度将逐渐降低。实践证明, 入射光越强或波长越短, 衰老速度也越快。如果把已降低了灵敏度的光电管停止使用, 放在黑暗的地方, 可部分或全部恢复其灵敏度。

8.2.2 光电倍增管

1. 光电倍增管的结构原理

光电倍增管结构如图 8-4 所示。它是在一个玻璃泡内除装有光电阴极和光电阳极以外, 还装有若干个光电倍增极, 且在光电倍增极上涂以在电子轰击下可发射更多次级电子的材料, 倍增极的形状及位置要正好能使轰击进行下去, 在每个倍增极间均应依次增大加速电压, 设每极的倍增率为 δ , 若有 n 级, 则光电倍增管的光电流倍增率将为 $n\delta$ 。

光电倍增极一般采用 Sb - Cs 涂料或 Ag - Mg 合金涂料, 倍增极数可在 4 ~ 14 之间, δ 值可为 3 ~ 6。

2. 光电倍增管的基本特性

(1) 光照特性 在光通量不大时, 阳极电流 I 和光通量 Φ 之间有很好的线性关系, 如图 8-5 所示, 但当光通量很大 ($\Phi > 0.1\text{lm}$) 时, 光电特性出现严重的非线性, 这是由于在强光的照射下, 大的光电流将使后几级倍增极疲劳, 造成二次发射系数降低; 产生非线性的另一个原因是当光通量大时, 阳极和最后几级倍增极将会受到附近空间电荷的影响。

(2) 光谱特性 光电倍增管的光谱特性与相同材料的光电管的光谱特性相似。在较长波长的范围内, 光谱特性取决于光电阴极的材料性能, 而在较短波长的范围时, 光谱特性取决于窗口材料的透射特性。图 8-6 表示铯钾铯光电阴极的光电倍增管的光谱特性。

(3) 伏安特性 光电倍增管的阳极电流 I 与最后一级倍增极和阳极间的电压 U 的关系称为光电倍增管的伏安特性, 如图 8-7 所示, 此时其余各级电压保持恒定。在使用时, 应使其工作在饱和区。

(4) 暗电流 当光电倍增管不受光照, 但极间加入电压时在阳极上会收到电子, 这时产生的电流称为暗电流。产生暗电流的原因是热电子发射、极间漏电流、场致发射等。暗电流在电路设计中, 被认为是一种噪声电流, 在光照情况下, 由于光电流与暗电流的比值大,

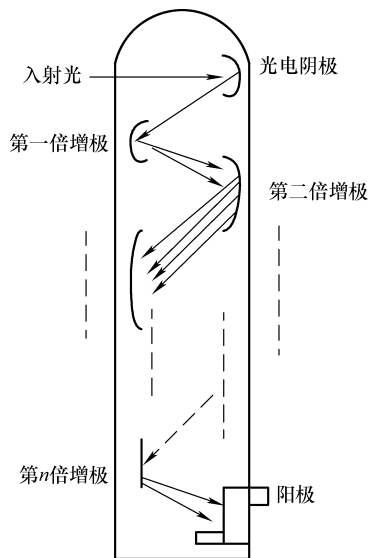


图 8-4 光电倍增管结构图

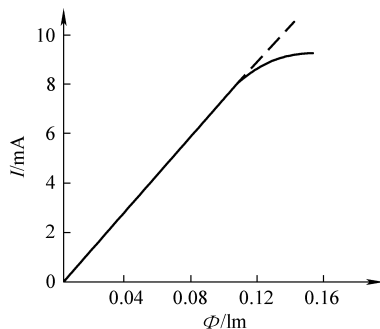


图 8-5 光电倍增管的光照特性

但在低照度下，光电流与暗电流比值小，所以，光电倍增管的暗电流对于测量微弱光强和精确测量的影响很大，通常可以用补偿电路加以消除，在选择时往往应选择暗电流小的光电器件。

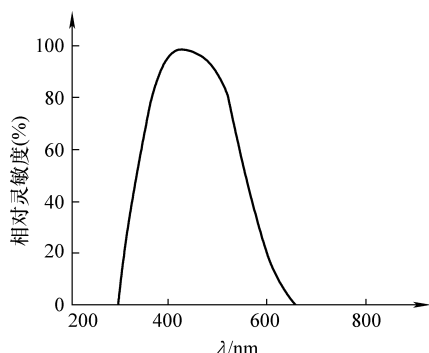


图 8-6 光电倍增管的光谱特性

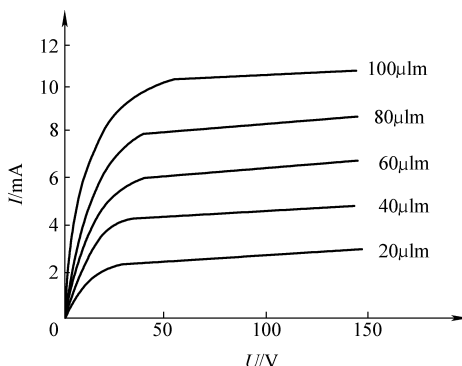


图 8-7 光电倍增管的伏安特性

8.2.3 光敏电阻

1. 光敏电阻的结构原理

光敏电阻是用具有内光电效应的光导材料制成一种均质半导体光电器件。由于内光电效应仅限于光线照射的表面层，所以光电半导体材料一般都做成薄片并封装在带有透明窗的外壳中。光敏电阻除用硅、锗制造外，还可用硫化镉、硫化铅、硒化铟、碲化铅等材料制造。光敏电阻常称光导管，它的典型结构如图 8-8a 所示，为了避免外来干扰，光敏电阻外壳的入射孔上盖有一种能透过所要求的光谱范围的透明保护罩（如玻璃）。为增加灵敏度，光敏电阻做成图 8-8b 所示的栅形，装在外壳中。光敏电阻没有极性，使用时在电阻两端既可加直流电压，也可加交流电压，在光线的照射下，可改变电路中电流的大小。

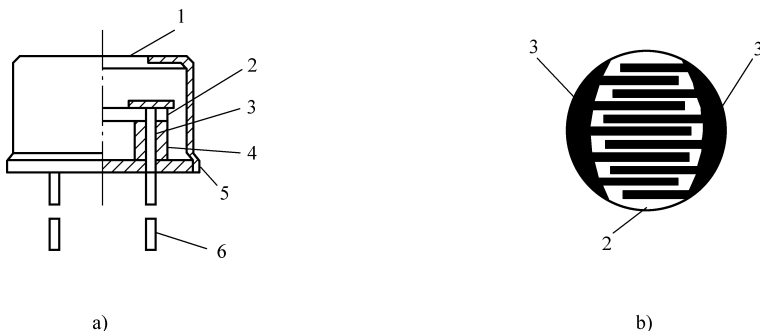


图 8-8 光敏电阻的典型结构

a) 光敏电阻的结构 b) 栅型光敏电阻结构

1—玻璃 2—光电半导体 3—电极 4—绝缘体 5—外壳 6—引线

2. 光敏电阻的基本特性

(1) 暗电阻、亮电阻及光电流 光敏电阻置于室温、全暗条件下，经一段稳定时间后测得的阻值称为暗电阻。此时流过的电流称为暗电流。

光敏电阻在光照下的阻值称为亮电阻，此时流过的电流称为亮电流。亮电流和暗电流之

差称为光电流。光敏电阻的暗电阻越大，亮电阻越小，则性能越好。也就是说，暗电流越小，亮电流越大，光敏电阻的灵敏度越高。实际上，光敏电阻的暗电阻往往超过 $1\text{M}\Omega$ ，甚至达到 $100\text{M}\Omega$ ，而亮电阻即使在白昼条件下也可降到 $1\text{k}\Omega$ 以下，因此光敏电阻的灵敏度是相当高的。

(2) 伏安特性 当光照为定值时，光敏电阻两端电压与电流间的关系，如图 8-9 所示，光敏电阻的伏安特性接近直线。使用时注意不要超过允许功耗限。

(3) 光照特性 指光敏电阻的光电流与光通量之间的关系，如图 8-10 所示，可见此关系为非线性，这是光敏电阻的一大缺点。

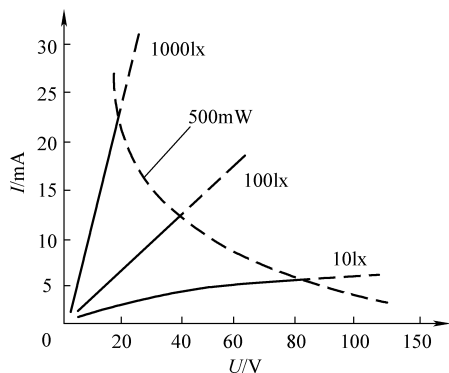


图 8-9 光敏电阻的伏安特性

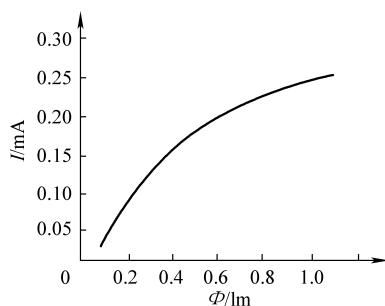


图 8-10 光敏电阻的光照特性

(4) 光谱特性 光敏电阻对不同波长的光灵敏度不同，如图 8-11 所示为硫化镉、硫化铊及硫化铅三种光敏电阻的光谱特性，其中只有硫化镉的光谱响应峰值落在可见光区，而硫化铅的光谱响应峰值处在红外区。

(5) 响应时间和频率特性 光敏电阻受到脉冲光照射时，光电流并不是立刻上升到稳态值；当光照撤销后，也不是立刻从稳态值下降到暗电流值。这表明光敏电阻中光电流的变化滞后于光照的变化，通常用响应时间来表示。响应时间又分为上升时间 t_1 和下降时间 t_2 ，如图 8-12 所示。所谓上升时间是指当光敏电阻突然受到光照时，电导率上升到饱和值的 63% 所用的时间；当器件的光照突然变暗时，电导率降到饱和值的 37% 所用的时间称为下降时间。

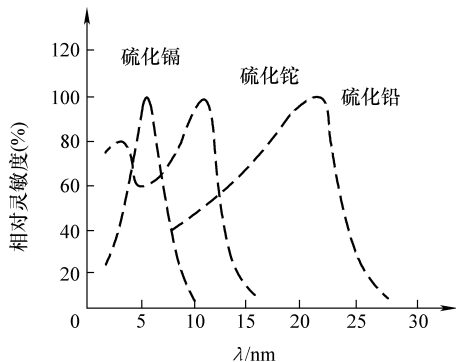


图 8-11 光敏电阻的光谱特性

上升时间和下降时间是表征光敏电阻性能的重要参数之一。上升时间和下降时间短，表示光敏电阻的惰性小，对光信号响应快，频率特性好（这里所说的频率，不是入射光的频率，而是指入射光强度变化的频率）。一般光敏电阻的响应时间都较长（约几十至几百毫秒）。光敏电阻响应时间除了与元件的材料有关外，还与光照的强弱有关，光照越强，响应时间越短。

由于不同材料的光敏电阻具有不同的响应时间，所以它们的频率特性也不同。图 8-13 所示为硫化铅与硫化铊的频率特性。

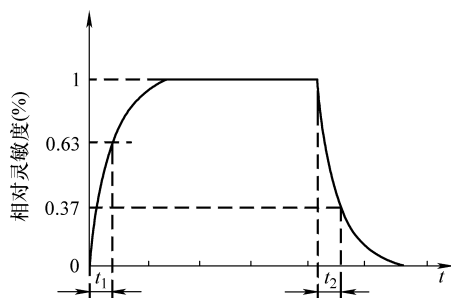


图 8-12 光敏电阻的响应时间特性

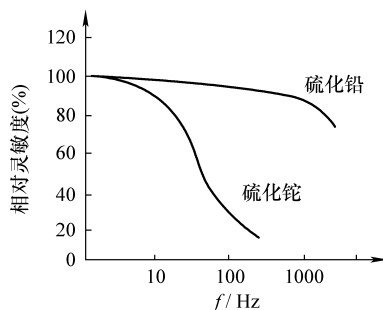


图 8-13 硫化铅与硫化铊的频率特性

(6) 温度特性 光敏电阻和其他半导体器件一样，其特性受温度影响较大。随温度的升高光敏电阻的暗电流及灵敏度将下降，图 8-11 所示光谱效应峰值将向左移动等。采用控温的方法可调节灵敏度或主要接受某一频段内的光信号。

8.2.4 光电池

1. 硅光电池的结构原理

光电池是基于光生伏特效应制成的，它是一种可直接将光能转换为电能的光电元件。制造光电池的材料很多，主要有硅、锗、硒、硫化镉、砷化镓和氧化亚铜等，其中硅光电池应用最为广泛，其光电转换效率高、性能稳定、光谱范围宽、频率特性好、能耐高温辐射等。

硅光电池是在一块 N 型硅片上，用扩散的方法掺入一些 P 型杂质，形成一个大面积的 PN 结，再在硅片的上下两面制成两个电极，然后在受光照的表面上蒸发一层抗反射层，构成一个电池单体。如图 8-14 所示，光敏面采用梳状电极以减少光生载流子的复合，从而提高转换效率，减小表面接触电阻。

光照射到电池上时，一部分被反射，另一部分被光电池吸收。被吸收的光能一部分变成热能，另一部分以光子形式与半导体中的电子相碰撞，在 PN 结处产生电子空穴对，在 PN 结内电场的作用下，空穴移向 P 区，电子移向 N 区，从而使 P 区带正电，N 区带负电，于是 P 区和 N 区之间产生光电流或光生电动势。受光面积越大，接受的光能越多，输出的光电流越大。

2. 光电池的基本特性

(1) 光谱特性 典型的光谱特性如图 8-15 所示，硒光电池响应区段在 $0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波长间，最灵敏峰出现在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右。硅光电池响应区段在 $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 波长间，最灵敏峰在 $0.8 \mu\text{m}$ 左右。可见在使用光电池时对光源应有所选择。

(2) 光照特性 光电池在不同光照度下光生电动势不同。图 8-16 所示为硅光电池的开路电压及短路电流与光照度的关系曲线。可见，短路电流与光照度成线性关系；而开路电压与照度之间成非线性关系，当照度大于 1000 lx 时出现饱和特性。因此光电池在作为测量元件使用时，应注意使其工作在接近短路状态为宜，即负载电阻应尽量减小，图 8-17 所示为在不同负载下光电流（称短路电流）与照度间的关系。当负载电阻为 100Ω 时，光照度在 $0 \sim 1000 \text{ lx}$ 范围内，均可取得线性转换关系。

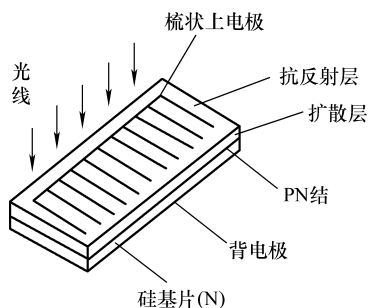


图 8-14 硅光电池结构

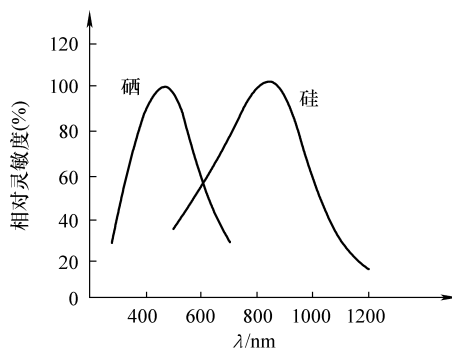


图 8-15 光电池光谱特性

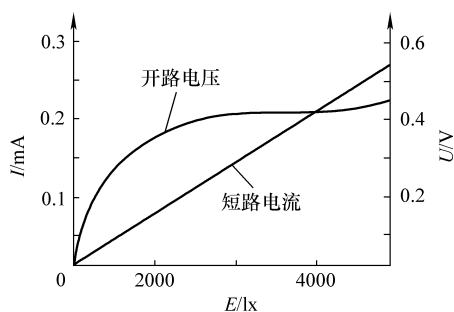


图 8-16 硅光电池光照特性

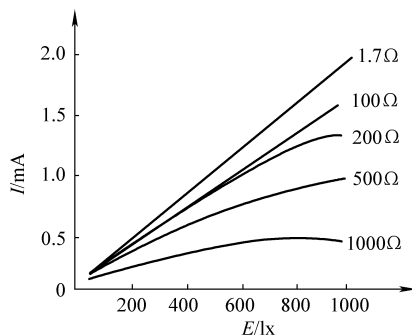


图 8-17 不同负载下光电流与照度间的关系

(3) 频率响应 光电池作为测量元件、计算元件及接收元件时，常采用调制光输入，这里频率即是指光的调制频率。图 8-18 所示为硅光电池与硒光电池的频率响应曲线，可见硅光电池有较好的频响特性。

(4) 温度特性 这里指的是开路电压与短路电流的温度特性。由于它关系着应用光电池仪器设备的温度漂移，所以此特性比较重要。图 8-19 给出的是硅光电池在 1000lx 照度下的温度特性曲线。由图可见开路电压随温度上升而很快下降，一般是 $3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。而短路电流则随温度缓慢地增加，一般是每度几个微安数量级。

(5) 稳定性 当光电池密封良好，电极引线可靠并且使用合理时，光电池的寿命比较长，性能比较稳定。但高温和强光照射会使光电池性能变坏，并降低寿命。

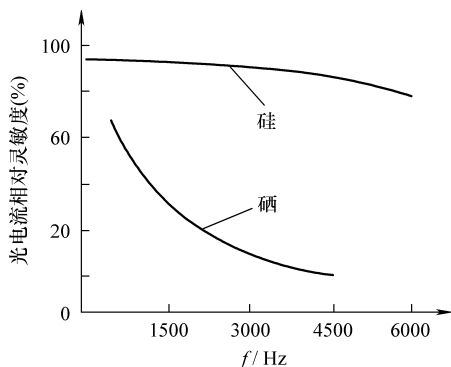


图 8-18 硅光电池和硒光电池的频率特性

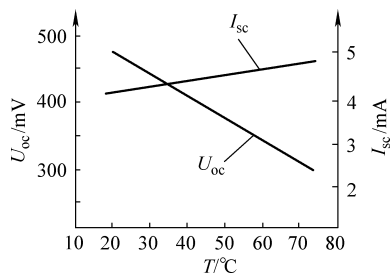


图 8-19 光电池的温度特性

8.2.5 光电二极管和光电晶体管

1. 光电二极管和光电晶体管的结构原理

光电二极管也称为光敏二极管，其结构与普通二极管相似，但其 PN 结位于管子顶部，可以直接受到光照射。使用时光电二极管一直处于反向工作状态，如图 8-20 所示。当没有光照射时，光电二极管的反向电阻很大，反向电流即暗电流很小。当光线照射 PN 结时，在 PN 结附近激发出光生电子空穴对，它们在外加反向偏压和内电场的作用下作定向运动，形成光电流。光的照度越大，光电流越大。

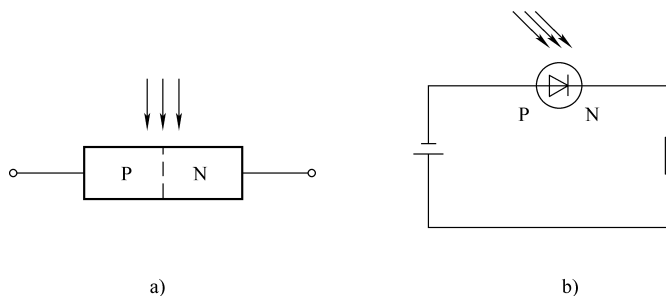


图 8-20 光电二极管的电路连接图

a) 光电二极管结构示意图 b) 光电二极管的工作原理示意图

光电二极管有三种类型，即普通 PN 结型光电二极管（PD）、PIN 结型光电二极管（PIN 二极管）和雪崩型光电二极管（APD）。相比之下，PIN 二极管具有很高的频率响应速度和灵敏度，而 APD 二极管除了响应时间短、灵敏度高外，还具有电流增益作用。

光电晶体管的结构与普通晶体管相似，它由两个 PN 结构成，基区做得很大，以扩大光的照射面积。光电晶体管有 NPN 和 PNP 两种类型，图 8-21 为 NPN 型光电晶体管的电路连接图。其工作原理与反向偏置的光电二极管类似，但比光电二极管灵敏度高，光电晶体管的电流放大作用与普通晶体管相似，此处不再说明。

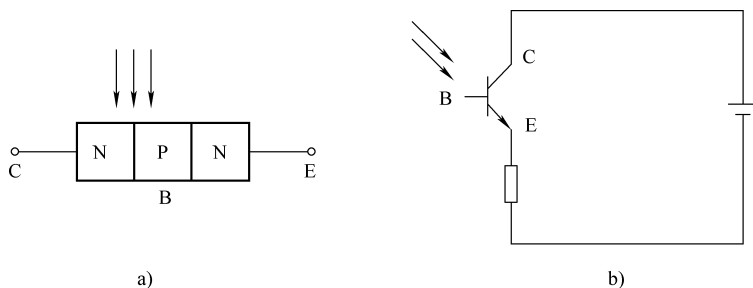


图 8-21 NPN 型光电晶体管电路连接图

a) NPN 型光电晶体管结构示意图 b) NPN 型光电晶体管工作原理示意图

这类器件也有硅管、锗管之分。前者的暗电流及特性的温度系数均比后者小，因此应用比较广泛。

2. 光电二极管和光电晶体管的基本特性

(1) 光谱特性 光电二极管和光电晶体管的入射光频率（波长）决定光生载流子的产

生与否及其能量大小，图 8-22 所示为光电晶体管的光谱特性。锗光电晶体管响应频段约在 500 ~ 1700nm 波长范围内，最灵敏峰在 1400nm 附近。硅光电晶体管的响应频段在 400 ~ 1000nm 波长范围之内，而最灵敏峰出现在 800nm 附近。

(2) 光电晶体管的伏安特性 光电二极管和光电晶体管的光电流与外加偏压的关系称为伏安特性，如图 8-23 所示，它与普通二极管和晶体管特性相似。光电二极管的光电流相当于反向饱和电流，其值决定于光照强度。光电晶体管的伏安特性曲线的参变量不是基极电流而是光的强度。

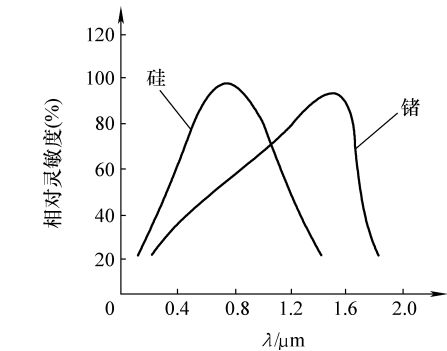


图 8-22 光电二极管和光电晶体管的光谱特性

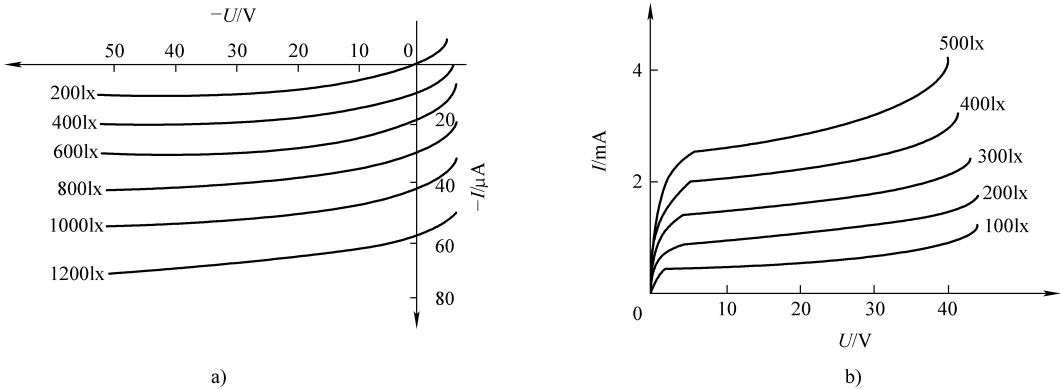


图 8-23 光电二极管和光电晶体管的伏安特性
a) 光电二极管 b) 光电晶体管

(3) 光照特性 外加偏压一定时，光电流与光照度的关系称为光照特性，典型曲线如图 8-24 所示。相比之下，光电二极管光照特性的线性度好，但光电流由于没有增益而比光电晶体管小很多。当光照足够大时均会出现饱和，其值的大小与材料、掺杂浓度及外加偏压有关。

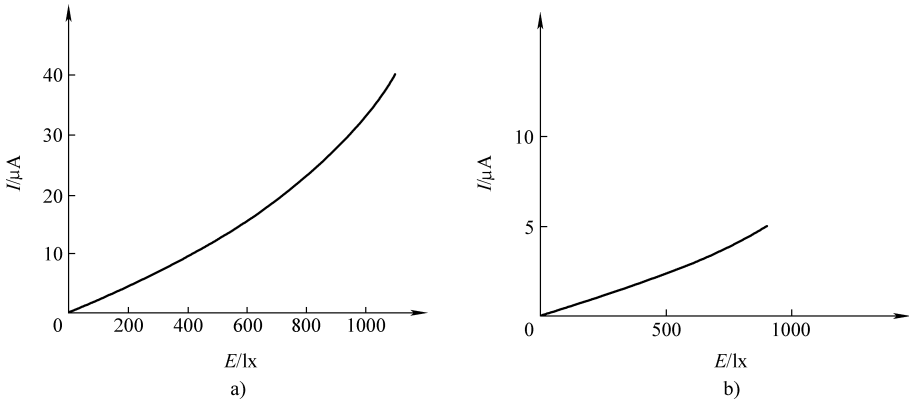


图 8-24 光电二极管和光电晶体管的光照特性
a) 光电二极管 b) 光电晶体管

(4) 频响特性 指光电流（或相对灵敏度）与光照调制频率的关系，典型曲线如图 8-25 所示。一般来说，光电晶体管的频响比光电二极管小得多。在光电晶体管中，锗管的频率响应要比硅管小一个数量级。负载电阻的大小对频响有影响，减小负载电阻可提高频响，但输出的光电压信号也减小。

(5) 光电流的温度特性 光电晶体管的亮电流对温度不很敏感，但其暗电流受温度影响严重，而且是非线性的，这是由于热源会发出红外光。光照度越强，温度影响越小。

在使用光电晶体管时，要注意光电流、极间偏压、耗散功率和环境温度不应超出最大限额值，此值在手册中均有规定。其次在使用过程中要注意保持光的入射方向不变，当光的方向改变时，光照效应改变，总传输系数也将改变。

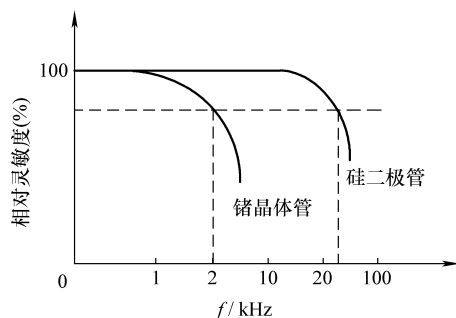


图 8-25 光电二极管和光电晶体管的频响特性

8.3 光源

要使光电式传感器能很好地工作，除了合理选用光电转换元件外，还必须配备合适的光源。从上面介绍的各种光电元件的特性来看，它们的工作状况与光源的特性有着密切的关系。光源在光电传感器中是不可缺少的组成部分，它直接影响到检测的效果和质量。正确地选择光源是成功设计光电传感器的前提和保证。选择光源时要考虑很多因素，例如波长、谱分析、相干性、发光强度、稳定性、体积、造价等。光电传感器中常用的光源主要分为热致发光光源（如白炽灯、卤钨灯等）、气体放电发光光源（如荧光灯、汞灯、钠灯、金属卤化物灯等）、固体发光光源（如 LED 和场致发光器件等）和激光器等几种类型。

8.3.1 热致发光光源

热致发光光源，它利用斯蒂芬-玻尔兹曼定律，物体温度越高，它辐射出的能量越大。这可用公式 $E = \mu \xi T^4$ 表示。式中， E 表示物体在温度 T 时单位面积和单位时间内的辐射总能量； μ 表示斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($\mu = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ K}^4)$)； ξ 表示比辐射率，即物体表面辐射本领与黑体辐射本领的比值； T 表示物体的绝对温度。

1. 白炽灯

白炽灯是根据热致发光原理制成的，钨丝密封在玻璃泡内，泡内充以惰性气体或者保持真空，依靠电能将灯丝加热至白炽而发光。一般白炽灯的辐射光谱是连续的，除可见光外同时还辐射大量的红外线和少量的紫外线。

白炽灯的灯丝多采用钨丝，钨丝具有正的电阻特性，钨丝白炽灯在工作时的灯丝电阻（热电阻）远大于冷态（20℃）时的电阻（冷电阻），通常相差 12~16 倍。因此，在灯打开瞬间有较大的电流通过。为了防止过电流损坏白炽灯，可以采用灯丝预热措施，或采用恒流源供电。白炽灯的寿命可以达到几千小时。

白炽灯发光光谱是连续的，覆盖从紫外区域到红外区域，它的峰值波长在近红外区，约

1 ~ 1.5 μm 。所以任何光敏元件都能和它配合接收到光信号。也就是说,这种光源虽然寿命不够长而且发热大、效率低、动态特性差,但对接收用的光敏元件的光谱特性要求不高,是它的可取之处。

2. 卤钨灯

卤钨灯是一种特殊的白炽灯,灯泡用石英玻璃或硬质玻璃制作,能够耐 3500K 的高温,灯泡内充以卤族元素,通常是碘,卤族元素能够与沉积在灯泡内壁上的钨丝发生化学反应,形成卤化钨,卤化钨扩散到钨丝附近,由于温度高而分散,钨原子重新沉积到钨丝上,这样弥补了灯丝的蒸发,大大延长了灯泡的寿命,同时也解决了灯泡因钨的沉积而发黑的问题,光通量在整个寿命期中始终能够保持相对稳定。

8.3.2 气体放电发光光源

电流通过置于气体中的两个电极时,两电极之间会放电发光,利用这种原理制成的光源称为气体放电光源。气体放电光源的光谱不连续,光谱与气体的种类及放电条件有关。改变气体的成分、压力、阴极材料和放电电流的大小,可以得到主要在某一光谱范围的辐射源。

低压汞灯、氢灯、钠灯、镉灯、氦灯是光谱仪器中常用的光源,统称为光谱灯。例如低压汞灯的辐射波长为 254nm,钠灯的辐射波长约为 589nm,它们经常用作光电检测仪器的单色光源。如果光谱灯涂以荧光剂,由于光线与涂层材料的作用,荧光剂可以将气体放电谱线转化为更长的波长。目前荧光剂的选择范围很广,通过对荧光剂的选择可以使气体放电灯发出某一特定波长或者某一范围的波长,照明日光灯就是一个典型的例子。

在需要线光源或面光源的情况下,在同样的光通量下,气体放电光源消耗的能量仅为白炽灯的 1/2 ~ 1/3。气体放电光源发出的热量少,对检测对象和光电探测仪器的温度影响小,对电压恒定的要求也比白炽灯低。

若利用高电压或超高压的氙气放电发光,则可制成高效率的氙灯,它的光谱与日光非常接近。目前氙灯又可以分为长弧氙灯、短弧氙灯、脉冲氙灯。短弧氙灯的电弧长几毫米,是高亮度的点光源。但氙灯的电源系统复杂,需用高电压触发放电。

8.3.3 固体发光光源

固体发光材料在电场激发下产生的发光现象称为电致发光,它是将电能直接转换成光能的过程。利用这种现象制成的光源称为固体发光光源,如发光二极管、半导体激光器和电致发光屏等。

发光二极管(LED)由半导体 PN 结构成。在半导体 PN 结中,P 区的空穴由于扩散而移动到 N 区,N 区的电子则扩散到 P 区。由于扩散作用,在 PN 结处形成势垒,从而抑制了空穴和电子的继续扩散。当 PN 结上加有正向电压时,势垒降低,电子由 N 区注入到 P 区,空穴则由 P 区注入到 N 区,称为少数载流子注入。注入到 P 区的电子和 P 区里的空穴复合,注入到 N 区的空穴与 N 区的电子复合,这种复合同时伴随着以光子形式释放出能量,因而在 PN 结有发光现象。

发光二极管的伏安特性与普通二极管相似,但因材料禁带宽度的不同,开启(点燃)电压略有差异。图 8-26 为 GaAsP 发光二极管的伏安特性曲线,红光约为 1.7V 开启,绿光约为 2.2V。注意,图中横坐标正负值刻度比例不同。一般而言,发光二极管的反向击穿电

压大于 5V，但为了安全起见，使用时反向电压应在 5V 以下。

发光二极管的光谱特性如图 8-27 所示，图中 GaAsP 的曲线有四根，这是因为其材质成分稍有差异而得到不同的峰值波长 λ_p 。峰值波长 λ_p 决定发光颜色，峰的宽度 $\Delta\lambda_p$ 决定光的色彩纯度， $\Delta\lambda$ 越小其光色越纯。

各种发光二极管都受温度影响，温度升高其发光强度减小，呈线性关系。因此使用时应注意环境对 PN 结温度的影响。

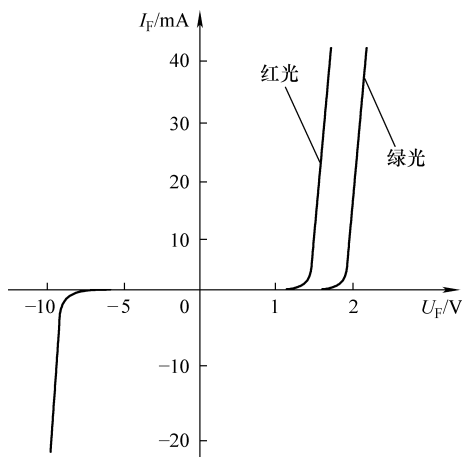


图 8-26 发光二极管 GaAsP 的伏安特性

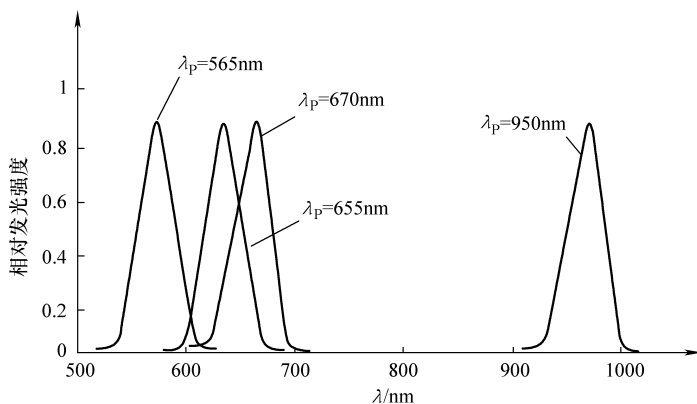


图 8-27 发光二极管 GaAsP 的光谱特性

8.3.4 激光光源

1. 激光产生的机理

在正常分布状态下，原子总是处于稳定的低能级 E_1 ，如无外界的作用，原子可长期保持这种稳定状态，但在外界光子作用下，赋予原子一定的能量 E 后，原子就从低能级 E_1 跃迁到高能级 E_2 ，这个过程称为光的受激吸收。处于高能级 E_2 的原子在外来光子的激发下，从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 而发光，这个过程称为光的受激辐射。光受激后，受激吸收或受激辐射满足下列能量关系

$$E = hf = E_2 - E_1 \quad (8-5)$$

式中 E_1 、 E_2 ——光子的能量；

h ——普朗克常数， $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ；

f ——光的频率。

由外光电效应，只有当外来光的频率等于激发态原子的某一固有频率（即红限频率）时，原子的受激辐射才能产生，因此，受激辐射发出的光子与外来光子具有完全相同的频率、传播方向和偏振方向。一个外来光子激发原子产生另一个同性质的光子，这就是说 1 个

光子放大为 N_1 个光子, N_1 个光子将诱发出 N_2 个光子 ($N_2 > N_1$) ……。在原子受激辐射过程中, 光被加强了, 这个过程称为光放大。

在外来光的激发下, 如果受激辐射大于受激吸收, 则原子在高能级的数目多于低能级的数目, 相对于原子正常分布状态来说, 称之为粒子数反转。当激光器内工作物质中的原子处于反转分布, 这时受激辐射占优势, 光在这种工作物质中传播时, 会变得越来越强。通常把这种处于粒子反转分布状态的物质称为增益介质。增益介质通过外界提供能量的激励, 使原子从低能级跃迁到高能级上, 形成粒子数反转分布, 外界能量就是激励器的激励能源。

为了使受激辐射的光强足够大, 还须设置 1 个光学谐振腔, 腔内设置 2 个面对面的反射镜: 一个为全反射镜, 另一个为半反射镜, 其间放有工作物质。当原子发出的光沿谐振腔轴线方向传播时, 遇到反射镜被反射折回, 在两反射镜间往返运行, 不断碰撞工作物质, 使其受激辐射, 产生雪崩似的放大, 从而形成强大的受激辐射光——激光, 通过半反射透镜输出。

由此可见, 激光的形成必须具备三个条件:

- 1) 具有能够提供能量的激励源。
- 2) 具有提供反复进行受激辐射场所的光学谐振腔。
- 3) 具有形成粒子数反转的增益介质。

将三者结合为一体的装置为激光器。

2. 激光的特性

与普通光相比, 激光具有如下特点:

1) 方向性强, 亮度高。激光具有高平行度, 发散角很小, 一般约为 0.18° , 比普通光和微波小 2~3 个数量级。激光光束在几千米之外的扩展只有几厘米, 因此, 立体角极小, 一般可小到 10^{-3}rad , 其能量高度集中, 亮度很高, 比普通光源高几百万倍。

2) 单色性好。光源发射光的光谱范围越窄, 光的单色性就越好。激光的频率范围很窄, 比普通光频率范围的 1/10 还小, 它是最好的单色光。

3) 相干性好。光的相干性是指两光束相遇时, 在相遇区域内发生的波相叠加, 并能形成清晰的干涉图样或能接收到稳定的拍频信号。由同一光源在相干时间 τ 内的不同时刻发出的光, 经过不同路程相遇时, 将产生干涉。这种相干性, 称为时间相干性。同一时刻, 由空间不同点发出的光的相干性, 称为空间相干性。激光是受激辐射形成的, 对于各个发光中心发出的光波, 其传播方向、振动方向、频率和相位均完全一致, 因此激光具有良好的时间和空间相干性。

3. 常用激光器及其特点

按增益介质分类, 常用激光器有如下几种:

1) 固体激光器。固体激光器的增益介质为固体, 其特点是体积小而坚固, 功率大, 可达几十兆瓦 (MW)。常用的固体激光器有红宝石激光器、掺钕的钇铝石榴石激光器 (YAG 激光器) 和钕玻璃激光器等。

2) 液体激光器。液体激光器的增益介质是液体, 其最大的特点是所发出的激光波长可在一定范围内连续可调, 连续工作而不影响效率。其中较重要的是有机液体染料激光器, 还有无机液体激光器等。

3) 气体激光器。气体激光器的增益介质是气体, 其特点是小巧, 能连续工作, 单色性

好,但输出功率不如固体激光器。目前已开发的有各种气体原子、离子、金属蒸汽、气体分子激光器。常用的有 CO_2 激光器、氦-氖激光器和 CO 激光器等。

4) 半导体激光器。半导体激光器是继固体和气体激光器之后发展起来的一种效率高、体积小、重量轻、结构简单但输出功率小的激光器。其中有代表性的是砷化镓激光器。

8.4 光电式传感器的应用

光电式传感器基本上可分为模拟式传感器和脉冲式传感器两类。

模拟式光电传感器的工作原理是基于光电器件的光电流随光通量而发生变化。对于光通量的任意一个选定值,对应的光电流就有一个确定的值,而光通量又随被测非电量的变化而变化,这样光电流就成为被测非电量的函数,这类传感器大都用于测量位移、表面粗糙度、振动等参数。

脉冲式光电传感器的工作原理是光电器件的输出仅有两个稳定状态,即“通”与“断”的开关状态。当光电器件受光照时,有电信号输出,当光电器件不受光照时,无电信号输出。这类传感器大都用于测量线位移、线速度、角位移、角速度(转速)等参数。

8.4.1 模拟式光电传感器的应用

1. 光电式带材跑偏仪

光电式带材跑偏仪由光电式传感器和晶体管放大器两部分组成,属于模拟式光电传感器。

光电式边缘位置传感器由白炽灯光源,光学系统和光电器件(硅光敏晶体管)组成,其结构原理如图 8-28 所示。白炽灯 1 发出的光线经过双凸透镜 2 会聚,再由半透反射镜 3 反射,使光路折转 90° ,经平凸透镜 4 会聚后成平行光束。这束光由带材遮挡一部分,另一部分射到角矩阵反射镜 6 后被反射又经透镜 4、半透反射镜 3 和双凸透镜 7 会聚于光敏晶体管 8 上。

光敏晶体管接在输入桥路的一臂上,电桥的参数如图 8-29 所示。图中 $10\text{k}\Omega$ 电位器为放大倍数调整电位器, $2.2\text{k}\Omega$ 和 220Ω 电位器分别为零点平衡位置粗调和细调电位器。

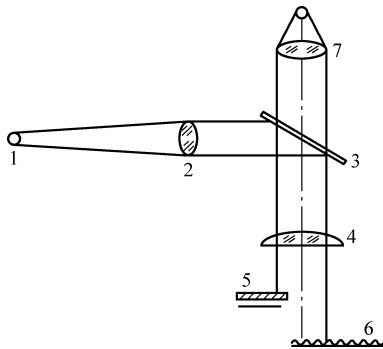


图 8-28 光电式边缘位置传感器原理图

1—白炽灯 2、7—双凸透镜 3—半透反射镜

4—平凸透镜 5—带环 6—角矩阵反射镜 8—光敏晶体管

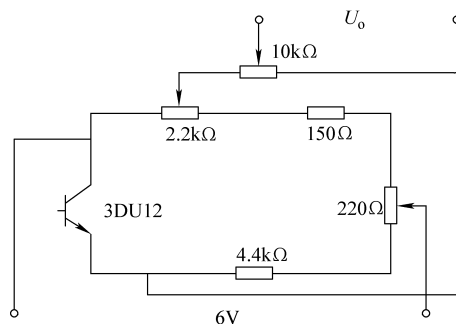


图 8-29 测量电桥

当带材处于平行光束的中间位置时，电桥处于平衡状态，输出信号为“0”，如图 8-30 所示，当带材向左偏移时遮光面积减少，角矩阵反射回去的光通量增加，输出电流信号为 $+\Delta I$ ，当带材向右偏移时，光通量减少，输出信号电流为 $-\Delta I$ ，这个电流变化信号由放大器放大后，作为控制电流信号，通过执行机构纠正带材的偏移。

角矩阵反射镜是利用直角棱镜的全反射原理，将许多个小的直角棱镜拼成矩阵。它能在安装精度不太高，使用环境有振动的场合应用，如图 8-31 所示。

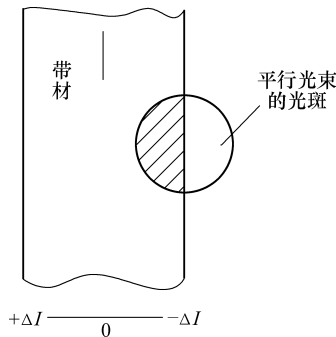


图 8-30 带材跑偏引起光通量的变化

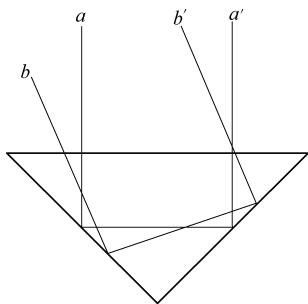


图 8-31 角矩阵反射器原理

以单个直角棱镜加以说明，光线 a 是与直角棱镜的平面垂直入射的，反射光线 a' 仍然与 a 平行；光线 b 与其平面不成垂直入射，反射光线 b' 仍然与 b 平行，这样对一束平行投射光束来说，在其投射的原位置，仍然可以接收到反射光。所以即使安装有一定的倾角，还是能接收到反射光线。而采用平面反射镜，就要有很高的安装精度，调试比较困难。

在光电式传感器后面往往配接差动放大器，因为光电器件容易受到温度的影响，采取温度补偿之后（见图 8-32），要求配接差动放大器。采用这种差接方法可以消除由于温度和其他因素引起的暗电流的影响，提高了转换与测量精度。

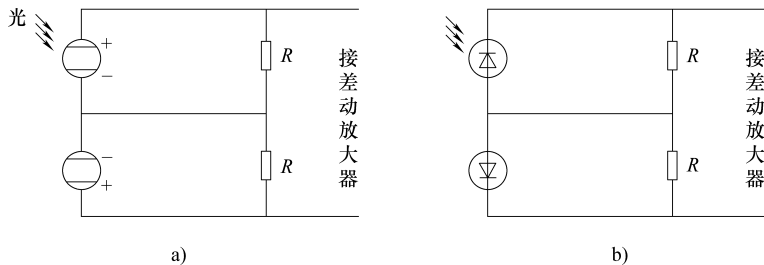


图 8-32 光电器件温度补偿线路

a) 光电电池的温度补偿 b) 光敏二极管的光电补偿

2. 光电比色高温计

光电比色高温计是根据普朗克定律通过测量在两个波长下的辐射强度之比而确定物体温度的，其测量范围为 $600 \sim 2000^{\circ}\text{C}$ ，最高可达 3000°C ，测量误差为测量上限的 $\pm(1 \sim 2)\%$ 。

光电比色高温计的原理图如图 8-33 所示，它由感温器和测量显示电路两部分组成。在感温器的光学系统中，被测物体的一束辐射线通过物镜 1 聚焦后，经平行平面玻璃 2，成像于光阑 3，再经过导光棒 4 混合均匀后，投射到分光镜 5 上。辐射能在分光镜上被分为红外光和可见光两部分，红外光可透过分光镜，而可见光被反射。红外光经滤光片 8 后，所透过

的某一波长 (λ_1) 的辐射光照射到硅光电池 9 的受光面上; 可见光经滤光片 6 后, 所透过的某一波长 (λ_2) 的辐射光照射到硅光电池 7 上。7、9 两个光电池上的电流在负载 R_{14} 和 R_{15} 上转变为电位差, 由测量显示电路根据两个电位差的比值得到被测物体的温度。

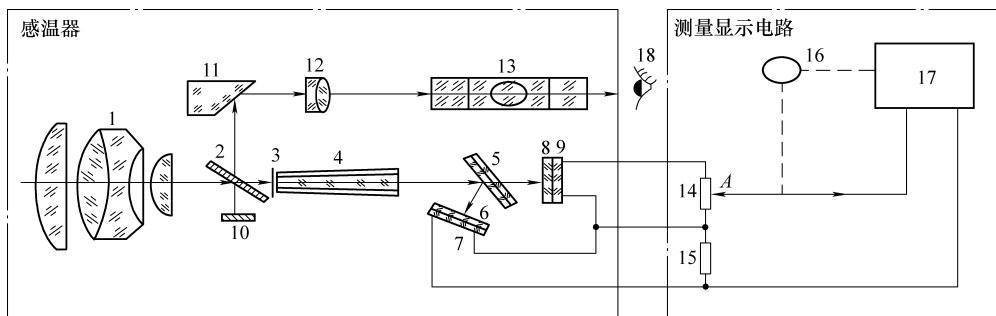


图 8-33 光电比色高温计的原理图

- 1—物镜 2—平面玻璃 3—光阑 4—导光棒 5—分光镜 6—滤光片 7、9—硅光电池
8—滤光片 10—瞄准反射镜 11—圆柱反射镜 12—目镜 13—多夫棱镜
14、15—负载电阻 16—可逆电动机 17—放大电路

为了能观测被测物体的辐射能是否正确地进入高温计的光学系统, 专门设置了瞄准系统。利用平面玻璃片 2 的反射作用, 把辐射线反射到瞄准反射镜 10, 经圆柱反射镜 11、目镜 12、多夫棱镜 13 进入观察者的眼睛 18。

8.4.2 脉冲式光电传感器的应用

1. 光电式数字转速表

光电式数字转速表属于脉冲式光电传感器, 图 8-34 给出它的工作原理图。在被测转速的电动机上固定一个调制盘, 将光源发出的恒定光调制成随时间变化的调制光。光线每照射到光电器件上一次, 光电器件就产生一个电信号脉冲, 经放大整形后记录输出。

如果调制盘上开 Z 个缺口, 测量电路计数时间为 $T(\text{s})$, 被测转速为 $N(\text{r/min})$, 则此时得到的计数值 C 为

$$C = \frac{ZTN}{60} \quad (8-6)$$

为了使计数值 C 能直接读取转速 N 值, 一般取 $ZT = 60 \times 10^n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)。

2. 条形码扫描笔

条形码由多个黑和白两色条纹按照一定的编码规则组成, 可以表示物品的产地、商品名称、生产厂家、生产日期等信息, 对条形码信息的检测是通过光电扫描笔实现的。扫描笔的前端为光电读入头, 它由一个发光二极管和一个光敏晶体管组成, 如图 8-35 所示。当扫描笔头部在条形码上移动时, 如果遇到黑条纹, 发光二极管发出的光线被黑条纹吸收, 光敏晶体管接收不到反射光, 呈现高阻抗, 处于截止状态。当遇到白色条纹时, 发光二极管发出的光线, 被反射到光敏晶体管的基极, 光敏晶体管产生光电流而导通。

整个条形码被扫描笔扫过之后, 光敏晶体管将条形码变成了一个个电脉冲信号, 该信号经放大、整形后便形成了脉冲序列。脉冲序列的宽窄与条形码黑白条纹的宽窄成对应关系, 再经计算机处理后, 实现对条形码信息的识别。

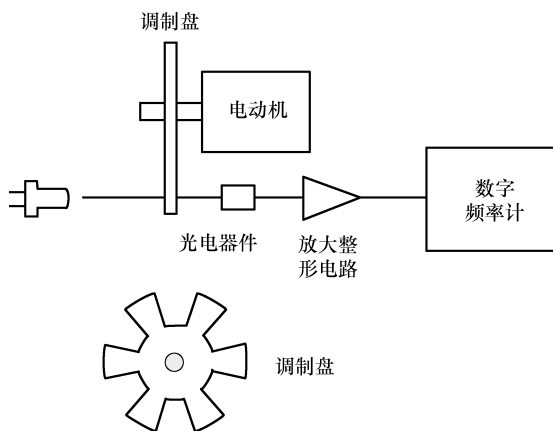


图 8-34 光电式数字转速表原理图

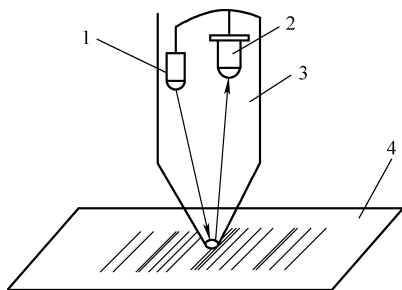


图 8-35 条形码扫描笔笔头结构示意图

1—发光二极管 2—光敏晶体管 3—扫描笔 4—条形码

8.5 色敏光电传感器

色敏光电传感器是半导体光敏传感器中的一种，它是基于内光电效应将光信号转换为电信号的光辐射探测器件。但不管是光电导器件还是光生伏特效应器件，它们检测的都是在一定波长范围内光的强度，或者说是光子的数目。而半导体色敏器件则可用来直接测量从可见光到近红外波段内单色辐射的波长。

8.5.1 色敏传感器的工作原理

色敏光电传感器相当于两只结构不同的光电二极管的组合，故又称为双结光电二极管。其结构原理及等效电路如图 8-36 所示。 P^+NP 不是晶体管，而是结深不同的两个 PN 结二极管，浅结的二极管是 P^+N 结；深结的二极管是 PN 结。当有入射光照射时， P^+ 、 N 、 P 三个区域及其间的势垒区中都有光子吸收，但是效果不同。其中，紫外光部分吸收系数大，经过很短距离已基本吸收完毕。因此，浅结光电二极管对紫外光灵敏度高，而红外部分吸收系数较小，此波长的光子则主要在深结区被吸收，因此，深结光电二极管对红外光的灵敏度较高。所以，利用半导体中不同的区域对不同的波长灵敏度差异这一特性制备的半导体器件，就构成了可以测定波长的半导体色敏传感器。应用时，可对该色敏器件进行标定，即实测出某一单色光照射时，器件中两只光敏二极管的短路电流比值 I_{PD2}/I_{PD1} 。 I_{PD1} 是浅结二极管的短路电流，它在短波区较大。 I_{PD2} 是深结二极管的短路电流，它在长波区较大。因而两者的比值与入射单色光波长的关系就可以确定。图 8-37 所示为不同结深二极管的光谱响应曲线，图中 PD_1 代表浅结二极管， PD_2 代表深结二极管。

8.5.2 色敏光电传感器的基本特性

半导体色敏器件是利用半导体特有的光吸收特性与厚度有关的原理，将两个光电二极管深浅不一地集成在同一硅基片上，构成色敏元件。色敏光电传感器的基本特性主要包括光谱特性，短路电流比 - 波长特性和温度特性。

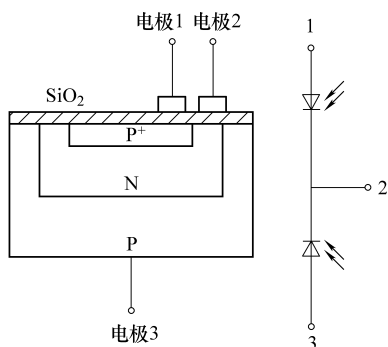
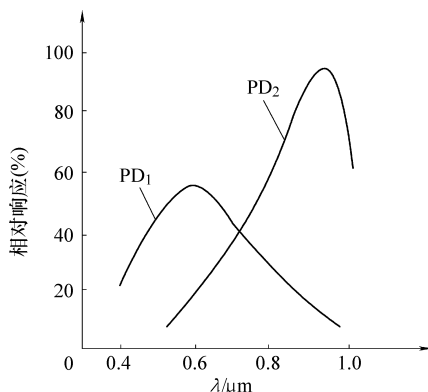


图 8-36 色敏光电传感器结构和等效电路图

图 8-37 硅色敏管中 PD₁ 和 PD₂ 的光谱响应曲线

1. 光谱特性

色敏光电器件的光谱特性是表示它能检测的波长范围，不同型号之间略有差别。图 8-38a 给出国产 CS-1 型色敏光电器件的光谱特性，其波长范围是 400 ~ 1000nm，其中 PD₁ 代表浅结二极管，PD₂ 代表深结二极管。

2. 短路电流比 - 波长特性

短路电流比 - 波长特性是表征半导体色敏器件对波长的识别能力，是赖以确定被测波长的基本特性，图 8-38b 表示上述 CS-1 型色敏光器件的短路电流比 - 波长特性曲线。

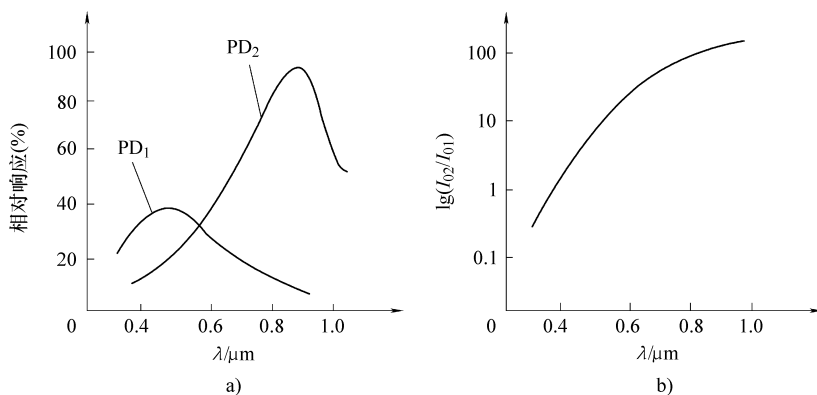


图 8-38 半导体色敏器件的光谱特性

a) 光谱特性 b) 短路电流比 - 波长特性

3. 温度特性

由于色敏光电器件测定的是两只光电二极管短路电流之比，而这两只光电二极管是做在同一块材料上的，具有相同的温度系数。这种内部补偿作用使色敏光电器件的短路电流比对温度不十分敏感，所以通常可不考虑温度的影响。

8.5.3 色敏传感器的应用

图 8-39 为检测光波长（即信号颜色）的处理电路。它由色敏光电传感器、两路对数电路及运算放大器 OP3 构成。

识别色彩，必须获得两个光电二极管的短路电流比。故采用对数放大器电路，在电流比

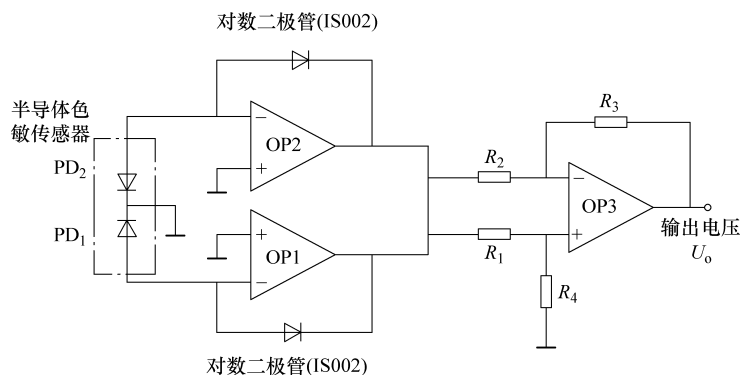


图 8-39 色彩信号处理电路

较小的时候，二极管两端加上的电压和流过电流之间存在近似对数关系，即 OP1、OP2 输出分别跟 $\ln I_{PD1}$ 、 $\ln I_{PD2}$ 成比例，OP3 取它们的差，即输出为

$$U_o = C(\ln I_{PD2} - \ln I_{PD1}) = C \ln \frac{I_{PD2}}{I_{PD1}} \quad (8-7)$$

输出 U_o 正比于短路电流比 I_{PD2}/I_{PD1} 的对数。其中 C 为比例常数。将电路输出电压经过 A/D 变换处理后即可判断出与电平对应的波长（即颜色）。

8.6 CCD 传感器

8.6.1 电荷耦合器件

CCD (charge coupled devices) 图像传感器是一种大规模集成电路光电器件，又称为电荷耦合器件，简称 CCD 器件，其基本组成部分是 MOS 光敏元阵列和读出移位寄存器。

1. MOS 光敏元

图 8-40 所示为 MOS (metal oxide semiconductor) 光敏元的结构。它是在半导体 (P 型硅) 基片上形成一种氧化物 (如二氧化硅)，在氧化物上再沉积一层金属电极，以此形成一个金属 - 氧化物 - 半导体结构元。

由半导体的工作原理可知，当在金属电极上施加一个正电压 U_g 时，在电场的作用下，电极下面的 P 型硅区域里的空穴将被赶尽，从而形成耗尽区。也就是说对带负电的电子而言，这个耗尽区是一个势能很低的区域，称为“势阱”，如图 8-40b 所示。如果此时有光线入射到半导体硅片上，则在光子的作用下，半导体硅片上就形成电子和空穴，由此产生的光生电子被附近的势阱所吸收（或称俘获），而同时产生的空穴则被电场排斥出耗尽区。此时势阱内所吸收的光生电子数量与入射到势阱附近的光强成正比。人们称这样一个 MOS 结构元为 MOS 光敏元，或称为一个像素；把一个势阱所收集的若干个光生电荷称为一个电荷包。

通常在半导体硅片上制有几百个或几千个相互独立的 MOS 元，它们按线阵或面阵规则地排列。如果在金属电极上施加一正电压，则在这半导体硅片上就形成几百个或几千个相互独立的势阱；如果照射在这些光敏元上的是一幅明暗起伏的图像，则在这些光敏元上就会感生出一幅与光照强度相对应的光生电荷图像，这就是电荷耦合器件光电效应的基本原理。

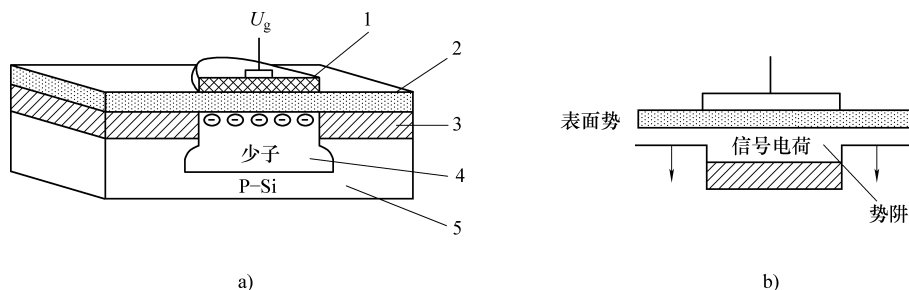


图 8-40 MOS 光敏元的结构

a) MOS 电容截面 b) 势阱图

1—金属 2—SiO₂ 绝缘层 3—沟道 4—耗尽区 (势阱) 5—衬底

2. 读出移位寄存器

读出移位寄存器的结构如图 8-41 所示。读出移位过程实质上是 CCD 电荷转移过程。在半导体的底部上覆盖一层遮光层，以防止外来光干扰。由 3 个邻近的电极组成 1 个耦合单元 (即传输单元)，在这 3 个电极上分别施加了脉冲波 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 。

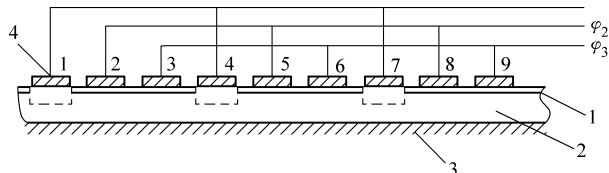


图 8-41 读出移位寄存器的结构

1—二氧化硅 2—P 型硅 3—遮光层 4—金属电极

电荷传输过程如图 8-42 所示。

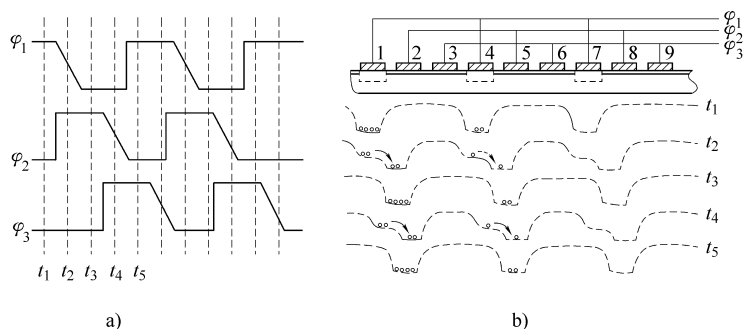


图 8-42 电荷传输过程

a) 转移电压 b) 转移过程

当 $t=t_1$ 时, $\varphi_1 = "1"$, $\varphi_2 = "0"$, $\varphi_3 = "0"$, 此时半导体硅片上的势阱分布形状如图 8-42b 所示, 即只有 φ_1 电极下形成势阱。当 $t=t_2$ 时, $\varphi_1 = "1"$, $\varphi_2 = "1"$, $\varphi_3 = "0"$, φ_1 电极下的势阱变浅, φ_2 电极下的势阱变得最深, φ_3 电极下没有势阱。根据势能原理, 原先在 φ_1 电极下的电荷就逐渐向 φ_2 电极下转移。当 $t=t_3$ 时, φ_1 电极下的电荷向 φ_2 电极下转移完毕。当 $t=t_4$ 时, φ_2 电极下的电荷向 φ_3 电极下转移。当 $t=t_5$ 时, φ_2 电极下的电荷已经全部转移到 φ_3 电极下。以此类推, 一直可以向后进行电荷转移。

从图中可以看出，当 $t=t_2$ 时，由于 φ_3 电极的存在， φ_1 电极下的电荷只能朝一个方向移动。因此，三个这样结构的电极在三相交变脉冲的作用下，就能将电荷包沿着二氧化硅界面的一个方向移动，在它的末端，就能依次接收到原先存储在各个 φ_1 电极下的光生电荷。

上述传输过程，实际上是一个电荷耦合的过程，因此把这类器件称为“电荷耦合器件”。在电荷耦合器件中担任电荷耦合传输的单元，称为“读出移位寄存器”。

8.6.2 线阵 CCD

电荷耦合器件（CCD）根据光敏元件排列形式的不同，分为线阵器件和面阵器件两种。

线阵 CCD 是由一系列 MOS 光敏单元和一系列 CCD 移位寄存器构成，光敏单元与移位寄存器之间有一个转移控制栅，转移控制栅控制光电荷向移位寄存器转移，一般的信号转移时间远小于光积分时间。在光积分周期里，各个光敏元中所积累的光电荷与该光敏元上所接收的光照强度和光积分时间成正比，光电荷存储于光敏元的势阱中。当转移控制栅开启时，各光敏元收集的信号电荷并行的转移到 CCD 移位寄存器的相应单元。当转移控制栅关闭时，MOS 光敏元阵列又开始下一行的光电荷积累。同时，在移位寄存器上施加时钟脉冲，将已转移到 CCD 移位寄存器内的上一行的信号电荷由移位寄存器串行输出，如此重复上述过程。

图 8-43 分别给出 CCD 单行和双行结构，其中在图 8-43b 中光敏元的信号电荷分别转移到上下方的移位寄存器中，然后在时钟脉冲的作用下向终端移动，在输出端交替合并输出。这种结构与长度相同的单行结构（见图 8-43a）相比较，可以获得高出两倍的分辨率，同时由于转移次数减少一半，使 CCD 电荷转移损失大为减少，双行结构已发展成为线性 CCD 图像传感器的主要结构形式。

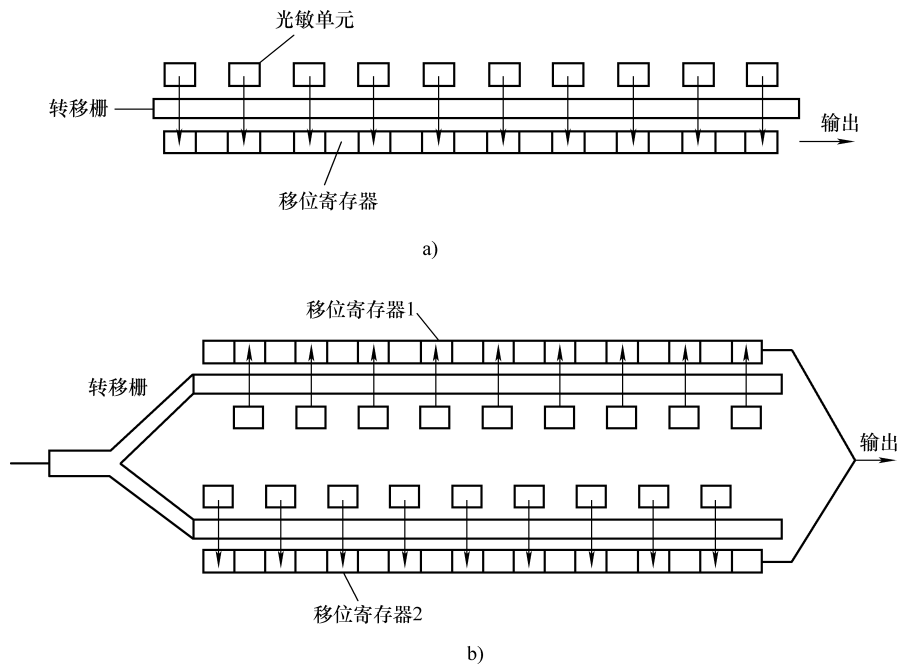


图 8-43 线性 CCD 传感器
a) 单行结构 b) 双行结构

线阵 CCD 可以直接接收一维光信息，不能直接将二维图像转为视频信号输出，为了得到整个二维图像视频信号，必须采用扫描的方法。所有线性 CCD 图像传感器主要用于测试、传真和光学文字识别技术等方面。

8.6.3 面阵 CCD

按一定的方式将一维线性光敏单元及移位寄存器排列成二维阵列，即可以构成面型 CCD 图像传感器，主要用于摄像机及测试技术。根据传输方式不同，面阵 CCD 图像传感器可分为线转移型、帧转移型和隔离转移型三种类型，如图 8-44 所示。

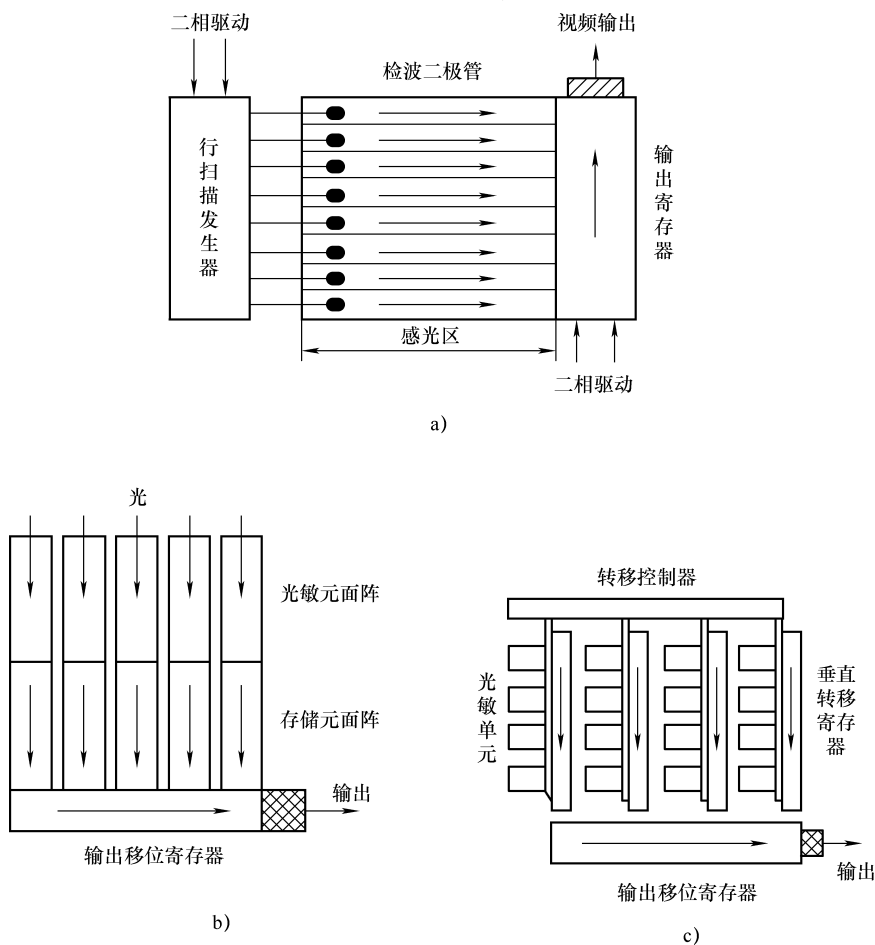


图 8-44 面型 CCD 图像传感器结构

a) 线转移型 b) 帧转移型 c) 隔离转移型

图 8-44a 为线转移型 CCD 的结构图，它由行扫描发生器、感光区和输出寄存器等组成。行扫描发生器将光敏元件内的信息转移到水平（行）方向上，驱动脉冲将信号电荷一位位的按箭头方向转移，并移入输出寄存器，输出寄存器亦在驱动脉冲的作用下使信号电荷经输出端输出。这种转移方式具有有效面积大、转移速度快、转移效率高等特点，但电路比较复杂，引起图像模糊。

图 8-44b 为帧转移型 CCD 的结构图，它由光敏元面阵（感光区）、存储器面阵和输出移

位寄存器三部分构成。图像成像到光敏元面阵，当光敏元的某一相电极加有适当的偏压时，光生电荷将收集到这些光敏元的势阱里，光学图像变成电荷包图像。当光积分周期结束时，信号电荷迅速转移到存储器面阵，经输出端输出一帧信息。当整帧视频信号自存储器面阵移出后，就开始下一帧信号的形成，这种类型 CCD 的特点结构简单，光敏单元密度高，但增加了存储区。

图 8-44c 为隔离转移型 CCD 的结构，也是应用最多的一种结构形式。它将光敏单元与垂直转移寄存器交替排列。在光积分期间，光生电荷存储在感光区光敏单元的势阱里；当光积分时间结束，转移栅的电位由低变高，信号电荷进入垂直转移寄存器中。随后，一次一行地转移到输出移位寄存器中，然后移位到输出器件，在输出端得到与光学图像对应的一行行视频信号。这种结构的感光单元面积小，图像清晰，但单元设计复杂。

8.6.4 CCD 传感器的应用

1. 线阵 CCD 工件尺寸检测

用线阵 CCD 传感器测量工件尺寸的基本原理如图 8-45 所示。测量系统由光学系统、图像传感器和微处理器等组成。光源通过透镜照射到工件上，当所用光源含红外光时，可在透镜与传感器之间加红外滤光片，若所用光源过强时，可再加一滤光片。成像透镜将工件成像在 CCD 传感器上，视频处理器对输出的视频信号进行存储和数据处理。

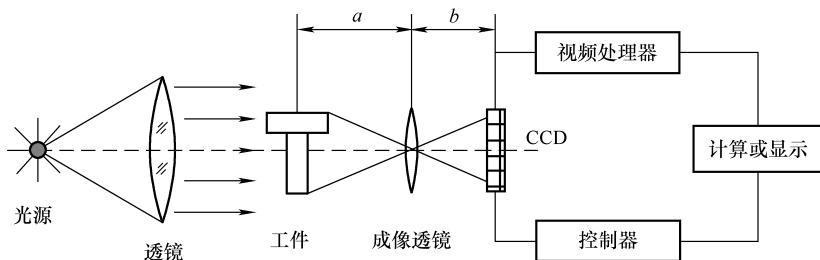


图 8-45 线阵 CCD 传感器测量工件尺寸示意图

在光学系统放大率为 $1:M$ 的装置中，有

$$L = (Nd \pm 2d)M \quad (8-8)$$

式中 L ——工件尺寸；

N ——覆盖的光敏单元数；

d ——相邻光敏元中心距离。

式中 $\pm 2d$ 为图像末端两个光敏单元之间可能的最大误差。由于被测工件往往是不平的，故必须自动调焦，这由计算机来控制。另外，在测量系统中，要求有恒定的照明亮度。

2. CCD 汽车前照灯配光检测

整个系统由工业用 CCD 摄像机、图像处理卡、监视器及计算机等构成。其结构框图如图 8-46 所示。CCD 摄像机接收汽车前照灯在幕布上的图像，该图像经 A/D 转换成数字图像信号，并由计算机进行图像处理，得到汽车前照灯配光信息，包括发光强度和光轴偏移量。

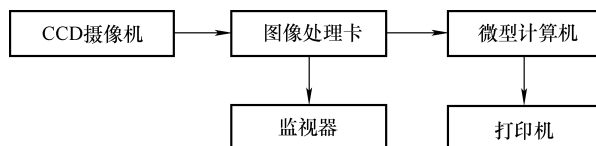


图 8-46 CCD 汽车前照灯配光测试系统结构框图

8.7 光栅传感器

光栅传感器是根据莫尔条纹原理制成的一种计量光栅，多用于位移和角度测量，或与位移、角度相关的物理量如速度、加速度、振动等方面的测量。按其形状可以分为长光栅和圆光栅两类，其中长光栅用于长度测量，又称为直线光栅，圆光栅用于角度测量；按光线的走向可以分为透射光栅和反射光栅。

8.7.1 光栅的结构

光栅主要由标尺光栅和光栅读数头两部分组成。通常，标尺光栅固定在活动部件上，如机床的工作台或丝杠上。光栅读数头则安装在固定部件上，如机床的底座上。当活动部件移动时，读数头和标尺光栅也就随之做相对移动。

1. 光栅尺

标尺光栅和光栅读数头中的指示光栅构成光栅尺，其中长的一块为标尺光栅，短的一块为指示光栅。两光栅上均匀地刻有许多相互平行的线纹，形成透明和不透明相间的条纹，这些线纹与两光栅相对运动的方向垂直。如图 8-47a 所示，光栅尺上 a 为刻线宽度（透光的明线）， b 为刻线间的缝隙宽度（不透光的暗线）， $W = a + b$ 称为栅距。通常情况下， $a = b = W/2$ 。常见长光栅的线纹宽度为 25 线/mm、50 线/mm、100 线/mm、125 线/mm、250 线/mm。

2. 光栅读数头

光栅读数头由光源、透镜、指示光栅、光敏元件和驱动电路组成，如图 8-47b 所示。光栅读数头的光源一般采用白炽灯。白炽灯发出的光线经过透镜后变成平行光束，照射在光栅尺上。当标尺光栅相对于指示光栅移动时，形成的莫尔条纹产生明暗交替变化的光信号，利用光敏元件将光信号转换成电脉冲信号。由于光敏元件输出的电压信号比较微弱，因此必须首先将该电压信号进行放大，以避免在传输过程中被多种干扰信号所淹没、覆盖而造成失真。驱动电路的功能就是实现对光敏元件输出信号进行功率放大和电压放大。

8.7.2 光栅的工作原理

1. 莫尔条纹

莫尔条纹是指两块光栅叠合时，出现光的明暗相间的条纹。如图 8-48 所示，当两块栅距叠合在一起，中间留有很小的间隙，栅线透光部分与透光部分叠加，形成亮带；栅线不透光部分与不透光部分叠加，互相遮挡，形成暗带，这种由光栅相互重叠形成的光学图案称为莫尔条纹。莫尔条纹是基于光的干涉效应产生的。

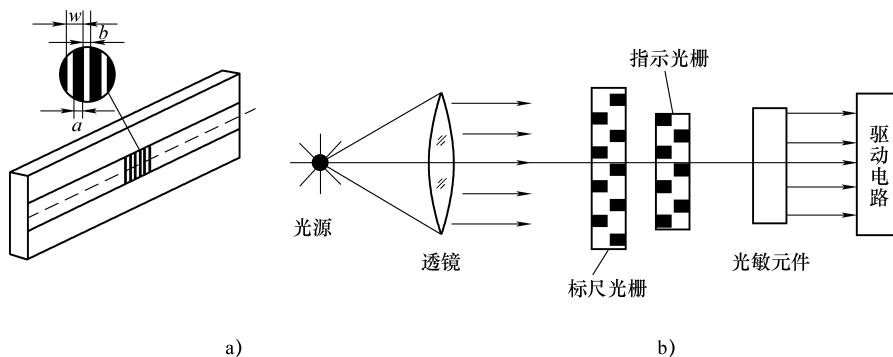


图 8-47 光栅尺和读数头

a) 光栅尺 b) 光栅读数头

如果两块光栅栅距 W 相等, 且两光栅之间的夹角 θ 很小时, 可以近似认为莫尔条纹与纵轴垂直, 莫尔条纹的间隔 B 可以定义为相邻条纹的垂直距离或相邻条纹在 y 轴的距离, 因此, 莫尔条纹的宽度 B 近似为

$$B = \frac{W}{\sin\theta} \approx \frac{W}{\theta} \quad (8-9)$$

2. 莫尔条纹特性

(1) 莫尔条纹的运动对应特性 莫尔条纹随光栅尺的移动而移动, 它们之间

有严格的对应关系。当两光栅沿刻线的垂直方向相对运动时, 莫尔条纹沿夹角 θ 平分线方向移动, 其移动方向随两光栅相对位移方向的改变而改变。光栅每移动一个栅距 W , 莫尔条纹相应地移动一个间距 B , 因此可以通过测量莫尔条纹的运动来判断光栅的运动。

(2) 莫尔条纹的位移放大特性 由式 (8-9) 可知, 莫尔条纹间距是放大的光栅栅距 W , 它随着光栅刻线夹角 θ 而改变。 θ 越小, 则 B 越大, 相当于把微小的栅距扩大了 $1/\theta$ 倍。

(3) 莫尔条纹的误差平均效应特性 莫尔条纹是由光栅的大量栅线共同形成的, 对光栅的刻线误差有平均作用, 在很大程度上消除了栅线的局部缺陷和短周期误差的影响。

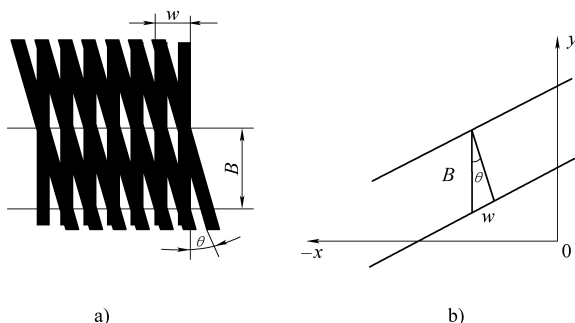


图 8-48 莫尔条纹的形成

a) 莫尔条纹 b) 横向莫尔条纹的距离

8.7.3 光栅信号的辨向与细分

1. 辨向原理

根据莫尔条纹的性质, 主光栅移动一个栅距 W , 输出信号 u 变化一个周期 2π , 输出信号经整形变为脉冲, 光栅移动距离与脉冲数、条纹数是一一对应的, 因此位移量为 $x = NW$, 其中 N 为条纹数, W 是栅距, 这就是光栅的测量位移原理。

由于在实际应用中, 大部分被测物体的移动往往不是单向的, 既有正向运动, 又有反向运动。因此, 用一个光敏元件在固定点测莫尔条纹, 得到的是正弦信号, 这个正弦信号只能判断位移大小, 不能判断位移方向。为了解决辨向问题, 实际应用中常采用两个光电接收元件同时接收莫尔条纹, 二者之间相差为 $B/4$ 距离, 这样得到两个光电元件接收到的正弦信

号相位相差 90° ，根据两个信号超前、落后情况即可判断出位移方向。

2. 细分技术

由光栅的位移原理可知光栅移动一个栅距，产生一个输出脉冲，这样光栅传感器的精度只是一个栅距。这样的精度往往达不到要求，为了提高精度测量，就引入了细分技术。所谓细分，就是在光栅移动一个栅距，莫尔条纹变化一个周期时输出多个脉冲，减小脉冲当量来提高分辨率。常用的细分方法有直接细分法和电位桥细分法。

(1) 直接细分 直接细分常用的细分数为 4，就是一个莫尔条纹宽度内，放置 4 个依次相距 $B/4$ 的光电元件，这样可以获得依次相差 90° 相角的四个正弦交流信号。用鉴零器分别鉴取每个正弦信号的零值，在信号从负到正过零点时发出一个计数脉冲。这样，莫尔条纹在一个周期内产生四个脉冲信号，实现了 4 细分。

由于两个相距 $B/2$ 的光电元件产生的两个正弦信号相位相差 180° ，实际上是互为相反信号，这样用一个光电元件再加上一个反相器电路就可以产生上述的两个信号，所以用两个相距 $B/4$ 的光电元件也可以实现直接 4 细分。

直接细分的优点是线路简单，对信号无严格要求，又可实现可逆计数和动静态测量，其分辨率也可满足一般数控机床的要求，因而使用广泛。

(2) 电位器桥细分 为了得到更高的细分分数，将直接细分产生的四个相位差为 90° 的交流信号 $U_m \sin\theta$ 、 $U_m \cos\theta$ 、 $-U_m \sin\theta$ 和 $-U_m \cos\theta$ 输入到电位器，如图 8-49 所示。为了在 $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$ 之间细分成 n 等分（这里 n 为 4 的整数倍），在电桥中通过电阻移相的方法，得到一个周期内相位依次相差 $2\pi/n$ 的一

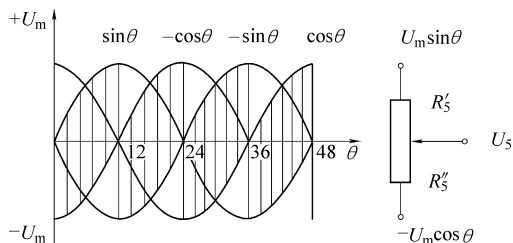


图 8-49 电位器桥细分原理

系列正弦信号，从而得到 n 个计数脉冲，实现细分。采用这种方法可以实现 12~60 细分。

8.7.4 光栅传感器的应用

由于光栅传感器测量准确度高，动态测量范围广，可进行非接触测量，易实现系统的自动化和数字化，因而在机械工业中得到了广泛的应用。光栅传感器通常作为测量元件应用于机床定位、长度和角度的计量仪器中，并用于测量速度、加速度和振动等。

图 8-50 所示为新天精密光学仪器公司生产的光栅式万能测长仪的工作原理图。

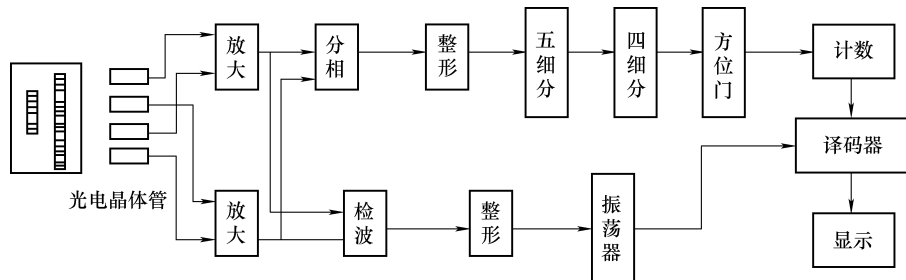


图 8-50 光栅式万能测长仪的工作原理图

主光栅采用透射式光栅，光栅栅距 $W = 0.01\text{mm}$ ，指示光栅采用四裂相（光栅尺移动一个栅距将输出 4 个 cp 脉冲，系统测量的最小分辨力提高至 1/4 栅距，通常称为四裂相或四倍频）光栅，照明光源采用红外发光二极管 TIL-23，其发光光谱为 $930 \sim 1000\text{nm}$ ，接收用 LS600 光电晶体管，两光栅之间的间隙为 $0.02 \sim 0.035\text{mm}$ ，由于主光栅和指示光栅之间的透光和遮光效应，形成莫尔条纹，当两块光栅相对移动时，便可接收到周期性变化的光通量。利用四裂相指示光栅依次获得 $\sin\theta$ 、 $\cos\theta$ 、 $-\sin\theta$ 和 $-\cos\theta$ 四路原始信号，以满足辨向和消除共模电压的需要。

光栅传感器获得的 4 路原始信号，经差分放大器放大、移项电路分项、整形电路整形、倍频电路细分、辨向电路辨向进入可逆计数器计数，由显示器显示输出。

8.8 光纤传感器

8.8.1 光纤及传光原理

1. 光纤的结构及特点

光纤是光学纤维的简称，是用石英、玻璃、塑料等光透射率高的电介质材料制成的，每根光纤由一个圆柱形的内芯和包层组成，如图 8-51 所示。纤芯的折射率为 n_1 ，包层的折射率为 n_2 ，且 $n_1 > n_2$ 。在近红外线至可见光的波长范围内传输损耗非常小，是一种极为理想的光传输线路，它具有较小的体积和重量、不带电、防爆、自身具有电离辐射免疫力、抗无线电干扰、容易安装、可靠性好、数据传输保密安全等特点。

2. 光纤的传输原理

入射光以入射角 θ_0 由折射率为 n_0 的外部介质从光纤的一端进入纤芯，在端面处发生折射，其折射角为 θ_1 ，然后光线以角 φ 入射至纤芯与包层界面，在界面处发生反射，如图 8-52 所示。

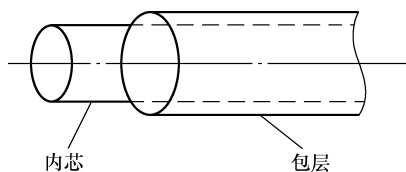


图 8-51 光纤的基本结构

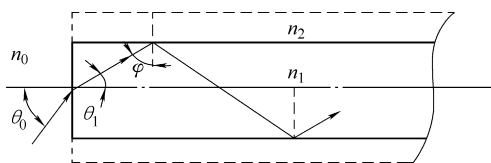


图 8-52 光线在平面端面光纤中传播

如果入射角 φ 大于或等于纤芯与包层的临界角 φ_c ，即

$$\varphi \geq \varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (8-10)$$

则光线在光纤的界面发生全反射，并在光纤内部以同样的角度反复逐次反射，直至传播到光纤的另一端面。

根据斯涅尔折射定律（Snell's Law）有

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \cos \varphi = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} \quad (8-11)$$

设当 φ 达到临界角 φ_c 时的入射角为临界入射角 θ_c ，由上面分析可知，只有当 φ 大于临界角 φ_c ，即入射角 θ_0 小于临界入射角 θ_c 时，光线在光纤内部才能发生全反射，从而传播到光纤的另一端。由式 (8-10) 和 (8-11) 可得

$$n_0 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8-12)$$

式中， $n_0 \sin \theta_c$ 定义为光纤的数值孔径，用 NA 表示。

由式 (8-12) 可知，光纤的数值孔径 NA 仅取决于光纤的折射率，而与光纤的几何尺寸无关。

数值孔径 NA 是光纤的一个重要参数，NA 值越大，则光纤临界入射角 θ_c 越大，即光纤端面接受光的角度越大，光纤的集光能力越强，与其他光纤或光源的耦合效率就越高。

注意上面讲述的光纤全内反射和数值孔径定义的前提是光纤中的光线是子午光线。所谓子午光线是指始终在通过光纤轴的同一平面内传播的光线。

3. 光纤的分类

(1) 按光纤折射率分类 按折射率分布情况可将光纤分为阶跃型和梯度型，如图 8-53 所示。阶跃型光纤内芯和包层间的折射率是突变的，而梯度型光纤在横截面中心处折射率最大，即 n_1 从中心向外逐渐变小，直到内芯边界时变为外层折射率 n_2 。梯度型结构保证了传递光束集中在光纤轴附近传输，性能较好。

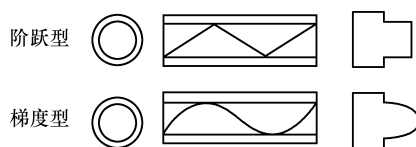


图 8-53 光纤的折射率分布示意图

(2) 按传输模式分类 光纤按其传输模式分为单模光纤和多模光纤。光波在光纤中传播时，由于纤芯边界的限制，其电磁场解不连续，这种不连续的场解称为模式。光纤中只能传输一种模式的光纤为单模光纤，而能同时传输多种模式的光纤称为多模光纤。单模光纤和多模光纤的主要差别是纤芯的尺寸和纤芯 - 包层的折射率差值。单模光纤直径为 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ ，只能传输一种模式的光，即基模。单模传输性能好，频带宽，单模光纤传感器线性好，灵敏度高，动态测量范围宽，但制造连接困难；多模光纤直径为几十到上千微米，可以传输多种模式的光，即基模及各阶次模。多模光纤性能相对较差，但内芯截面大，容易制造。

(3) 按材料分类 根据制作光纤的材料不同，光纤可以分为很多种类型。①高纯度石英 (SiO_2) 玻璃光纤，其特点是光传输的损耗低；②多组分玻璃光纤，其特点是纤芯 - 包层折射率可以在较大的范围内变化，因而有利于制造出大数值孔径的光纤，但材料的损耗大；③聚合物光纤，其特点是成本低，缺点是损耗大，温度性能差；④光子晶体光纤，又称多孔光纤或微结构光纤，这类光纤是由在纤芯周围沿着轴向规则排列微小空气孔构成，通过这些微小空气孔对光的约束，实现光的传导。光子晶体光纤以其独特的光学特性和灵活的设计成为近年来的热门研究课题；⑤液芯光纤，其特点是纤芯为液体，可以满足特殊要求。

(4) 按用途分类 按光纤的不同用途，光纤可以分为通信光纤和非通信光纤。通信光纤用于光通信系统，实际使用中大多使用光缆（多根光纤组成的线缆），是光通信的主要传光介质。而非通信光纤是用于通信以外的光纤，是以纤维光学为基础发展起来的一种光纤，用于传输光、传输图像或用作传感器，它的作用距离较短，使用长度长者不足千米，短者仅有数厘米，甚至数毫米。

8.8.2 光纤传感器的组成和分类

1. 光纤传感器的分类

按工作原理不同，光纤传感器一般分为功能型和传光型两大类。

传光型光纤传感器主要利用已有的其他敏感材料，作为其敏感元件，如图 8-54 所示。这样可以利用现有的优质敏感元件来提高光纤传感器的灵敏度。传光介质是光纤，所以采用通信光纤甚至普通的多模光纤就能满足要求。传光型光纤传感器占据了光纤传感器的绝大多数。

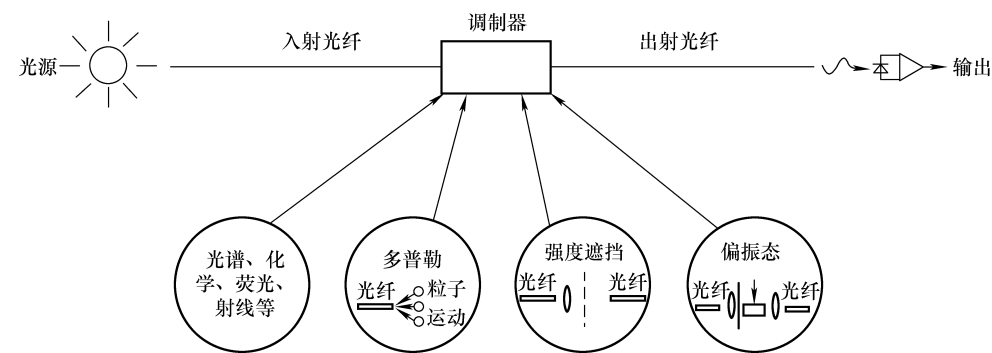


图 8-54 传光型光纤传感器

功能型光纤传感器是利用对外界信息具有敏感能力和检测功能的光纤（或特殊光纤）作传感元件，将“传”和“感”合为一体的传感器，如图 8-55 所示。

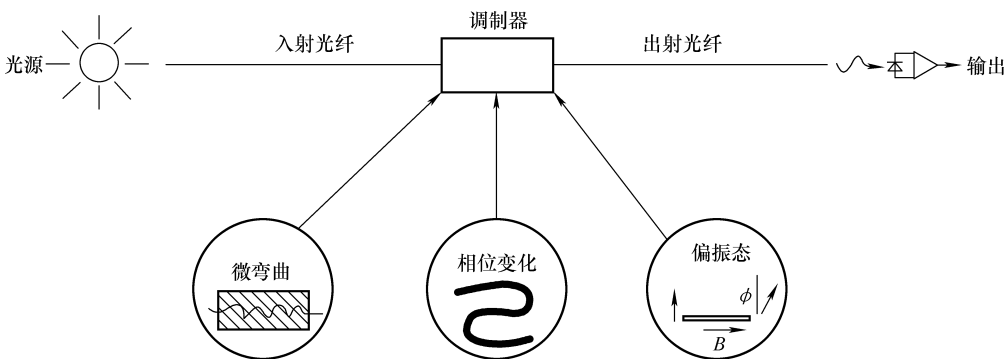


图 8-55 功能型光纤传感器

在这类传感器中，光纤不仅具有传光的作用，而且还具有感受被测量的作用。利用光纤在外界因素（弯曲、相变）的作用下，使其某些光学特性发生变化，对输入的光产生某种调制作用，使在光纤内传输的光的强度、相位、偏振态等特性发生变化，从而实现传和感的功能。

功能型光纤传感器在结构上比传光型光纤传感器简单，功能型光纤传感器的光纤是连续的，可以少用一些光耦合器件。但是，为了光纤能接受外界物理量的变化，往往需要采用特殊光纤来作探头，这样就增加了传感器制造的难度。随着对光纤传感器基本原理的深入研究

和各种特殊光纤的大量问世,高灵敏度的功能型光纤传感器必将得到更广泛的应用。

2. 光纤传感器组成

光纤传感器一般由光源、光纤和光探测器三部分组成,如图8-56所示。图8-56a为功能型(也称传感型)传感器,它是利用光纤本身的某种敏感特性或功能制成的传感器,图8-56b为非功能型(也称传光型)传感器,由于光纤只起传输光波作用,必须在光纤端面或中间加装其他敏感元件才能构成传感器。

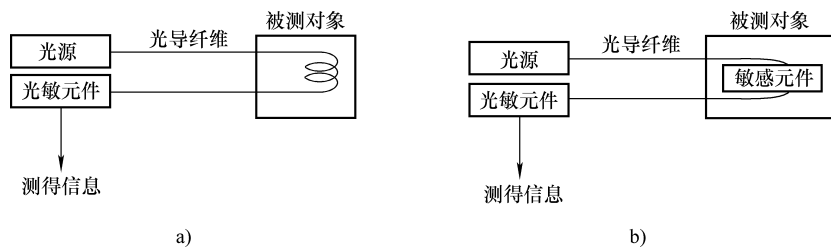


图 8-56 光纤传感器的组成

a) 功能型（传感型） b) 非功能型（传光型）

8.8.3 光纤传感器的调制原理

光纤传感器工作原理的核心是如何利用光纤的各种效应,实现对外界被测参数的“传”和“感”的功能。光纤传感器的核心就是光被外界输入参数的调制。研究光纤传感器的调制器,就是研究光在调制器中与外界被测参数的相互作用。外界信号可能引起光的某些特性(如强度、波长、频率、相位、偏振态等)变化,从而构成强度、波长、频率、相位和偏振态等调制。

1. 强度调制

利用被测量的作用改变光纤中光的强度,再通过光强的变化测量被测量,称为强度调制。其原理如图8-57所示。

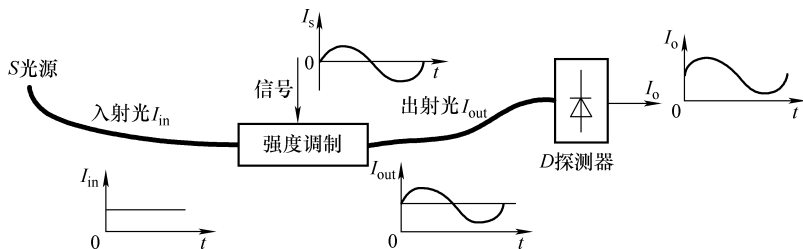


图 8-57 强度调制原理

当一恒定光源的光波 I_{in} 注入调制区,在外力场强 I_s 的作用下,输出光波的强度被 I_s 所调制,载有外力场信息的出射光 I_{out} 的包络线与 I_s 形状相同,光(强度)探测器的输出电流 I_o (或电压)也反映出了作用力场。

(1) 微小的线性位移和角位移调制 这种调制方法使用两根光纤,一根为光的入射光纤,另一根为光被调制后的出射光纤,如图8-58所示。两根光纤的间距为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$,端面为平面,两者对置。通常入射光纤固定,外界作用(如压力、张力等)使得出射光纤做横向

或纵向位移或转动，于是出射光纤输出的光强被其位移所调制。

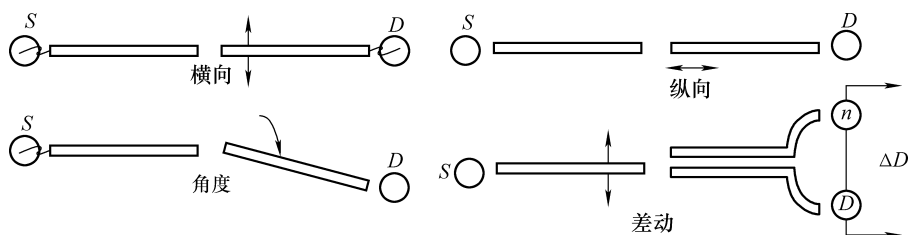


图 8-58 四种光强小位移调制

(2) 微弯损耗光强调制 根据模态理论，当光纤轴向受力而发生微小弯曲时，光纤中的部分光会折射到纤芯的包层中去，不产生全反射，这样将引起纤芯中的光强发生变化。因此，可以通过对纤芯或包层中光的能量变化来测量外界作用，如应力、重量、加速度等物理量。微弯光纤压力传感器由两块波形板或其他形状的变形器构成，如图 8-59 所示。其中一块活动，另一块固定。变形器一般采用有机合成材料（如尼龙、有机玻璃等）制成。一根光纤从一对变形器之间通过，当变形器的活动部分受到外力的作用时，光纤将发生周期性微小弯曲，引起传播光的散射损耗，使光一部分从纤芯耦合到包层，另一部分光反射回纤芯。当外力增大时，泄漏到包层的散射光增大，光纤纤芯的输出光强度减小；当外力减小时，光纤纤芯的输出光强度增强，它们之间呈线性关系。由于光强度受到调制，通过检测泄漏包层的散射光强或光纤纤芯中透射光强度的变化即可测出压力或位移的变化。

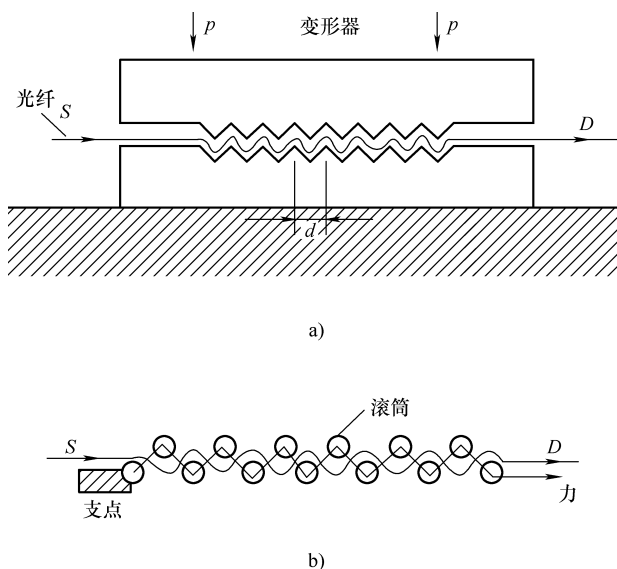
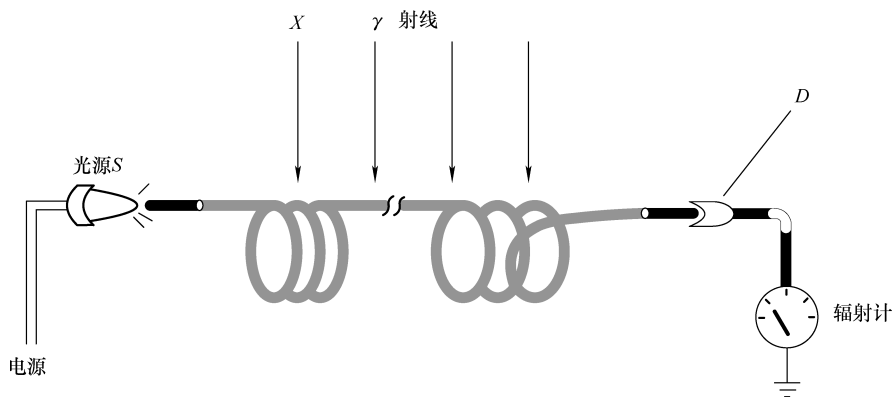


图 8-59 微弯光纤压力传感器

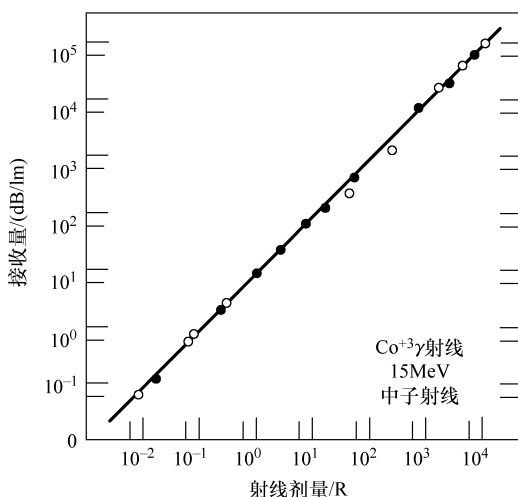
a) 波形板式的压力传感器 b) 滚筒型微弯传感器

(3) 吸收特性的强度调制 x 、 γ 射线等辐射会引起光纤材料的吸收损耗增加，使光纤的输出功率降低，从而可以构成强度调制器，用来测量各种辐射量，其原理如图 8-60a 所示。用不同材料制成的光纤对不同射线的敏感程度是不一样的，由此还可以鉴别不同的射

线。例如铅玻璃光纤对 x 、 γ 射线和中子射线特别灵敏，并且这种材料的光纤在小剂量射线照射时，具有较好的线性，可以测量射线的辐射剂量，如图 8-60b 所示。



a)



b)

图 8-60 吸收特性的强度调制

a) 光纤辐射传感器原理示意图 b) 辐射剂量与输出关系

2. 频率调制

利用外界作用改变光纤中光的波长或频率，通过检测光纤中光的波长或频率的变化来测量各种物理量，这两种调制方式分别称为波长调制和频率调制。波长调制技术比频率调制技术用得少，其原因是解调技术比较复杂。频率调制技术目前主要利用多普勒效应来实现。光纤常采用传光型光纤。当光源 S 发射出的光，经运动的物体散射后，观察者所见到的光波频率 f_1 相对于原频率 f_0 发生了变化，这就是光学多普勒效应，如图 8-61 所示。

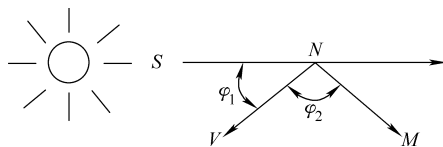


图 8-61 多普勒效应示意图

S 为光源, N 为运动物体, M 为观察者所处的位置, 若物体 N 的运动速度为 v , 其运动方向 NV 与 NS 和 MN 的夹角分别为 φ_1 和 φ_2 , 则从 S 发出的光频率 f_0 经运动物体 N 反射后, 观察者在 M 处观察到的运动物体反射的光频率为 f_1 , 根据多普勒效应, 它们之间有如下关系:

$$f_1 \approx f_0 \left[1 + \frac{v}{c} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \right] \quad (8-13)$$

式中 c ——光速。

根据式 (8-13), 可以设计出激光多普勒光纤流速测量系统, 如图 8-62 所示。设激光光源频率为 f_0 , 经半反射镜和聚焦透镜进入光纤射入到被测物流体, 当流体以速度 v 运动时, 根据多普勒效应, 其向后散射光的频率为 $f_0 + \Delta f$ 或 $f_0 - \Delta f$ (视流向而定), 向后散射光与光纤端面反射光 (参考光) 经聚焦透镜和半反射镜, 由检偏器检出相同振动方向的光, 探测器检测出端面反射光 f_0 与向后散射光 $f_0 + \Delta f$ 或 $f_0 - \Delta f$ 的差频 Δf , 由此可知流体的流速。

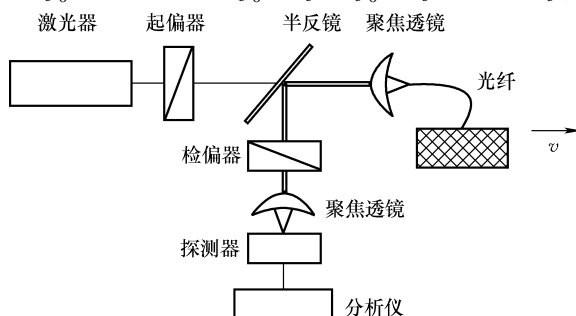


图 8-62 激光多普勒光纤流速测量系统

3. 偏振调制

利用光波的一些偏振特性, 可以制成偏振调制传感器。光纤传感器中的偏振调制器常用电光、磁光、光弹等物理效应进行调制。

(1) 法拉第效应 (磁光效应) 某些物质在磁场作用下, 线偏振光通过时, 其振动面会发生旋转, 这种现象称为法拉第效应。光的电矢量 E 旋转角 θ 与光在物质中通过的距离 L 和磁场强度 H 成正比, 即

$$\theta = \int_0^L H dL = K L H \quad (8-14)$$

式中 K ——物质的弗尔德常数。

利用法拉第效应制备的光纤电流传感器测量高压传输线的电流, 其测量原理如图 8-63 所示。

根据法拉第效应可知, 由电流所形成的磁场会引起光纤中线偏振光的偏转, 对于长直导线有

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (8-15)$$

式中 R ——光纤圈的半径;

H ——磁场强度;

I ——导线中电流。

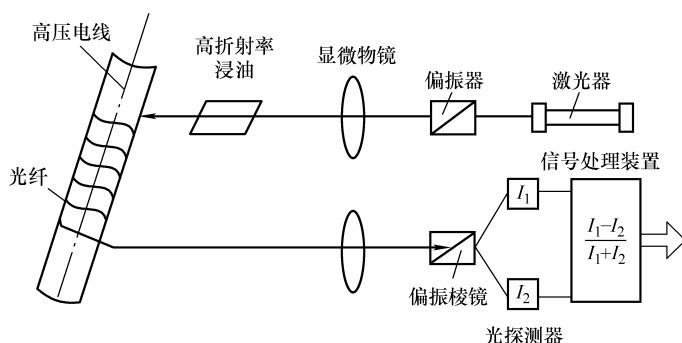


图 8-63 光纤电流传感器测量原理

将式 (8-15) 代入式 (8-14) 有

$$\theta = \frac{KLI}{2\pi R} \quad (8-16)$$

由上式可知，偏转角 θ 和电流 I 呈线性关系。

激光器发出的激光束经起偏器变成线偏振光，再经 10 倍的显微镜耦合到单模光纤中去，为了消除光纤中的包层模，把光纤浸到高折射率的油中，单模光纤缠绕在高压载流导线上，设通过导线的电流为 I ，受磁场作用后，经显微镜耦合到渥拉斯顿棱镜，该棱镜把激光束分成振动方向相互垂直的两束偏振光，分别进入两个光电探测器，经信号处理和显示器得到信号 p ，即

$$p = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin\theta \quad (8-17)$$

由于一般电子系统中偏振面的偏转角都很小，所以可以认为 $p \approx \theta$ 。因此，测得 p 值后就可以求出导线中电流的大小。

(2) 光弹效应 在垂直于光波传播方向上施加应力，被施加应力的材料将会使光产生双折射现象，其折射率的变化与应力相关，这种现象称为光弹效应。由光弹效应产生的偏振光的相位变化为

$$\Phi = \frac{2\pi KPL}{\lambda} \quad (8-18)$$

式中 K ——物质光弹性常数；

P ——施加在物体上的压强；

L ——光波通过材料的长度。

利用物质的光弹效应可以构成压力、振动、位移等光纤传感器。图 8-64 所示为利用光弹效应实现压力测量的原理图。沿 MN 方向对压力材料施加压力或张力，光源发出的光经过起偏器变成线偏振光，线偏振光通过施加了应力的材料后产生双折射，由检偏器获得偏振光的相位变化，从而可以测得应力的变化。

4. 相位调制

(1) 萨古纳克效应 同一光源，同一光路，两束对向传播光的相位差与其光路系统的旋转角速度成正比，这就是萨古纳克 (Sagnac) 效应。

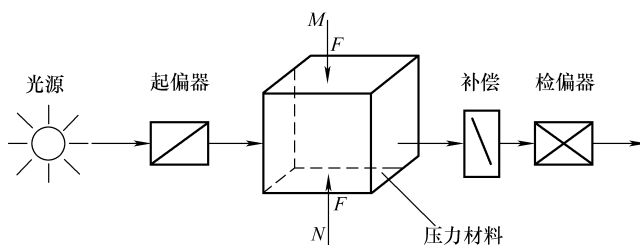


图 8-64 光弹效应压力测量原理图

如图 8-65 所示，激光器发出的光由分光镜分为两束，一束顺时针传播，另一束逆时针传播。当系统角速度 $\omega = 0$ 时，顺、逆光束由分光镜处开始传播又都回到分光镜处，路程均为 $L = 2\pi r$ ，所需时间为 $t = L/c$ ，其中 r 为旋转半径， c 为光速，故两束光之间无光程差。当系统以角速度 ω 相对惯性空间逆时针旋转时，逆时针传播光束所需时间与顺时针的之差为

$$\Delta t = \frac{L}{c - r\omega} - \frac{L}{c + r\omega} \quad (8-19)$$

因为 $c \gg r\omega$ ，所以

$$\Delta t = \frac{2rL\omega}{c^2} = \frac{4A\omega}{c^2} \quad (8-20)$$

式中 A ——圆形光学系统围成的面积。

因此，两光束之间的光程差和相位差分别为

$$\Delta L = \frac{4A\omega}{c} \quad (8-21)$$

$$\Delta\theta = \frac{8\pi A\omega}{\lambda_0 c} \quad (8-22)$$

式中 λ_0 ——真空中光波长。

可以证明，所推导公式适用于任意形状的光路，且与传播媒质无关。利用该效应可以制成环形激光陀螺和性能更优的光纤陀螺来测量角度或角速度。

(2) 磁致伸缩效应和电致伸缩效应 某些铁磁体及其合金，以及某些铁氧体在外磁场作用下产生机械变形的现象，称为磁致伸缩效应。当在电介质的极化方向施加电场，某些电介质在一定方向上将产生机械变形或机械应力，当外电场去掉后，变形或应力也随之消失的现象，称为电致伸缩效应。利用磁致伸缩效应或电致伸缩效应使光纤发生变形，从而改变光纤中光的相位。

图 8-66 所示为利用磁致伸缩效应或电致伸缩效应测量磁场强度或电场强度的原理图。

将磁致伸缩材料或电致伸缩材料与光纤粘接在一起，使其对马赫-泽德干涉仪的敏感光纤产生扰动，从而使输出相位发生变化。根据相位的变化即可测得磁场或电场强度。在这种结构原理中，光纤除了可粘接到磁致伸缩材料或电致伸缩材料上外，还可以嵌入磁致伸缩材

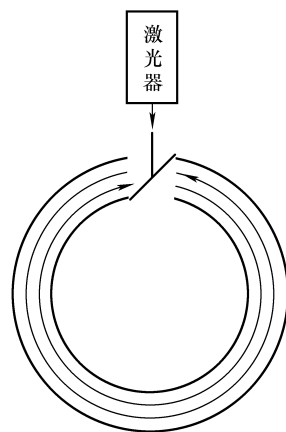


图 8-65 萨格纳克效应示意图

料或电致伸缩材料中,或者使用磁致伸缩材料或电致伸缩材料制成光纤的保护层。

8.8.4 光纤传感器的应用

根据光纤在传感器中的作用特点,其应用也主要分为传光型和传感型两大类。为了获得较大受光量和传输的光功率,传光型光纤传感器常采用数值孔径和芯径大的阶跃型多模光纤。它具有结构简单,能充分利用光电元件和光纤本身特点,应用较广,它的缺点是灵敏度比传感型光纤传感器低,精度差些。

传感型光纤传感器是利用光纤本身的传输特性受被测物理量作用发生变化,使光纤传输中光的属性(光强、相位、偏振态等)发生变化,传感型光纤传感器性能好,但结构复杂,调整也较难。

1. 光纤压力传感器

图 8-67 所示为一传光型压力传感器,在光纤的一端封装有一种液晶,当液晶加压后,散射回光纤的光强就会发生变化,根据光强变化就可以求得压力大小。利用此原理制作的光纤传感器可以将其深入血管内测量血压,由于光纤不导电,所以测量安全可靠。

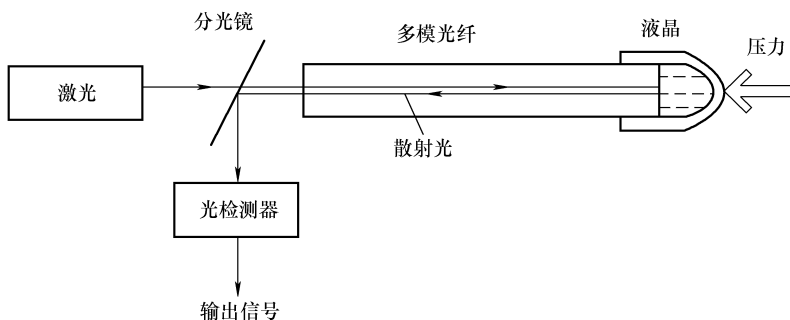


图 8-67 传光型光纤压力传感器

2. 光纤位移传感器

图 8-68 给出了三种传感型光纤位移传感器结构,其原理是利用固定在光纤上的物体的位移使光纤产生内应力而引起传输光的相位、偏振或光强的变化实现位移测量的。

由于光纤细而且可卷绕,具有良好的电绝缘与抗电磁干扰能力,因而常用于高压电器、易燃容器、桥梁和水坝等变形位移的测量。

3. 光纤温度传感器

图 8-69 给出了一种马赫-泽德干涉仪原理制作的光纤温度传感器。其原理是光在光纤内传输的相位随温度变化而变化。马赫-泽德干涉仪包括激光器、扩束镜、两个显微物镜、

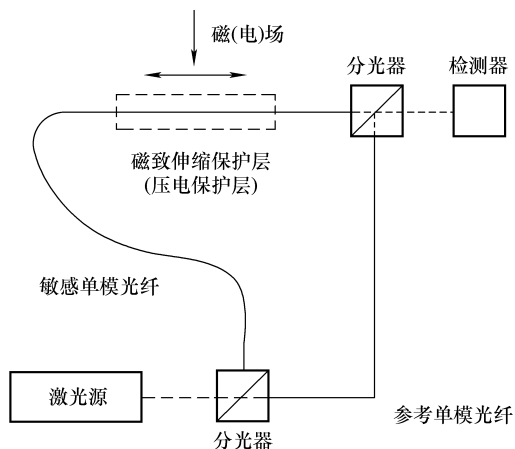


图 8-66 测量磁场、电场的马赫-泽德传感器

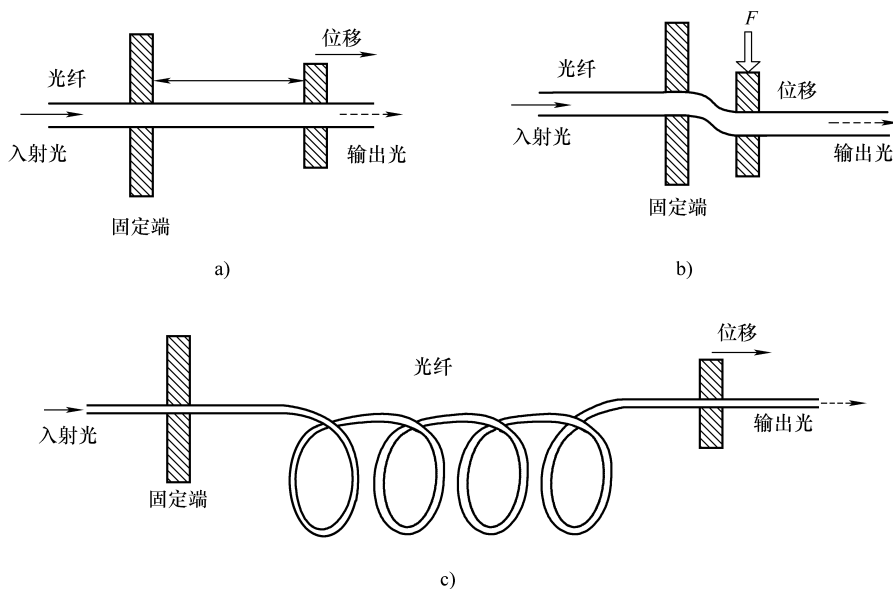


图 8-68 传感型光纤位移传感器

两个单模光纤和光探测器等。干涉仪工作时，由激光器发出的激光束经分光束分别送入测量光纤和参考光纤，两根光纤的长度基本相等，且输出端汇合在一起，这两束光产生干涉出现干涉条纹。当测量臂光纤受温度影响时产生的相位偏移，就会引起干涉条纹的移动，干涉条纹移动的数量便反映出被测物温度变化。

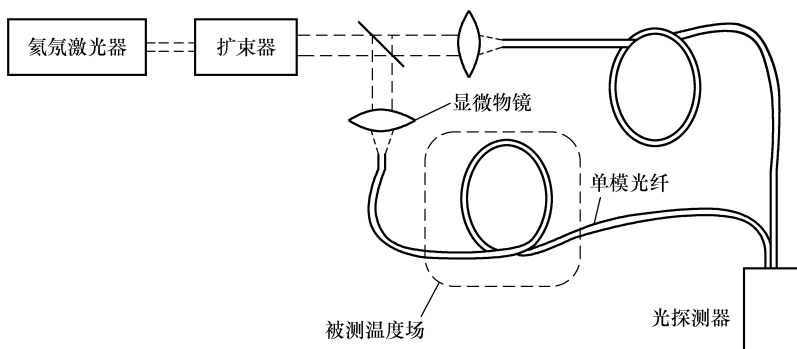


图 8-69 马赫－泽德光纤温度传感器

8.9 红外光传感器

8.9.1 红外辐射基本知识

红外辐射又称红外线，是一种不可见光，由于是位于可见光中红色光以外的光线故称为红外线。波长在 $0.76 \sim 1000\mu\text{m}$ ，红外线在电磁波谱中的位置如图 8-70 所示。在工程上，又

把红外线所占据的波段分为四个部分，即近红外、中红外、远红外和极远红外。

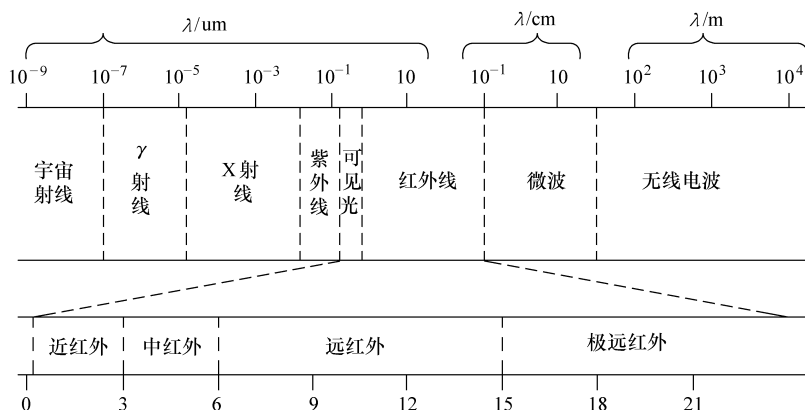


图 8-70 电磁波谱图

红外辐射的物理本质是热辐射。一个炽热物体向外辐射的能量大部分是通过红外线辐射发出来的，且物体的温度越高，辐射出来的红外线就越多，辐射的能量就越强。当红外线被物体吸收，可以显著的转变为热能。

红外辐射和所有的电磁波一样，是以波的形式在空间直线传播的。它在大气中传播时，大气层对不同波长的红外线存在不同的吸收带，部分气体传感器就是利用该特性工作的，但空气中对称的双原子气体，如 N_2 、 O_2 、 H_2 等不吸收红外线。而红外线在通过大气层时，有三个波段通过率高，它们是 $2 \sim 2.6 \mu m$ 、 $3 \sim 5 \mu m$ 和 $8 \sim 14 \mu m$ ，统称为“大气窗口”。这三个波段对红外探测技术特别重要，因为红外探测器一般都工作在这三个波段之内。利用红外线作为检测媒介来测量某些非电量，比可见光作为媒介的检测方法要好，具有不受可见光影响，可昼夜测量，且不必设光源等特点。

1. 基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律

物体在向周围发射红外辐射时，同时也吸收周围物体发射的红外辐射能，在一定温度下与外界的辐射处于热平衡状态时，单位时间内单位面积发射的辐射能 E_R 为

$$E_R = \alpha E_0 \quad (8-23)$$

式中 α ——物体的吸收系数；

E_0 ——常数，表示绝对黑体在相同条件下的发射本领。

2. 斯忒藩-波尔兹曼 (Stefan - Boltzmann) 定律

物体温度越高，向外辐射能量越多，单位时间内其单位面积辐射的总能量 E_R 为

$$E_R = \sigma \varepsilon T^4 \quad (8-24)$$

式中 T ——物体的绝对温度 (K)；

σ ——Stefan - Boltzmann 常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ；

ε ——比辐射率，黑体的 $\varepsilon = 1$ ，一般物体的 $\varepsilon < 1$ 。

3. 维恩 (Wien) 位移定律

红外辐射的电磁波中，包含着各种波长，其辐射能谱峰值波长 λ_m (单位： μm) 与物体自身的温度 T 成反比，即

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \quad (8-25)$$

由式可以看出,随着温度 T 升高,其峰值波长向短波方向移动,在温度不是很高 (2000K) 的情况下,其峰值辐射波长在红外区域。

8.9.2 红外探测器

红外探测器是能将红外辐射能转换成电信号的光敏器件,也称红外器件或红外传感器。常用的红外探测器有热电型探测器和光电型探测器两大类。

1. 热电型探测器

热电型探测器是将入射的红外辐射引起探测器的温度变化转换成相应的电信号,从而确定红外探测器所吸收的红外辐射。这类探测器响应波段宽,可以在室温下工作,使用方便。但它们响应时间长,灵敏度较低,一般用于红外辐射变化缓慢的场合。

(1) 热敏电阻型探测器 热敏电阻型红外探测器是由锰、镍、钴的氧化物混合后烧结而成,结构如图 8-71a 所示,热敏电阻一般制成薄片状,当红外辐射照射在热敏电阻上时,其温度升高,电阻减小。测量热敏电阻值大小变化,即可知红外辐射强度大小,从而判断产生红外辐射物体的温度。测量电路如图 8-71b 所示,其中, R 接收红外辐射, R_b 为补偿元件,不受红外影响。

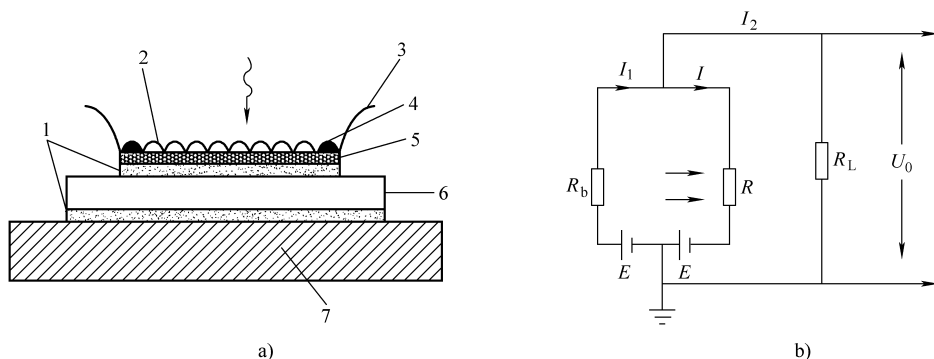


图 8-71 热敏电阻型红外探测器

a) 结构 b) 桥式测量电路

1—粘合剂 2—发黑材料 3—电极引线 4—金电极 5—热散薄片 6—衬底 7—导热基体

(2) 热电偶型探测器 (热电堆光敏器件) 利用多个热电偶串联起来,将工作端密集排列在很小的面积上,参考端分布在外,使入射红外线照射在工作端,屏蔽参考端,即可获得一定热电势。

热电偶的正极材料以铜、银、碲、硒、硫的混合物较理想,负极材料是硒化银和硫化银的混合物。也可用铋和锑制作热电偶,其工作端必须进行黑化处理以增强红外辐射能的吸收。热电堆的突出优点是对频率或波长没有选择性,对各种波长的辐射都有比较均匀的响应,无突出的峰值,这是其他光敏元件做不到的。缺点是时间常数大,不宜在高速变动的光照下使用,且效能不高。

(3) 热释电型探测器 若使某些强电介质物质的表面温度发生变化,在这些物质的表

面就会产生电荷变化,这种现象称为热释电效应,即热电效应的一种。

适于制作热释电红外线光敏元件的材料很多,以压电陶瓷和陶瓷氧化物最多,如利用钽酸锂 (LiTaO_3)、硫酸三甘钛 (LATGS) 及锆钛酸铅 (PZT) 制备的热释电红外传感器应用很广。这些陶瓷材料具有自发极化的特性,而且当温度有少许变化时其自发极化的大小就有很大的变化。在温度长时间恒定时由自发极化的表面极化电荷数目一定,它吸收空气中的电荷达到平衡,并与吸附的存在于空气中的符号相反的电荷产生中和;若温度因吸收红外光而升高,则极化强度会减少,使得单位面积上的极化电荷相应减少,释放一定

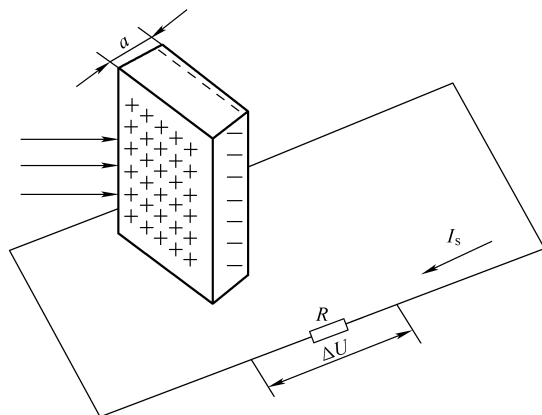


图 8-72 热释电效应原理示意图

量的吸附电荷;若与一个电阻连成回路会形成电流 I_s , 则电阻上可产生一定的压降,如图 8-72 所示。这种因温度变化引起的自发极化值变化的现象称为热释电效应。

为了使光照引起的整个材料的温度易于达到热平衡,一般采用陶瓷薄片。当连续光照达到热平衡,即吸热等于放热时温度不再变化,则不再释放电荷, R 上的压降就变为了 0V, 即无信号输出。因此热释电效应只能探测辐射的变化。电阻上的压降的变化表示为

$$\Delta U = S \frac{dp}{dt} R = S \frac{dp}{dT} R \frac{dT}{dt} = SXR \frac{dT}{dt} \quad (8-26)$$

式中 S ——电极面积;

P ——自发式极化强度;

X ——热释电系数;

dT/dt ——温度对时间的变化率,即温度变化率。

热释电红外传感器的结构如图 8-73a、b 所示,它由敏感元件、场效应晶体管、高阻电阻、滤光片等组成,并向壳内冲入氮气封装起来。

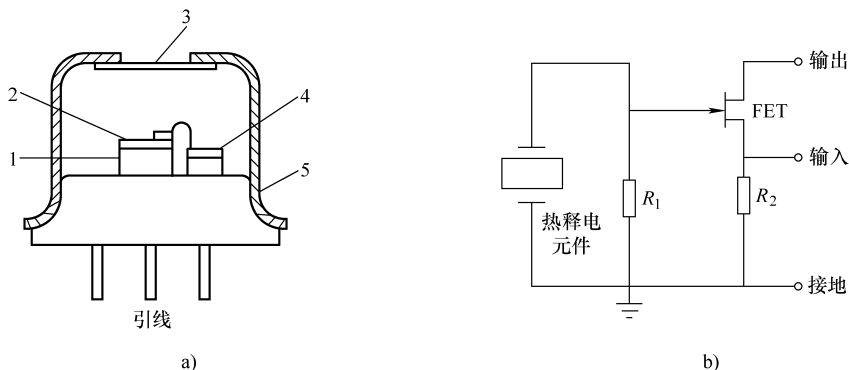


图 8-73 热释电传感器的结构和等效电路

a) 传感器结构 b) 等效电路

1—特殊导电性支持台 2—热释电元件 3—硅窗口 4—FET 5—TO-5 外壳

敏感元件用红外线热释电材料 (PZT) 制成很小薄片, 并在薄片两面镀上电极, 构成两个反向串联的有极性的小电容 (双元件红外敏感元件), 且受光面加上黑色膜。当入射红外线顺序照射在两个元件时, 由于两个元件反向串联, 其输出是单元件的两倍; 由于反向串联, 对于同时输入的红外线所产生的热释电效应会相互抵消。因此, 双元件红外线敏感元件结构可以防止因太阳光等外界环境引起的误差和干扰, 可以对环境温度变化起到补偿作用。

热释电红外敏感元件的内阻较高 ($10^{13}\Omega$), 同时其输出电压信号又极微弱, 因此, 需要进行阻抗变换和信号放大才能应用。热释电红外传感器等效电路如图 8-73b 所示, 场效应晶体管用来构成源极跟随器, 高阻 R_1 的作用是释放栅极电荷, 使场效应晶体管安全正常工作; R_2 为负载电阻, 源极输入时, 源极电压为 $0.4 \sim 1.0\text{V}$ 。

根据维恩位移定律, 对于人体体温辐射的峰值波长 $\lambda_m = 2898/309\mu\text{m} = 9.4\mu\text{m}$, 即人体辐射在 $9.4\mu\text{m}$ 处最强, 红外滤波片应选取 $7.5 \sim 14\mu\text{m}$ 波段。

2. 光电型探测器

光电型探测器是利用某些半导体材料在红外辐射的照射下, 产生光子效应, 使材料的电学性质发生变化, 通过测量电学性质的变化, 可以确定红外辐射的强弱。利用光子效应所制成的红外传感器统称为光电传感器 (光子探测器)。其优点是灵敏度高、响应速度快、响应频率高, 但是一般需要在低温下工作, 探测波段较窄。主要包括外光电探测器、光电导探测器、光生伏特探测器、光磁电探测器。

(1) 光电导探测器 当红外辐射照射在某些半导体表面时, 材料中的电子和空穴可以从原来不导电的束缚状态变为导电的自由状态, 使半导体的导电率增加, 这些现象称为光电导现象。利用光电导制备的器件称为光电导探测器。常用材料如硫化铅 (PbS)、硒化铅 (PbSe)、锑化铟 (InSb)、碲镉汞 (HgCdTe) 等材料, 使用光电导探测器时, 需要制冷和加上一定偏压, 否则会使响应频率偏低, 噪声大, 响应波段窄, 甚至会损耗红外探测器。图 8-74 为光电探测器的转换电路图, 图中 R 为光电半导体电阻, R_L 为负载, M 为红外调制盘。

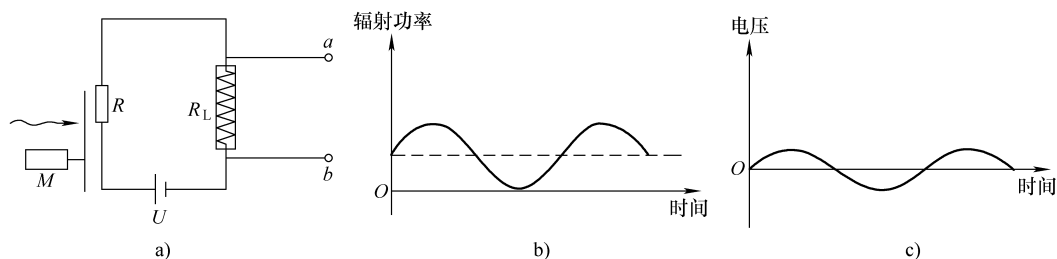


图 8-74 光电探测器的转换电路

(2) 光生伏特探测器 当红外辐射照射在某些半导体材料构成的 PN 结上时, 在 PN 结内电场的作用下, P 区的自由电子移向 N 区, N 区的空穴向 P 区移动。如果 PN 结是开路的, 则在 PN 结两端产生一个附加电动势, 称为光生电动势。利用这个效应制成的探测器称为光生伏特探测器。光生伏特探测器的工作原理如图 8-75 所示。

P 型半导体与 N 型半导体形成 PN 结后, 在 PN 结附近开始电子、空穴的热运动, P 区的多数载流子空穴移动到 N 区, 而 N 区多数载流子移动到 P 区, 热运动平衡后, 结果在二者的过渡区形成一个内电场, 如图 8-75a 所示, 红外光照射后, 在 PN 结附近产生了与辐射

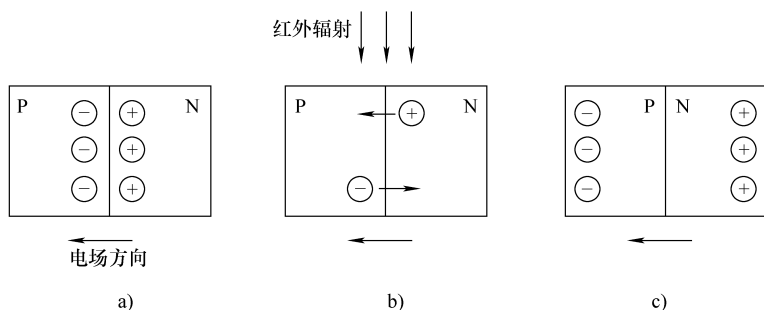


图 8-75 光生伏特探测器工作原理

a) 形成内电场 b) 相互移动 c) 产生电位差

能量相应的激发电子-空穴对，在内电场的作用下，P 区电子移动到 N 区，N 区空穴移动到 P 区，如图 8-75b 所示。电子、空穴在内电场的作用下移动的结果，在 P 区聚积了正电荷，在 N 区聚积了负电荷，最后在 PN 结两端产生了电动势，如图 8-75c 所示。常用的材料有砷化镓（InAs）、锑化铟（InSb）、碲化汞（HgCdTe）、碲化铅（PbSnTe）等几种。

（3）光磁电探测器 当红外线照射在某些半导体材料表面时，材料中的电子和空穴向内部扩散，在扩散中若受强磁场作用，电子和空穴则各偏向一边，因此产生开路电压，这种现象称为光磁电效应。利用此效应制成的红外探测器称为光磁电探测器。光磁电探测器不需要制冷，响应波段在 $7\mu\text{m}$ 左右，时间常数小，响应速率快，不用加偏压，内阻小，噪声小，有良好的稳定性和可靠性，但其灵敏度低，低噪声前置放大器制作困难，因而影响了使用。

8.9.3 红外光传感器应用

1. 红外测温

红外测温仪是利用热辐射在红外波段的辐射通量来测量温度的，如图 8-76 所示，它主要由光学系统、调制器、红外探测器、放大器和指示器等组成。调制器把红外辐射调制成交变辐射，光学系统将被测物体的红外辐射聚焦到红外探测器上，它将红外辐射变换为电信号输出。采用哪种类型红外探测器可根据被测物体辐射的红外波段与能量等实际情况确定。

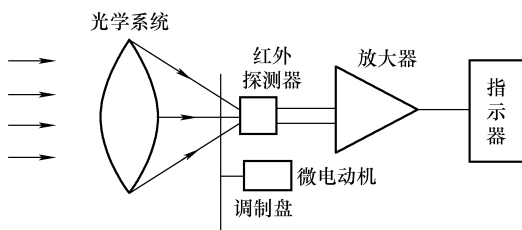


图 8-76 红外测温仪结构示意图

2. 医用 CO_2 红外分析

红外分析是根据物质的吸收特性来工作的，许多化合物的分子在红外波段都有吸收带，而且因物质的分子不同，吸收带波长（或波段）和吸收的强弱也不相同。据此可以识别物质分子的类型和含量。

根据需求和应用，红外分析仪有多种形式，如红外气体分析仪、红外分光光度计、红外光谱仪等。医用 CO_2 气体分析仪是利用 CO_2 对波长 $4.3\mu\text{m}$ 的红外辐射有强烈的吸收特性而进行测量分析的。图 8-77 所示为医用 CO_2 分析仪光学系统示意图，它由红外光源、气室和

检测器三部分组成。红外光经过测量气室被 CO_2 吸收后送至红外探测器， CO_2 浓度与其吸收的红外辐射能量成线性关系，则根据检测结果可得到 CO_2 浓度。

医用 CO_2 分析仪可连续测量人或动物呼出的气体中 CO_2 的含量，是研究呼吸系统和检查肺功能的有效手段。

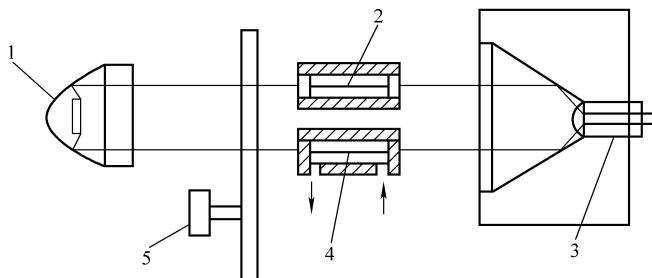


图 8-77 医用 CO_2 分析仪系统

1—红外光源 2—标准气室 3—红外探测器 4—测量气室 5—调制系统

习 题

- 8-1 光电效应有哪些类？列举对应的光电器件有哪些？
- 8-2 红外传感器系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
- 8-3 试计算 $n_1 = 1.46$ ， $n_2 = 1.45$ 的阶跃折射光纤的数值孔径值是多少？设外媒质空气（ $n_0 = 1$ ），求该光纤的最大入射角是多少？
- 8-4 设计一种光电式转速传感器，并简述其测量原理。
- 8-5 试利用热释电红外传感器 SD 02 和集成芯片 TWH9511 设计人体探测报警器。

参 考 文 献

- [1] 周真，苑惠娟．传感器原理与应用 [M]．北京：清华大学出版社，2011.
- [2] 谭定忠．传感器与测试技术 [M]．北京：中央广播电视大学出版社，2002.
- [3] 王晓敏，黄俊，刘建新．传感检测技术 [M]．北京：中国电力出版社，2009.
- [4] 梁福平．传感器原理及检测技术 [M]．武汉：华中科技大学出版社，2014.
- [5] 周旭．现代传感器技术 [M]．北京：国防工业出版社，2007.
- [6] 张洪润，张亚凡，邓洪敏．传感器原理及应用 [M]．北京：清华大学出版社，2008.
- [7] 吕泉．现代传感器原理及应用 [M]．北京：清华大学出版社，2006.
- [8] 何道清，张禾，湛海云．传感器与传感器技术 [M]．北京：科学出版社，2008.

第9单元

波 传 感 器

学习要点

- ◆ 声波的分类及特性；声敏传感器基本结构、工作原理；
- ◆ 声表面波分类；声表面波叉指换能器、振荡器；
- ◆ 声表面波传感器基本结构、工作原理；
- ◆ 超声波特性；超声波传感器性能参数；超声波传感器基本结构与工作原理；
- ◆ 次声波特性；次声波传感器基本结构与工作原理；
- ◆ 微波特性；微波传感器基本结构与工作原理。

相关知识链接

- ◆ 陈小平. 扬声器和传声器原理及应用. 中国广播电视出版社. 2005；
- ◆ 陈明, 范东远, 李岁劳. 声表面波传感器. 西北工业大学出版社. 1997；
- ◆ 林书玉. 超声换能器的原理及设计. 科学出版社. 2014；
- ◆ GB/T 18694—2002 无损检测超声检验探头及其声场的表征 (eqv ISO10375: 1997)；
- ◆ 赵春晖. 微波技术. 高等教育出版社. 2007。

引导案例

排水管道性能声波检测系统

城市排水管道负责整个城市的生活污水、工业废水和雨水的排除工作，与城市的经济发展、人民的生活质量和工作环境息息相关，保障其功能完好和结构稳固至关重要。

排水管网中水的输送通常是在常压情况下，依靠水的自身重力由高向低流动。由于污水中均含有一定的固体、半固体杂质，在流动过程中容易产生淤积，从而降低了管道的输水能力，有时还会导致管道部分或完全堵塞，甚至腐蚀塌陷等，丧失了输水能力。因此有必要定期对排水管道进行及时的检测。过去传统的检测方法是利用管道潜望镜或由专业检测人员进入管道内进行检测，这种方法仅能对管道内部状况进行初步判定，对水位、管径和管内流速均有严格限制。且当管内淤积、水沫、雾气或其他杂物较多时检测必须终止。这种既不严谨也不科学更不安全的检测方法为日后的管理带来安全隐患。

随着无损检测技术的发展，声波检测系统已成为目前国际上进行排水管道检测最先进有效的方法。利用这种非接触式的检测方法得到的声波回馈形成二维管壁横截面图像，找到

管道内的堵塞点和堵塞情况,准确检测管道内结构缺陷(如变形、坍塌、破裂、结垢等)和功能缺陷(如沉积、漂浮物),对排水管道进行全面“体检”。

该声波检测系统最核心的器件就是声波传感器。

波是指某一物理量的扰动或振动在空间逐点传递时形成的运动。不同形式的波虽然在产生机制、传播方式和与物质的相互作用等方面存在很大差别,但在传播时却表现出多方面的共性,可用相同的数学方法描述和处理。波传感器的定义范围非常广,只要是利用波动原理制作而成的传感器都可以叫作波传感器。

9.1 声传感器

9.1.1 声波的基本概念

1. 声波

声波是发声体产生的振动在空气或其他介质中传播的一种物理现象。声波的产生必须具有两个条件,一是声源,二是弹性介质。当声源发生振动时,借助介质本身的弹性和惯性,周围介质质点随之振动而产生位移,导致介质空间产生介质的疏密扰动,该扰动由近及远,形成声波在介质中的传播。因此,声波是振动状态在弹性介质中的传播,并非介质质点本身的传播。传播振动的弹性介质可以是空气,也可以是液体或固体。

2. 声波的分类

声波按其频率的高低、波阵面的几何形状以及质点的振动情况有不同分类。

(1) 按频率分 按频率高低可以将声波分为音频声、超声波和次声波。音频声是振动频率在 16 ~ 20kHz 之间的声波,也称为可听声;频率高于 20kHz 的声振动称为超声波;低于 20Hz 的声振动称为次声波。

超声和次声不能引起人们的声音感觉,如图 9-1 所示。

(2) 按波阵面分 按波振面的不同可以将声波分为平面波、球面波和柱面波。波阵面为平行平面的声波为平面波;波阵面为同心球面的声波为球面波;波阵面为同轴柱面的声波为柱面波。

(3) 按质点振动情况分 按质点振动情况可将声波分为纵波与横波。质点振动方向与传播方向一致的波为纵波,也称为压缩波,它能在空气、液体和固体中传播。图 9-2 所示鼓面在振动时,空气中声波的压缩与膨胀就是纵波。

质点振动方向垂直于传播方向的波为横波,也称为切变波,它只能在固体中传播,如弦绳的振动波。固体介质表面受到交替变化的表面张力,使介质表面的质点发生相应的纵向振动和横向振动,在这两种振动的合成作用下,表面的质点绕其平衡位置做椭圆振动。椭圆振动作用于相邻介质而在表面传播,其振幅随着深度的增加而迅速衰减,这种声波称表面波。

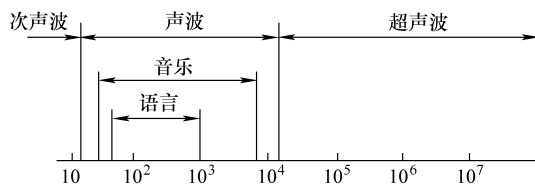


图 9-1 声波的频率界限

表面波只在固体表面传播。

3. 声波的特性

(1) 声压 (P) 声波是由于空气分子的振动形成疏密波而传播的。若空气中没有声波, 空气中的压强即为大气压。当声波传播时, 某处的空气疏密地变化, 使压强在大气压附近上下变化, 相当于在原来的大气压强上叠加一个变化的压强。这个叠加上去的压强就叫声压, 即由声波引起的压强变化称为声压, 用符号 P 表示。

由于声波是随时间疏密相间不断变化的, 所以, 任一点的声压都是随时间而不断变化的, 即每一瞬间的声压 (称为瞬间声压) 可以是正值, 也可以是负值, 声压变化的平均值 (平均声压) 为零。通常所说的声压, 是指一段时间内瞬时声压的方均根值 (即有效声压), 故总是正值。当声压随时间按简谐规律变化时, 有效声压等于瞬时声压最大值 $P_{\max}$ 除以 $\sqrt{2}$, 即

$$P = \frac{P_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (9-1)$$

一般来说, 电子仪表测得的就是有效声压, 因而, 习惯上声压就是指有效声压。有效声压的大小代表声波的强弱。在 CGS (Centimeter - Gram - Second, 即厘米、克、秒) 单位制中, 声压单位是 dyn/cm^2 , 称微巴 (μbar); 在 MKSA 单位制中, 单位为 Pa, 有时也用牛顿/米² (N/m^2) 表示, $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$; $1\mu\text{bar} = 0.1\text{Pa}$, 一个标准大气压为 $1.03 \times 10^5\text{Pa}$ 。

(2) 声功率 (W) 声波是能量传播的一种形式, 因此也常用能量的大小来表示声音的强弱。声源在单位时间内向外辐射的声能量叫作声功率, 用符号 W 表示, 单位为瓦 (W)。声功率是一个绝对量, 仅取决于声源本身, 与声学环境无关。

(3) 声强 (I) 声强也是衡量声波在传播过程中声音强弱的物理量。它是指通过垂直于声传播方向上单位面积的二次均声能流, 用符号 I 表示, 单位为 W/m^2 。若声能通过的面为 S , 则声强为

$$I = \frac{W}{S} \quad (9-2)$$

在无反射声波的自由场中, 点声源发出的球面波, 均匀地向四周辐射声能, 因此, 距离声源中心为 r 的球面上的声强为

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (9-3)$$

可见, 对于球面波, 声强与点声源的声功率 W 成正比, 而与距离 (半径) r 的二次方成反比, 即若距离加倍, 声强 I 就减为原来的 $1/4$ 。在自由场中, 声强与离声源的距离的二次方成反比减小的规律, 称为平方反比定律。需要特别注意的是, 声强是有方向的, 是一个矢量, 它表示声场中声能流的运动方向。

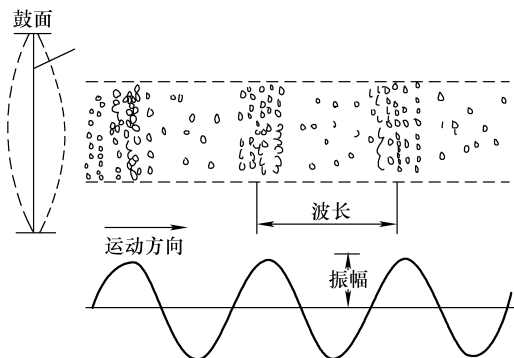


图 9-2 空气中声波的压缩与膨胀

对于平面波,由于声线相互平行,同一束声能通过声源不同距离的平面时,声能没有聚焦或发散,即与距离无关,所以不变。

以上现象都是假设声音在无损耗、无衰减的媒质中传播的。实际上,声波在媒质中传播时,声能总是有损耗的。声音的频率越高,损耗也越大。

(4) 声压级 (L_p) 声波的能量变化范围很大,对于 1kHz 的声音,人耳的听觉范围从刚能听见的下限声压 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ (相应的声强为 $2 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$),到使耳膜感到疼痛的上限声压 $2 \times 10 \text{ Pa}$ (相应的声强为 1 W/m^2),可见人耳容许的声压相差一百万倍(声强相差一万亿倍)。所以,用声压或声强来表示声音的强弱,数字太长,很不方便。同时,人的听觉与声压、声强不是成正比例关系,而是近似地与它们的对数值成正比。在声压较低时,稍有变化,人耳可以区别;在声压较高时,变化必须很大才会被感觉到。因此,常采用按对数方式分级的办法来表示声音大小,这就是声压级、声强级、声功率级。

声压级表示被测声压有效值 P 与基准参考声压 P_{ref} 的相对关系,记为 L_p ,单位为分贝 (dB),即

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad (9-4)$$

空气中参考声压 $P_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$,为 1kHz 时的听阈声压。低于这一声压值的声音人耳就听不见了,听阈声压的声压级为 0dB。在房间中高声谈话声(相距 1m 处)约 68~74dB,飞机发动机的声音(相距 5m 处)约 140dB,人耳对声音强弱的分辨能力大于 0.5dB。水中 $P_{\text{ref}} = 1 \mu\text{Pa}$ 或 $P_{\text{ref}} = 1 \text{ Pa}$ 。

(5) 声强级 (L_I) 声强级 L_I 是指测量的声强 I 与基准参考声强 I_{ref} 的相对关系,记为 L_I ,单位为分贝 (dB),即

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad (9-5)$$

这里的基准声强 I_{ref} 不能任意选定,必须考虑它应跟声压基准 P_{ref} 相一致。空气中, $P_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 与 $I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 相对应,为 1kHz 时的听阈声强值。水中若基准声压 $P_{\text{ref}} = 1 \mu\text{bar}$,则对应基准声强 $I_{\text{ref}} = 6.76 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ 。

(6) 声功率级 (L_W) 声功率级是指测量的声功率 W 与基准参考声功率 W_{ref} 的相对关系,记为 L_W ,单位为分贝 (dB),即

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_{\text{ref}}} \quad (9-6)$$

这里, W_{ref} 取值是独立的,它与基准声压值或基准声强没有关系,这是因为声功率级是对声源而言的,而声压级与声强级都是对声场而言的。为了计算简便,在空气中,通常取 $W_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ W}$,表示 1kHz 时听阈声功率值,水中 $W_{\text{ref}} = 1 \text{ W}$ 。

根据平方反比定律,在自由场中,接收点与声源的距离每增加一倍,声压级下降 6dB。根据这一特性,可以对其进行估算。

声压级、声强级、声功率级,与声强、声压和声功率的概念不同,以分贝为单位的各种“级”,只有相对的意义,无量纲,其数值的大小与所规定的基准值有关。因此,当使用以分贝为单位的各种“级”时,都同时标明所用的基准值。由于在一定条件下,声压级、声

强级、声功率级在数值上是相等的,因此,可将三者统一用声级表示。

4. 声波的衰减

声波在介质中传播时,随着传播距离的增加,能量逐渐衰减。引起声波在介质中传播衰减的原因,可以归纳为扩展损失、吸收损失与散射损失。扩展损失是指声波波阵面在传播过程中不断扩展而引起的声强衰减,也称为几何衰减;吸收损失通常是指在均匀介质中,由于介质黏滞、热传导以及其他弛豫过程引起的声强衰减;散射损失是指在流体介质中存在悬浮粒子,固体介质颗粒界面以及介质不均匀性等,引起的声波散射和声强衰减。

(1) 扩展损失 在理想介质中,一般把扩展引起的声能衰减 TL (单位: dB) 写成

$$TL = n \times 10 \lg r \quad (9-7)$$

式中 r ——传播距离。在不同的传播条件下, n 取不同的数值。例如

平面波传播,无扩展损失, $n=0$ 。

柱面波传播,声强与传播距离 r 成反比, $n=1$ 。

球面波传播,声强随 r^2 反比减小, $n=2$ 。

(2) 吸收系数 在介质中,由于吸收和散射引起的声传播衰减往往同时存在,很难把它们区分开来,因此常用式 (9-8) 描述这两种因素引起的声能衰减规律为

$$TL = \alpha r \quad (9-8)$$

式中的 α 为吸收系数,与介质的热导性、黏滞性及弹性滞后等因素有关,因此吸收系数 α 因介质材料的性质而异,一般颗粒越粗、频率越高衰减越大,吸收系数往往会限制声探测厚度。

那么声波的总传播衰减(扩散加吸收)可表示为

$$TL = n \times 10 \lg r + \alpha r \quad (9-9)$$

5. 声波的多普勒效应

声波的多普勒效应与光的多普勒效应相类似。当声源和声接收器在连续介质中有相对运动时,声接收器接收到的声波频率与声源发出的频率不同,两者靠近时频率升高,远离时频率降低,这种现象称为声波的多普勒效应。

如果在 S 有一声源,发出一频率为 f_s 的声波,在介质中的传播速度为 c ,波长为 λ 。那么,当接收点与发射点和介质都处于静止状态时,接收点所收到的频率将与发射频率完全相同;如果接收点以速度 v_0 与声波传播方向同向运动,此时声波相对于运动着的接收点有速度 $(c - v_0)$,这样接收点所收到的频率为

$$f_0 = f_s \frac{c - v_0}{c} \quad (9-10)$$

假如接收点不动,而声源以速度 v_s 运动,则在 $1s$ 内声源发出了 f_s 次振动,但第一次是 S 点发出的,到接收点接收到第 f_s 次振动时声源却已经前进 v_s 的距离,因此 f_s 次振动就像只通过 $(c - v_s)$ 距离一样。而对接收点来说,声波仍以介质中的声速 c 传来,所以接收到的波长如同挤紧了的波长 $\lambda' = (c - v_s)/f_s$ 一样。所以,接收点感觉到的频率 f_s 为

$$f_0 = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\frac{c - v_s}{f_s}} = f_s \frac{c}{c - v_s} \quad (9-11)$$

综合上述两种情况,就得到发射源和接收点同时对介质做相对运动时,接收点所收到的频率的表达式,即

$$f_0 = f_s \frac{c - v_0}{c - v_s} \quad (9-12)$$

其中多普勒频移为

$$f_0 - f_s = f_s \left(\frac{c - v_0 - c + v_s}{c - v_s} \right) = f_s \left(\frac{v_s - v_0}{c - v_s} \right) \quad (9-13)$$

在以上公式中,所有速度的方向都在声源和接收点的连线上,如果速度方向不一致时,只要把有关速度在这方向上的分量代入公式,即可得相应的多普勒效应。

9.1.2 声敏传感器的工作原理

声敏传感器也称为电声换能器,是指通过某种物理效应,将在气体、液体或固体中传播的机械振动声信号转换成电信号的器件或装置,它用接触或非接触的方法检出信号。声敏传感器的种类很多,按测量原理可分为阻抗变换型、压电型、电动型、电致伸缩型、电磁变换型、静电型和磁致伸缩型等。

1. 阻抗变换型声敏传感器

按照转换原理将这类传感器分为接触阻抗型和阻抗变换型两种。接触阻抗型声敏传感器的一个典型实例是炭粒式送话器,其工作原理图如图 9-3 所示。当声波经空气传播至膜片时,膜片产生振动,使膜片和电极之间炭粒的接触电阻发生变化,从而调制通过送话器的电流,该电流经变压器耦合至放大器经放大后输出。阻抗变换型声敏传感器是由电阻丝应变片或半导体应变片粘贴在膜片上构成的。当声压作用在膜片上时膜片产生形变,使应变片的阻抗发生变化,检测电路将这种变化转换为电压信号输出从而实现声-电的转换。

2. 压电型声敏传感器

压电型声敏传感器是利用压电晶体的压电效应制成的。图 9-4 是压电型声效传感器的结构图。压电晶体的一个极面和膜片相连接,当声压作用在膜片上使其振动时,膜片带动压电

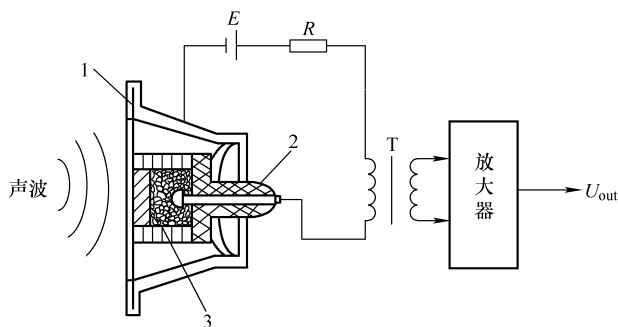


图 9-3 炭粒式送话器的工作原理图

1—膜片 2—电极 3—炭粒

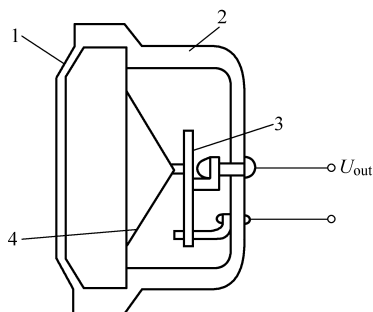


图 9-4 压电型声效传感器的结构图

1—带孔护盖 2—外壳 3—压电晶体 4—膜片

晶体产生机械振动,压电晶体在机械应力的作用下产生随声压大小变化而变化的电压,从而完成声-电的转换。压电型声敏传感器可广泛用于水声器件、麦克风 and 噪声计等方面。

3. 电磁变换型声敏传感器

电磁变换型声波传感器由电动式芯子和支架构成,有动磁式(MM型)、动铁式(MI型)、磁感应式(IM型)和可变磁阻式等。大多数磁性材料广泛使用坡莫合金、铁硅铝磁合金和珀明德铁钴系高导磁合金。

图9-5所示为动圈式话筒的结构。由磁铁和软铁组成磁路,磁场集中在磁铁心柱与软铁形成的气隙中。在软铁的前部装有振动膜片,其上带有线圈,线圈套在磁铁心柱上位于强磁场中。当振动膜片受声波作用时,带动线圈切割磁力线,产生感应电动势,从而将声信号转变为电信号输出。因线圈的圈数很少,其输出端还接有升压变压器以提高输出电压。

4. 电容式声敏传感器(静电型)

图9-6为电容式送话器的结构示意图。它由膜片、外壳及固定电极等组成,膜片为一片质轻而弹性好的金属薄片,它与固定电极组成一个间距很小的可变电容器。当膜片在声波作用下振动时,膜片与固定电极间的距离发生变化,从而引起电容量的变化。如果在传感器的两极间串接负载电阻 R_L 和直流电流极化电压 E ,当电容量随声波的振动变化时,在 R_L 的两端就会产生交变电压。

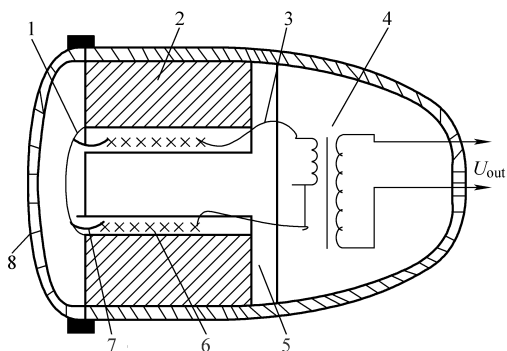


图9-5 动圈式话筒结构图

1—振动膜片 2—软铁 3—线圈引线 4—升压变压器
5—磁铁 6—线圈 7—连接件

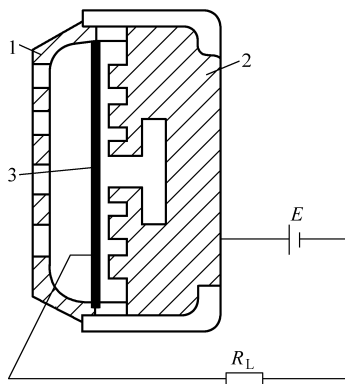


图9-6 电容式送话器结构示意图

1—护盖 2—固定电极 3—膜片

电容式声敏传感器的输出阻抗呈容性,由于其容量小,在低频情况下容抗很大,为保证低频时的灵敏度,必须有一个输入阻抗很大的变换器与其相连,经阻抗变换后,再由放大器进行放大。

5. 光电变换型声敏传感器

图9-7所示为光纤导管血压计,其压力检测元件(即振动片)配置在心音导管端部,探头比较小。它是用光纤束来传输光,将端部压力元件的位移由振动片反射回来,从而引起光量的变化,然后由光敏元件检测光量的变化以读出压力值。测量范围为 $-50 \sim 200\text{mmHg}$ (误差 $\pm 2\text{mmHg}$)、检测 $20 \sim 4000\text{Hz}$ 的心音和心杂音的发声部位以诊断疾病。其中压力检测元件还可使用电磁式、应变片式、压电陶瓷式等。

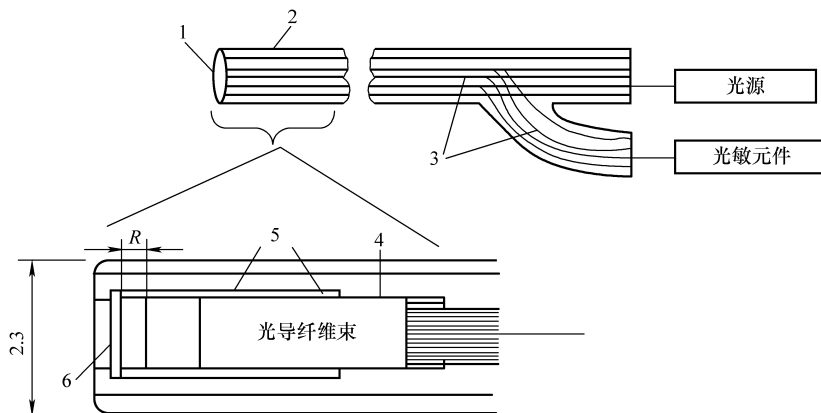


图 9-7 光纤导管血压计

1—振动片 2—心导管 3—玻璃纤维 4—套筒 5—金属圆筒 6—振动片

6. 音响传感器

音响传感器包括将声音载于通信网的电话话筒；将可听频带范围（ $20 \sim 2 \times 10^5 \text{ Hz}$ ）的声音真实地进行电变换的放音、录音话筒；从媒质所记录的信号还原成声音的各种传感器等。根据不同的工作原理（有电磁变换、静电变换、电阻变换、光电变换等），可制成多种音响传感器。其中水听器是一种用于水中接收声波的音响传感器。

声音在水中传播速度快，声波传输衰减小，而且水中各种噪声的分贝一般比空气中的声压分贝值约高 20dB。音响振动变换元件可换成电动、电磁、静电式，也可直接使用晶体和烧结体元件，水中的音响技术涉及测深、鱼群探测、海流检测及各种噪声检测等。

在海水中，电磁波传播时衰减很快，因而，到目前为止电磁波水下观察在水中尚未得到普遍使用，而水中声波在这方面则得到了广泛的应用。利用声波在海水中进行观察和通信的设备叫作水声换能设备，显然这种观察和通信设备必须有一个发射和接收声波的器件，这个器件叫作水声换能器。

一般来说，水声观测设备主要由两部分组成，一是电子设备——产生、放大、接收和指示电信号的部分，它具体包括发射机、接收机、指示器等；二是水声换能器——它的作用是完成电声信号的转换。图 9-8 是几种常用的水声设备的工作示意图。

由示意图可以看出，水声换能器是电子设备与水下信号声场之间相互联系的纽带，实际上水声观测设备中的换能器就像无线电、雷达的天线一样，都是起着耳目的作用，不同之处在于换能器是发射和接收声信号，而天线是发射和接收电磁波信号。

当水声换能器工作在发射状态时，它的任务就是把电的振荡能转换为机械系统的振动能，再推动水介质向外辐射声能量。当水声换能器工作在接收状态时，它的任务和发射状态时相反，即先把水介质中的声信号通过机械振动系统耦合到电路中并变成电信号，然后再把电信号送到接收或指示设备上。

目前在水声观测设备中最常用的是电致伸缩式换能器、压电式换能器和磁致伸缩式换能器。

专门被用来作为接收器的水声换能器，称为水听器。目前被广泛用于作水听器的是球形和小圆柱形压电陶瓷换能器，一般水听器工作在远低于它的谐振频率上。所以一般采用弹性

静力学的方法进行分析。

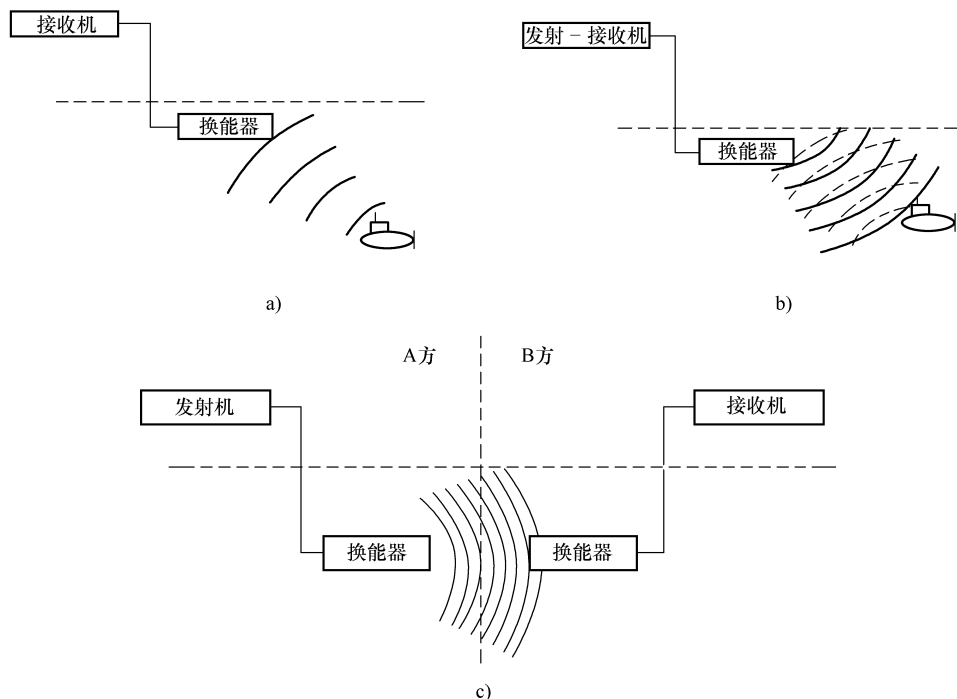


图 9-8 几种水声设备的工作示意图

a) 被动式声呐 b) 主动式声呐 c) 水声通信仪

此外还有录音拾音器、动圈式话筒、医用音响传感器等多种音响传感器。

7. 声矢量传感器

声矢量传感器一般由声压传感器和振动传感器（或加速度传感器、位移传感器以及声压梯度传感器等）复合而成，它可以空间共点、时间同步测得声场中某点处的声压和质点振速，或声压和质点加速度，或声压和声压梯度等空间声场中的标量和矢量信息。根据工作原理不同声矢量传感器分为压差式和同振式两大类。由于声矢量传感器可以同时获得声场的标量和矢量特性，所以目前已被广泛应用于探测、识别及通信中。

表 9-1 列出了一部分声敏传感器的构成和原理。

表 9-1 声敏传感器的构成和原理

分类	原理	传感器	构成
电磁变换	电动型	动圈式传声器、扁型传声器、动圈式拾音器	线圈和磁铁
	电磁型	电磁型传声器（助听器）、电磁型拾音器、磁记录再生磁	磁铁和线圈、高磁导率合金、或铁氧体和线圈
	磁致伸缩型	水中受波器、特殊传声器	镍和线圈、铁氧体和线圈

(续)

分类	原理	传感器	构成
静电变换	静电型	电容式传声器、驻极体传声器、静电型拾音器	电容器和电源、驻极体
	压电型	传声器、石英水声换能器	罗息盐、石英、压电高分子（PVDF）
	电致伸缩型	传声器、水声换能器、压电双晶片型拾音器	钛酸钡（BaTiO ₃ ）、锆钛酸铅
电阻变换	接触阻抗型	电话用炭粒送话器	炭粉和电源
	阻抗变换型	电阻丝应变型传声器、半导体应变变换器	电阻丝应变计和电源、半导体应变计和电源
光电变换	相位变化型	干涉型声传感器、DAD 再生用传感器	光源、光纤和光检测器、激光光源和光检测器
	光量变化型	光量变化型声传感器	光源、光纤和光检测器

注：传声器俗称麦克风。

9.1.3 声敏传感器的应用

1. 声控开关

声控开关是在特定环境光线下采用声响效果激发声传感器进行声电转换来控制用电器的开启，经过延时后能自动断开电源的节能电子开关。声控开关内含有传声器（声敏传感器）、晶体管、电容器等电子元件。在白天或光线较亮时，声控开关处于关闭状态；夜晚或光线较暗时，声控开关处于预备工作状态。当有人经过开关附近时，脚步声、说话声、拍手声均可将声控开关起动。目前声控开关已广泛用于楼道、建筑走廊、洗漱室、庭院等场所，可以节约用电，延长灯泡的使用寿命，是现代理想的新颖绿色照明开关。

2. 声传感器无线组网检测系统

在战术防空中，需要对低空和超低空目标进行识别，具体指对敌方战斗机、敌巡航导弹和武装直升机等进行识别，达到防空预警的目的。声敏传感器可以通过分析接收到低空目标飞行中辐射的噪声得到目标的方位角和属性信息，通过对声敏传感器的组网，融合网内多传感器信息，可以实现对敌方目标定位的目的。声敏传感器通过蜂窝布阵或随机布阵等方式组成传感器网络，相邻传感器探测范围相互覆盖，没有盲区，有效解决了雷达探测系统存在低空盲区的问题。声传感器不仅在战术防空中的应用前景广阔，在水下反潜战中也发挥重大作用。将固定式水下声传感器系统布置在海上咽喉要道，通过监测分析水下航行体的辐射噪声，远距离探测敌人的潜艇，以确保航母及其舰船免受敌人潜艇攻击。

9.2 声表面波传感器

9.2.1 声表面波基本概念

1. 声表面波

声表面波（surface acoustic wave，SAW）是在固体半空间表面存在的一种沿表面传播，

能量集中于表面附近的弹性波,最早是由英国物理学家瑞利在 1886 年研究地震波过程中发现的一种能量集中于地表面传播的声波。严格意义上说,声表面波泛指沿表面或界面传播的各种模式的波,不同的边界条件和传播介质条件可以激发出不同模式的声表面波,如瑞利波、乐甫波、广义瑞利波、拉姆波等。各种模式的声表面波被用于传感器领域,利用它们各自的不同特点发挥着不同的作用。

2. 声表面波的类型

(1) 瑞利波 SAW 技术所应用的绝大部分是这种类型的波,瑞利波质点的运动是一种椭圆的偏振,它是相位差为 90° 的纵振动和横振动合成的结果。表面质点做反时针方向的椭圆振动,其振幅随离开表面的深度而迅速衰减。因此瑞利波能量集中在约一个波长深的表面层内,频率越高,集中能量层越薄。这一特点使声表面波较体波(横波、纵波)更易获得高声强,同时该特点也使基片背面对 SAW 传播的影响很小,因而就 SAW 器件本身而言,对基片的厚度及背面质量无严格要求。但若用该器件做力传感器,则应根据设计严格控制基片厚度。

在各种模式的声表面波传感器中,由于瑞利波最容易激发,机电耦合系数高,且器件工艺简单,被广泛地用于流量、压力、湿度、气体等物理量的检测。然而,由于瑞利波的质点振动位移在径向面内具有沿表面法向的分量,在液体环境中使用时,会向液体中辐射声能量进而引起很大的衰减。因此,瑞利波传感器无法在液体环境中使用,需要选用其他模式的声波传感器。

(2) 乐甫波 在 SAW 器件中,常见到一种复合结构,即在基片上面覆盖一层薄膜。在这种情况下存在两种类型的波,一是质点作椭圆偏振的瑞利型波,另一个是当薄膜材料的体横波速度小于基片材料的体横波速度时,在表面层的边界经过多次全反射而被收集在表面层中的水平偏振剪切波,被称为乐甫波。

由于乐甫波器件是在压电基片上生长一层波导层而形成的,比起基片厚度属于半无限大(相对于波长),所以它坚固耐用。同时,乐甫波只在表面层传播,不会向深度方向传播,因此乐甫波传感器不仅适用于在气体环境中使用,也适应于液体环境中。尤其在液体环境中,可以说乐甫波传感器是最佳选择。

(3) 广义瑞利波(瑞利型波) 广义瑞利波与乐甫波往往同时发生,当基体上不存在薄膜时,基体中传播的即为瑞利波,当膜层增厚或频率增高时,薄膜中质点做椭圆偏振,由于该波的振动形式与瑞利波相近,因此被称为广义瑞利波。

(4) 拉姆波 这是一种在薄板中传播的板波,只产生在大约一个波长的薄板内,在板的两表面和中部都有质点的振动,声场遍及整个板的厚度。薄板两表面的质点振动是纵波和横波成分之和,运动轨迹为椭圆形,长轴与短轴的比例取决于材料的性质。板波可以分为对称型和非对称型两种。

基于拉姆波模式的波传感器有着本身独特的优点,它的整体质量小,更容易受外加质量、压力等参数影响,因此灵敏度比其他形式的声波传感器都要高;非压电基底薄,因而等效机电耦合系数大;此外,拉姆波在低频段的声速低于液体中声速,不会向液体中辐射声能量而引起衰减,也适于制作液体传感器。但拉姆波传感器制作工艺最为复杂,且牢固性最差,目前还很难实现拉姆波传感器的市场化。

3. 声表面波的特性

(1) 反射及模式转换 在声表面波传播的表面上常会出现声阻抗不连续的情况,如压电晶体表面蒸上金属条,金属化区域由于电场短路而使其声速比自由表面区域小;或因金属条有质量加载而使声阻抗发生变化;或因表面刻有沟槽而使声阻抗不连续等。声表面波与一般波动一样遇到声阻抗不连续便会发生反射,入射波除了以瑞利波形式反射回来外,还有一部分能量反射时会转换成体波,这种现象称为模式转换。

(2) 波束偏离与衍射效应 在各向异性固体中,波的相位传播方向与能量传播方向一般不一致,这种现象被称为波束偏离。两者之间的夹角称为偏离角度。由于表面波器件绝大部分是用各向异性的单晶做基片,所以存在波束偏离现象。

与一般波动一样,声表面波也存在衍射现象。衍射会造成沿垂直于固体法向方向上的振幅与相位发生变化。

对于具有一定宽度的波束,会同时存在波束偏离与衍射效应,在传播过程中,波束的方向及其振幅与相位会发生变化。这些变化在设计 SAW 器件时应加以考虑。

(3) 声表面波的衰减 波束偏离与衍射效应会引起波束能流方向改变或发散,使接收器不能全部截获到发射波束的能量,因而导致器件插入损耗的增加。此外,还存在三种原因会引起传播过程中声表面波的衰减,即固有衰减、散射衰减和辐射衰减。

固有衰减是声表面波与材料热声子相互作用引起的衰减。其大小取决于材料的性质,与温度和频率有关,温度越低衰减越小,一般与频率的二次方成正比。

散射衰减是因材料表面的晶体缺陷、杂质、刻痕等引起表面波散射所产生的衰减,其大小与材料质量和抛光工艺水平有关,与温度无关。

辐射衰减是表面波在传播时不断向气体中辐射声波引起的衰减,其值与表面上气体性质和气压有关。一般可采取真空密封的方法来消除这种衰减。

9.2.2 声表面波传感器工作原理

SAW 传感器的核心部件是 SAW 振荡器,该振荡器是由 SAW 谐振器(简称为 SAWR)或 SAW 延迟线与放大器以及匹配电路组成。SAW 传感器的基本原理是在压电材料表面形成叉指换能器,构成 SAW 谐振器或 SAW 延迟线,适当设计 SAW 振荡器,使其对微细的被测量敏感。一般是使被测量作用 SAW 的传播路径,引起 SAW 的传播速度发生变化,从而使振荡频率发生变化,通过频率的变化检测被测量。

1. SAW 叉指换能器

(1) 叉指换能器的基本结构 图 9-9 所示为叉指换能器的基本结构,它由若干淀积在压电衬底材料上的金属膜电极组成,这些电极条互相交叉放置,两端由汇流条连在一起,其形状如同交叉平放的两排手指,故称为均匀(或非色散)叉指换能器。叉指周期 $T = 2a + 2b$ 。两相邻电极构成一电极对,其相互重叠的长度为有效指长,即换能器的孔径,记为 W 。若换能器的各电极对重叠长度相等,则称为等孔径(或等指长)叉指换能器。

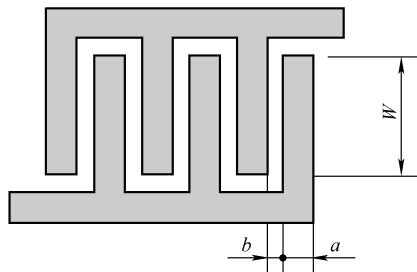


图 9-9 叉指换能器的基本结构

(2) 叉指换能器激励 SAW 的物理过程 利用压电材料的逆压电效应与正压电效应, 叉指换能器既可以作为发射换能器, 用来激励 SAW, 又可作为接收换能器, 用来接收 SAW。因而这类换能器是可逆的。

当在发射叉指换能器上施加适当频率的交流电信号后, 在压电基片内部的电场分布如图 9-10 所示。该电场可分解为垂直与水平两个分量 E_V 和 E_H 。由于基片的逆压电效应, 这个电场使指条电极间的材料发生形变, 使质点发生位移, E_H 使质点产生平行于表面的压缩(膨胀)位移, E_V 则产生垂直于表面的剪切位移。这种周期性的应变就产生沿叉指换能器两侧表面传播出去的 SAW, 其频率等于所施加电信号的频率。

SAW 传播至接收叉指换能器, 通过正压电效应将 SAW 转换为电信号输出。发射叉指换能器和接收叉指换能器构成了 SAW 器件, 如图 9-11 所示。

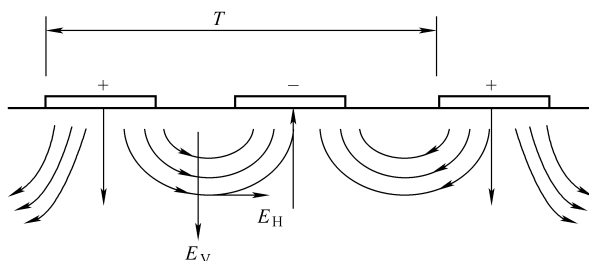


图 9-10 叉指电极下某一瞬间的电场分布

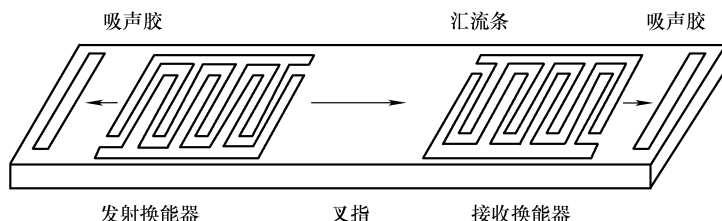


图 9-11 SAW 器件示意图

2. SAW 振荡器

SAW 振荡器有两种实现方式。一种以 SAW 谐振子 (Surface Acoustic Wave Resonator, SAWR) 为核心, 一种以 SAW 延迟线为核心, 再配以适当的放大器组成。

SAWR 由一对叉指换能器及金属栅条式反射器构成, 如图 9-12 所示。两个叉指换能器一个用作发射 SAW, 一个用作接收 SAW。叉指换能器及反射器用半导体集成工艺将金属铝沉积在压电基底材料上, 再用光刻技术将金属薄膜刻成一定尺寸及形状的特殊结构。

SAW 延迟线由两个叉指换能器组成。由发射换能器产生 SAW, 利用声波的行波特性, 在波的传播方向上, 设置的另一个叉指换能器将接收到的声波转换

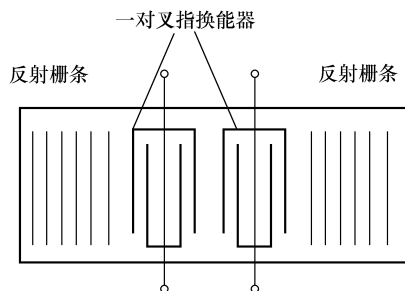


图 9-12 SAWR 基本结构

成电信号输出。

SAW 延迟线型是属于传输型器件,在这些叉指电极中的任何反射都会使得器件性能恶化。而 SAW 谐振器型正是利用这种 SAW 的反射性质,使声波在反射阵列之间进行相干反射、相互叠加,在腔体内形成驻波,发生共振,使振荡幅度达到最大。这样,在一对反射阵列之间就构成了谐振腔,将 SAW 限制在谐振腔内以得到能量存储的目的。因而,SAW 谐振器的 Q 值可以做得很高,插入损耗很小。通常,谐振器的典型工作带宽是在 $500 \leq f/\Delta f \leq 50000$ 范围内,而 SAW 延迟线的工作带宽一般为 $2 \leq f/\Delta f \leq 500$ 。由于 SAW 谐振器的优异性能,用它制作的振荡器的各方面性能均超过 SAW 延迟线型振荡器。

声表面波传感器都是基于声表面波振荡器的频率特性实现的,即基于振荡器的频率随着被测参量的变化而改变来实现对被测量的检测的。

以声表面波振荡器为核心并配以必要的电路和机构,可以做成测量机械应变、应力、压力、微小位移、作用力、流量及温度等传感器;利用通用的机理,通过合适的结构设计,也可以做成 SAW 加速度计;在两叉指换能器电极之间涂覆一层对某种气体敏感的薄膜,也可制成各种 SAW 气体传感器、湿度传感器等。总之,用 SAW 器件制作测量各种物理量和化学量传感器,具有十分广阔的应用前景。

9.2.3 声表面波传感器的特点

1965 年,美国的 R. M. White 和 F. M. Voltmov 发明了能在压电材料表面激励 SAW 的叉指换能器之后,大大加速了 SAW 技术的发展,相继出现了许多各具特色的 SAW 器件,使 SAW 技术逐渐应用到许多技术领域。由于它符合传感器向小型化、数字化、智能化和高精度的发展方向,因而受到人们的高度重视。SAW 传感器主要有以下优点:

- 1) 高准确度、高灵敏度。SAW 传感器非常适用于微小量程的测量。
- 2) 结构工艺性好,便于批量生产。SAW 传感器是平面结构,设计灵活;片状外形,易于组合和实现单片多功能化;易于实现智能化;能获得良好的热性能和机械性能。SAW 传感器的关键部件——SAW 器件,包括谐振子或延迟线,极易集成化、一体化。由于 SAW 传感器易于大规模生产,故可以降低成本。
- 3) 体积小,质量小,功耗低,易于集成。由于 SAW 90% 以上的能量集中在距表面一个波长左右的深度内,因而损耗低。此外,SAW 传感器电路相对简单,所以整个传感器的功耗很小,这对于煤矿、油井或其他有防爆要求的场合特别重要。
- 4) 与微处理器相连,接口简单。SAW 传感器直接将被测量的变化转换成频率的变化(为准数字式信号),便于传输与进一步处理。

9.2.4 声表面波传感器的应用

1. SAW 压力传感器

SAW 压力传感器的开发始于 20 世纪 70 年代后期。目前已较广泛地应用于信号处理、雷达、通信、电子对抗和广播电视等领域。

SAW 压力传感器通常采用周边固定的石英膜片为敏感元件,图 9-13 所示为 SAW 压力传感器的结构原理图。

当外界压力加到石英膜片上时,膜片内部各点的应力发生变化,而膜片的弹性常数、密

度随应力的变化而变化。SAW 的传播速度是弹性常数和密度的函数,因而,SAW 速度也将发生变化;同时,膜片因受力而产生的形变还导致 SAW 谐振器的结构尺寸的变化,从而造成 SAW 的波长等性能参数的改变。SAW 速度和 SAW 器件结构尺寸的变化最终导致 SAW 谐振器中心频率的偏移,振荡器的振荡频率也随之发生改变。因此通过测量 SAW 的输出频率偏移,即可得知压力的大小。

声表面波压力传感器已在心脏肺部驱动以及生物技术、工艺流程中得到较好的应用。但在一些工艺流程控制以及机动车轮胎压力控制中,由于功耗而引起传感器的使用稳定性以及寿命等问题限制了这种有源压力传感器的应用。近年来研制的无线 SAW 压力传感器在轮胎压力监控系统中得到了很好的应用。

2. SAW 气敏传感器

SAW 气敏传感器是以 SAW 延迟线振荡器为基础的。在延迟线的两个叉指换能器之间,即 SAW 的传播路径上敷设一层具有特殊选择性的吸附膜,该吸附膜只对所需敏感的气体有吸附作用。SAW 气敏传感器的敏感机理随吸附膜的不同而不同。当薄膜是绝缘材料时,它吸附气体引起吸附膜密度的变化,进而引起 SAW 延迟线振荡器频率的偏移;当薄膜是导体或金属氧化物半导体膜时,主要是由于电导率的变化引起 SAW 延迟线振荡器频率的偏移。

目前选择性的吸附膜主要有三乙醇胺薄膜(敏感 SO_2)、Pd 膜(敏感 H_2)、 WO_3 膜(敏感 H_2S)、酞菁膜(敏感 NO_2)等。

为了实现对环境温度变化的补偿,SAW 气敏传感器大多采用双通道延迟线结构。

图 9-14 所示为二氧化硫(SO_2) SAW 气敏传感器的原理结构图。两个相同的延迟线并列设置在同一基片上,并与放大器连接成 SAW 延迟线振荡器,其中一个延迟线的声传播路径上敷有三乙醇胺,它对 SO_2 有吸附作用。整个基片放在一个容量为 144ml 的密封盒中,盒内保持室温。盒内充入 SO_2 气体后,三乙醇胺敷层吸附 SO_2 ,使声传播路径的表面性质改变,从而导致振荡器频率也随之改变。另一个没有敷层的振荡器的频率不受 SO_2 的影响,故两个振荡器的输出经混频后,得到的差频随 SO_2 含量的多少而变化。

采用双通道结构,温度的影响得到了补偿。该传感器能够分辨 SO_2 的最低浓度为 0.07ppm ($1\text{ppm} = 10^{-6}$),当浓度再降低时,差频输出没有重复性。能检测的浓度上限为 22ppm,当浓度高于该值时,SAW 由于敷层吸收 SO_2 过多衰减太大,以致振荡器不能起振。把敷层暴露在不含 SO_2 的大气中,几分钟后敷层中的 SO_2 即被排除。

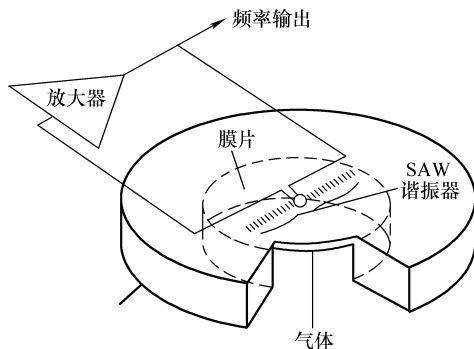


图 9-13 SAW 压力传感器的原理结构图

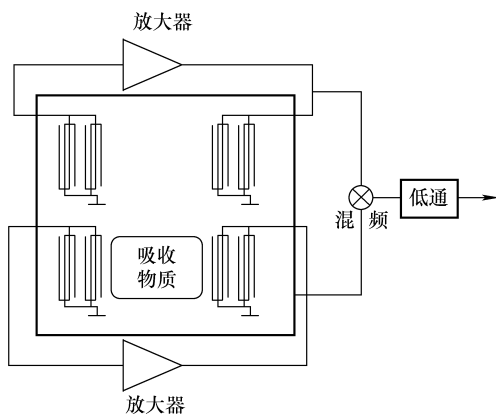
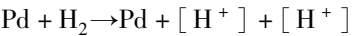


图 9-14 气敏传感器的原理结构

一种 SAW 氢气传感器的结构与上述传感器相似。敏感膜采用钯（Pd）膜，厚度为 $0.2 \sim 1\mu\text{m}$ ，相当于 SAW 波长的 $0.4\% \sim 2\%$ 。该器件暴露在含有 $0.1\% \sim 10\%$ 的 H_2 和 N_2 气体中，其振荡频率随气体浓度发生变化。若将它放在 O_2 气体中，振荡频率复原。钯膜吸附氢的反应原理是通过氢的结合，在钯表面由于催化反应导致产生质子转移，使之导电。催化反应式为



质子 $[\text{H}^+]$ 成为导电离子，这样在 Pd 薄膜中因为吸附氢和解吸氢而改变了膜密度和弹性特性，从而引起表面波速度的变化。实验证实，Pd 膜吸附氢气时，声速增加，氢气浓度增大，传播速度也增大，整个反应过程是可逆的。

自 1979 年 Wohltjen 和 Dessy 首次报道了 SAW 气敏传感器以来，经过 30 多年的研究与发展，结合多种敏感膜材料已研制出针对 SO_x 、 NO_x 、 CO_x 、 H_2S 、丙酮、甲醇等多种有毒污染气体检测的 SAW 气敏传感器，广泛应用于环境监测、临床分析等民用领域。

3. SAW 加速度传感器

当外界加速度作用到敏感质量块上，根据牛顿第二定律，敏感质量块将加速度转换成力作用到悬臂梁或膜片上，从而使梁或膜片上各处的应力发生变化，而应力的变化会改变 SAW 的传播速度，从而改变 SAW 谐振器的谐振频率。因此，SAW 加速度传感器实质上是加速度 - 频率变换器。通过频率的测量，就可以知道加速度的大小。

SAW 加速度传感器结构形式很多，图 9-15 分别是推拉式和悬臂梁式 SAW 加速度计结构示意图。可根据对传感器性能的要求、加工装配的工艺性、调整的方便性、使用的可靠性等加以合理设计。

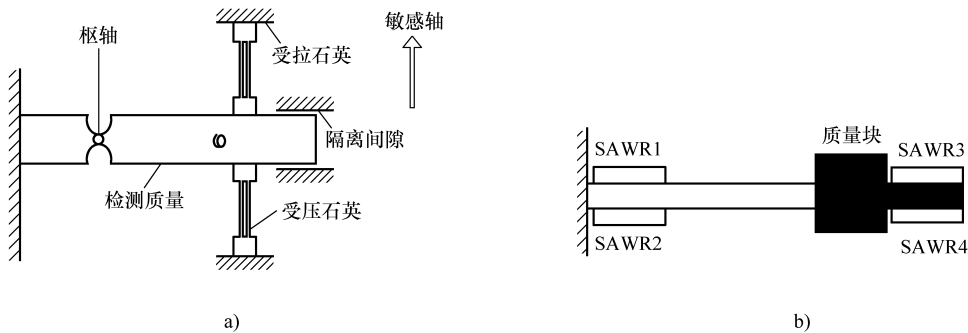


图 9-15 SAW 加速度传感器结构示意图
a) 双晶体推拉式加速度计 b) 悬臂梁式 SAW 加速度计

4. SAW 流量传感器

图 9-16 是 SAW 流量传感器的原理示意图，其核心是 SAW 延迟线型振荡器。在同一压电基片上有一对叉指换能器，其中一个为发射器，另一个为接收器，由它们组成了 SAW 延迟线。延迟线输出信号通过放大器正反馈到它的输入端，组成 SAW 延迟线型振荡器。在两个叉指换能器之间设置有加热元件，将基片加热至高于环境温度的某一温度值。当有流体经由基体表面通过时，带走部分热量，从而降低了基片的温度，使延迟器件的延迟时间发生变化，进而引起 SAW 振荡器振荡频率的偏移。通过检测 SAW 振荡器输出频率的变化来测量流

体流速的大小，进而计算出流量的大小。这就是 SAW 流量传感器的基本工作机理。

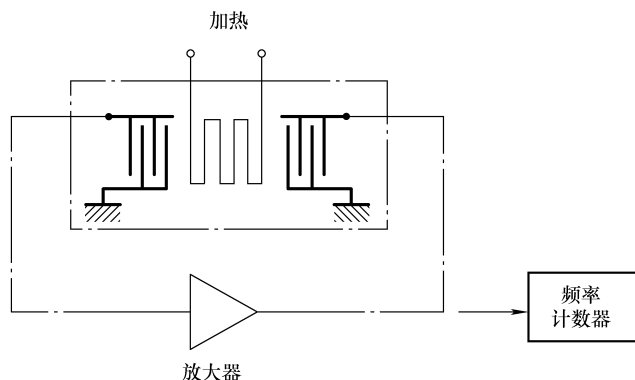


图 9-16 SAW 流量传感器的原理示意图

9.3 超声波传感器

通常，高于 20000Hz 的高频声波称为超声波，超声波传感器是利用超声波的特性实现对被测量的检测的。当超声波从一种介质入射到另一种介质时，由于在两种介质中的传播速度不同，在介质界面上会产生反射、折射和波形转换等现象。超声波在介质中传播时与介质作用会产生机械效应、空化效应和热效应等，超声波的这些特性，使其在检测技术中获得广泛应用，如超声波无损探伤、厚度测量、流速测量、超声波测距等。

9.3.1 超声波的基本特性

1. 超声波的波型及其转换

由于声源在介质中施力方向与波在介质中传播方向的不同，超声波的波型也分为纵波、横波和表面波三种主要波型，其性质和声波完全相同，参见 9.1.1 节。纵波、横波及表面波的传播速度取决于介质的弹性系数及介质密度，气体中声速为 344m/s，液体中声速在 900 ~ 1900m/s。

当纵波以某一角度入射到第二介质（固体）的表面上时，除有纵波的反射、折射外，还发生横波的反射和折射，如图 9-17 所示。在一定的情况下，还能产生表面波。各种波型均符合几何光学中的反射定理，即

$$\frac{C_L}{\sin \alpha} = \frac{C_{L1}}{\sin \alpha_1} = \frac{C_{S1}}{\sin \alpha_2} = \frac{C_{L2}}{\sin \gamma} = \frac{C_{S2}}{\sin \beta} \quad (9-14)$$

式中 α ——入射角；

α_1, α_2 ——纵波和横波的反射角；

γ, β ——纵波和横波的折射角；

C_L, C_{L1}, C_{L2} ——入射介质、反射介质和折射介质内的纵波速度；

C_{S1}, C_{S2} ——反射介质和折射介质内的横波速度。

2. 超声波的反射和折射

当超声波从一种介质传播到另一种介质时，在两介质的分界面上将发生反射和折射，如

图 9-18 所示。超声波的反射和折射满足波的反射定律和折射定律，即

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\alpha'} = \frac{C_1}{C_1'} \quad (9-15)$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{C_1}{C_2} \quad (9-16)$$

式中 α, α', β ——入射角、反射角和折射角；

C_1, C_1', C_2 ——入射波、反射波和折射波的速度。

当入射波和反射波的波型相同、波速相等时，入射角 α 等于反射角 α' 。

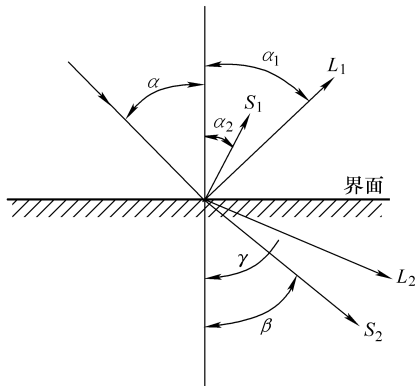


图 9-17 波型转换图

L —入射纵波 L_1 —反射纵波 L_2 —折射纵波

S_1 —反射横波 S_2 —折射横波

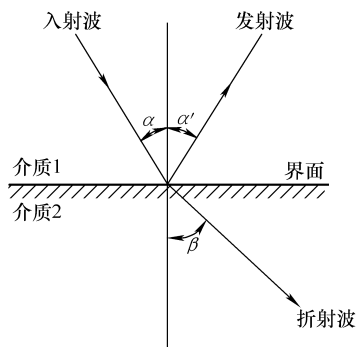


图 9-18 超声波的反射和折射

3. 超声波的衰减

超声波在介质中传播时，随着距离的增加，能量逐渐衰减。其声压和声强的衰减规律符合声波的衰减规律，如式 (9-7) 和式 (9-8) 所示。

9.3.2 超声波传感器的工作原理

超声波传感器有发送器和接收器，但一个超声波传感器也兼有发射和接收超声波的双重作用，即为可逆元件。超声波传感器按其工作原理可以分为电致伸缩式、磁致伸缩式、电磁式等。实际使用中最常见的是电致伸缩式。

1. 电致伸缩式超声波传感器

电致伸缩式超声波传感器是利用电致伸缩效应即压电效应工作的，因而也称为压电式超声波传感器或压电式超声波探头。

压电式超声波发生器是利用逆压电效应工作的。在压电材料切片上施加交变电压，使它产生电致伸缩振动，而产生超声波。常用的压电材料有石英晶体、压电陶瓷和压电薄膜。

当外加交变电压的频率等于晶片的固有频率时产生共振，这时产生的超声波最强。压电式发射探头可以产生几十千赫到几十兆赫的高频超声波，其声强可达几十瓦/厘米²。

压电式超声波接收器是利用正压电效应工作的，当超声波作用在压电晶片上时，使晶片伸缩，在晶片的两个界面产生交变电荷。接收器的结构和发生器基本相同，有时就用同一套

装置兼作发生器和接收器两种用途。

压电式超声波探头按其结构和使用的波型不同又可分为直探头（纵波探头）、斜探头（横波探头）、表面波探头、兰姆波探头、双晶探头、聚焦探头、水浸探头、空气传导探头和其他专用探头等。典型的压电式探头主要由压电晶片、吸收块、保护膜组成，其结构如图9-19所示。压电晶片多为圆板形，其厚度与超声波频率成反比。压电晶片的两面镀有银层，作为导电的极板。若晶片（锆钛酸）厚度为1mm时，自然频率约为1.89MHz；若厚度为0.7mm，自然频率为2.5MHz。这是常用的超声频率。

为避免压电片与被测试件直接接触而磨损晶片，在晶片下粘有一层软性保护膜或硬性保护膜。软性保护膜可采用厚度约0.3mm的薄塑料膜，它与表面粗糙的工件接触较好。而硬性保护膜可采用不锈钢片或陶瓷片。

吸收块用钨粉、环氧树脂和固化剂等浇注，又称阻尼块。它的作用是降低晶片的机械品质 Q ，吸收声能量，从而可限制脉冲宽度、减小盲区和提高分辨力。如果没有吸收块，当激励的电脉冲信号停止时，晶片将会继续振荡，加长超声波的脉冲宽度，使分辨力变差。吸收块的声阻抗等于晶片的声阻抗时，效果最佳。

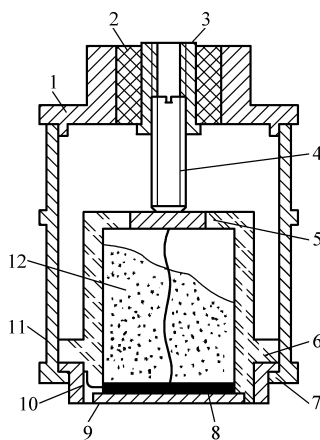


图9-19 压电式超声波探头的结构图

- 1—金属盖 2—绝缘柱 3—接触座
4—螺杆 5—接地片 6—晶片座
7—金属外壳 8—压电晶片 9—保护膜
10—接地铜圈 11—地线 12—吸收块

2. 磁致伸缩式超声波传感器

磁致伸缩式超声波发生器是利用磁致伸缩效应工作的，当铁磁材料置于交变磁场中，它就会产生机械尺寸的交替变化，即机械振动，从而产生超声波。磁致伸缩式超声波接收器是利用逆磁致伸缩效应工作的。当超声波作用到磁致伸缩材料上时，引起导磁特性发生变化。由于电磁感应，在磁致伸缩材料上所绕的线圈里就产生感应电动势。

9.3.3 超声波传感器的性能参数

描述超声波传感器的性能指标有工作频率、机电耦合系数、方向特性、阻抗特性、发射功率、灵敏度等。根据实际用处以及使用场合的不同，对超声波传感器性能提出不同的要求，对发射和接收用的传感器提出的要求也不一样。

1. 工作频率

超声波传感器的工作频率的选择不仅直接关系到传感器的频率特性和方向特性，也影响到传感器的发射功率、效率和灵敏度等重要性能指标。通常发射超声波传感器工作频率就等于它本身的谐振基频，这样可以获得最佳工作状态、取得最大的发射功率和效率；而接收用超声波传感器的工作频率是一个较宽的频带，同时要求传感器自身的谐振基频要比频带的最高频率还要高，以保证传感器有平坦的接收响应。

2. 方向特性

超声波传感器不论是用作发射还是接收，本身都具有一定的方向特性，不同应用的传感器对方向特性的要求也不同。对于一个发射传感器，其方向特性曲线的尖锐程度决定了它的

发射声能的集中程度；而对接收传感器而言，它的方向特性曲线的尖锐程度决定了其搜索空间内能接收的声能的角度范围。所以超声波传感器的方向特性的好坏直接关系到超声设备的作用距离。图 9-20 为某型超声波传感器的方向特性图，该传感器在较宽范围内具有较高的检测灵敏度，适用于物体检测与报警装置等。

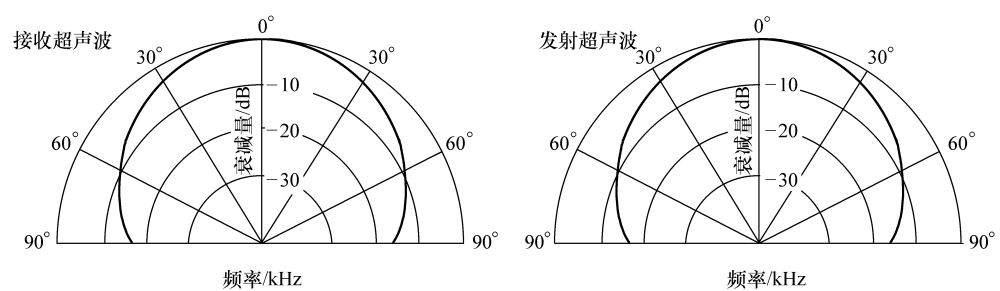


图 9-20 超声波传感器的方向特性

3. 频率特性

传感器的频率特性是指传感器的一些重要参数指标随工作频率变化的特性。例如接收传感器的接收灵敏度随工作频率变化的特性，发射传感器的发射功率和效率随工作频率的变化特性。不同的传感器的频率特性设计要求不同。图 9-21 为超声波传感器阻抗随工作频率的变化特性曲线，负载阻抗很大时，频率特性是尖锐谐振的，并且在这个频率点上灵敏度最高。如果阻抗过小，频率特性变得较缓，通带较宽，灵敏度也随之降低。超声波传感器在使用时，应与输入阻抗较高的前置放大器配合使用。

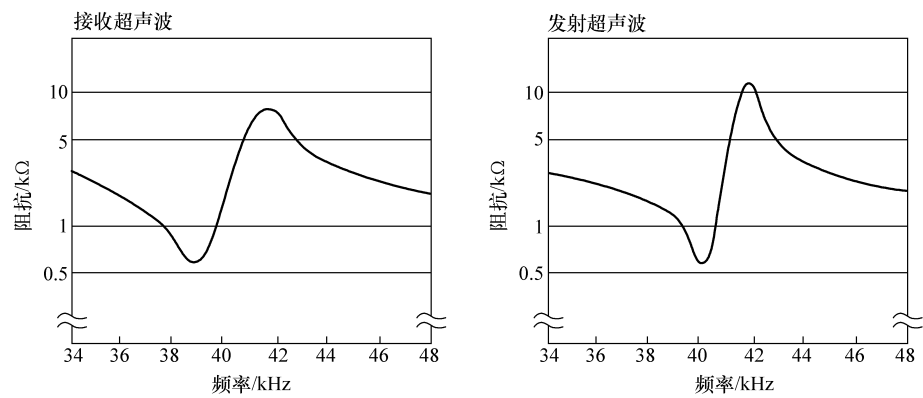


图 9-21 超声波传感器的阻频特性

4. 发射声功率

它是描述一个发射传感器在单位时间内向介质声场辐射声能多少的物理量，它的大小直接影响超声处理的作用效果。超声波传感器的发射声功率一般是随着工作频率而变化的，在其机械谐振频率时可以获得最大的发射声功率。

9.3.4 超声波传感器的应用

1. 超声测距传感器

从发射器发出的超声波，经目标反射后沿原路返回接收器所需的时间，即渡越时间。通过测量渡越时间，利用介质中已知的声速即可求得目标与传感器的距离。

超声测距传感器主要应用于物位、液位、导航和避障，其他还有焊缝跟踪，物体识别。

2. 超声波探伤仪

超声波探伤是无损探伤技术中的一种主要检测手段。它主要用于检测板材、管材、锻件和焊接等材料中的缺陷（如裂缝、气孔、夹渣等）、测定材料的厚度、检测材料的晶粒、配合断裂力学对材料使用寿命进行评价等。超声波探伤因具有检测灵敏度高、速度快、成本低等优点，因而得到人们普遍的重视，并在生产实践中得到广泛的应用。

3. 超声波流量计

超声波流量计的形式有多种，但工业上最常用的有传播时差法和多普勒法两种，两种流量计都用于液体测量。超声波在流体中传播时，在静止流体和流动流体中的传播速度是不同的，利用这一特点可以求出流体的速度，再根据管道流体的截面积，便可知道流体的流量。在实际应用中，为不影响管道内流体的流动状态，往往把传感器安装在管道外面，透过管壁发射和接收超声波。

4. 超声波诊断仪

超声波诊断仪是通过向体内发射超声波（主要采用纵波），然后接收经人体各组织反射回来的超声波并加以处理和显示，根据超声波在人体不同组织中传播特性的差异进行诊断的。由于超声波对人体无损害、操作简便、结果迅速、受检查者无不适感、对软组织成像清晰，因此，超声波诊断仪已成为临床上重要的现代诊断工具。超声波诊断仪类型较多，最常用的有 A 型超声波诊断仪、M 型超声波心电图仪和 B 型超声波断层显像仪等。

A 型超声波诊断仪又称为振幅型诊断仪，它是超声波最早应用于医学诊断的一门技术。A 型超声波诊断仪原理框图如图 9-22 所示。其原理类似示波器，所不同的是在垂直通道中增加了检波器，以便把正负交变的脉冲调制信号变成单向的视频脉冲信号。

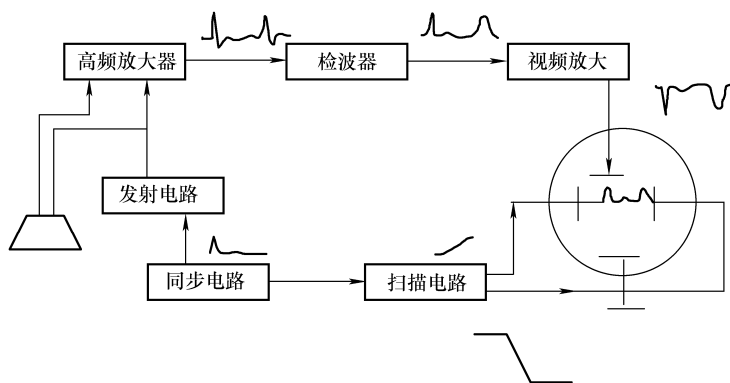


图 9-22 A 型超声波诊断仪原理框图

同步电路产生 50 ~ 2000Hz 的同步脉冲，该脉冲触发扫描电路产生锯齿波电压信号，锯

齿波电压信号的频率与超声波的频率相同，而且与视频信号同步。

发射电路在同步脉冲作用下，产生一高频衰减振荡，即产生幅度调制波。发射电路一方面将调幅波送入高频放大器放大，使荧光屏上显示发射脉冲（如荧光屏上的第一个脉冲）；另一方面将送到超声波探头，激励探头产生一次超声振荡。超声波进入人体后的反射波由探头接收转换成电压信号，该电压送到高频放大器放大、检波、功率放大，于是荧光屏上将显示出一系列的回波（如荧屏上的第二、第三个……脉冲），它们代表着各组织的特性和状况。

此外还有超声波测厚、超声波物位测量、超声波流量测量等应用。

9.4 次声波传感器

9.4.1 次声波基本特性

次声波又称亚声波，是一种人耳听不到的声波，频率范围在 $10^{-4} \sim 20\text{Hz}$ 之间；人类的活动如核爆炸、人工爆破、火箭起飞、飞机起降、奔驰车辆的振动等会产生相当强的次声波；人工还可以制造出声源——次声发生器，它的工作很像风琴管，具有较大的功率。次声波的传播遵循声波传播的一般规律，但由于它的频率很低，在传播时有其特殊性。

1. 传播距离远

传播速度和可闻声波相同，由于次声波频率很低，大气对其吸收甚小，当次声波传播几千千米时，其吸收还不到万分之几，所以它传播的距离较远，能传到几千米至十几万千米以外。

2. 穿透力强

次声波有很强的穿透能力，可以穿透建筑物、坦克、船只等障碍物。7000Hz 的声波用一张纸即可阻挡，而 7Hz 的次声波可以穿透十几米厚的钢筋混凝土。地震或核爆炸所产生的次声波可将岸上的房屋摧毁，次声如果和周围物体发生共振，能放出相当大的能量，如 4~8Hz 的次声能在人的腹腔里产生共振，可使心脏出现强烈共振和肺壁受损。

9.4.2 次声波传感器工作原理

次声波传感器就是能够接收或发射次声波的传声器。由于次声波的声压太小，只有几十到几百帕的数量级，因此，必须把其机械位移转化为电信号来分析次声波的各个物理特性。多种换能型的传感器都可以把机械能转化为电能，只要有足够低的下限频率就可用作次声波传感器，常见的有电容式、动圈式、波纹管膜盒型、光纤式等。

1. 电容式次声波传感器

图 9-23 为电容式次声波传感器。图 9-23a 是其基本结构示意图，主要由前腔声阻 R_1 、前腔声顺 C_1 、带膜片的支撑环、膜片声顺 CS 、极板、后腔声顺 C_2 、均压管声阻 R_2 、绝缘板、电缆插座及外壳等组成。膜片的厚度为 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 的镍箔，膜片与极板距离为 $50\mu\text{m}$ ，膜片与靠得很近的刚性后极板构成一个平行板电容器，其电容量为 C_0 ；声波作用时膜片振动使电容变化 ΔC ，进而转化成电压信号输出。图 9-23b 是等效电路图，其中 P 表示声压信号、 Q 表示在声压作用下膜片的体积位移。其中，前腔声阻 R_1 和前腔声顺 C_1 构成低通滤波

器,用来决定仪器的高频截止频率,且前腔声阻 R_1 只是在校准时用来与活塞发声器进行连接。当后腔体积和膜片张力固定时,低频特性主要由均压管声阻 R_2 决定。

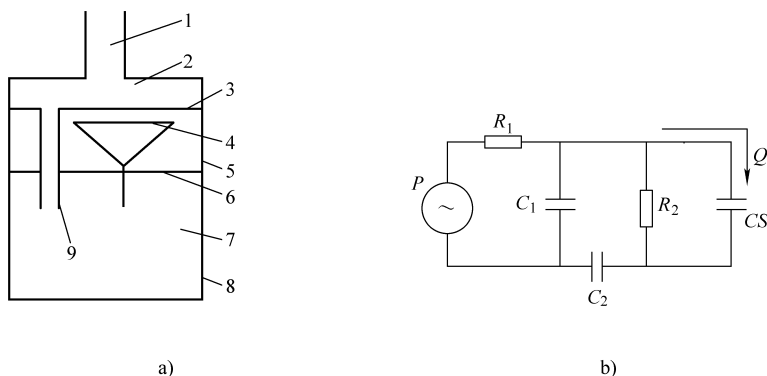


图 9-23 电容式次声波传感器

a) 基本结构示意图 b) 等效电路

1—前腔声阻 R_1 2—前腔声顺 C_1 3—膜片声顺 CS 4—后极板 5—支撑环
6—绝缘板 7—后腔声顺 C_2 8—外壳 9—均压管声阻 R_2

电容式次声波传感器具有体积小、频带宽、输出电压大、灵敏度高、频率响应好、长期稳定性好、可以直接与记录器或信号实时模数转换器连接等特点。它的频率响应为劲度控制,其系统的高频限取决于系统的劲度(即弹性的倒数),在第一共振频率以下可以有平直的响应,其下限频率能做得很低甚至为零赫兹;电容的劲度即膜片的张力可以很低,能工作于弹性区,不会因为外界影响(如温度、时间等)改变其弹性;而且,其换能元件为质量非常轻的薄膜,使传感器只对声波敏感(不超过 20Hz)而对振动不敏感,有很好的抗干扰性能。因此,非常适合用作次声波传感器,构建次声波测量阵列测定次声波的声源位置和传播特性。

2. 光纤次声波传感器

由以色列 Phone 公司生产的光纤麦克风(光纤次声波传感器,信号 MKM/FOM12),能够在复杂的环境中,如强电磁和放射性的领域中使用。这是由于该传感器是一种无源器件并且不含电子或金属成分,对电磁干扰反应不起任何作用。图 9-24 为光纤式次声波传感器工作原理示意图,光纤次声波传感器基于独特的光纤传感技术,光束通过光纤被传送到硅膜上,声音信号引起薄膜振动改变被反射的光学特性,然后被转换为电信号。光纤次声波传感器具有低于 1Hz 高达 1000Hz 的频率响应范围。具有很高的信噪比和小于 1% 总谐波失真的频率带宽。

光纤次声波传感器可在户外与户内操作,应用在特殊的温度和更高的频率范围条件下。它也能组成传感器阵列去应用,如声音定位、复杂环境声音检测(例如带电情况、油和气体位置探测、爆炸或高的射频),也可作为声波生命探测仪,用于探测地震、矿业、煤矿救援时幸存者发出的声波所引起的振动,包括拍打、刻划及呼喊的具体位置等。

此外,次声波传感器不仅能够检测次声,而且还具有传声功能,这也就要求相关人员要重视声学设计结构,通过完善其前腔、后腔的设计,确保系统在测量频率范围内具有良好的

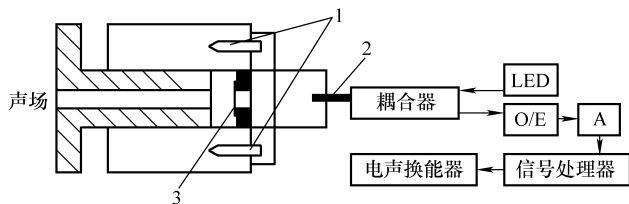


图 9-24 光纤次声波传感器工作原理示意图

1—螺旋旋钮 2—多模光纤 3—弹性膜片

频率响应特性实现声学特性的无损传输。

9.4.3 次声波传感器的应用

1. 管道泄漏检测

当管壁出现破坏而产生泄漏时，管道内介质（油、气）从泄漏点喷出，管内全部介质都迅速涌向泄漏处，且在泄漏处形成振动。该振动从泄漏处以声波的形式向管道两端迅速传播，该声波包含次声波、超声波等。其中的次声波受管内的杂波影响极小，传播速度恒定，信号能够非常清晰地传递到远端捕捉次声波的传感器处，当安置于管道两端的次声波传感器接收到次声波信号时，可根据接收的次声波信号信息（大小和其他特性）以及接受时间来进行管道的泄漏定位，其定位原理如图 9-25 所示。

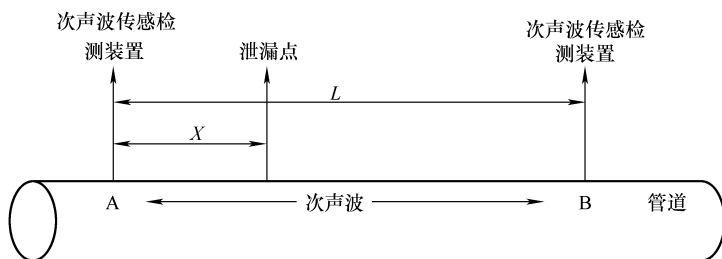


图 9-25 次声波定位原理

设分别于管道 A、B 两端安置次声波传感器，泄漏处的次声波传播速度为 v ，泄漏点到管道上端次声波传感器 A 的距离为 X ，上下端次声波传感器间的距离为 L ，从泄漏开始计时，A、B 两端次声波传感器捕捉到次声波时间分别为 t_1 、 t_2 ，则有

$$t_1 + t_2 = \frac{L}{v}, \quad t_1 - t_2 = \Delta t \quad (9-17)$$

$$t_1 v = X$$

整理可得

$$X = \frac{L + \Delta t \cdot v}{2} \quad (9-18)$$

由式 (9-18) 可知，当得到管道两端次声波接收信息的时间后，计算时间差和估计波速，即可算出管道泄漏点的具体位置。

2. 自然灾害预警

许多灾害性的自然现象如地震、火山爆发、雷暴、风暴、陨石落地、大气湍流等，在发生之前可能会辐射出次声波，由于产生次声波的波源能量一般都很大，且频率很低，因此次声波的穿透力度很强，低于 20Hz 的次声波可以穿透土层、钢筋混凝土等构件，次声波在传播时不易被吸收，衰减量很小，在空气中可以传播数千公里。利用次声波这一非常重要的特性，将高灵敏度的次声波传感器埋入沙层中，在地震发生前接收到次声波信号，人们就有可能利用这个前兆来预测和预报地震事件的发生。对于由海底地震所引发的海啸而言，在推进过程中会向空中和水体同时发射低频次声波信号，利用次声波在海水中的传播速度快于在空气中传播速度的特性，通过在海岸沿线布放的水下次声波传感器，可提前测量到海啸信息，实现灾害预警。

9.5 微波传感器

9.5.1 微波的基本概念

1. 微波

微波是指频率为 300MHz ~ 300GHz 的电磁波，是无线电波中一个有限频带的简称，即波长在 1m（不含 1m）到 1mm 之间的电磁波。微波作为一种电磁波也具有波粒二象性。

2. 微波的特性

微波的基本性质通常呈现为穿透、反射、吸收三种特性。对于玻璃、塑料和瓷器，微波几乎是穿越而不被吸收。对于水和食物等就会吸收微波而使自身发热。而对金属类东西，则会反射微波。从电子学和物理学观点来看，微波具有不同于其他波段的重要特点。

（1）穿透性 微波比其他用于辐射加热的电磁波，如红外线、远红外线等波长更长，因此具有更好的穿透性。微波透入介质时，由于微波能与介质发生一定的相互作用，使介质的分子间互相产生摩擦，引起介质温度的升高，使介质材料内部、外部几乎同时加热升温，形成体热源状态，大大缩短了常规加热中的热传导时间，且在条件为介质损耗因数与介质温度呈负相关关系时，物料内外加热均匀一致。

（2）选择性加热 物质吸收微波的能力，主要由其介质损耗因数来决定。介质损耗因数大的物质对微波的吸收能力强；相反，介质损耗因数小的物质吸收微波的能力也弱。由于各物质的损耗因数存在差异，微波加热就表现出选择性加热的特点。

（3）似光性和似声性 微波波长很短，比地球上的一般物体（如飞机、舰船、汽车、建筑物等）尺寸相对要小得多，或在同一量级上。使得微波的特点与几何光学相似，即所谓的似光性。因此使用微波工作，能使电路元件尺寸减小，使系统更加紧凑，可以制成体积小、波束窄、方向性很强、增益很高的天线系统。由于微波波长与某些物体（实验室中无线设备）的尺寸有相同的量级，使得微波的特点又与声波相似，即所谓的似声性。例如微波波导类似于声学中的传声筒；喇叭天线和缝隙天线类似于声学喇叭；微波谐振腔类似于声学共鸣腔。

利用微波与物质相互作用所表现出来的特性，人们制成了微波传感器。根据微波的特点，微波传感器是一种非接触式的传感器，因此，在工业领域，微波传感器可实现对材料的

无损检测及物位检测；在地质勘探方面，可实现微波断层扫描。

9.5.2 微波传感器的工作原理

当发射天线发出微波，遇到被测物时将被吸收或反射，使功率发生变化。利用接收天线，接收通过被测物或由被测物反射回来的微波，并将它转换成电信号，再由测量电路处理，就实现了微波检测过程。

微波传感器主要由微波振荡器和微波天线（发射天线和接收天线）组成。

1. 微波振荡器

微波振荡器就是能产生微波的装置。

微波谐振器一般有传输线型谐振器和非传输线型谐振器两大类，传输线型谐振器是一段由两端短路或开路的微波导行系统构成的，如金属空腔谐振器、同轴线谐振器和微带谐振器等，如图 9-26 所示，在实际应用中大部分采用此类谐振器。

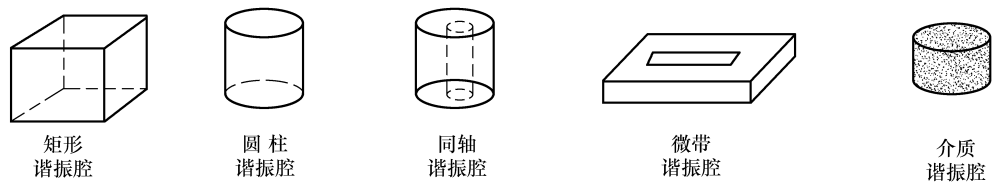


图 9-26 各种微波谐振器

低频电路中的 LC 回路是由平行板电容 C 和电感 L 并联构成，如图 9-27a 所示。它的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \tag{9-19}$$

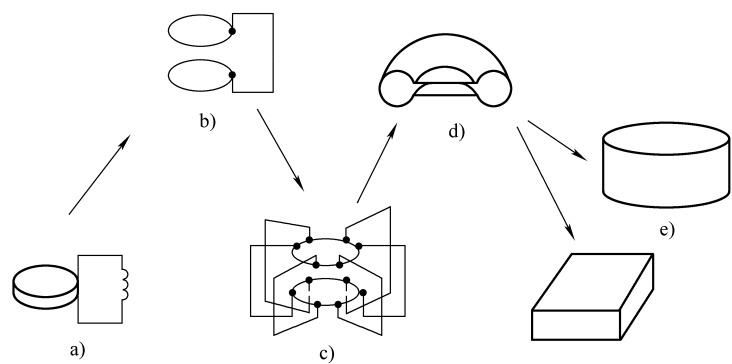


图 9-27 微波谐振器的演化过程

当要求谐振频率越来越高时，必须减小 L 和 C 。减小电容就要增大平行板距离，而减小电感就要减少电感线圈的匝数，直到仅有一匝如图 9-27b 所示；如果频率进一步提高，可以将多个单匝线圈并联以减小电感 L ，如图 9-27c 所示；进一步增加线圈数目，以致相连成片，形成一个封闭的中间凹进去的导体空腔，如图 9-27d 所示，这就成了重入式空腔谐振

器；继续把构成电容的两极拉开，则谐振频率进一步提高，这样就形成了一个圆盒子和方盒子，如图 9-27e 所示，这也是微波空腔谐振器的常用形式。虽然它们与最初的谐振电路在形式上已完全不同，但两者之间的作用完全一样，只是适用于不同频率而已。对于谐振腔而言，已经无法分出哪里是电感，哪里是电容，腔体内充满电磁场，因此只能用场的方法进行分析。

产生微波的器件主要分为半导体器件和电真空器件两大类。电真空器件是利用电子在真空中运动来完成能量变换的器件，或称之为微波电子管。在电真空器件中能产生大功率微波能量的有磁控管、多腔速调管、微波三/四极管、行波管等。微波晶体管包括微波低噪声晶体管和微波大功率晶体管。按结构分类，微波晶体管可分为双极型晶体管和场效应晶体管。

2. 微波天线

用来辐射和接收无线电波的装置称为天线。发射机所产生的已调制的高频电流能量（或导波能量）传输到发射天线，通过天线将其转换为某种极化的电磁波能量，并向所需方向辐射出去。到达接收点后，接收天线将来自空间特定方向的某种极化的电磁波能量又转换为已调制的高频电流能量，输送至接收机输入端。

研究天线问题，实质上是研究天线在空间所产生的电磁场分布。这个问题比较复杂，不在这里讨论。这里简要介绍接收天线的接收原理。

图 9-28 所示为一接收天线，它处于外来无线电波 E 的场中，发射天线与接收天线相距甚远，因此，到达接收天线上各点的波是均匀平面波。设入射电场可分为两个分量：一个是垂直于射线与天线轴所构成平面的分量 E_1 ，另一个是在上述平面内的分量 E_2 。只有沿天线导体表面的电场切线分量 $E_z = E_2 \sin\theta$ 才能在天线上激起电流，在这个切向分量的作用下，天线元段 dz 上将产生感应电动势 $\varepsilon = E_z dz$ 。设在入射场的作用下，接收天线上的电流分布为 $I(z)$ ，并假设电流初相为零，则接收天线从入射场中吸收的功率为 $dP = -\varepsilon I(z)$ 。

则整个天线吸收的功率为

$$P = - \int_{-l}^l \varepsilon I(z) e^{jkz \cos\theta} dz = \int_{-l}^l E_z I(z) e^{jkz \cos\theta} dz$$

(9-20)

式中的因子 $e^{jkz \cos\theta}$ 是入射场到达天线上各元段的波程差。

为了使发射的微波具有尖锐的方向性，天线具有特殊的结构。常用的天线有喇叭形天线和抛物面天线，如图 9-29 所示。

喇叭形天线结构简单，制造方便，它可以看作是波导管的延续。喇叭形天线在波导管与敞开的空间之间起匹配作用，以获得最大能量输出。抛物面天线犹如凹面镜产生平行光，这样使微波发射的方向性得到改善。

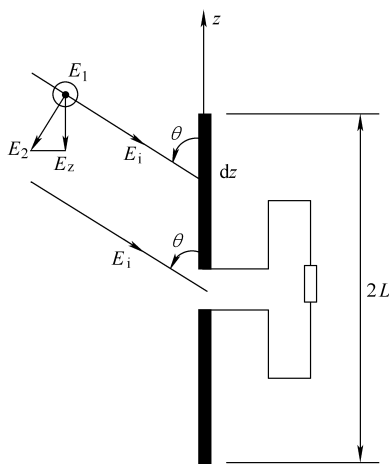


图 9-28 接收天线原理

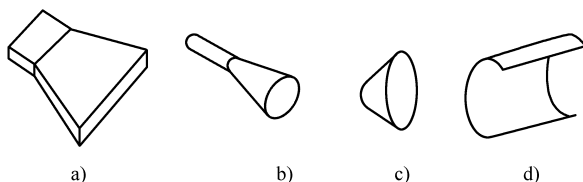


图 9-29 常用微波天线

a) 扇形喇叭天线 b) 圆锥形喇叭天线 c) 旋转抛物面天线 d) 柱抛物面天线

9.5.3 微波传感器的应用

1. 微波液位计

微波液位计原理如图 9-30 所示。相距为 S 的发射天线与接收天线，相互成一定角度。波长为 λ 的微波信号从被测液面反射后进入接收天线。接收天线接收到的微波功率的大小将随着被测液面的高低不同而异。

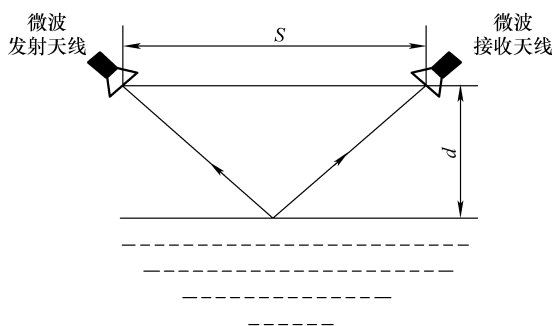


图 9-30 微波液位计

2. 微波物位计

图 9-31 所示为微波物位计原理图。当被测物体位置较低时，发射天线发出的微波束全部被接收天线接收，经检波、放大与设定电压比较后，发出物位正常信号。

当被测物位升高到天线所在高度时，部分微波束被物体吸收，部分被反射，接收天线接收到的微波功率相应减弱，经检波、放大与设定电压比较，低于设定电压值，微波物位计发出被测物体位置高出设定物位的信号。

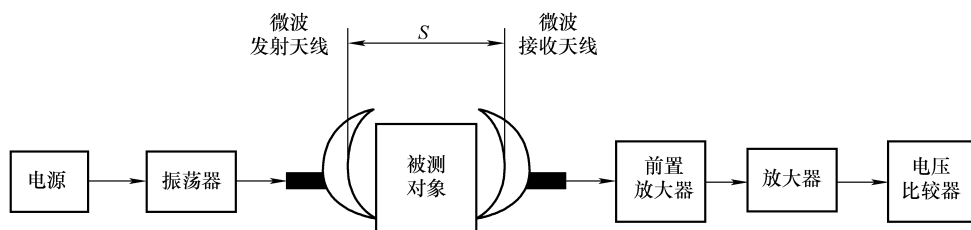


图 9-31 微波物位计

3. 微波热像仪

微波热像仪用来检测生物机体上各点的相对温度分布。它与红外热像仪相比，不仅可以检测表面的问题，利用微波具有的穿透能力，还能探测次表面的温度。温度高于绝对零度的一切物体都会辐射某些波长的电磁波，辐射功率和最强的辐射波长均与物体的温度有关。如果用一个直接接触式辐射计来测量物体辐射的微波功率，已知其表面的发射功率时，就可求得物体的温度。近年来医用微波热像仪被用于乳腺癌的早期诊断，依据的基本原理是癌变组

织的温度比正常组织的温度稍高一些，而癌细胞处于次表面层，所以要用微波才能探测到它的温度。

4. 微波多普勒传感器

微波同光波一样，也能发生多普勒效应。利用微波多普勒效应可以探测运动物体的速度、方向与方位。多普勒频率为

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (9-21)$$

式中 v ——物体的运动速度；

λ ——微波信号波长；

θ ——方位角。

在确定 v 、 λ 、 θ 中任意两个参数后，即可测出第三个参数。微波多普勒传感器的应用非常广泛，例如多普勒测速仪可用于交通管制的车辆测速雷达，水文站用的流速测定仪，海洋气象站用来测定海浪与热带风暴，火车进站速度监控等。

习 题

- 9-1 简述声波的基本概念。
- 9-2 声波的衰减主要取决于什么？并做简单介绍。
- 9-3 简单介绍 SAW 的基本原理和主要优点。
- 9-4 超声波传感器的性能参数有哪些？分别对传感器有什么影响？
- 9-5 简述次声波的特点。
- 9-6 声表面波传感器可以测量哪些被测量？

参 考 文 献

- [1] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京：南京大学出版社，2012.
- [2] 周真，苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京：清华大学出版社，2011.
- [3] 王以真. 实用扬声器技术手册 [M]. 北京：国防工业出版社，2003.
- [4] 樊尚春. 传感器技术及应用 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2010.
- [5] 付少波，赵玲. 传感器实用电路 [M]. 北京：化学工业出版社，2013.
- [6] 杨德森，洪连进. 矢量水听器原理及应用引论 [M]. 北京：科学出版社，2009.
- [7] 赵玉刚，邱东. 传感器基础 [M]. 北京：北京大学出版社，2013.
- [8] 何鹏举，张朋，陈明. 声表面波网络传感器及其在国防工业中的应用 [M]. 西安：西北工业大学出版社，2011.
- [9] 郭发滨，董立峰. 次声波在海啸灾害预警中的应用探讨 [J]. 海岸工程，2007 (26).
- [10] 李英. 微波、毫米波传感器与非电量检测 [M]. 北京：电子工业出版社，1991.

第10单元

化学传感器

学习要点

- ◆ 半导体气体传感器的结构、机理及特性；
- ◆ 湿度传感器（电解质、半导体陶瓷、高分子）的感湿机理。

相关知识链接

- ◆ GB 15322—2015 可燃气体探测器；
- ◆ GB/T 15768—1995 电容式湿敏元件与湿度传感器总规范；
- ◆ JJF10762001 湿度传感器校准规范。

引导案例

天津港“8·12”特别重大火灾爆炸事故

2015年8月12日23时34分，位于天津滨海新区的瑞海国际物流有限公司化工危险品仓库发生特别重大火灾爆炸事故，事故造成包括消防人员、公安民警在内的遇难者165人，另有8人失联，受伤人数近800人；由于爆炸中心临近进口汽车仓储地，数千辆进口新车因爆炸事故被焚毁。截至2015年12月10日，事故调查组已核定直接经济损失68.66亿元人民币。

事故发生后，中国气象局世界气象组织、国际原子能机构北京区域环境紧急响应中心以及天津市气象局迅速启动环境应急响应模式，对天津滨海新区爆炸事故发生时的天气状况包括温度、湿度、风力及风向进行分析，对事故区域三处入海排水口全部实施封堵，同时对现场隔离区外的雨水口、污水口、污水处理厂、海河闸口进行不间断监测，监测项目包括天津港港池及周边海域海水中的酸碱度、溶解氧、化学需氧量、油类、活性磷酸盐、硫化物、有机碳、多环芳烃、氰化物、挥发酚等，所用传感器大部分是化学传感器。

化学传感器用来检测特定的化合物，比如各种气体。这种传感器的工作原理其实非常简单，就像我们在日常生活中观察到的一样，很多物质对化学作用都很敏感。比如，很多金属长时间暴露在空气中都有被氧化的危险。金属表面显著的氧化层能改变材料的性能，例如金属的电阻，因此可以通过检测金属性材料被氧化后电阻的变化来检测氧气。

化学传感器（化学量传感器）是继物理量传感器之后兴起的另一类传感器。化学传感器的传感对象包括离子与分子。化学传感器是现代传感器技术的重要组成部分，在科学研究和工农业生产、环境保护、医疗卫生、安全防卫等方面得到了广泛的应用，已成为化学分析

与检测的重要手段。然而有关化学传感器的定义尚无统一规定，基本上可以认为将各种化学物质（电解质、化合物、分子、离子等）的状态（或变化）定性（或定量）地转化成电信号而输出的装置就是化学传感器。化学传感器按照传感器敏感对象的特性可分为气体传感器、湿度传感器、离子传感器等。

10.1 气体传感器

气体传感器是用来测量气体的类别、浓度和成分的传感器。气体传感器能将气体种类及其与浓度有关的信息转换成电信号（电流或者电压），根据这些电信号就可以获得待测气体相关的信息，从而可以进行检测、监控、报警。由于气体种类繁多，性质各不相同，气体传感器检测这些气体的原理各异，所以气体传感器的种类很多，主要包括半导体式气体传感器、接触燃烧式气体传感器、电化学式气体传感器和固体电解质式气体传感器等。气体传感器主要应用在职业健康与安全、环境与排放监测、住宅健康与安全三个领域。

10.1.1 半导体式气体传感器

半导体式气体传感器是利用半导体气敏元件同气体接触，使半导体性质发生变化，从而检测待测气体的成分和浓度。半导体式气体传感器与其他气体传感器相比，具有快速、灵敏、简便等优点，因而有着广阔的发展前景。

1. 结构

半导体式气体传感器一般分为电阻型和非电阻型两种，见表 10-1。电阻型半导体气体传感器用 SnO_2 、 ZnO 等金属氧化物材料制作敏感元件，利用其阻值的变化来检测气体浓度，又称为半导体气敏电阻。非电阻型半导体气体传感器用半导体结型二极管和金属栅场效应晶体管制作敏感元件，主要利用它们与气体接触后的整流特性以及晶体管作用的变化，实现对气体的检测。目前使用最多的是电阻型半导体气体传感器。因此，以电阻型为例介绍半导体气体传感器。

表 10-1 半导体气敏元件分类

	主要物理特性	类型	气敏元件	检测气体
电阻型	电阻	表面控制型	SnO_2 ， ZnO 等的烧结体、薄膜、厚膜	可燃性气体
		体控制型	$\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 CoC_3 、 TiO_2 、 CoC 、 $\text{Ia}_{1-x}\text{SrCoSrO}_3$ 等	可燃性气体，如氧气、酒精等
非电阻型	二极管整流	表面控制型	Pd/CdS 、 Pd/TiO_2 、 Pt/TiO_2 等	氢气、一氧化氮
	晶体管特性		以 Pd 、 Pt 、 SnO_2 为栅极的 MOSFET	氢气、硫化氢

从制作工艺来看，电阻式半导体气敏传感器结构可以分为烧结型、厚膜型和薄膜型三种类型，如图 10-1 所示。

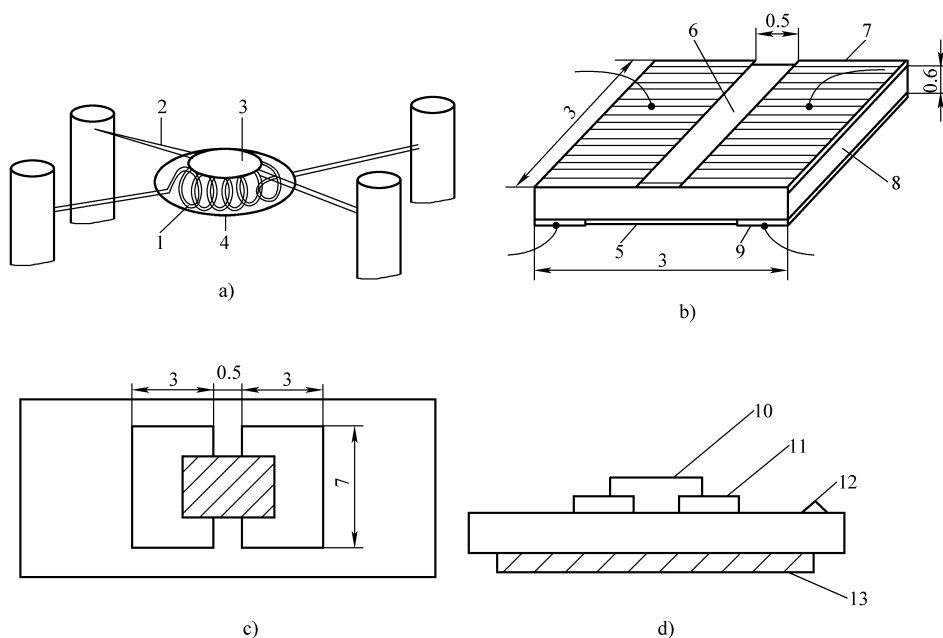


图 10-1 传感器元件的结构示意图

a) 烧结型气敏元器件 b) 薄膜型气敏元器件 c) 厚膜型器件 d) 厚膜型器件结构
1、5、13—加热器 2、7、9、11—电极 3—烧结体 4—玻璃 6、10—半导体 8、12—绝缘体

按加热方式又可分为直热式和旁热式。直热式元件的主要特点是加热器与气敏材料直接接触，如图 10-2 所示，它将起电极和加热作用的 Ir-Pd 合金线圈埋入气敏氧化物材料中经烧结而成。旁热式则使用绝缘陶瓷管，如图 10-3 所示，将加热线圈插入绝缘陶瓷管内，而在其表面分别涂上电极和气体敏感材料，这样加热器与气敏材料不再直接接触。

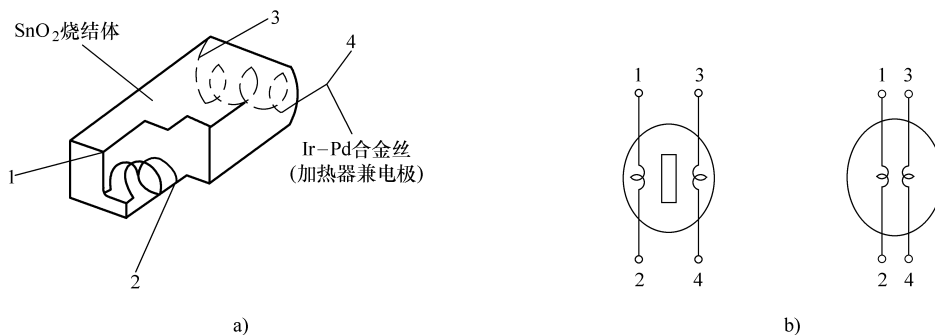


图 10-2 直热式传感器元件的结构和符号

a) 结构 b) 符号

1、2、3、4—Ir-Pd 合金丝

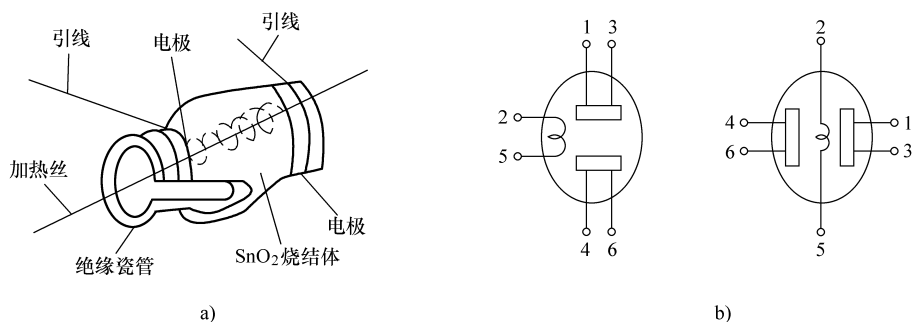


图 10-3 旁热式传感器元件的结构和符号

a) 结构 b) 符号

1、3、4、6—电极 2、5—加热丝

2. 敏感机理

以半导体材料 SnO_2 为例说明气敏半导体材料的敏感机理。 SnO_2 是 N 型半导体，其导电机理可以用吸附效应来解释。图 10-4a 为烧结体 N 型半导瓷的模型。它是多晶体，晶粒间界有较高的电阻，晶粒内部电阻较低。图中分别以空白部分和黑点部分示意表示。导电通路的等效电路如图 10-4b 所示。图中 R_n 为颈部等效电阻， R_b 为晶粒的等效体电阻， R_s 为晶粒的等效表面电阻。其中 R_b 的阻值较低，它不受吸附气体影响。 R_n 和 R_s 则受吸附气体所控制，且 $R_s \gg R_b$ ， $R_n \gg R_b$ 。由此可见，半导体气敏电阻的阻值将随吸附气体的数量和种类而改变。

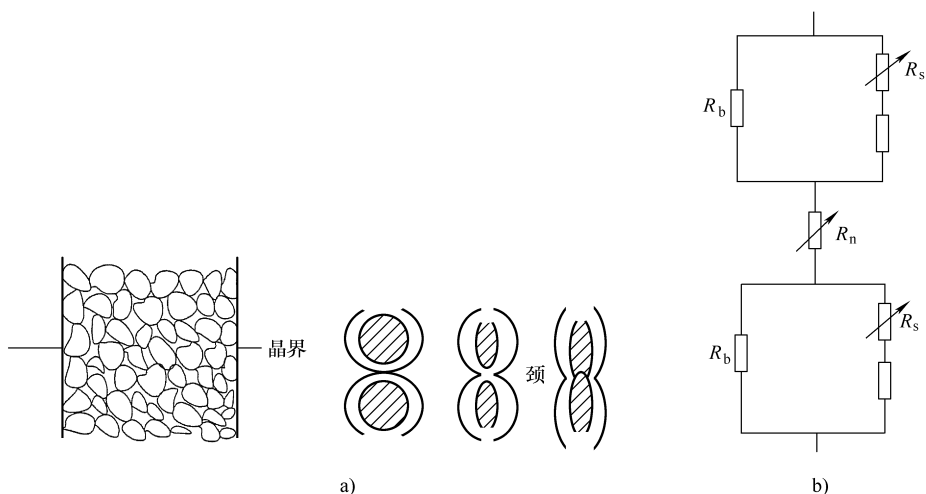


图 10-4 烧结体半导体气敏元件的敏感机理

这类半导体气敏电阻工作时都需加热。器件在加热到稳定状态的情况下，当有气体吸附时，吸附分子首先在表面自由地扩散。其间一部分分子蒸发，一部分分子就固定在吸附处。

此时如果材料的功函数小于吸附分子的电子亲和力,则吸附分子将从材料夺取电子而变成负离子吸附;如果材料功函数大于吸附分子的离解能,吸附分子将向材料释放电子而成为正离子吸附。 O_2 和 NO_x (氮类氧化物)倾向于负离子吸附,称为氧化型气体。 H_2 、 CO 、碳氢化合物和酒类倾向于正离子吸附,称为还原型气体。氧化型气体吸附到N型半导体上,将使载流子减少,从而使材料的电阻率增大。还原型气体吸附到N型半导体上,将使载流子增多,材料电阻率下降。根据这一特性,就可以从阻值变化的情况得知吸附气体的种类和浓度。

3. 测量电路

常用的直流测量电路如图10-5所示。 R_L 为负载电阻, V 为敏感元件两端的电压,可通过负载电阻上电压的变化来确定敏感元件的电阻变化。

$$V_o = \frac{V}{R_s + R_L} R_L \quad (10-1)$$

式中 R_s ——敏感元件的电阻;

V_o ——负载电阻 R_L 两端的电压输出值。

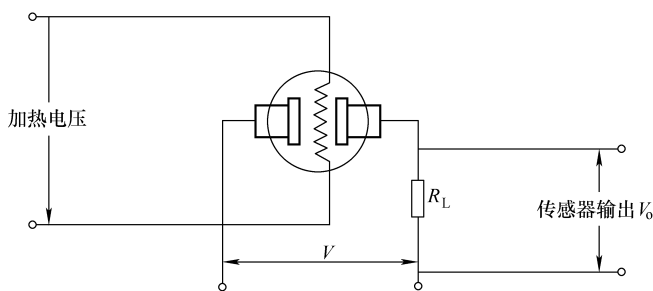


图 10-5 测量电路

4. 特性参数

(1) 固有电阻 R_0 和工作电阻 R_s 固有电阻 R_0 是电阻式半导体气敏传感器在洁净空气中的电阻值,一般在千欧到兆欧数量级。工作电阻 R_s 是指电阻式半导体气敏传感器在检测一定浓度气体时的电阻值。

(2) 灵敏度 S 灵敏度是指器件对被检测气体的敏感程度,通常用气敏传感器在洁净空气中的电阻值与在一定浓度的检测气体中的电阻之比来表示灵敏度 S 。即

$$S = \frac{R_0}{R_s} \quad (10-2)$$

由于洁净空气不易获得,通常采用同种气体在不同浓度下的电阻值之比来表示

$$S = \frac{R_s(c_2)}{R_s(c_1)} \quad (10-3)$$

式中 $R_s(c_2)$ ——元件在浓度为 c_2 的被测气体中的电阻值;

$R_s(c_1)$ ——元件在浓度为 c_1 的被测气体中的电阻值。

图10-6为 SnO_2 半导体式气体传感器的灵敏度特性曲线,一般的,半导体式气体传感器的电阻与气体浓度是非线性关系,近似于双对数线性关系。

(3) 选择性 在多种气体共存的条件下, 气敏传感器区分气体种类的能力称为选择性。对某种气体的选择性好, 就表示气敏传感器对它有较高的灵敏度。用选择性系数表示

$$K_{A/B} = \frac{S_A}{S_B} \quad (10-4)$$

式中 $K_{A/B}$ ——在 A、B 混合气体中, 气敏传感器对气体 A 的选择性系数;

S_A ——气敏传感器在 A 气体中的灵敏度;

S_B ——气敏传感器在 B 气体中的灵敏度。

(4) 响应时间和恢复时间 响应时间反应气敏传感器对被检测气体的响应速度。从传感器接触一定浓度的被测气体开始到其阻值达到该浓度下稳定阻值的时间, 称为响应时间。有些情况下也把气敏传感器从与检测气体接触开始, 到其阻值达到稳定量的 90% 所需要的时间, 定义为响应时间。

恢复时间反应气敏传感器对被测气体的脱附速度。气敏传感器从与检测气体脱离开始, 到其阻值恢复到正常空气中阻值的 90% 所需要的时间, 定义为恢复时间。

实际上, 对于某一气体传感器, 往往并不按上述定义确定响应时间和恢复时间, 而常用气体传感器从接触和脱离检测气体开始, 到其阻值或阻值增量达到某一确定值的时间, 例如, 气体传感器阻值增量由零变化到稳定增量的 63% 所需要的时间, 定义为响应时间。

图 10-7 为典型半导体式气体传感器的响应特性曲线, 一般的, 气体传感器的恢复时间要长于响应时间。

(5) 温度特性和湿度特性 气敏元件灵敏度随温度变化的特性称为温度特性。元件本身温度和环境温度对气敏元件灵敏度都有影响。其中元件本身温度的影响特别大, 可以采取温度补偿方法减小这方面的影响。

气敏元件灵敏度随环境湿度变化的特性称为湿度特性。湿度特性是影响检测准确度的另一个因素, 也可以采取湿度补偿方法减小其影响。

半导体式气体传感器的温湿度特性曲线如图 10-8 所示。

(6) 稳定性 当气体浓度不变时, 在规定的时间内气敏元件输出特性维持不变的能力, 称为稳定性。稳定性表示气敏元件对于气体浓度以外的各种因素的抵抗能力。

(7) 电源电压特性 气敏传感器的灵敏度随电源电压变化的特性称为电源电压特性, 为改善这种特性, 需采用恒压源。

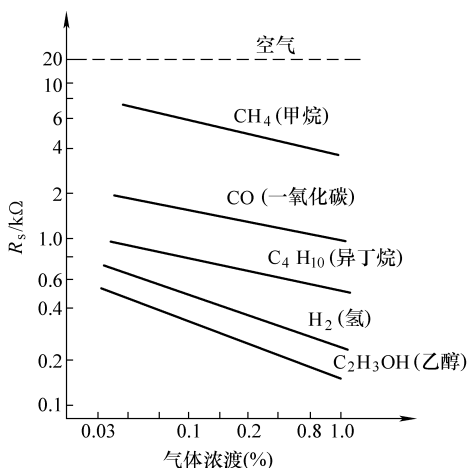


图 10-6 半导体气敏传感器的灵敏度特性

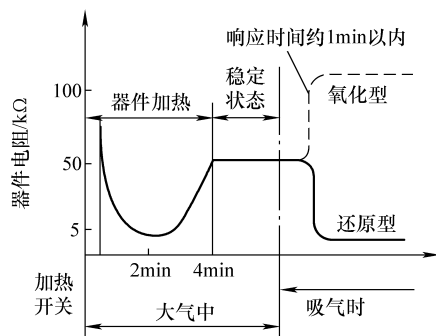


图 10-7 半导体气体元件的响应特性曲线

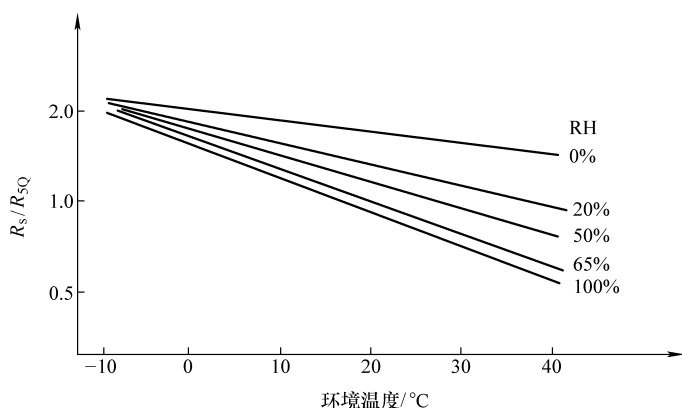


图 10-8 半导体式气敏元件温湿度特性

5. 工艺

(1) 烧结型直热式气敏元件 早期的半导体式气敏元件大多数为烧结型直热式器件，其制造工艺比较简单，直接将作为电极和加热丝的合金线圈埋入制成泥状的、混合均匀的气敏氧化物材料中，成形，并在一定温度下进行烧结即成。这种器件的特点是加热温度较低，一般在 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ，因此，加热功率小，缺点是元件参数离散性大，互换性差，因而这种结构正被逐渐淘汰。

(2) 烧结型旁热式气敏元件 烧结型旁热式气敏元件的制作方法是将气敏粉体材料及少量胶黏剂充分研磨、混合均匀后调成浆状，然后涂覆在制有电极并引出电极引脚的瓷管上，再经 $500 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 烧结而成。它的特点是元件的热稳定性较好，与直热式气敏元件相比，具有较小的离散性，缺点是工艺较复杂，机械化程度低，不易批量生产。

(3) 厚膜型气敏元件 厚膜型元件则是把气敏材料（如 SnO_2 、 ZnO ）与一定比例（3% ~ 15% 质量百分比）硅凝胶混合成能印制的厚膜胶，再把这厚膜胶用丝网印制到预先安装有 Pt 电极的 Al_2O_3 基片上。经自然干燥后在 $400 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 烧结 1 ~ 2h 便制成厚膜型元件。目前还有管状厚膜元件，这种气敏元件半导体层采用 ZnO ，膜厚 0.5mm，外层用 Pt 作为催化剂层，它不仅与还原性气体起反应，而且增加 ZnO 表面上氧的吸附，增大 ZnO 在空气中电阻值，从而提高了元件的灵敏度。用这种方法制成的气敏元件能检测液化石油气体，环境温度、湿度变化影响小，并能连续使用到 5000h。此外管状形厚膜元件采用 $\text{V}-\text{Mo}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 做催化剂可检测浓度很低的卤化碳氢化合物气体，如 CCl_2F_2 、 CHClF_2 等，而对还原性气体敏感性小。

(4) 薄膜型气敏元件 最常见的薄膜气敏传感器的结构如图 10-9 所示。传感器制作时，通常是在基片的正面预溅射一对 Pt 的叉指电极，以测量薄膜的电导率；在基片的背面再镀一层 Pt，以作加热用；然后再在电极上用特定的沉积方法制备薄膜，经烧结、退火等热处理后将该器件安装到标准设计的机座中。

传感器的基片、电极及加热元件的选取还有多种，包括：常用到的基片有三氧化二铝、康宁 7059 玻璃、蓝宝石、硅、陶瓷玻璃等。电极通常选取 Pt、Ag、Au 等贵金属，在贵金属中 Ag 的功函数最小，且在空气中较高的温度下也能保持稳定；如果要使电极和薄膜间形成

欧姆接触, 应选择 Au 电极, 当薄膜的初始电阻即未通气体时的电阻大于 $1\text{M}\Omega$ 时, Au 电极在比较大的电压范围内能与薄膜保持欧姆接触, 电极通常用真空蒸发法、电子束蒸发法等方法镀上去。

前面介绍的薄膜传感器尽管结构简单、性能可靠、灵敏度高, 但其工作温度一般在 300°C 左右, 器件功耗在 $500 \sim 1000\text{mW}$ 之间, 这种结构不利于半导体 IC 工艺集成, 为了解决上述问题, 人们发展了硅基微结构型薄膜传感器。

当前利用硅集成电路工艺制备硅基微结构的薄膜型气敏传感器已成为薄膜气敏传感器结构发展的主流, 与传统的体型传感器相比, 它具有损耗功率小、生产率高、宜于智能化、成本低等优点。在这方面, 已经有许多人进行了广泛深入的研究, 设计制备出多种新颖、性能优良的结构, 使半导体薄膜型硅基微传感器取得了长足的进展, 并形成了比较成熟的工艺技术。

硅基微结构薄膜型气敏传感器由传感器底层 (相当于衬底)、加热元件、电极、气敏薄膜层组成。传感器底层一般选用 P 型 (100) 取向的硅片, 然后再在它的两个主要表面各覆盖一层 Si_3N_4 ; 而加热元件和电极同时制备集成到衬底的同一面上, 通常选用 Pt/Ta 和 Pt/Ti 等双层膜作电极和加热元件, Pt 下面的 Ta 或 Ti 层既用来提高 Pt 和下面基底材料的黏附力, 也用以避免它们之间的热和电的扩散。

图 10-10 给出了硅基微结构薄膜型气敏传感器的截面结构图。制备这种薄膜型气敏传感器的一种比较成熟的工艺流程如下:

1) 用低压化学气相沉积法 (LPCVD) 在硅晶片的正反两面沉积一定厚度的 Si_3N_4 层, 该层是一无应力的介电层, 其正表面作为制作电极图形, 反面作为刻蚀时的钝化层。

2) 在硅晶片的正面用直流溅射法或射频磁控溅射法沉积一定厚度的 Ti 层和 Pt 层, 再将 Pt/Ti 双层膜于 550°C 下退火处理 30min 。

3) 用反应离子刻蚀工艺或者别的方法把硅晶片背面的 Si_3N_4 层刻蚀掉, 为最后刻蚀硅晶片的背面打开一个窗口, 这是第一个掩膜。

4) 用去变 (lift-off) 工艺或双边准直技术制作图形电极和加热器 Pt/Ti 双层膜, 形成一对电极和电阻加热器, 这是第二个掩膜。

5) 通过某种沉积薄膜的工艺将金属氧化物气敏薄膜层沉积到电极上, 再进行适当的热处理。

6) 对该气敏薄膜层进行选择性刻蚀, 以使气敏薄膜层与电极和加热元件的垫片保持接

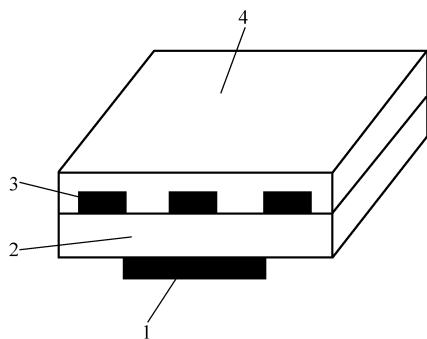


图 10-9 薄膜气敏器件的截面结构图

1—Pt 加热器 2—基片
3—Pt 叉指电极 4—薄膜

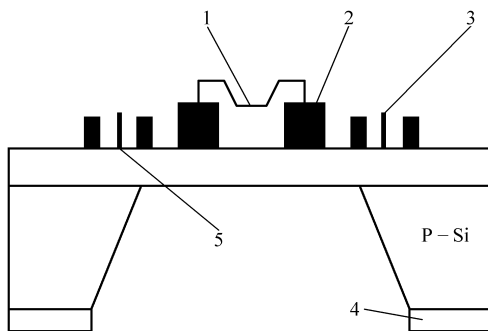


图 10-10 硅基微结构薄膜型气敏传感器的截面结构图

1—薄膜 2—Pt 电极 3—Pt 加热器
4—绝缘层 5—Pt 温度传感器

触，这是第三个掩膜。

7) 用 KOH 溶液或相关溶液，采用各向异性刻蚀法，把硅晶片背面刻蚀掉一部分，形成一定厚度的一个正方形的横隔膜，实现低功耗下芯片加热。

这种平面结构既与湿化学成膜工艺（如旋转涂覆法）兼容，也与其他成膜工艺（如射频磁控溅射法、激光闪蒸发、气相沉积法）等兼容。同时，为了在微热平板上达到最佳的热分布，且耗散功耗最小，人们已经运用有限元方法进行热分布模拟，得出性能比较好的微结构传感器的特征尺寸，其中，敏感层面积为 $0.24\text{mm} \times 0.24\text{mm}$ ；横隔膜面积为 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ （用于电极和加热器）；总面积为 $78\text{mm} \times 3.78\text{mm}$ （把硅晶片背面刻蚀以后）。

(5) LTCC 型气敏元件 近年来随着气敏传感器研究不断发展，人们在传感器结构设计中融入了降低功耗、可集成、微型的理念，图 10-11 所示为 LTCC 模式的传感器元件结构。它的特点是将 LTCC（low temperature cofiring ceramics，低温陶瓷烧结技术）技术应用于气敏传感器的制造，这种结构的意义在于使人们可以制造出集多种功能为一体的气敏传感器。

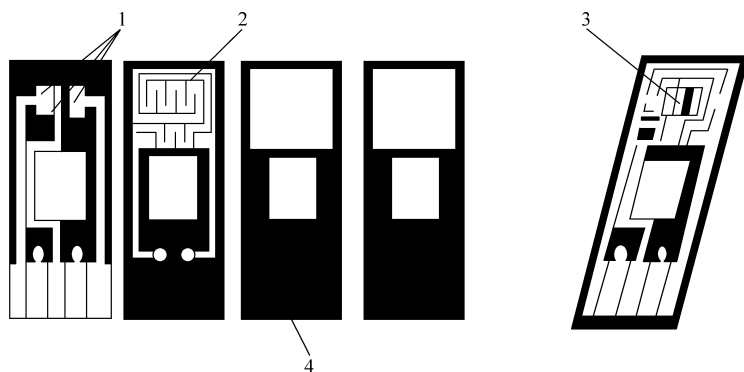


图 10-11 LTCC 模式的传感器元件结构

1—Au 电极 2—Pt 加热器 3—敏感层 4—LTCC 陶瓷

10.1.2 其他气体传感器

1. 燃烧式气体传感器

燃烧式气体传感器是基于强催化剂使气体在其表面燃烧时产生热量，使传感器温度上升，这种温度变化可使贵金属电极电导随之变化的原理而设计的。

它的结构与电阻式半导体直热式烧结型气体传感器的结构相似，将贵金属细丝绕成线圈状，然后把它放在用添加了 Pt、Pd 等贵金属催化剂的催化载体材料制成的球状体内，如氧化铝 + Pt，氧化铝 + PdO 等，最后在一定温度下煅烧而成。

它的工作原理是：当可燃性气体与预先加热了的传感器接触时，由于强催化剂的作用，传感器表面会发生燃烧现象。如果可燃性气体的气体浓度较低，而且是完全燃烧的话，传感器的电阻变化量与被测气体的浓度成正比，这也是这种传感器的特征之一，另外与半导体传感器不同的是，它几乎不受周围环境湿度的影响，但长时间使用后它的气敏特性会随着催化剂活性的降低而退化，因此改进载体材料和催化剂制造技术一直是提高这类传感器性能的有

效方法。

2. 电化学气体传感器

利用电化学原理的气体传感器主要采用恒电位电解方式和伽伐尼电池方式工作。即当气体存在于由 Pt、Au 等贵金属电极、比较电极和电解质（固态或液态）组成的电池中时，气体会与电解质发生反应或在电极表面发生氧化 - 还原反应，而在两个电极之间有电流或电压的输出，凡是利用这类特性来检测气体成分及浓度的传感器，统称为电化学气体传感器。这类气体传感器的特征是它的结构与通常的电池系统类似，而电解质可以是电解质溶液（包括水溶液和非水电解质溶液及固态化电解质凝胶），也可以是固体电解质。

电化学传感器的构成是：将两个反应电极——工作电极和对电极以及一个参比电极放置在特定电解液中，然后在反应电极之间加上足够的电压，使透过涂有重金属催化剂薄膜的待测气体进行氧化还原反应，再通过仪器中的电路系统测量气体电解时产生的电流，然后由其中的微处理器计算出气体的浓度。

3. 固体电解质氧传感器

同电化学原理的传感器比较，此类传感器显然结构简单的多，而且，制作工艺与薄膜工艺兼容，适合批量制造。目前，固体电解质材料主要有 NASICON、 $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ 、 $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ 、 Ti_2O 等。其中， $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ 是目前氧传感器的主体材料，在汽车、窑炉等行业中有着广泛的应用。

固体电解质均采用管状结构，此管状可以两端开口也可以单端开口。而在使用时，引入被测气体又有直接插入式和扩散式两种。

这种氧传感器现已应用在冶金、石油、化工、电力等部门的加热炉、燃烧炉的管理以及汽车空燃比控制，起到节省燃料、提高燃烧效率的作用，此外还可以用于环保监测、宇航、潜艇测氧等方面。

10.1.3 气体传感器的应用

各类易燃、易爆、有毒、有害气体的检测和报警都可以用相应的气敏传感器及其相关电路来实现，如气体成分检测仪、气体报警器、空气净化器等已用于工厂、矿山、家庭、娱乐场所等，下面给出两个应用实例。

1. 气体鉴别与报警

图 10-12 给出的气体鉴别、报警与控制电路图，一方面可鉴别实验中有无有害气体产生，鉴别液体是否有挥发性，另一方面可自动控制排风扇排气，使室内空气清新。MQS2B 是旁热式烟雾、有害气体传感器，无有害气体时阻值较高（ $10\text{k}\Omega$ 左右），当有害气体或烟雾进入时阻值急剧下降，A、B 两端电压下降，使得 B 的电压升高，经电阻 R_1 和 R_p 分压、 R_2 限流加到开关集成电路 TWH8778 的选通端脚，当脚电压达到预定值时（调节可调电阻 R_p 可改变 5 脚的电压预定值），1、2 两脚导通。+12V 电压加到继电器上使其通电，触点 K_{1-1} 吸合，合上排风扇电源开关自动排风。同时 2 脚 +12V 电压经 R_4 限流和稳压二极管 VZ_1 稳压后供给微音器 HTD 电压而发出滴滴声，而且发光二极管发出红光，实现声光报警的功能。

2. 防止酒后开车控制器

图 10-13 为防止酒后开车控制器原理图。图中 QM - J₁ 为酒敏元件。若司机没喝酒，在

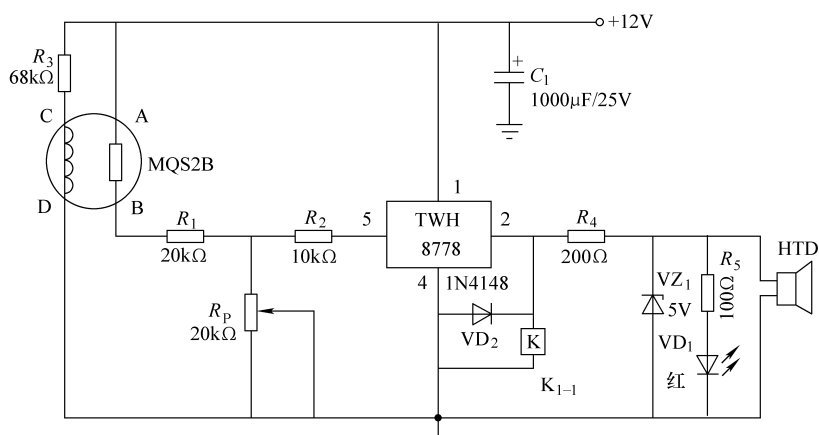


图 10-12 气体鉴别、报警与控制电路图

驾驶室内合上开关 S, 此时气敏器件的阻值很高, U_a 为高电平, U_1 为低电平, U_3 为高电平, 继电器 K_2 线圈失电, 其常闭触点 K_{2-2} 闭合, 发光二极管 VD_1 通, 发绿光, 允许起动发动机。

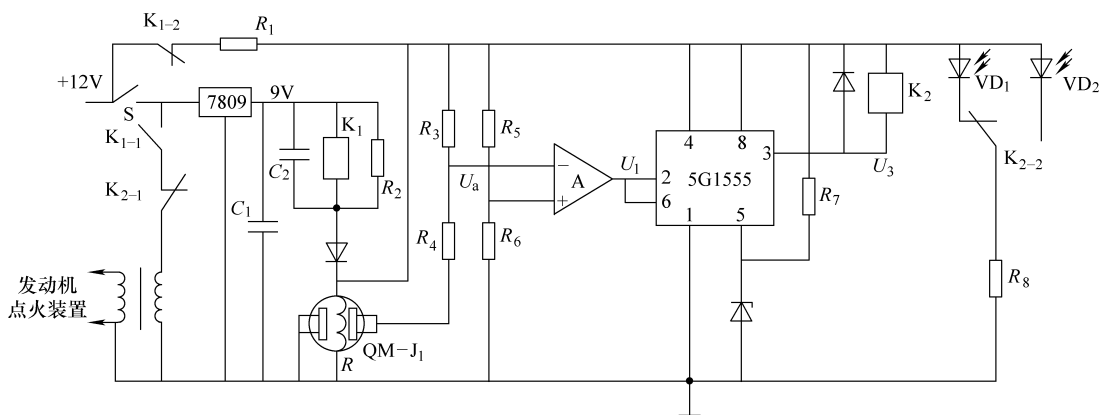


图 10-13 防止酒后开车控制器原理图

若司机酗酒, 气敏器件的阻值急剧下降, 使 U_a 为低电平, U_1 为高电平, U_3 为低电平, 继电器 K_2 线圈通电, K_{2-2} 常开触头闭合, 发光二极管 VD_2 通, 发红光, 以示警告, 同时常闭触点 K_{2-1} 断开, 无法起动发动机。

若司机拔出气敏器件,继电器 K_1 线圈失电,其常开触点 K_{1-1} 断开,仍然无法起动发动机。常闭触点 K_{1-2} 的作用是在 S 断开情况下,为酒敏器件及后面的检测电路提供电源,以保证酒精检测部分始终处于工作状态。5G1555 为集成定时器。

10.2 湿度传感器

10.2.1 湿度及其表示方法

湿度传感器主要用于测量大气环境的湿度大小,在粮食仓储、食品防霉、温室种植、环境监测、仪表电器、交通运输、气象探测、军事装备等领域有着广泛的应用。

湿度传感器是利用湿度敏感材料吸附效应直接吸附大气中的水分子,使材料的电学特性等物理性质发生变化,从而监测湿度的变化。理想的湿度传感器应具有测量精度高、响应速度快、温度系数小、量程宽、测量范围广、稳定性好、耐水性好、抗污染能力强、价格低廉等特点。

湿度传感器的研究始于20世纪30年代,利用氯化锂(LiCl)电解质制成了电阻型湿度传感器。随后,湿度敏感材料与传感器的研究受到了高度重视,发展很快。目前得到广泛研究和应用的湿度传感器,大致可以分为电解质型、陶瓷型、半导体型和高分子型湿度传感器四大类。

湿度是表示空气中水蒸气含量的物理量,常用绝对湿度、相对湿度、露点等表示。绝对湿度是单位体积空气内所含水蒸气的质量,用每立方米空气中所含水蒸气的克数表示

$$H_a = \frac{m_v}{V} \quad (10-5)$$

式中 m_v ——待测空气中水蒸气质量;

V ——待测空气的总体积;

H_a ——绝对湿度,单位为 g/m^3 。

相对湿度是表示空气中实际所含水蒸气的分压(P_w)和同温度下饱和水蒸气的分压(P_N)的百分比,即

$$H_T = \left(\frac{P_w}{P_N} \right)_T \times 100\% \text{ RH} \quad (10-6)$$

通常用% RH表示相对湿度。当温度和压力变化时,因饱和水蒸气变化,所以气体中水蒸气的气压即使相同,其相对湿度也会发生变化。一般而言,空气湿度多用相对湿度表示。

水的饱和蒸汽压是随着温度的降低而逐渐下降的。当空气的温度下降到某一温度时,空气中的水蒸气压将与同温度下的饱和水蒸气压相等,空气中的水蒸气将会有一部分凝聚成露珠,此时,相对湿度为100% RH,这个温度称为露点温度。空气中水蒸气压越小,露点越低,因而可以用露点表示空气中湿度的大小。

10.2.2 湿度传感器的基本原理

利用水分子有较大的偶极矩,因而易于吸附在固体表面并渗透到固体内部的特性(称为水分子亲和力),制成的湿度传感器称为水分子亲和力和型湿度传感器;另一类湿敏元件与水分子的亲和力无关,称为非水分子亲和力和型湿度传感器。

非水分子亲和力和型湿度传感器是利用物理效应的方法测量湿度,由于没有吸附和脱湿过程,一般响应速度较快。常用的非水分子亲和力和型有热敏电阻式、红外吸收式、超声波式和

微波式湿度传感器等（本书不做介绍）。

水分子附着或浸入湿敏功能材料后，不仅有物理吸附而且还有化学吸附或毛细管凝聚等。其结果是使其电气性能（电阻、阻抗、介电常数等）变化。这样便可分别制成电阻式、阻抗式或电容式湿敏元件。

以氧化物 $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 为例来说明水分子的吸附原理。在完全脱水的氧化物 $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 表面上，暴露有金属离子和氧离子， H_2O 先解离为 H^+ 和 OH^- ， OH^- 在金属离子上， H^+ 在氧离子上进行化学结合，分别形成表面氢氧基。两个表面氢氧基进行氢键合，第一层物理吸附水蒸气处于在表面无法移动的固态状态。在第一层物理吸附水之后，经过由类似于冰结构的氢键所连接的若干层吸附，形成液状的水层，以实现由水的多层吸附到水的凝聚状态，图 10-14 所示为水吸附状态模式图。

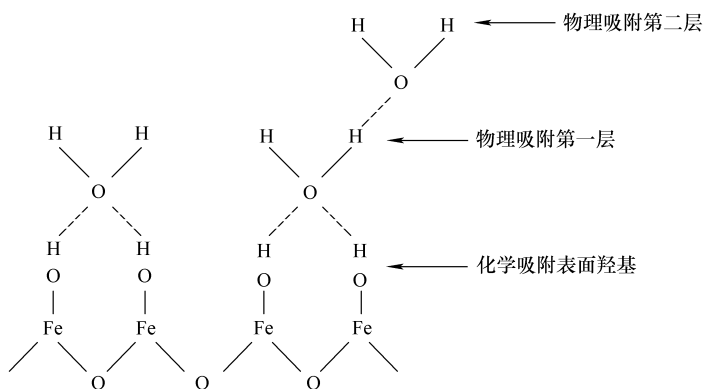


图 10-14 $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 的水吸附状态模式图

随着水蒸气的相对压力 $P_{\text{W}}/P_{\text{N}}$ （ P_{N} 为饱和水蒸气压）的增加，在固体表面上的水蒸气由单分子层吸附发展为多分子层吸附。若有细孔存在，便发生毛细管凝聚。水的毛细管凝聚由 Kelvin 公式表示。假设细孔为圆筒状，当其半径为 r_{K} （称为 Kelvin 半径）时，在给定的相对湿度下，水可在半径大小为 r_{K} 的细孔中发生凝聚

$$r_{\text{K}} = \frac{2\gamma M}{\rho R T \ln\left(\frac{P_{\text{s}}}{P}\right)} \quad (10-7)$$

式中 R ——气体常数；

T ——绝对温度；

ρ ——水的密度；

γ ——水的表面张力；

P 、 P_{s} ——平面、曲面液面饱和蒸汽压；

M ——水的分子量。

在 $20 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内相对湿度和 Kelvin 半径之间的关系如图 10-15 所示。相对湿度越大，能发生水凝聚的毛细管孔径越大。水的电离所引起的离子传输使固体材料的电导率增加。另外，由于毛细管凝聚的细孔半径与绝对温度成反比，因此，温度越高，水凝聚的毛细管的细孔半径就越小。

10.2.3 电解质湿度传感器

有些物质的水溶液是能够导电的，被称为电解质。无机物中的酸、碱、盐绝大部分属于电解质。由于电解质具有强烈的吸水性，其电导率又随其吸水量的多少而发生变化。因此，电解质是人们最先进行研究的湿度敏感材料。

如果将某种盐的饱和溶液置于一定温度的环境中，若环境的相对湿度高，溶液将由环境中吸收水分，使溶液浓度降低；反之，溶液将向环境释放水分，使溶液浓度增加，甚至有固相析出。电解质溶液的电导率与溶液的浓度有关，而溶液的浓度在一定温度下又是环境相对湿度的函数，利用这个特性制成了电解质湿度传感器。

电解质的材料很多，但以电解质氯化锂湿度传感器最为典型，其结构如图 10-16 所示。它是用一个圆筒形支架作为器件的基体，一般要在支架的表面上浸涂一层含有聚苯乙烯醋酸酯 (PVAC) 和氯化锂 (LiCl) 水溶液的混合液，均匀地涂于圆筒表面。当被涂溶液的溶剂挥发干后，即凝聚成一层其阻值可随环境湿度变化的感湿薄膜。在一定的温度 (20 ~ 50℃) 和一定的相对湿度 (20% RH ~ 90% RH) 下，经过 7 到 15 天老化处理，即可得到一个可供实用的电解质湿度传感器。氯化锂浓度不同的单片湿度传感器其感湿的范围也不同。浓度低的单片湿度传感器对高湿度敏感，浓度高的单片湿度传感器对低湿度敏感。图 10-17 是氯化锂湿度传感器的电阻湿度特性。

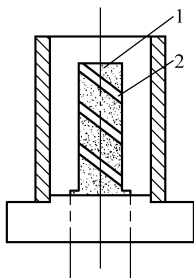


图 10-16 氯化锂湿度传感器

1—圆筒 2—平行的两根钨丝

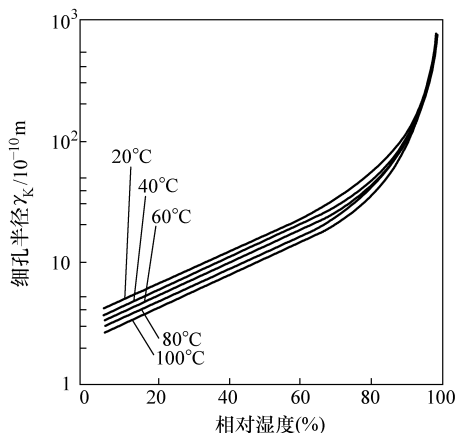


图 10-15 毛细管凝聚时的相对湿度和 Kelvin 半径

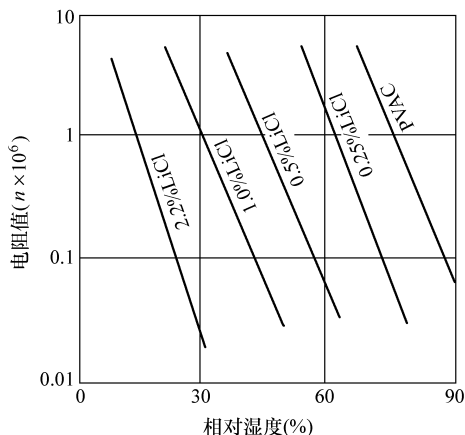


图 10-17 氯化锂湿度传感器的电阻湿度特性

10.2.4 半导体陶瓷湿度传感器

半导体陶瓷湿度传感器主要是利用陶瓷湿度材料烧结制备形成的多孔结构，吸附或凝聚

水分子作用于导电通路，从而改变陶瓷本身的电导率或电容量。利用多孔结构陶瓷的电导率或电容率随外界湿度变化的特点，可以制成湿度传感器。常用的陶瓷湿度敏感材料种类繁多、化学组成复杂。陶瓷湿度敏感材料按其感湿特性大体可以分为电阻型、电容型和阻抗型等；按其工艺特点可以分为烧结体型、厚膜型和薄膜型。

制造半导体陶瓷湿敏电阻的材料，主要是不同类型的金属氧化物。图 10-18 是几种典型的金属氧化物半导体陶瓷的湿敏特性。由于它们的电阻率随湿度的增加而下降，故称为负特性湿敏半导体陶瓷。

一般认为，作为湿敏材料的多晶陶瓷，由于晶粒间界的结构不够致密与缺乏规律性，不仅载流子浓度远比晶粒内部小，而且载流子迁移率也要低得多。所以，一般半导体陶瓷的晶粒间界电阻要比体内高得多。因而半导体陶瓷的晶粒间界便成了半导体陶瓷中传导电流的主要障碍。正由于这种高阻效应的存在，使半导瓷具有良好的湿敏特性。

水分子中的氢原子具有很强的正电场。当水在半导体陶瓷表面附着时，就可能从半导体陶瓷表面俘获电子，使半导体陶瓷表面带负电，相当于表面电势变负。如果该半导体陶瓷是 P 型的，则由于水分子的吸附使表面电势下降，这类材料就是负特性湿敏半导体陶瓷。它的阻值随着湿度的增加可以下降三至四个数量级。对于 N 型半导体陶瓷，由于水分子附着同样会使表面电势下降，如果表面电势下降比较多，不仅使表面的电子耗尽，同时将大量的空穴吸引到表面层，以致有可能达到表面层的空穴浓度高于电子浓度的程度，出现所谓表面反型层，这些空穴称为反型载流子，它们同样可以在表面迁移而对电导做出贡献。这就说明水分子的附着同样可以使 N 型半导瓷材料的表面电阻下降。由此可见，不论是 N 型还是 P 型半导体陶瓷，其电阻率都可随湿度的增加而下降。

还有一种材料（如 Fe_3O_4 半导体陶瓷）的电阻率随着湿度的增加而增大，称为正特性湿敏半导体陶瓷。

10.2.5 高分子湿度传感器

高分子湿度传感器与陶瓷型湿度传感器相比，具有量程宽、响应快、湿滞小、制作简单、成本低等优点，逐渐成为研究的重点。根据湿度传感原理，高分子湿度敏感材料可分为电容型、电阻型、SAW 型、光敏型等，目前，对电容和电阻高分子湿度敏感传感器研究较为深入。

1. 电容型高分子湿度传感器

(1) 结构与原理 电容型高分子湿度传感器结构如图 10-19 所示。在上下电极之间是聚纤亚胺（PI）湿敏膜。它的感湿原理是基于高分子膜的介电常数 $\varepsilon \approx 5$ 和水分子的介电常

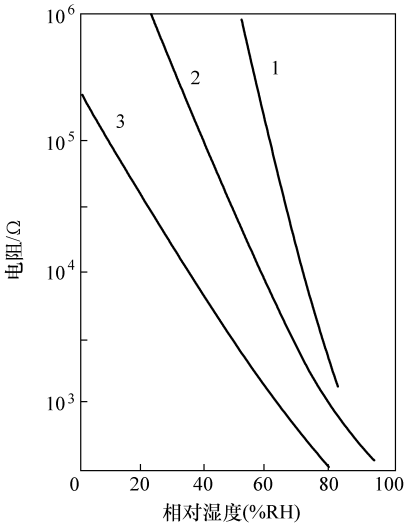


图 10-18 几种典型的金属氧化物
半导体陶瓷的湿敏特性
1— $\text{ZnO}-\text{LiO}_2-\text{V}_2\text{O}_5$ 系 2— $\text{Si}-\text{Na}_2\text{O}-\text{V}_2\text{O}_5$ 系
3— $\text{TiO}_2-\text{MgO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ 系

数 $\varepsilon \approx 80$ 相差较大, 随着环境湿度变化, 高分子膜吸附水分子的量不同, 会改变其电容值, 由此可测定相对湿度。典型响应特性如图 10-20 所示。

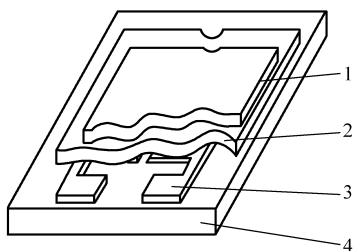


图 10-19 电容型高分子湿度传感器结构

1—上电极 (Au) 2—PI 湿敏膜
3—下电极 (Au/Cr) 4—衬底 (石英)

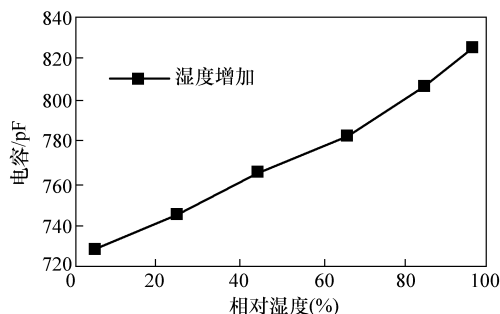
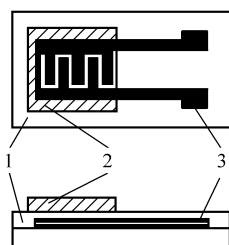


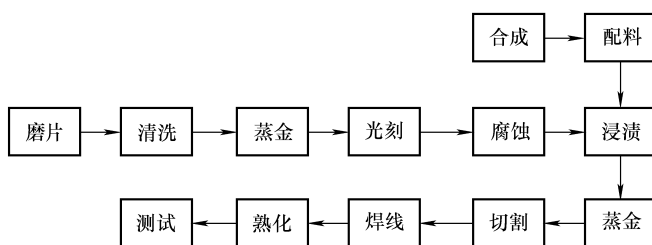
图 10-20 电容型高分子湿度传感器响应特性

电容型高分子湿度传感器的研究始于 20 世纪 50 年代, 至 20 世纪 70 年代投入商品化生产, 目前占有高分子湿度传感器 70% 的市场。早期, 高分子电容湿敏材料多用醋酸纤维及其衍生物, 目前则主要采用醋酸丁酸纤维素 (CAB)。此外还有聚酰亚胺 (PI)、聚砜、等离子聚合聚丙烯、交联聚乙烯基羧酸酯、PMMA (线性、交联、等离子聚合) 等。

(2) 工艺 图 10-21 示出高分子薄膜电介质电容式湿度传感器, 图 10-21a 为其结构, 图 10-21b 为其制造工艺流程。首先在洗净的玻璃基片上, 蒸镀一层极薄 50nm 的梳状金质, 并联作为下部电极; 然后在其表面上涂覆已经配制好的醋酸纤维素溶液; 待其干固成介质薄膜后, 再在其上蒸镀一层多孔透水的金质薄膜作为上部电极; 最后, 将上、下电极焊接引线, 就制成了电容式高分子膜湿敏传感器。湿敏薄膜厚度约为 500nm, 膜厚小于 200nm 时, 上、下部电极可能短路。当厚度大于 $1\mu\text{m}$ 时, 测湿响应特性将变差。电极厚度一般要求为 50nm。



a)



b)

图 10-21 高分子薄膜电介质电容式湿敏传感器

a) 结构 b) 制造工艺流程

1—高分子薄膜 2—上部电极 3—下部电极

2. 电阻型高分子湿度传感器

(1) 结构与原理 电阻型高分子湿度传感器的结构如图 10-22 所示。其可分为电子导电型和离子导电型两类。高分子电子导电型湿度传感器, 也称为“涨缩型湿度传感器”。它

通过将导电粉末（金属、石墨等）掺入膨胀吸湿高分子中制成湿敏膜。随湿度变化，石墨发生膨胀或收缩，从而使导电粉末间距变化，电阻随之改变。主要有交联亲水性丙烯酸聚合物掺入碳粒子、聚丙烯酰胺加碳粉、聚乙烯醇（PVA）加炭黑等。离子导电型湿度传感器的感湿原理是高分子湿敏膜吸湿后，在水分子作用下，粒子相互作用减弱，迁移率增加；同时吸附的水分子电离使离子载体增多，膜电导随湿度增加而增加。

（2）工艺 图 10-23 为聚苯乙烯磺酸锂电阻式湿敏传感器的结构。它是将占质量 8% 的二乙烯苯作交联剂与质量占 92% 的苯乙烯共聚，制成聚苯乙烯作为基片，是具有一定机械强度和绝缘性能的亲水性高分子聚合物。将基片浸入浓度为 98% 的硫酸中，进行磺化。硫酸中应加入约 1% 的硫酸银催化剂，磺化温度为 40℃，历时 30 ~ 65min。然后，用去离子水冲洗，这样在基片的表面上就制备了一层亲水性的磺化聚苯乙烯。将磺化聚苯乙烯基片放入氯化锂饱和溶液中进行离子交换，温度为 20 ~ 40℃，时间不等，于是把吸湿性很强的锂离子交换到磺化聚苯乙烯上去，于是就得到一种湿敏性很强的聚苯乙烯磺酸锂湿敏膜。在湿敏膜上印制梳状电极即制成了高分子湿敏传感器。聚苯乙烯磺酸锂是一种强电解质，由于极强的吸水性，吸水后电离，在其水溶液里就含有大量的锂离子。吸湿量不同，聚苯乙烯磺酸锂的阻值也不同，根据阻值变化可测量相对湿度。

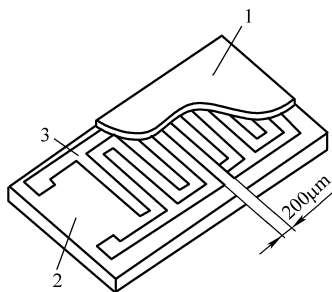


图 10-22 电阻型高分子湿度传感器结构

1—聚合物湿敏膜 2—金电极 3—基底

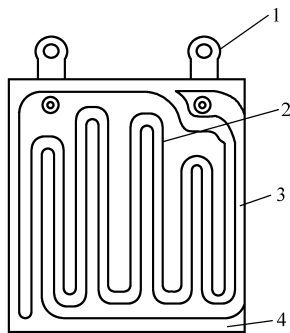


图 10-23 聚苯乙烯磺酸锂电阻式湿敏传感器的结构

1—引线端 2—湿敏膜 3—梳状电极 4—基片

3. 特性参数

以典型的羟乙基纤维素碳电阻型高分子湿度传感器为例，说明高分子湿度传感器的主要特性参数。

（1）感湿特性 羟乙基纤维素碳湿度敏感材料，在吸湿和脱湿两种情况下的感湿特性曲线，如图 10-24a 所示。当湿度大于 90% RH 的高湿段，干湿特性曲线具有负的斜率，这是由于混入浸涂液中的离子性杂质所引起的。在干燥和超净条件下制得的器件，这一现象就极其轻微。图 10-24b 中给出了三种不同条件下制备的湿敏器件的感湿特性曲线。曲线 A 是理想器件所应具有感湿特性曲线；曲线 B 为在正常批量生产中器件的感湿特性曲线；曲线 C 是在高湿和离子污染较重的条件下所得器件的感湿特性曲线，另外在 25℃ 和 33.3% RH 条件下，其间的湿滞回线有一交叉点。对于一定的浸涂液，该点出现的位置是固定的，不同的浸涂液该点位置不同。

（2）温度特性 羟乙基纤维素碳湿度敏感材料在不同温度下的感湿特性曲线如图 10-25

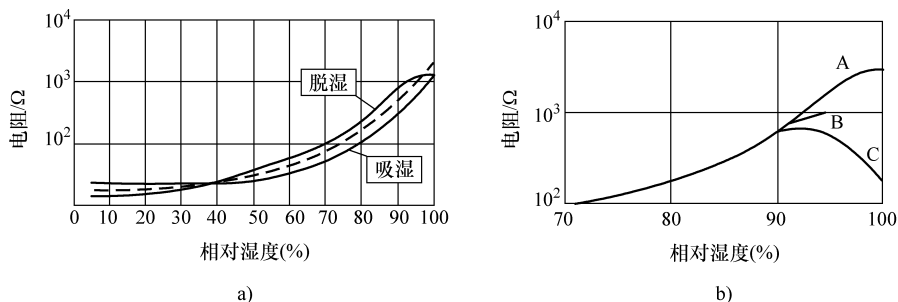


图 10-24 羧甲基纤维素碳湿度敏感材料的感湿特性曲线

a) 吸湿和脱湿 b) 不同制备条件

所示。该图的纵坐标为电阻比，它表示

$$\frac{R_{x\%RH}}{R_{33.3\%RH}} = \frac{t^{\circ}\text{C 和 } x\%RH \text{ 时湿度材料的阻值}}{t^{\circ}\text{C 和 } 33.3\%RH \text{ 时湿度材料的阻值}} \quad (10-8)$$

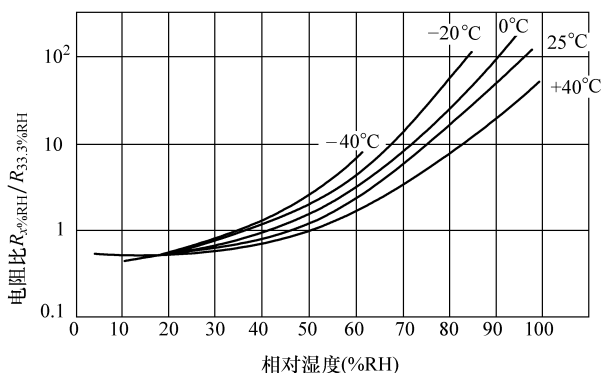


图 10-25 温度特性

(3) 响应特性 羧甲基纤维素碳湿度敏感材料的响应特性如图 10-26 所示。影响器件响应特性的因素是多重的。器件最初的快速响应相对应于感湿膜表面吸湿的结果，此段占全部阻值变化的 85% 左右。随后的缓慢变化相对应于水分在感湿膜内的扩散。

(4) 灵敏度 由于大多数湿度传感器的感湿特性曲线是非线性的，在不同的湿度范围内具有不同的斜率，故目前多用传感器在不同环境湿度下的湿度特征量之比来表示其灵敏度。

10.2.6 湿度传感器的应用

1. 挡风玻璃自动除湿

图 10-27 所示为一种用于汽车驾驶室挡风玻璃的自动除湿电路， R_s 为埋入挡风玻璃内的加热电阻丝，H 为湿敏传感器，如图 10-27a 所示； V_1 、 V_2 为施密特触发电路， V_2 的集电极负载为继电器 K 的线圈， R_1 、 R_2 为基极偏置电阻， R_p 为湿敏传感器 H 的等效电阻，如图 10-27b 所示。

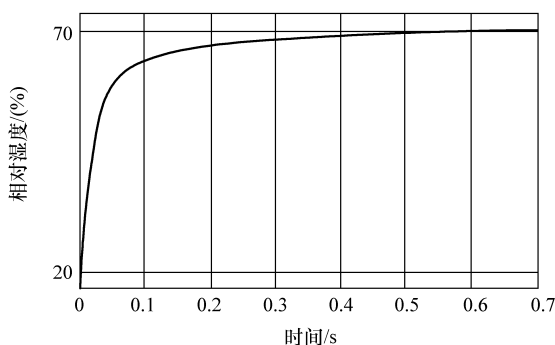


图 10-26 响应特性

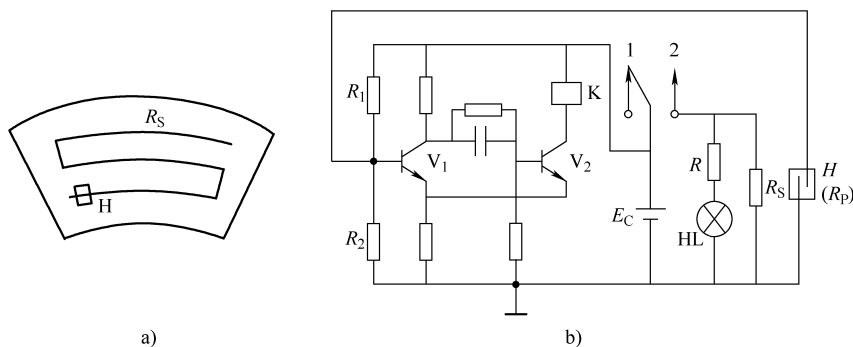


图 10-27 汽车驾驶室挡风玻璃的自动除湿电路

在不结露时,调整各电阻值,使 V_1 导通, V_2 截止。当湿度增大,湿敏传感器 H 的等效电阻值下降到某一特定值时, $R_p//R_2$ 减小,使 V_1 截止, V_2 导通,则继电器 K 线圈通电,它的常开触点 2 闭合,接通加热电源 E_C ,指示灯亮,电阻丝 R_S 通电,挡风玻璃被加热,驱散水汽。当湿度降到一定程度时, $R_p//R_2$ 回到不结露时的阻值, V_1 、 V_2 恢复到初始状态,指示灯灭,电阻丝 R_S 断电,停止加热。

2. 高湿度显示仪

图 10-28 是高湿度显示仪电路。它能在环境相对湿度过高时做出显示,告知人们应采取排湿措施了。湿度传感器采用 MS01 - A 型湿敏电阻,当环境的相对湿度在 (20% ~ 90%) RH 变化时,它的电阻值在 $10^2 \sim 10^4 \Omega$ 范围内改变。为防止湿敏电阻产生极化现象,采用变压器降压供给检测电路 9V 交流电压,湿敏电阻 R_H 和电阻 R_1 串联后接在它的两端。当环境湿度增大时, R_H 阻值减小,电阻 R_1 两端电压会随之升高,这个电压经 VD_1 整流后加到由 V_1 和 V_2 组成的施密特电路中,使 V_1 导通, V_2 截止, V_3 随之导通,发光二极管 VD_4 发光。高湿度显示电路可应用于蔬菜大棚、粮棉仓库、花卉温室、医院等对湿度要求比较严格的场合。

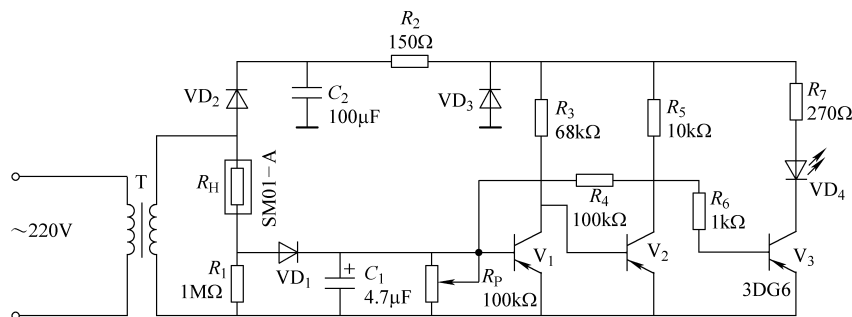


图 10-28 高湿度显示仪电路

10.3 离子传感器

离子传感器在化学、化工、生物、生物技术、医药卫生、轻工、食品、农业与环境保护等领域的应用日渐增多。它是化学量传感器中制作工艺较成熟、实用化较早的一类传感器。

离子传感器是将溶液中的离子活度转换为电信号的传感器，这里所说的电信号通常是指电位或电流。溶液中真正参加化学反应（或离子交换作用）的离子的有效浓度称为离子活度。

在强电解质溶液中，各种离子之间以及离子与溶剂分子之间并不是孤立的，它们之间存在着一定的相互作用，限制着彼此的活动，这样就使得离子在参加化学反应或离子交换时受到减弱，说得更确切些，就是离子的有效浓度会小于真实浓度。当溶液浓度极低时，离子之间、离子与溶剂分子之间的相互作用可忽略不计，因此，在较浓的溶液中离子活度不等于离子浓度，在非常稀的溶液中，活度才能和浓度相等。

离子传感器的基本原理是离子识别。利用固定在敏感膜上的离子识别材料有选择性地结合被传感的离子，从而发生膜电位或膜电流的改变。

离子传感器主要由敏感膜与换能器组成，其分类通常是根根据敏感膜或换能器的种类来划分。

按敏感膜的种类可以分为玻璃膜式离子传感器、固态膜式离子传感器、液态膜式离子传感器、以离子传感器为基本体的隔膜式传感器。

按换能器的类型可以分为电极型离子传感器、场效应晶体管型离子传感器、光导传感型离子传感器、声表面波型离子传感器。

10.3.1 离子选择性电极

离子选择性电极（ion selective electrode, ISE）是利用膜电势测定溶液中离子活度或浓度的电化学传感器，当它和含有待测离子的溶液接触时，在它的敏感膜和溶液的相界面上产生与该离子活度直接有关的膜电势。膜电势是一种相间电势，即不同两相接触，并发生带电粒子的转移，待达到平衡时，两相间产生的电势差。

1. 离子选择电极的基本结构

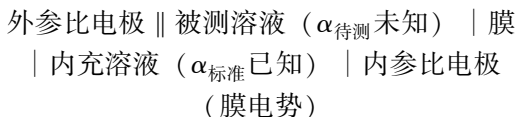
离子选择电极主要有电极膜、内充液和内参比电极三个部分组成,图 10-29 为离子选择电极的结构示意图。

电极膜可以是固体的也可以是液体的。有的能让离子通过(如细胞膜和渗透膜),有的不能让离子直接通过(如玻璃膜)。内充液是含有待测离子的电解质溶液,浓度稳定且已知。按电极膜的类型不同离子电极分为玻璃电极、固体膜电极和液体膜电极三种。

无论何种类型的膜,其膜电势是不能单独直接测定出来的。但可以通过测定电化学电池(即原电池)的电动势而计算出来。

2. 离子选择性电极工作原理

离子选择性膜电极作为指示电极,它是半个电池(气敏电极除外),必须和适当的外参比电极组成完整的电化学电池,如图 10-30 所示。把膜电极和外参比电极插入待测溶液中,构成的原电池为



此电池电势为

$$E = E_{\text{外参}} - E_{\text{指示}} \quad (10-9)$$

式中 E ——原电池的电势;

$E_{\text{外参}}$ ——外参比电极的电位;

$E_{\text{指示}}$ ——指示电极的电位。

所谓指示电极是指电位随待测溶液的活度变化的电极;参比电极是指电位不受待测溶液活度的影响,其值稳定不变的电极。

指示电极的电位与膜电势和内参比电极电势有关,即

$$E_{\text{指示}} = E_{\text{膜}} + E_{\text{内参}} \quad (10-10)$$

式中 $E_{\text{膜}}$ ——膜电势;

$E_{\text{内参}}$ ——内参比电极的电位。

将式(10-8)代入式(10-7)得

$$E = E' + E_{\text{膜}} \quad (10-11)$$

式中 E' ——外参比电极与内参比电极电位的代数和。

而膜电势是膜两边溶液之间的相间电势差,它与溶液中离子的浓度(活度)有关

$$E_{\text{膜}} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{\alpha_{\text{待测}}}{\alpha_{\text{标准}}}$$

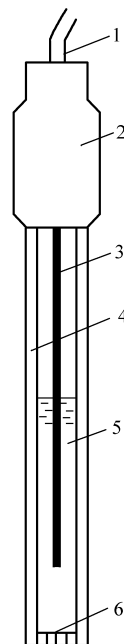


图 10-29 离子选择性电极的结构

1—导线 2—罩帽 3—内参比电
4—电极管 5—内充液 6—电极膜

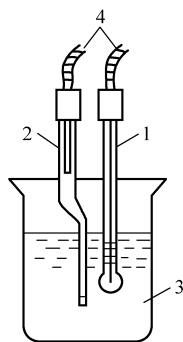


图 10-30 测量溶液 pH 值的电极系统

1—玻璃电极(指示电极)
2—外参比电极
3—电解质溶液

(10-12)

式中 n ——电荷数（或溶液中离子的价态）；

F ——法拉第常数；

R ——摩尔气体常数；

T ——热力学温度；

$\alpha_{\text{待测}}$ 、 $\alpha_{\text{标准}}$ ——分别为待测溶液和标准溶液中同种离子浓度（活度）。

膜电势 $E_{\text{膜}}$ 将随未知离子浓度（活度）不同而改变。所以只要测定上述原电池的电动势就可以计算出该膜的膜电势 $E_{\text{膜}}$ ，根据式（10-10）就可以求出非标准溶液中离子的浓度（活度）。

3. 离子选择性电极的分类

按膜的组成和结构，国际纯粹化学与应用化学联合会（IUPAC）推荐对离子选择性电极分类如图 10-31 所示。

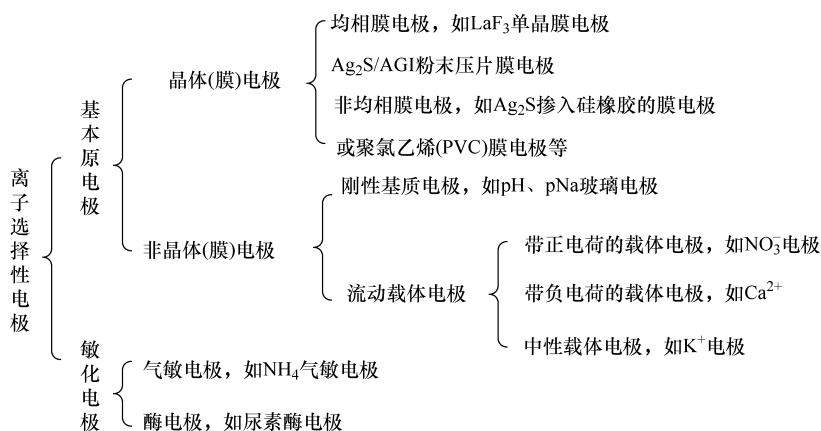


图 10-31 离子选择性电极的分类

4. 晶体膜电极

晶体膜电极可细分为均相膜电极和非均相膜电极两种。前者由一种或几种化合物的晶体均匀组合而成，后者除了晶体膜外，还加入了其他材料以改善电极传感性能。跟其他离子选择性电极类似，晶体膜电极由电极管、内参比电极、内充液和敏感膜四部分组成，常见结构如图 10-32 所示。氟离子选择性电极就是晶体膜电极。

氟离子选择性电极的敏感膜是氟化镧 LaF_3 单晶切片，其中掺杂少量 EuF_2 或 CaF_2 以增加导电性。内参比溶液一般为 0.1mol/L 的 $\text{NaCl} + 0.1\text{mmol/L}$ 的 NaF ，其中 Cl^- 的加入是为了稳定 Ag/AgCl 内参比电极的电位； F^- 的加入是为了稳定单晶 LaF_3 膜内参比溶液一侧的膜电位。

LaF_3 的晶格中有空穴，在晶格上的 F^- 可以移入晶格邻近的空穴而导电。当氟电极插入到 F^- 溶液中时， F^- 在晶体膜表面进行交换。当温度为 25°C 时，该电极的膜电位满足

$$E_{\text{膜}} = K - 0.0591 \lg \alpha_{\text{F}^-} \quad (10-13)$$

该电极在 α_{F^-} 约为 $(0.1 \sim 5) \times 10^{-7} \text{mol/L}$ 的范围呈能斯特响应， α_{F^-} 检测下限约为 10^{-7}mol/L ，接近于 LaF_3 的溶解度。

待测溶液的 pH 值控制在 $5 \sim 7$ 之间。当 pH 值高时，溶液中的 OH^- 与氟化镧晶体膜中

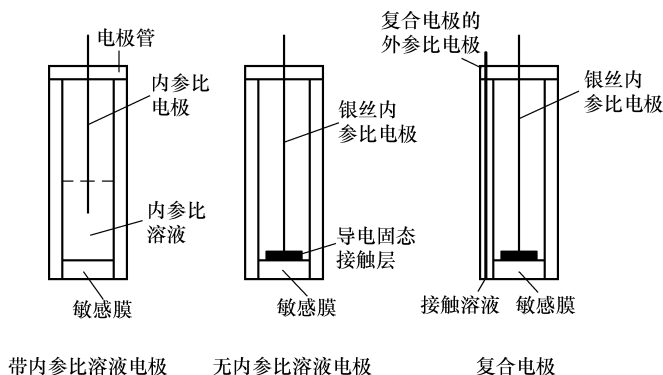


图 10-32 离子选择性电极常见结构示意图

的 F^- 交换；当 pH 值较低时，溶液中的 F^- 生成 HF 或 HF_2^- 。

5. 非晶体膜电极

这类电极包括刚性基质电极和流动载体电极，刚性基质电极也称作玻璃膜电极，其敏感膜是由离子交换型的薄玻璃片或其他刚性基质材料组成，膜的选择性主要由玻璃或刚性材料的组分来决定，如 pH 玻璃电极和一价阳离子（钠、钾等）的玻璃电极。

(1) 玻璃电极 成分不同的玻璃膜可制成对不同阳离子响应的玻璃电极。pH 玻璃电极是最早出现，也是研究最成熟的一类离子选择电极。

玻璃电极的结构如图 10-33 所示。在电极玻璃管下端装一个特殊材料的球形薄膜，玻璃管内装有一定 pH 值的缓冲溶液作内参比溶液，溶液中浸一根内参比电极。

在 SiO_2 基质中加入 Na_2O 、 Li_2O 和 CaO 烧结而成厚度约为 0.05mm 的玻璃膜对 H^+ 有选择性，用这种敏感膜就构成了 pH 玻璃电极。

玻璃电极使用前，必须在水溶液中浸泡。水浸泡时，表面的 Na^+ 与水中的 H^+ 交换，形成一个三层结构，即中间的干玻璃层和两边的水合硅胶层。水合硅胶层具有界面，构成单独的一相，厚度一般为 0.01 ~ 10 μm 。在水化层，玻璃上的 Na^+ 与溶液中的 H^+ 发生离子交换而产生相界电位。

将浸泡后的玻璃电极和参比电极放入待测溶液，构成测定 pH 的原电池（见图 10-30）。水合层表面可视为阳离子交换剂。如图 10-34 所示，溶液中 H^+ 经水合层扩散至干玻璃层，干玻璃层的阳离子向外扩散以补偿溶出的离子，离子的相对移动产生扩散电位，两者之和构成膜电位。

玻璃电极水合硅胶层表面与溶液中的 H^+ 活度不同，形成活度差， H^+ 由活度大的一方迁向活度小的一方，达到平衡时有

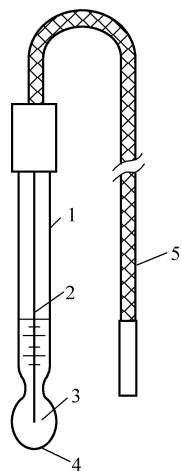


图 10-33 玻璃电极基本结构

1—玻璃电极杆 2—内参比电极
3—内参比液 4—玻璃膜
5—导线

$$H_{\text{溶液}}^{+} = H_{\text{硅胶}}^{+}$$

$$E_{\text{内}} = K_1 + 0.059 \lg \frac{\alpha_2}{\alpha'_2} \quad (10-14)$$

$$E_{\text{外}} = K_2 + 0.059 \lg \frac{\alpha_1}{\alpha'_1} \quad (10-15)$$

式中 $E_{\text{外}}$ ——膜外溶液与外水合硅胶层相界电位；

$E_{\text{内}}$ ——膜内溶液与内水合硅胶层相界电位；

α_1, α_2 ——外部试液、电极内参比溶液的 H^{+} 活度；

α'_1, α'_2 ——玻璃膜外、内水合硅胶层表面 H^{+} 活度；

K_1, K_2 ——玻璃膜外内表面性质决定的常数。

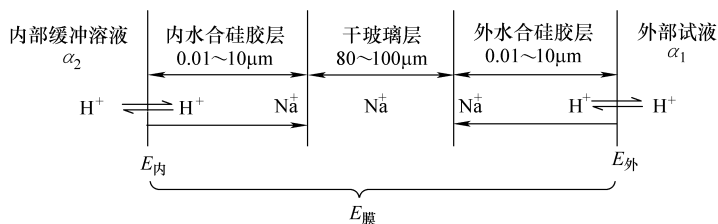


图 10-34 膜电位产生示意图

由于玻璃膜内、外表面的性质基本相同，则有 $K_1 = K_2$ ， $\alpha'_1 = \alpha'_2$ 。在 25°C 时，膜电位 $E_{\text{膜}}$ 为

$$E_{\text{膜}} = E_{\text{外}} - E_{\text{内}} = 0.059 \lg \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (10-16)$$

由于内参比溶液中的 H^{+} 活度（ α_2 ）是固定的，则

$$E_{\text{膜}} = K' - 0.059 \lg \alpha_1 = K' - 0.059 \text{pH}_{\text{溶液}} \quad (10-17)$$

玻璃膜电位与试样溶液中的 pH 呈线性关系。式中 K' 是由玻璃膜电极本身性质决定的常数。

(2) 流动载体电极 流动载体电极即液膜电极，钙离子电极是液膜电极的代表。

钙离子电极结构如图 10-35 所示。将离子交换剂渗透进疏水性的多孔性膜里，形成一层薄膜——电极的敏感膜。内参比溶液为 Ca^{2+} 水溶液。内外管之间的液膜是液体离子交换剂 0.1mol/L 二癸基磷酸的苯基磷酸二辛酯溶液。液膜极易扩散进入多孔膜，但不溶于水，故不能进入试液溶液。

二癸基磷酸根可以在液膜-试液两相界面间来回迁移，传递钙离子，直至达到平衡。由于 Ca^{2+} 在水相（试液和内参比溶液）中的活度与有机相中的活度差异，所以在两相之间产生相界电位。在 25°C 时膜电位为

$$E_{\text{膜}} = K + \frac{0.059}{2} \lg \alpha_{\text{Ca}^{2+}} \quad (10-18)$$

钙电极适宜的 pH 范围是 $5 \sim 11$ ，可测出 10^{-5}mol/L 的 Ca^{2+} 。

6. 敏化电极

敏化电极是在主体电极上覆盖一层膜或一层物质，使电极能提高或改变其选择性。

通过某种界面的敏化反应（气敏反应或酶敏反应），将试样中被测物转变为原电极能响应的离子。如氨气敏电极就是将 pH 电极和气透膜联用，可测量溶液或其他介质中的氨气。其结构如图 10-36 所示。放置在内充溶液中的 pH 玻璃电极和 Ag/Cl 内参比电极构成原电池。气透膜通常是由疏水但透气的醋酸纤维、聚四氟乙烯、聚偏四氟乙烯等材料制成。内充溶液为 0.1mol/L 的 NH_4Cl 。试样中氨气通过气透膜进入内充溶液，引起反应 $\text{NH}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+$ 左移或右移，内充溶液的 pH 值相应发生改变，测量原电池的电动势就可检测出试样中的氨气。

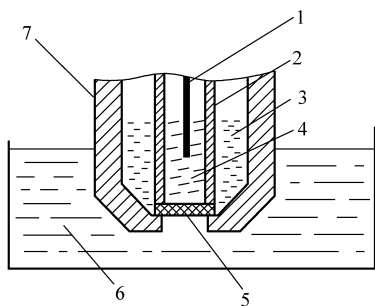


图 10-35 液膜电极的基本结构

- 1—Ag-AgCl 内参比电极 2—隔离管
3—液体离子交换剂 4—内参比液
5—多孔膜（载有离子交换剂）
6—试液 7—电极杆

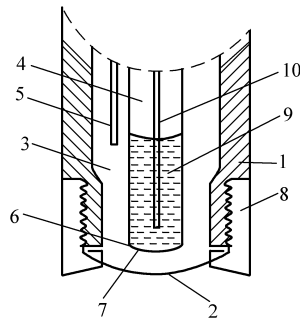


图 10-36 氨电极结构示意图

- 1—电极管 2—透气膜 3—0.1mol/L NH_4Cl 溶液
4—平底 pH 玻璃电极 5—Ag/AgCl 参比电极
6—敏感玻璃膜 7—0.1mol/L NH_4Cl 溶液薄层
8—可卸电极头 9—内参比溶液 10—内参比电极

改变敏感膜，可制作分别敏感 CO_2 、 NO_2 、 H_2S 、HF、HAc 和氯气等的气敏电极。

酶电极是在主体电极上覆盖一层酶，利用酶的界面催化作用，将被测物转变为适宜于电极测定的物质。如脲酶电极，就是把脲酶固定在氨电极上制成的。可检测血浆和血清中 0.05 ~ 5mmol/L 的尿素。

细菌电极是把某种细菌的悬浮体接在主体电极和透气膜之间制成的。

生物电极是把动物或植物组织覆盖于主体电极上制成的。例如有人将猪肾切片粘接在氨电极表面制成的生物电极可测谷氨酰胺含量等。

10.3.2 离子敏感场效应晶体管

离子敏感场效应晶体管（ion sensitive field effect transistor, ISFET）是由离子选择性电极 ISE 敏感膜和金属-氧化物-半导体场效应晶体管（metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET）组合而成的，是对离子具有一定的选择性的器件。相对于普通的 ISE，它具有高阻抗转换的优点，并具有放大功能，从而克服了普通的 ISE 不能用一般的仪器来测量的缺点，为电信号的准确检测提供了有利的条件，且灵敏度、响应时间均有所提高。此外，它还具有体积小、易于集成的优点，可以很容易地做成微型分析仪器和离子探针，可以用于微量溶液中离子活度的分析，这些优点使其在电化学的领域中得到广泛的应用。

ISFET 是一种测量溶液中离子活度的化学/生物传感器，其核心部件是 MOSFET。在 P 型硅的衬底上用扩散法形成两个 N 区，分别称为源极（S）和漏极（D）。在源极和漏极之间的 P 型硅表面生长一层金属氧化物 SiO_2 （有时其上还有 SiN_4 ），在 SiO_2 上再沉积一层金

属, 构成栅极 (G)。这样在栅极到硅片间为金属-氧化物-半导体结构。

如图 10-37 所示, 当栅极上加负偏压时, 由于栅极氧化层下面的硅为 P 型, 而源极为 N 型, 故源极和漏极之间不导通。当在栅极上加足够大的正向偏压 U_{gs} 时, 由于表面电场效应, 使栅氧化层下面硅表面由 P 型转变为 N 型, 即出现反型层。这个反型层将源区和漏区连接起来。这时若加 U_{ds} 电压, 便有电流 I_d 由源区通过反型层流到漏区, 这个电流称为漏极电流。显然 U_{gs} 越大, 表面反型越严重 (即反型层电阻越小), I_d 电流也越大。连接源区和漏区的 N 型反型层称为 N 型沟道。只有当栅电压大于某特定电压 U_T (阈值电压) 时, 在 P 型硅表面才能形成 N 型沟道的 MOSFET 器件, 称为 N 沟道增强型 MOSFET。

I_d 电流的大小随 U_{gs} 和 U_{ds} 的大小而变化, 其变化规律就是 MOSFET 的电流电压特性, 与普通的场效应晶体管特性类似。

ISFET 的基本结构类似于普通的 MOSFET, 因而具有类似的输出特性, 如图 10-38 所示。

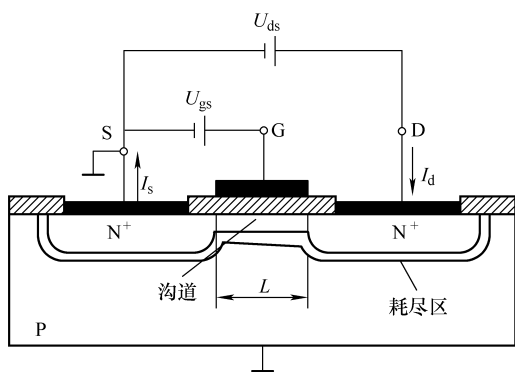


图 10-37 N 型沟道增强型 MOSFET 工作原理

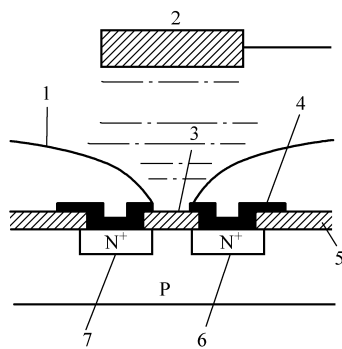


图 10-38 ISFET 的结构

1—封装材料 2—参考电极 3—栅绝缘体 (SiO_2)

4—铝膜 5—二氧化硅 6—源区 7—漏区

如果将 MOSFET 的栅极用铂丝作引出线, 然后在铂丝上涂覆一层离子敏感膜, 可制成涂丝 (或涂层) ISFET。将通用的 MOSFET 金属栅 (铝) 去掉, 让其绝缘体氧化层 (SiO_2 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$) 裸露, 或在其上涂敷对离子敏感的敏感膜。它与参比电极以及待测溶液一起起着栅电极的作用。参比电极上所加电压 (包括溶液-敏感膜之间的能斯特电位) 通过待测溶液加到绝缘栅上, 使半导体表面反型, 形成导电沟道。如果参比电极上施加的电压 U_{gs} 刚好使半导体表面反型, 这时参比电极上的电压称为阈值电压 (U_T)。

当将 ISFET 放入待测溶液中, 在溶液和敏感膜接触处的界面电势的大小, 取决于溶液中待测离子的活度 (浓度)。这一界面电势的大小将直接影响阈值电压 U_T 的值。

ISFET 阈值电压可写为

$$U_T = C + S \ln \alpha_i \quad (10-19)$$

式中 α_i ——待测溶液离子的活度 (浓度);

C 、 S ——对一定的器件、一定的溶液而言, 在固定参考电极电位时是常数。

10.3.3 离子传感器的应用

1. 低至皮摩尔浓度级的痕量检测

内带参比溶液的离子选择性电极的敏感膜常为固定高选择性离子载体的疏水膜，膜的内外两侧分别为特定的内参比液（水相）和试液（水相）。通常，这种离子选择性电极的检测下限在微摩尔浓度级。1997 年，Pretsch 等发现对于 PVC 膜铅离子选择电极，若采用离子缓冲的特定溶液作为内充液（加入高浓度 EDTA 钠盐），内参比溶液一侧的敏感膜表面几乎没有 Pb^{2+} ，当测量稀样品溶液时，内充液中的 Pb^{2+} 可通过膜、内充液界面和膜相向样品溶液扩散，使得膜外表面驻留微摩尔浓度级的 Pb^{2+} ，故常规 PVC 膜铅离子选择电极的检测下限也就在微摩尔浓度级。随后，Pretsch 等对多电极和相关机理进行了深入研究，发现这种内参比液中主离子浓度低而干扰离子浓度较高，而减少零电流测定条件下待测离子流、降低待测离子检测下限的方法具有普遍性，可扩展到 Ca^{2+} 、 Cd^{2+} 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 SCN^- 等离子检测，明显降低它们的检测下限，如图 10-39 所示。

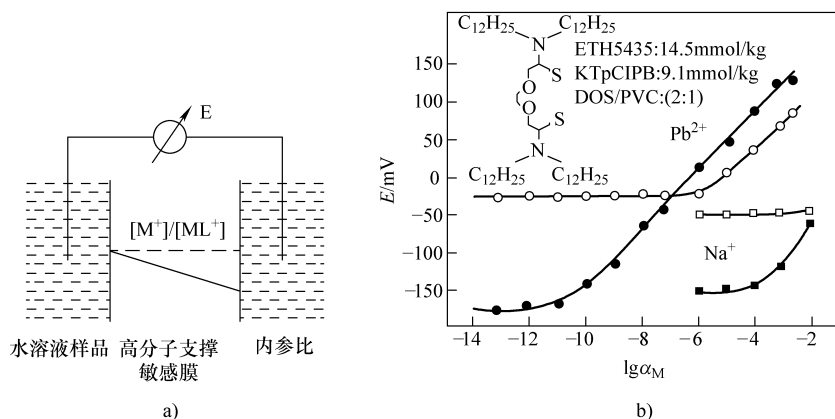


图 10-39 低至皮摩尔浓度级的痕量检测

图 10-39a 所示为离子选择电极的电动势 (E) 测量装置和膜内稳态浓度分布示意，常规离子电极即使在零电流条件下也形成流向样品的样品离子流。

图 10-39b 所示为相同敏感膜不同内参比液的两个 PVC 膜铅离子选择性电极对样品溶液中 Pb^{2+} 和 Na^+ 的响应，空心圆：内参比液为 $1\text{mol/L PbCl}_2 + 0.1\text{mol/L MgCl}_2$ （常规）；实心圆：参比液为 $1\text{mol/L PbCl}_2 + 0.05\text{mol/L EDTA-Na}$ ，该溶液中计算得到的 Pb^{2+} 和 Na^+ 活度分别为 10^{-12}mol/L 和 0.1mol/L 。

2. 全固态离子选择性电极

将固态敏感膜直接固定在电极上，不采用内充液，可研制全固态离子选择性电极。涂丝电极是在金属电极上直接涂上敏感膜制作的离子选择性电极，但是其电位稳定性欠佳。有文献认为这种电位不稳定现象来自于金属电极与敏感膜间存在水层，空气中 CO_2 影响该水层的 pH 而影响涂丝电极的响应性能，如果预先用疏水材料修饰金属电极，则稳定性会明显提高。

在金属或炭电极上沉积高分子薄膜，如聚吡咯类、聚芳香氨类、聚芳香酚类、聚酞菁、聚喹、聚二茂铁衍生物等，可制作性能良好的电位传感器，或以电极上聚合的导电高聚物取

代内充液，再外涂离子选择性敏感膜，制作成全固态电极。自 Heineman 的开创性工作以来，人们在铂、金、玻璃碳等电极上沉积的多种 N 原子、O 原子的聚合膜用于研制 pH 电位传感器。这类基于聚合膜的 pH 电位传感器易制备、内阻低、响应快且易于微型化，具有在线测量 pH 的潜力，也在很大程度上克服了 pH 玻璃电极易碎、内阻高和不能在含 HF 介质中使用等缺点。影响其 pH 值响应的因素有：聚合膜中的 N 原子、O 原子的质子化而构建的聚合膜相（溶液）内外的氢离子平衡；聚合膜选择性透过 H^+ 在基底电极上产生 pH 响应；和（或）溶液组分通过膜相发生的涉及 H^+ 的氧化还原反应。全固态电极也可制成传感器阵列，已用于血液中不同电解质组分的同时分析。

习 题

- 10-1 化学传感器的基本定义以及它的主要分类。
- 10-2 什么是燃烧式气体传感器？并简述它的工作原理。
- 10-3 陶瓷湿度传感器在应用中应该注意哪些问题？
- 10-4 简述离子选择性电极的工作原理。
- 10-5 什么是离子敏感场效应晶体管？说明其结构和工作原理。

参 考 文 献

- [1] 周真，苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京：清华大学出版社，2011.
- [2] 陈艾. 敏感材料与传感器 [M]. 北京：化学工业出版社，2004.
- [3] 何道清. 传感器与传感器技术 [M]. 北京：科学出版社，2008.
- [4] 倪星元，张志华. 传感器敏感功能材料及应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2005.

第 1 单元

生物传感器

学习要点

- ◆ 了解生物传感器的原理和特点；
- ◆ 生物传感器的分类、生物功能物质的分子识别机理；
- ◆ 了解酶传感器、免疫传感器、半导体生物传感器的原理、结构特点以及各自的应用。

相关知识链接

◆ 朱旭, 李春兰, 刘琴, 等. 石墨烯/纳米金复合材料的无酶葡萄糖生物传感器制备 [J]. 分析化学, 2011, 39 (12): 1846 – 1851.

◆ Suginta W, Khunkaewla P, Schulte A. Electrochemical biosensor applications of polysaccharides chitin and chitosan [J]. Chemical reviews, 2013, 113 (7): 5458 – 5479.

◆ Umar L, Alexander F A, Wiest J. Application of algae – biosensor for environmental monitoring [C]. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE. IEEE, 2015: 7099 – 7102.

◆ Feldman B J, Heller A, Heller E, et al. Method for manufacturing a biosensor: U. S. Patent 8, 701, 282 [P]. 2014 – 4 – 22.

引导案例

非侵入式血糖检测

据官方调查显示, 目前全球糖尿病患者人数已增至近 4 亿人, 预计在 20 年内将达到近 6 亿人, 而中国目前的糖尿病患者人数约有 9200 万。国内研究人员发表于《新英格兰医学杂志》的调查指出, 中国成年人中有近 10% 罹患糖尿病, 另有 16% 处于患病边缘。血糖检测, 对每位糖尿病人来说都是件痛苦不堪的事, 每天多次血糖测试, 每次都要经过指尖消毒、刺破采血、试纸检验等, 不仅要忍受扎针带来的疼痛, 还要承担因操作不当引起感染的风险。与此同时, 购买试纸、采血针等耗材, 积攒下来也是一笔不小的开支, 而且大量的耗材也会对环境造成污染。

2012 年美国普渡大学等机构的研究人员研发出一种新型生物传感器, 能够以非侵入方式进行糖尿病测试, 探测出人体唾液和眼泪中极低的葡萄糖浓度。此项技术还可用于检测多种化合物以契合其他的医疗状况。例如可将葡萄糖氧化酶替换为谷氨酸氧化酶来测量神经递质谷氨酸, 以进行帕金森症和阿尔茨海默症的测试。相关研究论文发表在《先进功能材料》

杂志上。非侵入式血糖检测仪的问世，给糖尿病患者带来便捷检测、减轻痛苦的同时，还将带动健康应用市场的发展。据国际专利评估机构对非侵入式血糖检测仪的初步分析预测，预估市场容量将高达数百亿美元。

根据全球知名市场调研公司 PMR (Persistence Market Research) 近日发布的一份报告指出，个性化药物和非侵入性生物传感器的出现及不断增长的需求，即时检验 (point-of-care testing, POCT) 需求的不断增加，慢性病发病率不断上升、人口不断老龄化以及生物传感器在各行业的广泛应用等均在不断地驱动全球生物传感器市场的增长。预计到 2020 年全球生物传感器 (biosensor) 市场的市值将达到 225 亿美元。

生物的基本特征之一是能够对外界的各种刺激作出反应，利用各种生物或生物物质 (酶、抗体、微生物等) 作为敏感材料，用以检测与识别生物体内化学成分的传感器称为生物分子传感器或简称生物传感器。根据生物反应的奇异性和多样性，从理论上讲可以制作出测量所有生物物质的多种多样的生物传感器。这类传感器是在无试剂条件下工作的，比各种传统的生物学和化学分析法操作简便、快速、准确。近年来，随着微电子学、生物电子学及生物技术的不断发展，各类生物传感器不断涌现，广泛应用于生物医学、生命科学、临床化学、电分析化学等领域。

11.1 生物传感器的结构及工作原理

1. 生物传感器的结构

生物传感器主要由分子识别部分和转换部分组成，分子识别部分由生物功能物质制成即为传感器的敏感元件，它与被测物质相接触时伴有物理、化学变化的生化反应，用于进行分子识别，是生物传感器的关键部分；转换部分即换能器，将敏感元件感受的信号转换为电信号或其他可用的信号，其基本结构

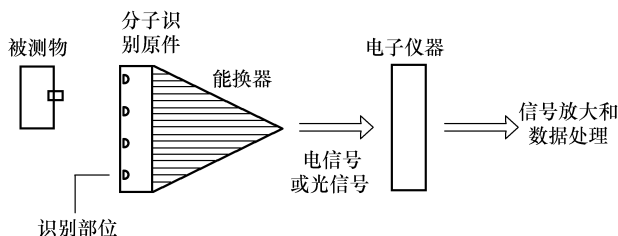


图 11-1 生物传感器基本结构示意图

如图 11-1 所示。分子识别部分的结构是将能识别被测物的功能物质，如酶 (E)、抗体 (A)、酶免疫分析 (EIA)、原核生物细胞 (PK)、真核生物细胞 (EK) 和细胞类脂 (O) 等用固定化技术固定在一中膜上，从而形成可识别被测物的功能性膜。

2. 生物传感器的工作原理

生物传感器的工作原理就是将待测物质经扩散作用进入生物膜敏感层，经分子识别而发生生物学作用，产生相应的光、热、声等信息，再经过相应的信号转换器变为可定量处理的电信号，再经二次仪表放大并输出，以电极测定其电流值或电压值，从而换算出被测物质的量或浓度，如图 11-2 所示。

3. 生物传感器的分类

按生物传感器中分子识别元件即敏感元件进行分类，有酶传感器、微生物传感器、细胞传感器、组织传感器和免疫传感器。显而易见，所应用的敏感材料依次为酶、微生物个体、

细胞器、动植物组织、抗原和抗体。按生物传感器的换能器即信号转换器进行分类，有生物电极传感器、半导体生物传感器、光生物传感器、热生物传感器、压电晶体生物传感器等；换能器依次为电化学电极、半导体、光电转换器、热敏电阻、压电晶体等。按被测目标与分子识别元件的相互作用方式进行分类，有生物亲合型生物传感器、代谢型或催化型生物传感器。图 11-3 表示生物传感器分类。

上述分类方法中，每一类又都包含许多种具体的生物传感器，例如，仅酶电极一类，根据所用酶的不同就有几十种，如葡萄糖电极、尿素电极、胆固醇电极、乳酸电极等。而就葡萄糖电极，有用 pH 电极或碘离子电极作为转换器的电位型葡萄糖电极，也有用氧电极或过氧化氢电极作为转换器的电流型葡萄糖电极等，实际上还可再进一步细分。总之，生物传感器是传感器中类别较多、内容较广的一大类传感器，随着科学技术的不断发展，它所包含的内容也必将更为丰富。

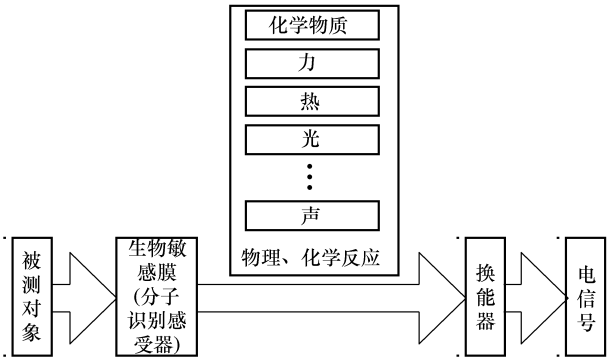


图 11-2 生物传感器原理示意图

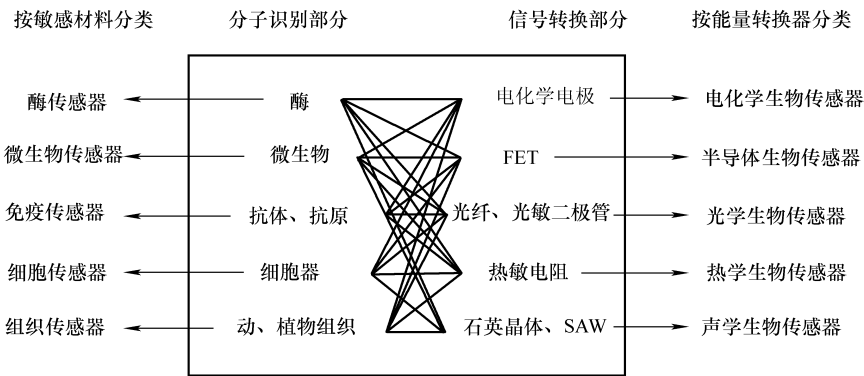


图 11-3 生物传感器的分类

11.2 生物功能物质的分子识别机理

生物传感器能够识别某些特定生物物质是基于在功能膜上进行的生物反应，生物反应包括生理生化、遗传变异和新陈代谢等一切形式的生命活动。研究生物传感器实际上就是研究如何将生物反应与传感器技术有机地结合起来。酶反应、微生物反应和免疫反应是三种典型的生物反应。

11.2.1 酶反应

1897 年，Buchner 兄弟用酵母细胞滤液成功地进行了糖至乙醇和二氧化碳的转化，该实

验通常被认为是酶学研究的开始。而此后的 20 世纪是酶学研究的顶峰时期,目前我们已经清楚地认识到,酶是一种由生物体产生的具有催化能力的蛋白质,它与生命活动息息相关。

酶因其具有特异的催化功能,而被称为生物催化剂。酶在生命活动中起着极为重要的作用,它们参加新陈代谢过程中的所有生化反应,与一般的催化剂相比较,酶催化具有如下特点:

- 1) 酶分子的催化效率是一般催化剂的 $10^7 \sim 10^{13}$ 倍。
- 2) 由于酶是蛋白质,极端的环境条件会使酶失活,因此酶催化反应一般需在常温、常压和近中性条件下进行。
- 3) 酶的催化具有高度的专一性(特异的选择性),即一种酶只能作用于一种或一类物质,产生一定的产物,如淀粉酶只能催化淀粉水解。

酶的分子识别功能及其反应过程如图 11-4 所示。

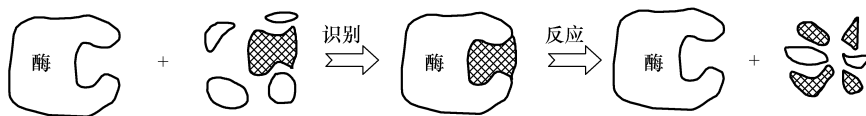


图 11-4 酶的分子识别功能及其反应过程示意图

酶的这种专一性及其催化低浓度底物反应的能力在化学分析上非常有用,可用于对酶的底物、催化剂、抑制剂以及酶本身的测定。

11.2.2 微生物反应

微生物反应是将微生物作为生物催化剂进行的反应,酶在微生物反应中起最基本的催化作用。微生物反应类型很多,主要有以下几种:

1. 同化与异化

根据微生物代谢流向,微生物反应可以分为同化作用和异化作用。

在微生物反应过程中,细胞同环境不断地进行物质和能量的交换,其方向和速度受各种因素的调节,以适应体内外环境的变化。细胞将底物摄入,并通过一系列生化反应转变成自身的组成物质,并存储能量,称为同化作用或组成代谢(assimilation)。细胞将自身的组成物质分解以释放能量或排出体外,称为异化作用或分解代谢(dissimilation)。代谢是由酶催化的,具有复杂的中间过程。例如葡萄糖进入细胞内氧化成水和 CO_2 要经过许多化学变化,这些过程总称为中间代谢。中间代谢步骤极多,顺序性很强,每一个环节上的化学物质都称为中间代谢物,它们在细胞内构成代谢流,并随着环境条件的变化通过可逆反应来调整反应。同化和异化之间的转化实际上就是代谢流方向的改变。

2. 自养与异养

根据微生物对营养的要求,微生物反应又分为自养型与异养型。自养微生物以 CO_2 作为主要碳源,无机氮化物作为氮源,通过细菌的光合作用或合成作用获得能量。异氧微生物以有机物作为碳源,无机物或有机物作为氮源,通过氧化有机物获得能量。绝大多数微生物都属于异养型。

3. 好气性与厌气性

根据对氧的要求与否,微生物反应可分为好氧反应与厌氧反应。微生物反应生长过程中

需要氧气的称为好氧反应，这类微生物也称为好气性微生物；微生物反应生长过程中不需要氧气，而需要 CO_2 的称为厌氧反应，这类微生物也称为厌气性微生物。

许多微生物既能好气生长，也能厌气生长，称为兼性微生物，如固氮菌、大肠杆菌、链球菌、葡萄球菌等。

11.2.3 免疫学反应

免疫指机体对病原生物感染的抵抗能力，可区别为自然免疫和获得免疫。自然免疫是非特异性的，能抵抗多种病原微生物的损害，如完整的皮肤、黏膜、吞噬细胞、补体、溶解酶、干扰素等。获得性免疫一般是特异性的，是在微生物等抗原物质刺激后才形成的，如免疫球蛋白等，并能与该抗原起特异性反应。

上述各种免疫过程中，抗原与抗体的反应是最基本的反应。

1. 抗原与抗体

抗原是能够刺激动物机体产生免疫反应的物质，但从广义的生物学观点看，凡是具有引起免疫反应性能的物质都可以称为抗原。抗原有两种性能，即刺激机体产生免疫应答反应及与相应免疫反应产物发生特异性结合反应。前一种性能称为免疫原性 (immunogenicity)，后一种性能称为反应原性 (reactionogenicity)。具有免疫原性的抗原是完全抗原 (complete antigen)。那些只有反应原性，不刺激免疫应答反应的称为半抗原 (hapten)。抗体是由抗原刺激机体产生的具有特异性免疫功能的球蛋白，又称免疫球蛋白。人类免疫球蛋白有 IgG、IgM、IgA、IgD 和 IgE 五类。

2. 抗原—抗体反应

抗原与抗体结合时将发生凝聚、沉淀溶解反应和促进吞噬抗原颗粒的作用。

抗体与抗原的特异性结合点位于 Fab (fragment antigen-binding) L 链及 H 链 * 的高变区，又称抗体活性中心，其构型取决于抗原决定簇的空间位置，两者可形成互补性构型。在溶液中，抗原和抗体两个分子的表面电荷与介质中的离子形成双层离子云，内层和外层之间的电荷密度差形成静电位和分子间引力。由于这种引力只在近距离间发生作用。抗原与抗体分子结合时对应位十分准确。这种准确定位是因为两个条件：一是结合部位的形状要互补于抗原的形状；二是抗体活性中心带有与抗原决定簇相反的电荷。然而，抗体的特异性是相对的，这表现在两个方面：其一，部分抗体不完全与抗原决定簇相对应，如鸡白蛋白的抗体可与其他鸟类白蛋白发生反应，这种现象称为交叉反应，交叉反应与同源性抗原反应有显著差异；其二，即便是针对一定半抗原的抗体，本身化学结构也不一致。

抗原与抗体结合尽管是稳固的，但也是可逆的。调节溶液的 pH 值离子浓度，可能促进可逆反应，某些酶能促进逆反应，抗原抗体复合物解离时，都保持自己本来的特性，如用生理盐水把毒素—抗毒素的中性混合物稀释 100 倍时得到的液体有毒性，该复合物能在体内解离而导致中毒。

11.2.4 膜技术

上述各类基础反应，均是在一种膜的表面或中间进行的，反应过程即识别过程。生物传感器性能的优劣取决于分子识别部分的生物敏感膜和信号转换部分的变换器。在这两部分中，尤以前者是生物传感器的关键部分。这里所谈及的不是天然的生物膜，而是由人工制造

的, 是通过一种固定化技术把识别物固定在某些材料中, 形成具有识别被测物质功能的人工膜, 我们称其为生物敏感膜 (biosensitive membrane)。生物敏感膜是基于伴有物理和化学变化的生化反应分子识别膜, 研究生物传感器的主要任务就是研究这种膜元件。

固化的首要目的是将酶等生物活性物质限制在一定的结构空间内, 但又不妨碍底物的自由扩散及反应。制成的这种生物敏感膜应该具有可用于分析底物, 能重复使用, 分析操作简单, 不再需要其他试剂, 对样品量要求小等特点。

生物传感器的响应速度和响应活性是一对相互制约的因素。以酶传感器为例, 随着被固定酶量的增多, 其活性相应增大的同时而使其膜厚度必然增厚, 其结果则导致响应速度的减慢。为了制成反应快、活性又大的生物敏感膜, 一些学者转向单分子层成膜技术, 又称为“LB” (langmuir – blodgett) 膜成形技术。LB 膜是利用纳米技术, 通过单分子层的多次连续转移所形成的多层组合超薄膜。LB 膜的基本原理是把许多生物分子, 如脂质分子和一些蛋白质分子, 在洁净水表面展开后形成水不溶性液态单分子膜, 横向压缩其表面积, 使液态膜逐渐过渡到成为一个分子厚度的拟固态膜。单分子膜制备好后则可以成形到基片上去。这种 LB 膜具有如下优点:

- 1) 膜的厚度可精确控制, 可精确到 nm 级。
- 2) 膜内分子排列有序而致密。
- 3) 脂质双层膜 (BLM) 同生物膜结构极其相似, 是仿生物膜的理想模型。
- 4) 有极佳的生物相容性。
- 5) 可把功能分子固定在 LB 膜的预定位置上进行分子识别的组合设计, 从而制成具有特殊功能的分子体系。

LB 膜的成功研制不仅协调了响应速度和活性间的矛盾, 且因其可微型化, 有望结合 IC 技术而制成微米级的生物传感器。

11.3 酶传感器

酶传感器是发展最早, 也是目前最成熟的一类生物传感器。早在 1962 年 Clark 等就提出了酶传感器原理。1967 年 Updike 等制成了酶电极。作为专一性很强的生物大分子, 酶在生物传感器的研制开发中占有非常重要的地位。在固定化酶的催化作用下, 生物分子发生化学变化后, 通过换能器记录这种变化, 从而间接测定出待测物的浓度。

11.3.1 酶电极原理

将酶敏感膜与电化学传感器相连接的用来测量底物浓度的电极叫作酶电极 (或称酶传感器)。酶电极可以分为电位型和电流型两种。

电位型是通过电化学传感器测量敏感膜电位来确定与催化反应有关的各种物质浓度的, 一般采用 NH_3 电极、 CO_2 电极、 H_2 电极等。当底物与酶膜发生作用时, 所产生的单价阳离子 H^+ 和 NH_4^+ 等由离子选择性电极所测得。这种测量电位型传感器不大消耗待测物, 但在生物溶液中存在着其他离子时很容易被干扰。其电位值可由 Nikolsky – Eisenmen 方程给出

$$E = \text{常数} - \text{Nlg}(C_i + K_{ij}C_j) \quad (11-1)$$

式中 C_i ——被测离子浓度；
 C_j ——干扰离子深度；
 K_{ij} ——选择性系数；
 N ——能斯脱系数。

由式 (11-1) 可见，电极电位与待测物离子浓度的对数成线性关系，由此可定量地检测待测物的含量。

电流型是由酶催化相关物质反应产生的电流来确定反应物质浓度的，一般采用氧电极、 H_2O_2 电极等，如克拉克型氧电极、过氧化氢电极等。当工作电极相对于参考电极维持在一恒定的极化电压时，测量输出电流。工作电极通常是惰性金属，但也有采用碳的。浸透性甘汞电极 (SCE) 或 $Ag/AgCl$ 电极为参考电极。当工作电极表面上电活性物质还原或氧化时，产生一个电流，该电流在一定的条件下可由下式给出：

$$i = nFAf \tag{11-2}$$

式中 n ——克分子量电极反应的电荷法拉第数；
 A ——电极面积；
 f ——电活性物质到电极的流量。

在合适的极化电压下，电极能产生一个高而平稳的电流—极限电流。它与极化电压无关，而与活性物质的浓度成线性关系。酶传感器的工作原理如图 11-5 所示。

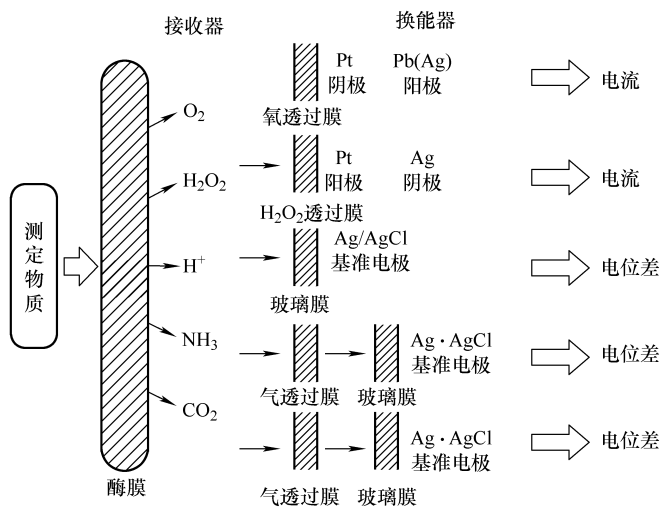
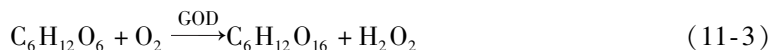


图 11-5 酶传感器的工作原理

11.3.2 葡萄糖传感器

葡萄糖传感器是第一支酶传感器，早在 20 世纪 70 年代中期已有葡萄糖传感器作为商品。葡萄糖传感器由葡萄糖氧化酶膜和克拉克型氧电极或过氧化氢电极组成。其电化学器件为 Pt 阳电极和 Pb 阴电极，中间溶液为强碱溶液，并在阳电极表面覆盖一层透氧气的聚四氟乙烯膜，形成封闭式氧电极，如图 11-6 所示。在葡萄糖氧化酶 (GOD) 的作用下，葡萄糖 ($C_6H_{12}O_6$) 发生氧化反应，消耗氧而生成葡萄糖酸内酯 ($C_6H_{12}O_{16}$) 和过氧化氢 (H_2O_2)。

上述过程可表示为



葡萄糖氧化时产生 H_2O_2 ，它们通过选择性透气膜在 Pt 电极上氧化，产生阳极电流，葡萄糖含量与电流成正比。如，在 Pt 阳极上加 0.6V 的电压，则 H_2O_2 在 Pt 电极上产生的氧化电流为



式中 e ——所形成电流的电子。

过氧化氢电极中 Pt 为阳极，Ag/AgCl 为阴极，电解液为 KCl 等中性溶液，外覆多孔膜，外加电压 0.6V，如图 11-7 所示。

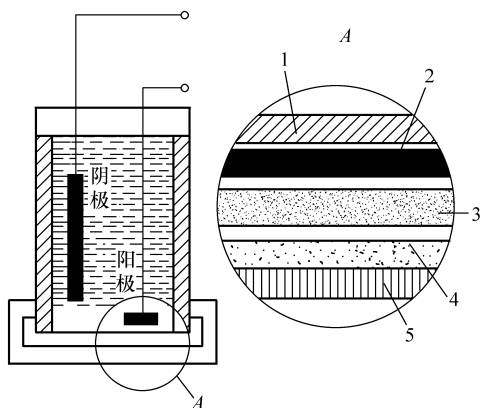


图 11-6 氧电极葡萄糖传感器

1—Pt 阳极 2—聚四氟乙烯膜 3—固相酶膜
4—半透膜多空层 5—半透膜致密层

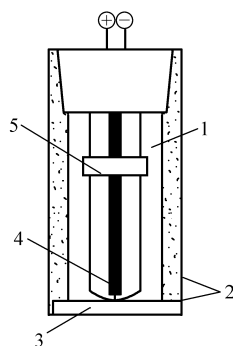


图 11-7 过氧化氢电极

1—内电介质 2—透析膜 3—酶
4—Pt 阳极 5—Ag/AgCl 阴极

11.3.3 酶传感器的应用

自酶传感器应用于测定葡萄糖以来，用同样的原理和电极制成了乳糖传感器、蔗糖传感器、半乳糖传感器等。

检测氨基酸的含量是医疗和食品工业中不可缺少的。与葡萄糖传感器相同，将 L-氨基酸氧化酶固定膜和氧电极或过氧化氢测定装置相结合即构成了 L-氨基酸传感器。此法在选择性上还存在一些问题，但当采用氨基酸脱氨基酶或脱羧酶时，则可有较高的选择性，此时必须用氨电极或二氧化碳电极。

血液中脂质的测定对诊断动脉硬化是极为重要的。在临床化学中，脂质中的胆甾醇、中性脂质、磷脂质均是十分重要的测定对象。测定血液中胆甾醇总含量要用两种酶。首先将胆甾醇脂用固定的胆甾醇脂酶加水分解，制成游离的胆甾醇，然后让固定的胆甾醇氧化酶对其起作用，使质胆甾醇氧化成胆甾烯酮。在此反应中，由于氧的消耗和生成过氧化氢，根据电极检测原理就可组成传感器系统，如图 11-8 所示。将固定的磷脂酶 D、胆碱氧化酶与电极相结合即得磷脂酰胆碱传感器。将固定的脂肪脂肪酶、丙三醇氧化酶与电极组合可做成测定中性脂质的传感器。

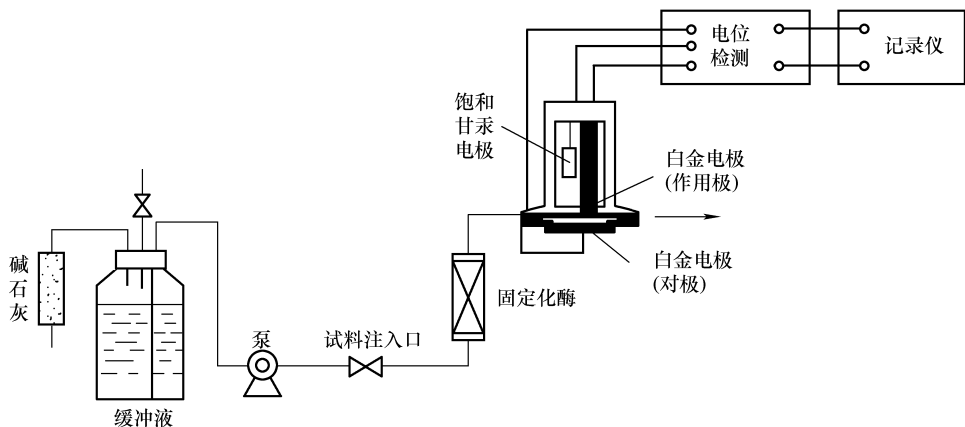


图 11-8 总胆甾醇传感器系统

测定尿素是诊断肾功能的重要手段，也是监护人工肾不可缺少的。由于尿素以脲酶进行分解而生成氨，故可将固定化的脲酶和铵离子电极或氨电极组合成尿素传感器。但在氨电极的选择性上尚存在一些问题。近年来，有人研究了一种硝化菌固定膜和氧电极组合而成的氨传感器，在该氨传感器上设置脲酶固定膜后，可以有选择性地定量测定尿素。

乙醇的定量测定是发酵工业、食品工业及医疗领域等不可缺少的。乙醇虽然用简单的气体分析法也可加以测定，但在生产线上测定则需要解决传感器的问题。乙醇的识别可采用乙醇脱水酶或乙醇氧化酶。将固定的乙醇氧化酶与氧电极或过氧化氢测定装置相连，即构成乙醇传感器。同理，用固定化的乳酸氧化酶或丙酮酸氧化酶与氧电极相连，即分别构成了乳酸传感器及丙酮酸传感器。

血液中酶含量的测定在医疗诊断中极为重要。如谷丙转氨酶（GPT）标准，对诊断肝炎是很重要的，该活性用前述的丙酮酸传感器就可测定。此外，也可测定谷草转氨酶（GOT）。

采用固定化乳酸菌与乳酸传感器组合，可测定血液中微量的苯丙氨酸，这对早期发现苯酮尿症极为重要。

11.4 免疫传感器

11.4.1 免疫传感器原理

免疫传感器是利用抗体对抗原的识别功能和结合功能而构成的。抗体被固定在膜上或固定在电极表面上，固定化抗体识别和其对应的抗原形成稳定的复合体，在膜上或电极表面形成的抗原抗体复合体，会引起膜电位或电极电位的变化。利用这种现象，可构成免疫传感器，其原理如图 11-9 所示。

免疫传感器不同于酶传感器，它可选择性地检出蛋白质或肽等高分子，这是它最大的特点。这种选择性显然是由于抗体的作用。目前已研制出多种免疫传感器，都表明抗体识别抗原的功能用于生物传感器是有效的。

11.4.2 酶免疫传感器

提高免疫传感器的灵敏度来进行超微量成分测量已经作了很多试验，其代表例子是利用标记酶的化学放大。因为利用了酶，所以叫作酶免疫传感器。

酶免疫传感器的基本结构如图 11-10 所示，传感器的选择性取决于抗体固定化膜。进行化学放大的酶共价结合在抗原上。以过氧化氢酶为标记酶的酶免疫传感器的测定法如下：

- 1) 在测定液内加入规定量的过氧化氢酶标记抗原，将免疫传感器浸入，使之发生抗原抗体反应。非标记抗原（被测定物质）和标记抗原互相竞争地结合在抗体膜表面上。
- 2) 洗净去掉未反应的抗原。

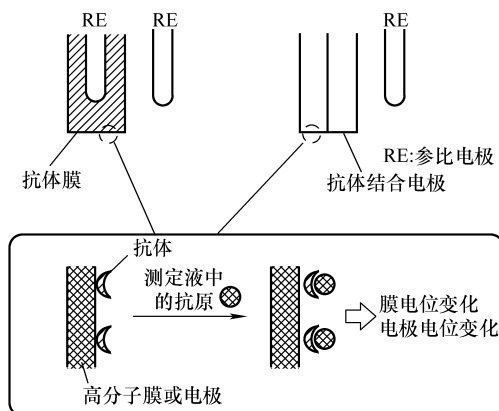


图 11-9 免疫传感器原理图

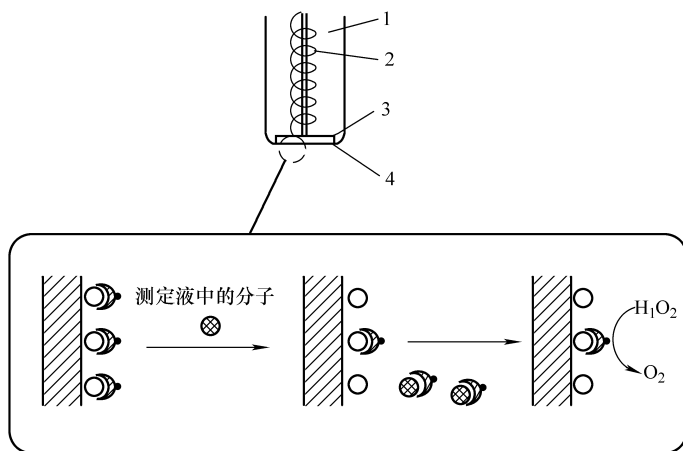


图 11-10 酶免疫传感器原理

1—电解液 2—Ag 阳极 3—Pt 阴极 4—透氧高分子膜/生物亲合性复合结膜

3) 把免疫传感器浸入酶活性测定液中，传感器则显示出由测定液的溶解酶所产生的电流值。添加规定量的 H_2O_2 ，结合在抗体膜表面的标记抗原的过氧化氢酶使 H_2O_2 分解，产生 O_2 。由于 O_2 的增加，会使传感器的电流值增大。从电流的增加速度或最大变化量可求出标记酶量，即结合于膜的标记抗原量。如求得抗体膜的最大抗原结合量，就可推算出被测的非标记抗原的量。

图 11-10 所示测定法中给出的是用过氧化氢酶为标记酶的情况，也可以用葡萄糖氧化酶等作为标记酶。

11.4.3 免疫传感器的结构与分类

1. 免疫传感器的基本结构

免疫传感器由分子识别系统（感受器）、转换器和电子放大器构成。这里所说的分子识别系统，在非均相免疫测定中是固定化的抗体或抗原。固定化的抗体（抗原）在与相应的抗原（抗体）结合时，自身的立体结构和物性发生变化，通过转换器将免疫反应信息转换为电信息，再由放大器进行信号的放大和处理。

2. 免疫传感器的分类

免疫传感器以免疫反应为基础，按照分子识别系统的免疫物质是否进行标记，分为标记型免疫传感器和非标记型免疫传感器。标记型免疫传感器也称间接型免疫传感器；非标记型也称直接型免疫传感器。

根据使用的换能器进行分类有：电化学免疫传感器、光学免疫传感器、压电免疫传感器和 SPR（表面等离子体共振）免疫传感器。

11.4.4 免疫传感器的应用举例

通常在感染乙型肝炎病毒后 40 ~ 120 天，血中出现乙型肝炎病毒抗原（HBsAg），故检出血中 HBsAg 是感染乙型肝炎病毒的标志。HBsAg 酶免疫传感器以氧电极作信号转换器，采用戊二醛将葡萄糖氧化酶标记到抗 HBsAg 抗体上制成酶标抗体，采用尼龙网作载体，用硫酸二甲酯活化载体后，加接 1，6—己二胺作间隔基，用戊二醛作偶联剂，将抗 HBsAg 抗体共价结合到尼龙网上制成抗体膜。用该方法制备的抗体膜，机械性能好，抗体结合量多，空间位阻小，气液通透性好。将该抗体膜按夹心法形成夹心结构膜，然后将其固定到具有流通池的氧电极的透气膜上组成流动注入式酶免疫传感器，如图 11-11 所示。以恒定流速向传感器通入葡萄糖溶液，夹心膜上的酶催化葡萄糖反应，生成葡萄糖酸内酯和过氧化氢，同时消耗氧，使氧电极电流减小。氧电极电流减小与抗原浓度成比例，据此记录的电流响应和标准曲线如图 11-12 和图 11-13 所示。该传感器响应时间小于 20s，恢复时间约 40s，最小检出量为 5ng/ml。

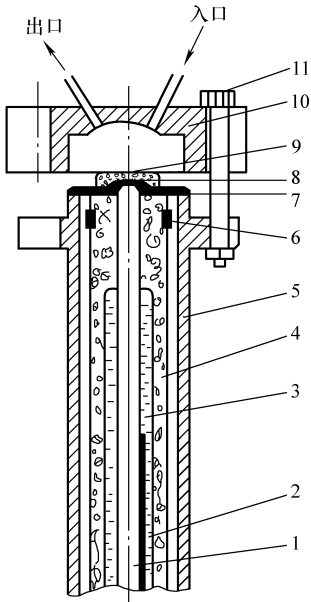


图 11-11 流通式酶免疫传感器结构

1—铂丝 2—Ag/AgCl 电极 3—KCl 溶液
4—聚四氟乙烯套管 5—不锈钢外套管
6—橡胶圈 7—垫圈 8—O₂ 膜
9—夹心结构膜 10—流通池盖
11—流通池固定螺丝

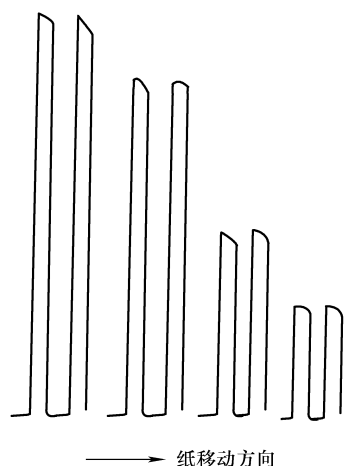


图 11-12 流通式酶免疫传感器响应

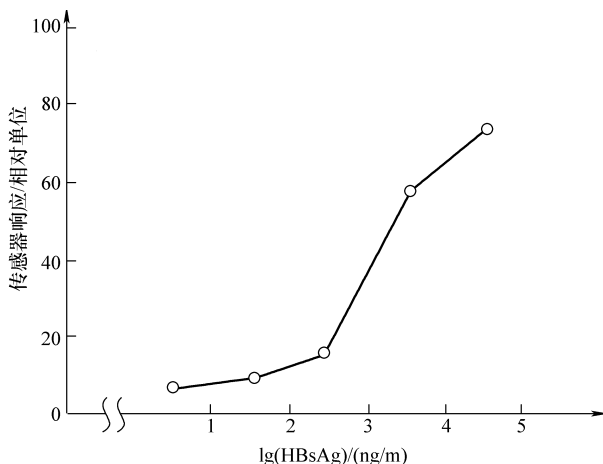


图 11-13 HBSAg 校准曲线

11.5 半导体生物传感器

半导体生物传感器 (semiconductive biosensor) 由半导体传感器与生物分子识别器件组成。半导体器件通常采用场效应晶体管 (field effect transistor, FET), 因此半导体生物传感器又称为生物场效应晶体管 (BioFET), 它是将催化蛋白质引到 FET 的栅极成为所谓的 BioFET。BioFET 源于两种成熟技术, 即固态集成电路技术和离子选择性电极。

11.5.1 半导体生物传感器特点

利用 FET 制作的生物传感器具有如下特点:

- 1) 构造简单, 便于批量制作, 成本低。
- 2) 属于固态传感器, 机械性能好, 耐振动, 寿命长。
- 3) 输出阻抗低, 与检测器的连接线甚至不用屏蔽, 不受外来电场干扰, 测试电路简单。
- 4) 体积小, 可制成微型 BioFET, 适合微量样品分析和活体内的测量。
- 5) 可在同一硅片上集成多种传感器, 对样品中的不同成分可同时进行测量分析得出综合信息。
- 6) 可直接整合到电路中进行信号处理, 是研制生物芯片和生物计算机的基础。

11.5.2 酶场效应晶体管结构及原理

酶场效应晶体管 (ENFET) 是将酶膜复合在离子敏场效应晶体管的栅极上, 在进行测量时, 酶的催化作用使待测物分子反应生成 ISFET 能够响应的离子。由于场效应晶体管栅极对表面电荷非常敏感, 由此引起栅极电势的变化, 这样就可对漏极电流进行调制, 通过漏极电流的变化, 便可获得待测物的信息。由于氢离子敏的 FET 最为成熟, 与 H^+ 变化有关的生化反应自然首先被用到 BioFET 方面, 相继出现了酶 - FET、免疫 FET 和细菌 FET 传感器。酶 FET 传感器的结构及原理如图 11-14 所示。

酶被固定在离子选择性膜表面，样品溶液中的待测底物扩散进入酶膜，并在膜中形成浓度梯度，则可以通过 ISFET 检测底物或产物。假设是检测产物，产物在胶层中向膜内外扩散，向离子选择性膜扩散的产物分子浓度不断积累增加，并在酶膜和离子选择性膜界面达到恒定。因反应速率基于底物浓度，稳定浓度则取决于底物浓度。实际上，EN-FET 都含有双栅极，一支栅极涂有酶膜，作为指示 ENFET，另一支涂上灵活的酶膜或清蛋白膜作为参比 IS-FET，称为差动式酶 - FET，其结构如图 11-15 所示。两支 FET 制作在同一芯片上，对 pH 和温度以及外部溶液电场变化具有同样的敏感性。也就是说，如果两支 FET 漏电流出现了差值，那只能是 ENFET 中促敏反应所致，而与环境温度、PH、加样体积和电场噪声等无关，故其差值即成比例于被测产物的浓度。

酶 FET 传感器与酶电极相比，具有输入阻抗小、响应时间短、线性好、体积小、样品用量少、信号倍增等特点，是酶传感器重要的发展方向，为发展微型和多功能集成生物传感器提供了重要的途径。例如，德国一家公司利用微系统技术开发了一种流通式的 6 通道的微流集成传感器，能够同时测定葡萄糖、乳酸和谷氨酸，样品量不到 1mL。系统还能在 2min 内完成多种酶的测定。

11.5.3 酶热敏电阻

尽管目前热敏元件种类繁多，但酶热敏电阻仍是最具普遍性的一种传感器。因为凡有生物体反应的地方，都可观察到放热或吸热反应（即存在焓变化）。酶热敏电阻就是以测定焓（enthalpy）变化作为测定原理的。因此，其测量对象范围涉及医疗、发酵、食品、环境监测等诸多方面。现已在临床化学分析方面用它测定血清和尿等体液中的葡萄糖、尿素和尿酸等。另外，在医疗和发酵食品制作过程中，此类传感器也被广泛用于测定青霉素、头孢菌素、酒精、糖类等。

1. 酶热敏电阻的测量原理

酶热敏电阻由固定化酶和热敏电阻组合而成，利用的原理是温度引起电阻变化，如图

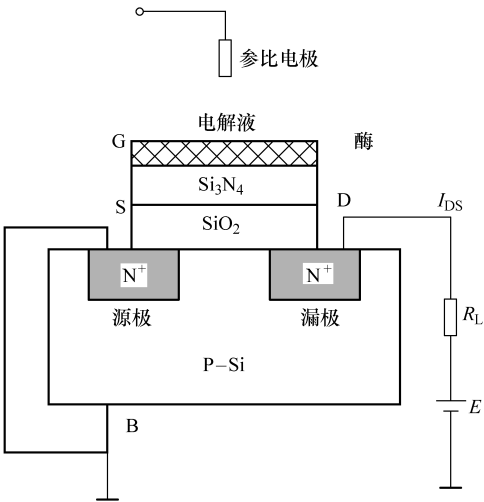


图 11-14 酶 FET 传感器的结构及原理

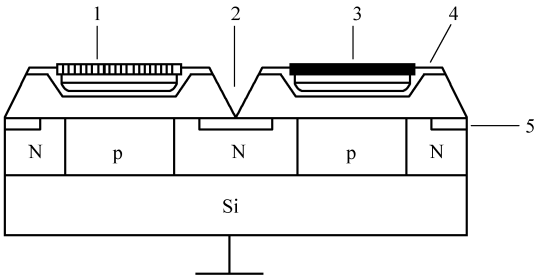


图 11-15 差动式酶 - FET 结构

1—参比端 2—漏极 3—酶膜
4—栅极 5—源极

11-16 所示。它可用作分子识别元件的物质不局限于酶、抗原、抗体、细胞器、微生物、动物细胞、植物细胞、组织等的固定化物，因而可根据这些物质作各种选择性检测。在检测时，由于识别元件的催化作用或因构造和物性变化引起焓变化，可借助热敏电阻将其变换为电信号输出。以酶促反应为例，焓变在 $5 \sim 100 \text{ kJ/mol}$ 范围内，它与参与酶促反应的相关物质量有关。用酶热敏电阻测定待测物含量是依据酶促反应产生热量的多少来进行的。若反应体系是绝热体系，则酶促反应产生的热全部用于使体系温度升高，测得体系的温度变化便可推知待测物的含量。若酶催化反应放出的热量全部用于反应体系温度升高，则满足下列关系：

$$\Delta T = \frac{-n\Delta H}{C_s} \quad (11-5)$$

式中 ΔT ——反应体系的温度变化；

n ——产物的摩尔数；

ΔH ——酶催化反应的焓变；

C_s ——反应体系的热容量。

由式 (11-5) 可见，体系的温度变化与产物的浓度呈线性关系。目前，热敏电阻可测定 10^{-4} K 的微小温度变化，误差小于 1%。

目前市售的酶种类超过 200 种，那么基于该原理至少可测量相对应种类数目的底物。

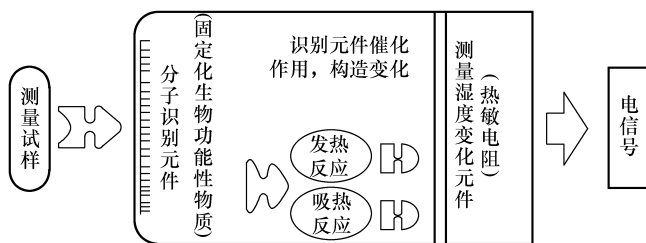


图 11-16 酶热敏电阻的测量原理

2. 酶热敏电阻传感器

瑞典 Lund 大学的 Mosbach 和 Danielsson 设计出一种装置，将酶固定在柱填充物上形成酶柱，酶柱与保温池和流动管路共同构成反应系统。在该系统中，酶促反应产生的热沿着酶柱传递和积累并被热敏电阻响应，如图 11-17 所示。这就是延续多年的酶热敏电阻生物传感器的主要形式。

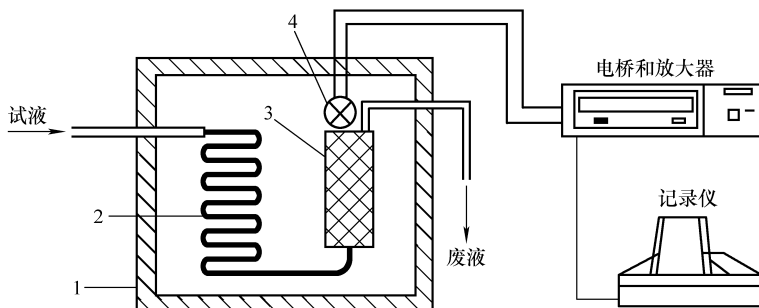


图 11-17 酶热敏电阻的测量系统

1—恒温槽 2—热交换器 3—反应器（酶柱） 4—热敏电阻

酶热敏电阻生物传感器要求酶的载体应不随温度变化而膨胀和收缩，热容量小，机械强度高，耐压性强，适合流动装置用；对酸、碱、有机溶剂等化学试剂和诸如细菌、霉菌等具生物学稳定性等。目前，常用的载体除玻璃以外，还有使用多糖类凝胶或尼龙制的毛细管等。

此类传感器可直接把酶固定在热敏电阻上或者将固定化酶膜装在热敏电阻上。这种密接型酶传感器具有响应速度快、灵敏度高、压耗小的特点。Tran - Minh 等使用这种类型的传感器测量了过氧化氢、葡萄糖和尿素。在常温（25℃）下电阻值为 2kΩ，温度系数为 - 3.9%/K 的热敏电阻，以戊二醛作交联剂，固定各种酶和清蛋白的混合物。用此方法制备的酶传感器在 10s 内就能出结果，且重复性好，误差在 3% 以内。

此外，还常采用另一种反应器型酶热敏电阻传感器。在反应器中充填过量的酶，可使响应范围更宽，且能长期保持一定水平的生物活性。酶热敏电阻传感器在临床分析、发酵分析及过程控制等方面都获得满意的效果。

酶热敏电阻传感器测定温度变化的方式如图 11-18 所示。

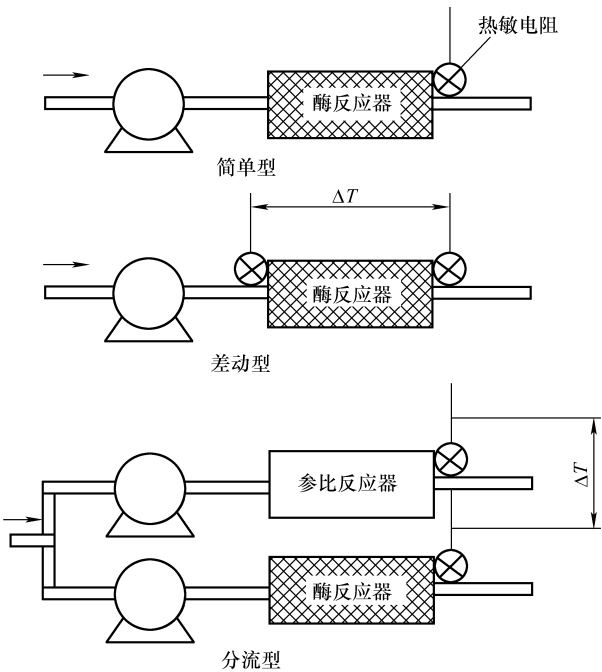


图 11-18 酶热敏电阻测温度方式

11.6 生物传感器应用

生物传感器在国民经济的各个领域有着十分广泛的应用，特别是食品、制药、环境监测、临床医学监测、生命科学研究等。测定对象为物质中化学和生物成分的含量，如各种形式的糖类、尿酸、尿素、胆固醇、胆碱、卵磷脂等。目前，生物传感器的功能已发展到活体测定、多指标测定和联机在线测定，检测对象包括近百种常见的生化物质，在临床、发酵、食品、环保及军事等方面显示出广阔的应用前景。

1. 在生物医学中的应用

在生物医学基础研究中，生物传感器可实时监测生物大分子之间相互作用。借助这一技术动态观察抗原、抗体之间结合与解离的平衡关系，可较为准确地测定抗体的亲和力及识别抗原表位，帮助人们了解单克隆抗体特性，有目的地筛选各种具有最佳应用潜力的单克隆抗体，而且较常规方法省时、省力，结果也更为客观可信。如用生物传感器测定重组人肿瘤坏死基因， $-\alpha$ （TNF- α ）单克隆抗体的抗原识别表位及其亲和常数。

在临床应用上，可利用酶、免疫等生物传感器检测体液中的各种化学成分，为医学诊断

提供依据。如美国 YSI 公司推出一种固定化酶型生物传感器,利用它可以测定出运动员锻炼后血液中存在的乳酸水平或糖尿病患者的葡萄糖水平。德国 Max - Plank 生物化学研究所将蜗牛神经细胞置于一个硅芯片上,使用微型塑料桩将它们围在特定位置,邻近的细胞彼此之间以及与芯片之间形成连接。每个神经细胞受到刺激后产生电脉冲,作用于芯片上的电脉冲从一个神经细胞传到另一个,再传回到芯片。这种生物芯片可以在脊髓受损部分建立起连接“桥梁”,也可作为生物传感器检测作用于神经细胞上的有毒物质或药用物质。

在生物医药方面,生物传感器已在癌症药物的研制方面发挥了重要的作用。如将癌症患者的癌细胞取出培养,然后利用生物传感器准确地测试癌细胞对各种治癌药物的反应,经过这种试验就可以快速地筛选出一种最有效的治癌药物。在利用生物工程技术生产药物时,将生物传感器用于生化反应的监视,可以迅速地获取各种数据,有效地控制生物工程产品的质量。

2. 在食品分析中的应用

生物传感器可广泛用于食品工业生产中,如对食品原料、半成品和产品质量的检测,发酵生产中的在线监测等。利用氨基酸氧化酶传感器可测定各种氨基酸(包括谷氨酸、L-天冬氨酸、L-精氨酸等十几种氨基酸)。食品添加剂的种类很多,如甜味剂、酸味剂、抗氧化剂等,生物传感器用于食品添加剂的分析已有很多报道。例如鲜度是评价食品品质的重要指标之一,通常由人的感官检验,主观性强,个体差异大,因此人们一直在寻找客观的理化指标来代替。Volpe 等曾以黄嘌呤氧化酶为生物敏感材料,结合过氧化氢电极,通过测定鱼降解过程中产生的一磷酸肌苷(IMP)、肌苷(HXP)和次黄嘌呤(HX)的浓度,来评价鱼的鲜度。

3. 在环境监测中的应用

环境监测对于环境保护非常重要。传统的监测方法有很多缺点,分析速度慢、操作复杂、且需要昂贵的仪器,无法进行现场快速监测和连续在线分析。生物传感器的发展和应用为其提供了新的手段。利用从活性泥状沉积物、河水、瓦砾和土壤中分离出来的微生物细胞,如细菌、酵母、真菌等制作识别元件,用于环境的监测。生物传感器在环境监测中应用最多的是水质分析,典型应用是测定生化得氧量(biochemical oxygen demand, BOD)。国内外已研究出许多不同的微生物 BOD 传感器以及其他用于水污染监测的微生物传感器,如基于重金属离子对微生物新陈代谢的抑制来检测重金属离子污染物。

大气污染是一个全球性的严重问题。微生物传感器也可以监测 CO_2 、 NO_2 、 NH_3 、 CH_4 之类的气体。二氧化硫(SO_2)是酸雨酸雾形成的主要原因,传统的检测方法很复杂。而将含亚硫酸盐氧化酶的肝微粒体的亚细胞脂类固定在醋酸纤维膜上,和氧电极组合制成电流型生物传感器,对 SO_2 形成的酸雨酸雾样品溶液进行检测,10min 可以得到稳定的测试结果。

随着科学的发展,不断有新的农药和抗生素用于农牧业,它们在给人类带来富足的同时,也给人类健康带来了危害。对农药和抗生素残留量的测定是一个重要的内容。近些年,人们就生物传感器在该领域中的应用也做了一些有益的探索,如分别用乙酰胆碱酯酶(AChE)和丁酰胆碱酯酶(BchE)为敏感材料,制作了离子敏场效应晶体管酶传感器,两种生物传感器均可用于蔬菜等样品中有机磷农药 DDVP 和伏杀磷等的测定,检测限为 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ mol/L}$ 。

4. 在军事上的应用

现代战争往往是在核武器、化学武器、生物武器威胁下进行的战争。侦察、鉴定和监测是整个“三防”医学中的重要环节,是进行化学战和生物战有效防护的前提。生物传感器由于具有高度的特异性、灵敏性和能快速地探测化学战剂和生物战剂(包括病毒、细菌和毒素等)的特性,将是最重要的异类化学战剂和生物战剂侦检器材。烟碱乙酰胆碱受体传感器和某种麻醉剂受体传感器,能在 10s 内检测出 10^{-9} 浓度级的生化战剂,包括委内瑞拉马脑炎病毒、黄热病毒、炭疽杆菌、流感病毒等。近年来,美国陆军医学研究和发展部研制的酶免疫生物传感器具有初步鉴定多达 22 种不同生物战剂的能力。美国海军研究出 DNA 探针生物传感器,在海湾沙漠风暴作战中用于检测生物战剂。用生物传感器检测生物战剂、化学战剂具有经济、简便、迅速、灵敏的特点。单克隆抗体的出现及其与微电子学的联系使发展众多的小型、超敏感生物传感器成为可能,生物传感器在军事中的应用前景将更为广阔。

习 题

- 11-1 什么叫酶?酶有什么性质?
- 11-2 微生物反应的特点是什么?微生物反应的类型有哪些?
- 11-3 什么叫抗原?什么叫抗体?
- 11-4 什么叫活性材料固定化技术?常用的固定化方法有哪些?
- 11-5 什么叫生物传感器?简述生物传感器的基本结构和工作原理。
- 11-6 生物传感器的特点是什么?它有哪些类型?
- 11-7 如何用生物传感器诊断一个病人是否得了乙肝?
- 11-8 试简述生物传感器的今后发展前景以及它对揭示人类生物信息所起得巨大作用。

参 考 文 献

- [1] 陈安宇. 医用传感器 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 夏银桥. 传感器技术及应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- [3] 曹光跃. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [4] 杨清梅, 等. 传感技术及应用 [M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2014.
- [5] 刘迎春, 等. 现代新型传感器原理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [6] 彭承琳. 生物医学传感器——原理与应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992.
- [7] 张洪润. 传感器技术大全: 中册 [M]. 北京: 北京航大出版社, 2007.
- [8] 姜远海, 等. 医用传感器 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [9] 许春向, 等. 生物医学传感器及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [10] 张先恩. 生物传感器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] 陈建元. 传感器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 陶红艳, 余成波. 传感器与现代检测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [13] 张洪润, 张亚凡, 等. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

第12单元

微传感器与智能传感器

学习要点

- ◆ 微传感器的特点；
- ◆ 智能传感器的功能和基本组成。

相关知识链接

◆ Forsentek. 微型压力传感器 [OL]. 深圳: 深圳福森泰科传感技术有限公司. <http://www.forsentek.com/ch/product4.html>;

◆ 比利科技. 霍尼韦尔 ST3000/900 系列全智能压力变送器 [OL]. 天津: 天津市比利科技发展有限公司. <http://www.tjbily.com/huoniweier/index.html>。

引导案例

浅谈飞机上的传感器

飞机上大约有 2000~4000 个传感器, 包括各种活动机件的即时位置传感器 (如襟、副翼位置、喷口大小、油门位置、减速板位置、起落架收放位置等), 飞机状态传感器 (如迎角、侧滑角传感器、飞机姿态传感器等), 各种参数 (如液压、油压、发动机振动量、滑油金属屑)、各种消耗品 (如油料剩余量、消耗速度等) 传感器, 还有结冰传感器, 火警传感器, 刹车压力传感器, 极限传感器, 过载传感器和生命传感器等, 飞机上的传感器之多, 不胜枚举。

为了满足航天飞行器测控的需要, 开发了一系列具有高精度、小型化、耐恶劣环境、较高技术水平的传感器。例如, 宽温区小型化压力传感器、高温薄膜压力传感器、CAN 总线压力传感器、发动机燃气热偶组传感器、一体化振动/冲击传感器、石英微机械陀螺、MMU/CNSS 组合导航系统。未来航天测控传感器的发展趋势是微型传感器、网络传感器技术和智能化传感器技术。例如, 以 MEMS 技术为基础的微型传感器仪表以较快的步伐进入航天测控应用领域。

在无人飞行器姿态控制中的 MEMS 微惯性导航系统集微陀螺、微加速度计及其信号处理单元为一体。该系统以硅材料为主, 用 MEMS 加工工艺制造而成, 其体积和质量比常规惯性导航系统至少下降 2、3 个数量级。采用 MEMS 技术制造的微型惯性测量单元 (MIMU), 没有转动的部件, 在寿命、可靠性、成本、体积和质量等方面都要大大优于常规的惯性仪表。所生产出来的标准化的、高性能航天器姿态测量仪器性能更好, 价格更便宜, 而且在航空航天平台均能使用。采用 MIMU 器件可使装置的重量大大减轻。

12.1 微传感器

MEMS（micro electric mechanical system）即为微电子机械系统，从广义上讲，MEMS 是指集微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路，甚至接口电路、通信和电源于一体的微型机电系统。图 12-1 是一典型的 MEMS 示意图。由传感器、信息处理单元、执行器和通信/接口单元等组成。其输入是物理信号，通过传感器转换为电信号，经过信号处理（模拟的和/或数字的）后，由执行器与外界作用。每一个微系统可以采用数字或模拟信号（电、光、磁等物理量）与其他微系统进行通信。MEMS 在航空航天、汽车、工业、生物医学、信息通信、环境监控和军事等领域有着广阔的应用前景。

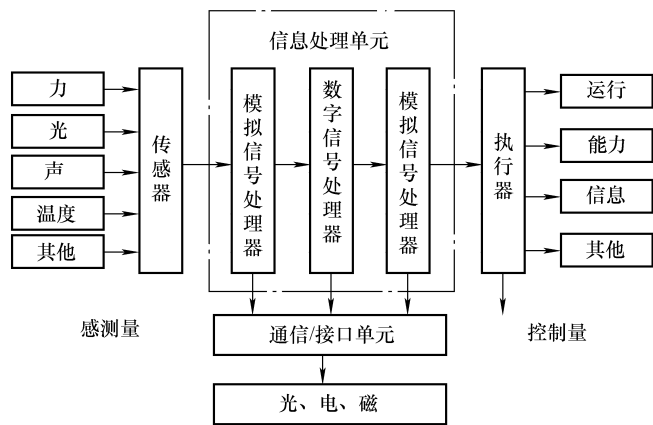


图 12-1 典型的 MEMS 示意图

12.1.1 微传感器及特点

利用 MEMS 技术制作的传感器称为 MEMS 传感器，也叫微传感器。与传统意义上的传感器相比，MEMS 传感器的体积很小，敏感元件的尺寸一般在 $0.1 \sim 100\mu\text{m}$ 之间。然而，MEMS 传感器并不仅仅是传统传感器比例缩小的产物，在理论基础、结构工艺、设计方法等方面，都有许多自身的特殊现象和规律。

微传感器可以是单一的敏感元件，这类传感器的一个显著特点就是尺寸小（敏感元件的尺寸从毫米级到微米级，有的甚至达到纳米级）。在加工中，主要采用精密加工、微电子技术以及 MEMS 技术，使得传感器的尺寸大大减小。

微传感器也可以是一个集成的传感器，这类传感器将微小的敏感元件、信号处理器、数据处理装置封装在一块芯片上，形成集成的传感器。

微传感器还可以是微型测控系统，在这种系统中，不但包括微传感器，还包括微执行器，可以独立工作。此外还可以由多个微传感器组成传感器网络或者通过其他网络实现异地联网。

微传感器具有一系列的优点，主要包括：

1) 体积小，重量轻。利用 MEMS 技术，微传感器的敏感元件尺寸大多在微米级，这使

得微传感器的整个尺寸也大大缩小,微传感器封装后的尺寸大多为毫米量级,有的甚至更小。例如,压力微传感器已经可以小到放在注射针头内,送进血管测量血液流动情况;或装到飞机或发动机叶片表面,用来测量气体的流速和压力。

2) 能耗低。绝大多数微传感器都是将非电量信号转换为电量信号,并且是无源的,也就是说工作时离不开电源。随着集成电路技术的发展,便携式测量仪器得到越来越多的应用。在很多场合,传感器及配套的测量系统都是利用电池供电的。因此传感器能耗的大小,在某种程度上决定了整个仪器系统可供连续使用的时间,而且为在某些需要采用电池供电且需要长时间工作的场合提供了可能。

3) 性能好。微传感器在几何尺寸上的微型化,在保持原有敏感特性的同时,提高了温度稳定性,不易受到外界温度干扰。敏感元件的自谐振频率提高,工作频带加宽,敏感区间变小,空间解析度提高。

4) 易于批量生产,成本低。微传感器的敏感元件一般是利用硅微加工工艺制造的,这种工艺的一个显著特点就是适合于批量生产。大批量生产使得微传感器单件的生产成本大大降低。

5) 便于集成化和多功能化。集成化是指将微传感器与后级的放大电路、运算电路、温度补偿电路等集成在一起,实现一体化;或将同一类的微传感器集成于同一芯片上,构成阵列式微传感器;或将几个微传感器集成在一起,构成一种新的微传感器。多功能化是指传感器能感知与转换两种以上不同的物理或化学参量。

6) 提高传感器的智能化水平。智能传感器是测量技术、半导体技术、计算技术、信息处理技术、微电子学和材料科学互相结合的综合密集技术。与一般传感器相比,智能传感器具有自补偿能力、自校准功能、自诊断功能、寻址处理能力、双向通信功能、信息存储、记忆和数字量输出功能。

12.1.2 微传感器加工技术

1. 体微加工技术

体微加工技术指利用蚀刻工艺对块状硅进行准三维结构的微加工,主要包括蚀刻和停止蚀刻两项关键技术。蚀刻又分为采用液体蚀刻剂的湿法蚀刻和采用气体蚀刻剂的干法蚀刻。湿法蚀刻又分为各向同性蚀刻和各向异性蚀刻。各向同性蚀刻法在硅片的所有方向均匀蚀刻,沿晶界面形成蚀刻边缘。各向异性蚀刻法蚀刻速度与单晶硅的晶向有密切关系,蚀刻边界是平滑变化的。

2. 表面微加工技术

表面微加工技术一般是采用光刻等手段,使得硅片等表面淀积或生长而成的多层薄膜分别具有一定的图形,然后去除某些不需要的薄膜层,从而形成三维结构。由于主要是对表面的一些薄膜进行加工,而且形状控制主要采用平面二维方法,因此被称为表面微加工技术。它与IC有较好的兼容。最终被去掉的薄膜部分被称为牺牲层,所以表面微加工技术也称为表面牺牲层技术。

3. 键合技术

固相键合技术就是不用液态粘结剂而将两块固体材料键合在一起,且键合过程中材料始终处于固相状态。主要包括阳极键合(静电物理作用)和直接键合两种。阳极键合主要用

于硅—玻璃键合，可以使硅与玻璃两者的表面之间的距离达到分子级。直接键合技术（依靠化学键）主要用于硅—硅键合，其最大特点是可以实现硅一体化微机械结构，不存在边界失配的问题。

4. 光刻电铸注塑技术

光刻电铸注塑技术（LIGA）是一种基于X射线光刻技术的MEMS加工技术。LIGA是德文Lithographie、Galanofomung和Abformung三个词，即光刻、电铸和注塑的缩写。主要包括X光深度同步辐射光刻、电铸制模和注模复制三个工艺步骤。由于X射线有非常高的平行度、极强的辐射强度、连续的光谱，使LIGA技术能够制造出高宽比达到500、厚度大于1500 μm 、结构侧壁光滑且平行度偏差在亚微米范围内的三维立体结构。这是其他微制造技术所无法实现的。LIGA技术被视为微纳米制造技术中最有生命力、最有前途的加工技术。利用LIGA技术，不仅可以制造微纳米尺度结构，而且还能加工尺度为毫米级的Meso结构。

微传感器加工技术除了以上几种，还有准LIGA技术、深槽刻蚀与键合工艺相结合、厚胶与电镀相结合、体硅工艺与表面牺牲层相结合等加工技术。

12.1.3 微传感器的应用

1. 热电堆

热电堆就是将多个热电偶串联起来构成的一种温度传感器或红外光探测器。热电堆的输出电压（输出温差电动势）是多个热电偶的输出电压之和。

在作为光电探测器使用时，热电堆的工作机理不同于量子光电探测器，而是一种热光电探测器；在结构上即把热电偶一端的表面涂上黑色薄膜，让其大量吸收光，并产生热量，而把另一端（参考极）罩住光、有时还涂上一层反射薄膜，不让吸收光，并保持在环境温度下，然后通过测量热电堆的温差电动势即可检测出红外光等的辐射。为了提高灵敏度和响应速度，热电堆光电探测器往往采用薄膜来制作。此外，热电堆光电探测器通常都放置于真空中或者惰性气体中。

图12-2给出了一种热电堆元件的结构。冷端置于硅衬底上，以提供有效的热沉（散热）。热端制备有黑色吸收体，以吸收红外辐射。红外辐射引起温度的上升量取决于入射的红外强度。热电堆所采用的两种不同的热电偶材料需要制作在低热传导率、低热容量的薄片上，这样可在冷端与热端之间产生更大的温度差，并因此而提高微传感器的性能。

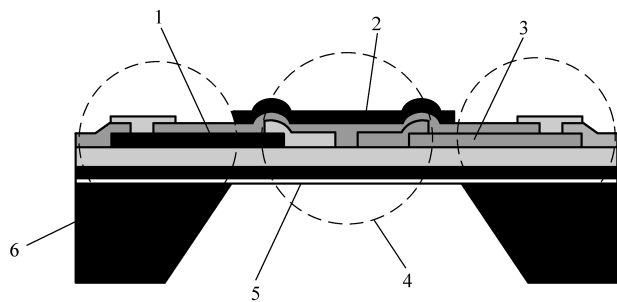


图12-2 热电堆截面图

1—热电偶材料1 2—黑色吸收体 3—热电偶材料2 4—热端 5—膜片 6—冷端

图 12-3 给出了这种热电堆元件的封装结构。虽然从原理上说, 热电堆元件对红外辐射的响应不受环境温度的影响, 但实际的器件输出还是会受到环境温度变化的影响。所以, 在元件中集成有一个热敏电阻, 用来探测环境温度的变化, 并进而对热电堆的输出特性进行补偿。此外, 由于热电堆同样对入射波长敏感, 所以滤光窗参数的设计非常重要。

2. 石英谐振温度微传感器

一种音叉结构的石英谐振温度微传感器如图 12-4 所示。谐振器工作于扭转振动模式, 谐振器的谐振频率为温度的函数。由于石英晶体谐振器的阻尼所带来的能量损耗一般在 $100\mu\text{W}$ 的量级, 因此这种微传感器在流体环境中的自热现象一般不会对测量结果产生影响。

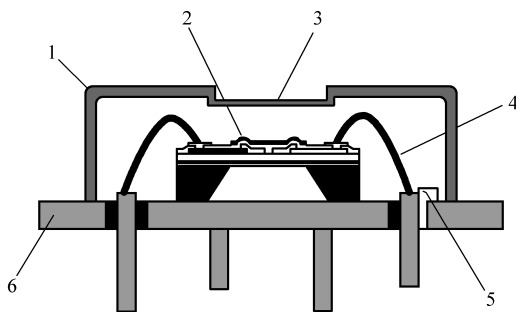


图 12-3 热电堆元件封装图

1—外壳 2—黑色吸收体 3—硅滤光窗
4—引线 5—热敏电阻 6—底座

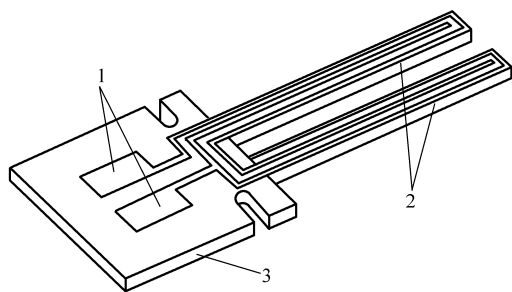


图 12-4 音叉结构的石英谐振温度微传感器

1—电极引出点 2—扭转振动音叉 3—固定块

石英晶体谐振器的基本频率 f_0 可根据对温度灵敏度的要求来选取。例如, 要求温度每变化 1°C 时频率变化 1000Hz , 如果谐振器的频率温度系数为 $35.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 则基本频率应为

$$f_0 = 1000 / 35.4 \times 10^{-6} \approx 28 \times 10^6 \text{Hz}$$

一般来说, 石英谐振式温度传感器的振荡频率范围大约为 $256\text{kHz} \sim 28\text{MHz}$, 温度系数的范围为 $19 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。在 $-50 \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度范围内, 灵敏度可达到 $1000\text{MHz}/^\circ\text{C}$ 左右, 分辨力可达到 0.0001°C 。某些特殊设计的传感器的测量范围可达到 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$, 但线性度比较差。

3. 红外光微传感器

利用微加工技术很容易实现辐射热测量器的设计制作。由于可以制作出很好的热绝缘微结构, 微传感器的性能也很理想。

图 12-5 所示为一种红外光微传感器的结构。这种微传感器的加工需要用到体加工工艺。由窄的氮化硅支撑梁支撑敏感膜片, 以实现热敏材料的热绝缘。在支撑梁上扩散出测量电极, 在测量电极上用真空沉积方法制作温度敏感膜。敏感膜常用的材料包括钛、氮化钛 (电阻温度系数约为 $0.24\%/^\circ\text{C}$) 以及氧化钒 (VO_x , 电阻温度系数约 $3\%/^\circ\text{C}$)。在衬底上通过支撑梁支撑着敏感膜, 其中心的敏感膜吸收热辐射, 如图 12-5b 所示。通过测量电极输出敏感膜的电阻值。

这种微传感器的 $1/f$ 噪声很低。通过在同一衬底基片上制作多个这样的岛状结构, 可实现红外光微传感器阵列。有文献报道, 利用氧化钒材料制作的红外光微传感器, 利用 300K 的黑体辐射测试, 得到的响应度为 $7 \times 10^4 \text{V/W}$ 。

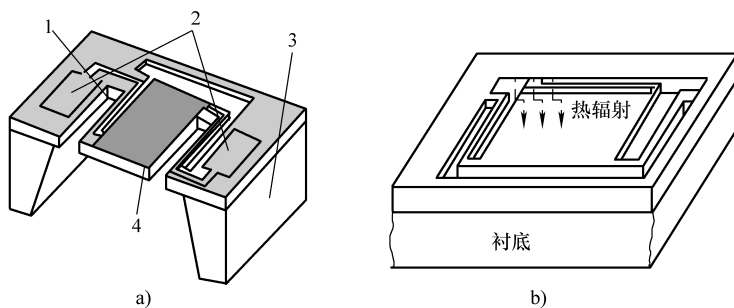


图 12-5 热辐射测量器型红外光微传感器结构

a) 剖面图 b) 结构图

1—支撑梁 2—测量电极 3—硅衬底 4—敏感膜片

4. 压力微传感器

压力微传感器是微机电系统中非常成功的一类。商业化的压力微传感器产品在许多不同的领域都得到了广泛的应用。在压力微传感器中，感受压力的弹性元件一般是膜。传统的压力传感器大多采用金属膜片，而在微机电系统中的压力微传感器，采用很少蠕变、疲劳和回滞的（单晶）硅膜取代金属膜片，使压力传感器取得了突破。微型压力传感器被广泛应用于汽车和航天工业中。大多数这种传感器都是基于由被测压力引起薄膜的机械变形和应力的原理。机械效应引起的薄膜的变形和应力可以通过几种转换方法将其转变成电信号输出。

压力微传感器的主要结构形式如图 12-6 所示。传感器元件通常由大小可以从几微米到几毫米见方的薄硅片组成。硅片的一面用微制造技术刻上一个空腔，空腔的顶部就形成了一个能在被测液体压力作用下变形的薄膜，硅薄膜的厚度通常为几个微米到几十个微米，由金属或陶瓷（耐热玻璃是常用材料）做成的底座支撑着这个硅结构。在图 12-6 中， p_1 为参考压力， p_2 为被测量的压力。施加压力后， p_2 大于 p_1 ，使薄膜产生形变，可以通过不同的转换方法转变成电信号输出。

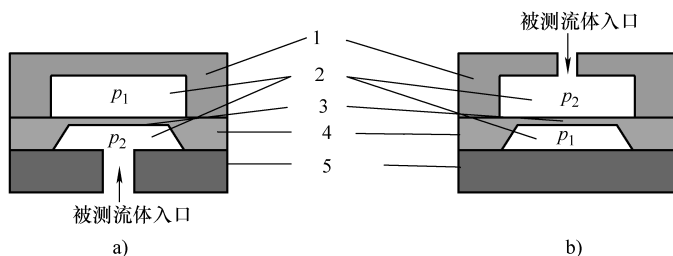


图 12-6 微压力传感器的横截面示意图

1—外壳 2—空腔 3—薄膜 4—带薄膜的硅片 5—底座（金属或陶瓷）

图 12-7 所示为压力微传感器的四种主要结构形式，其中 p_{input1} 及 p_{input2} 为被测量的压力， $p_{reference}$ 为参考压力。简单来说，压力微传感器可分为两类：一类为密封测量，即测量与一个密封的参照空腔相对的压力，测量得到的是绝对压力值，如图 12-7a、c 所示。密封的参照空腔是一个真空腔时，被测压力是以真空作为参考压力的“绝对”值，称为绝对压力传感器如图 12-7a 所示。反之，则为计量压力传感器如图 12-7c 所示。在这种情况下，真空空腔

是首选的, 因为其参照压力不会受温度影响。另一类则是非密封测量, 即测量两个端口输入的压力差, 如图 12-7b、d 所示。如另一端口所输入的压力为环境压力, 则为差压微传感器, 如图 12-7b 所示, 而采用差分测量结构得到的是差压传感器, 如图 12-7d 所示。

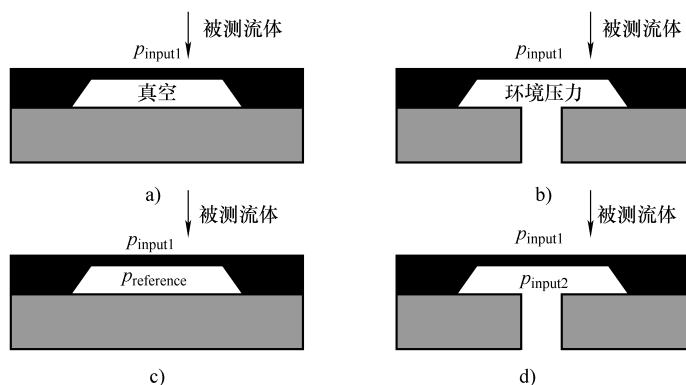


图 12-7 压力微传感器的常见结构形式

图 12-8 是一个封装好的压力传感器。其核心部分是一块沿某晶向切割的 N 型的硅膜片。在膜片上利用集成电路工艺方法扩散上四个阻值相等的 P 型电阻, 用导线将其构成平衡电桥。膜片的四周用圆硅环 (硅杯) 固定, 其上部是与被测系统相连的高压腔, 下部一般可与大气相通。在被测压力作用下, 膜片产生应力和应变。芯片顶视图显示了四个植入硅片表面下的压电阻 (R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4)。它们将施加在薄膜上的压力转换为自身电阻的变化, 然后通过惠斯顿电桥将电阻的改变转换成电压信号输出。这些压电阻本质上是最小的半导体压力计, 可以通过机械应力的改变来改变自身电阻。电阻 R_1 和 R_3 在外力的作用下被拉长, 这种延长增加了它们的电阻, 而 R_2 和 R_4 有着相反的电阻改变。电阻的变化通过惠斯顿电桥电路检测

$$V_o = V_{in} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)$$

式中 V_o , V_{in} ——待测电压和外加电压。

压电阻的微型压力传感器有较大的增益, 在平面应力和输出的电阻变化之间有很好的线性关系。然而它有一个主要的缺点, 即对温度敏感。

5. 单悬臂梁压阻式加速度微传感器

加速度计是一种测量运动物体加速 (或减速) 的仪器。微加速度计用来探测机械系统运动中有关的动态力, 这些加速度计被广泛应用于汽车工业。

图 12-9 所示为一种具体的单悬臂梁式硅加速度微传感器结构, 如图 12-9a 所示。

整个传感器由一块硅片 (包括敏感质量块和悬臂梁) 和两块玻璃键合而成, 从而形成质量块的封闭腔, 以保护质量块并限制冲击和减震。在悬臂梁上, 通过扩散法集成了压阻 (图 12-9a 中的受力压敏电阻)。当质量块运动时, 悬臂梁弯曲, 于是压阻的阻值就发生变化。在悬臂梁的附近同样也通过扩散集成了压阻 (图 12-9a 中的补偿压敏电阻), 主要是为了补偿由于温度而引起的变化。在硅片上进行 P⁺ 扩散是作为引线引出压敏电阻值, 导电环氧键合盘是为了能引出 P⁺ 扩散硅上的信号。其等效电路如图 12-9c 所示。

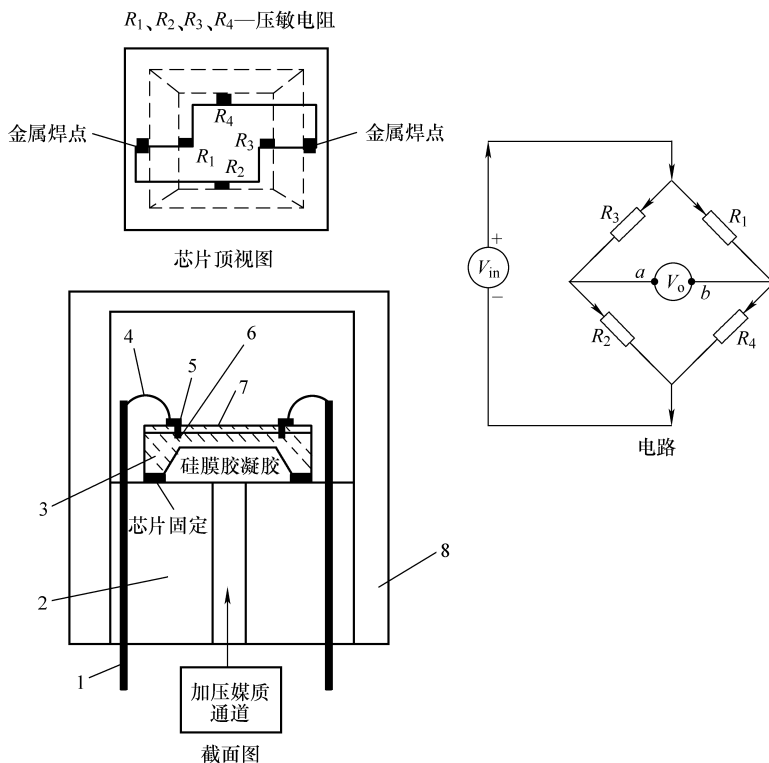


图 12-8 典型的压力传感器组件

1—引线 2—耐热玻璃约束底座或金属盖 3—硅薄膜 4—引线键合 5—金属层
6—压敏电阻 7—绝缘层 8—金属外壳 9—芯片固定

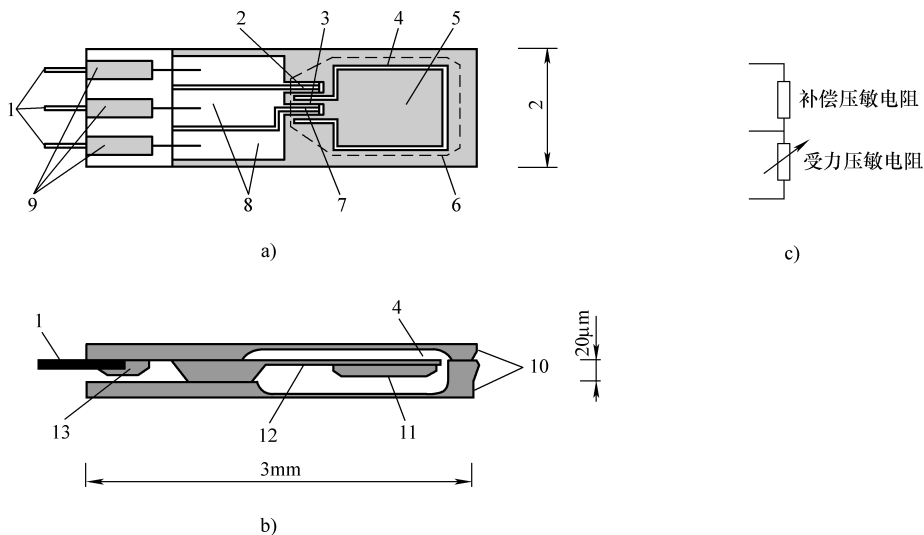


图 12-9 单悬臂梁压阻式加速度微传感器结构

a) 俯视图 b) 截面图 c) 等效电路

1—引线 2—补偿压敏电阻 3—悬臂梁 4—气隙 5—质量块 6—玻璃盖板上腐蚀的腔的轮廓 7—受力压敏电阻
8—P⁺扩散 9—导电环氧键合盘 10—玻璃 11—检测质量跨块 12—硅梁 13—导电环氧

制作这样一个加速度微传感器的基本工艺过程如图 12-10 所示。首先在硅片上腐蚀一些定位孔,接着在硅片上覆盖一层带有一定图形的大约 $1.5\ \mu\text{m}$ 厚的热氧化物。然后再进行两次扩散,一次形成连接线,一次形成压阻(在硅片上不进行金属化)。在硅片正面淀积一层厚的、致密的氧化物,对硅片背面氧化物图形化,再用 KOH(氢氧化钾溶液)刻蚀以形成梁的形状。对正面的氧化物图形化,并使用 KOH 对其刻蚀以形成质量块的活动间隙。接下来,金属化玻璃层以形成必要的空腔,再在玻璃上淀积并图形化一层铝,用来形成键合盘。接着硅晶片夹在两层玻璃之间缝合,最后划片即完成整个压阻式加速度微传感器的制作。

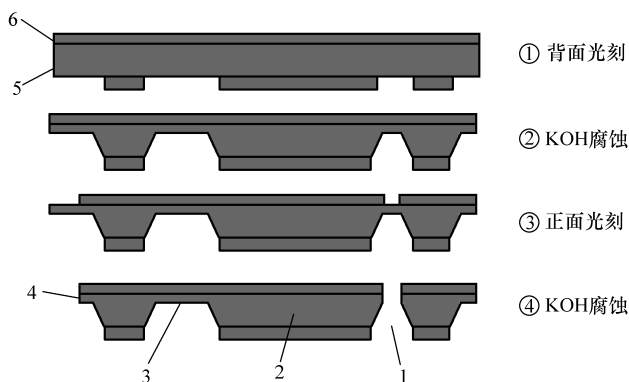


图 12-10 单悬臂梁压阻式加速度微传感器的制作工艺过程

1—气隙 2—Si 质量块 3—梁 4—支撑 5—硅 6— SiO_2

这样一支加速度微传感器的总体积仅为 $2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 0.6\text{mm}$,可植入体内测量心脏的加速度值,测量的最低加速度值可达 $0.001g$ 。

6. SnO_2 氧化物薄膜气体微传感器

图 12-11 给出了利用硅体加工工艺制作出的一种 SnO_2 氧化物薄膜气体微传感器的结构。

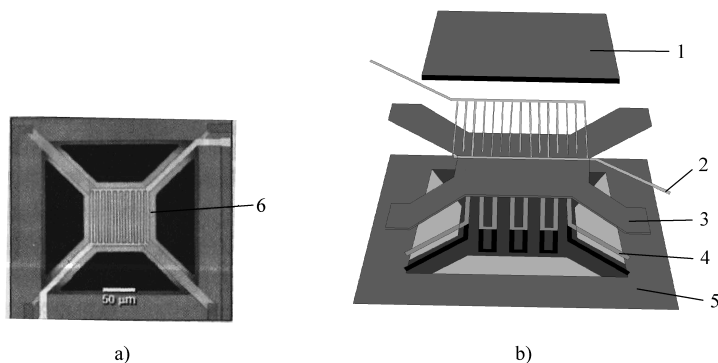


图 12-11 基于 SnO_2 氧化物薄膜气体敏感元件结构图

a) 元件俯视图 b) 元件的薄膜结构

1— SnO_2 敏感膜 2—测量电极 3— SiO_2 绝缘层 4—掺杂多晶硅加热器 5— SiO_2 绝缘层 6—悬空结构

SnO_2 氧化物薄膜对气体的敏感特性是与温度有关的,产生这种温度特性的主要原因在于气体分子在表面的吸/脱附过程、气体分子在表面的吸附量、反应速度等均与温度有关。

因此,元件结构中设有加热器(图12-11b中的掺杂多晶硅加热器),形成一个可控温度元件,采用脉冲式电流进行加热。二氧化硅绝缘层作为测量电极与多晶硅加热器之间的绝缘层。在测量电极上采用真空沉积的方法淀积一层二氧化锡薄膜。当微传感器暴露在含有目标气体的被测环境中时,二氧化锡的电阻会由于目标气体与二氧化锡敏感膜表面间的相互作用而产生改变。

此外,温度还会引起微结构的尺寸变化。因此,这种 SnO_2 氧化物薄膜结合可控温元件的微传感器比起传统形式的氧化物薄膜气体微传感器有明显的优势。在元件的制作方面,需要考虑的因素主要有加温元件的位置以及用微结构制作的表面薄膜的控制。可通过对元件工作温度的控制,调节敏感元件的气体敏感特性。

图12-12给出了集成有9个敏感元件的器件,这是一种与CMOS工艺兼容的器件,由于体积微小,所以热惯性小,温度变化率可达到 $10^5 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

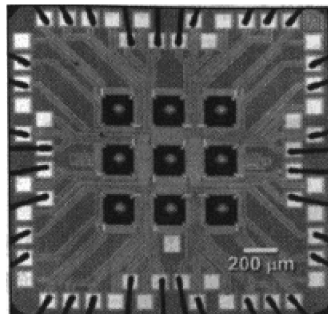


图12-12 集成有9个敏感元件的芯片

12.2 智能传感器

12.2.1 智能传感器的概念

所谓智能传感器就是一种以微处理器为核心,具有检测、判断和信息处理等能力的传感器。智能传感器(intelligent sensor或smart sensor)的概念最初是由美国宇航局提出来的。宇宙飞船在太空中飞行需要控制飞行的速度、加速度、姿态以及飞船内部温度、湿度、气压等,因而需要大量的传感器。要处理由众多传感器获取的信息,需要一台大型电子计算机,而这在飞船上是无法实现的。为了不丢失数据,又能降低成本,于是科学家们提出了分散处理数据的设想。智能传感器自20世纪70年代初出现以来,已经成为当今传感器技术发展的主要方向之一。

对于智能传感器科学界尚无统一的定义,早期人们简单、机械地强调在工艺上将传感器与微处理器两者紧密结合,认为“传感器的敏感元件及其信号调理电路与微处理器集成在一块芯片上就是智能传感器”。美国宇航局的科学家认为智能传感器需要具备功能有:①由传感器本身消除异常值和例外值,提供比传统传感器更全面、更真实的信息;②具有信号处理(如温度补偿、线性化等)功能;③随机整定和自适应;④具有一定程度的存储、识别和自诊断功能;⑤内含特定算法并可根据需要改变。概括地说,智能传感器就是将传感技术与信息处理技术结合起来具有信息检测和信息处理功能的测量装置。图12-13所示为智能传感器的原理框图,它主要包括传感器、信号调理电路和微处理器。

微处理器是智能传感器的核心,它不但可以对传感器测量数据进行计算、存储、处理,还可以通过反馈回路对传感器进行调节。由于微处理器充分发挥各种软件的功能,可以完成硬件难以完成的任务,从而能有效地降低制造难度,提高传感器性能,降低成本。智能传感器的信号感知器件往往有主传感器和辅助传感器两种,主传感器用于测量被测参数,辅助传感器测量某些环境参数如温度、压力等,用于修正和补偿这些环境参数变化对测量的影响。

信号处理电路及微机硬件系统对传感器输出的微弱信号进行放大、处理、存储及与上位机通信。

12.2.2 智能传感器的功能与特点

1. 智能传感器的功能

智能传感器具有如下功能：

(1) 传感器功能 智能传感器首先是传感器，能够自动感受和检测各种被测参数。

(2) 逻辑判断和信息处理功能 智能传感器能对信息进行非线性校正、温度误差修正与补偿、数字滤波等处理。

(3) 自动校准和自动补偿功能 智能传感器能够进行自动调零、自动调平衡、自动校准、自动补偿以及自动标定。

(4) 自诊断功能 智能传感器通过自检软件，能对传感器和系统的工作状态进行定期或不定期的检测，实现故障诊断及报警。

(5) 组态功能 在智能传感器系统中可以设置多种模块化的硬件和软件，用户可通过微处理器发出指令，改变智能传感器的硬件模块和软件模块的组合状态，完成不同的测量功能。

(6) 数据存储和记忆功能 智能传感器具有数据存储和记忆功能，能随时存取检测数据。

(7) 双向通信功能 智能传感器具有双向通信功能，能通过各种标准总线接口、无线协议等直接与其他传感器及上位计算机通信。

2. 智能传感器的特点

与一般传感器相比，智能传感器具有如下特点：

(1) 精度高 智能传感器具有数据处理功能，可以通过软件修正非线性误差等系统误差、补偿温度误差和某些随机误差等，因此具有较高的精度。

(2) 可靠性高 智能传感器具有一定的可编程自动化能力，包括指令、数据存储、自动调零、自检和自校准等。传感器一旦出现故障，能及时报警和自动排除。

(3) 高信噪比与高分辨力 智能传感器具有数据存储、记忆与处理功能，可以通过软件进行数字滤波、相关分析等处理，去除输入数据中的噪声，从而将有用信号提取出来；通过数据融合、神经网络技术，可以消除多参数状态下交叉灵敏度的影响，从而保证在多参数状态下对特定参数的分辨能力。

(4) 自适应性强 智能传感器可在条件变化的情况下，在一定范围内使自己的特性自动适应这种变化。通过采用自适应技术，能补偿老化部件引起的参数漂移，自动适应不同的环境条件，从而延长器件或装置的寿命，扩大智能传感器的应用领域。同时，通过采用自适应技术，使得校正和补偿数值已不再是一个平均值，而是测量点的真实修正值，从而可以提

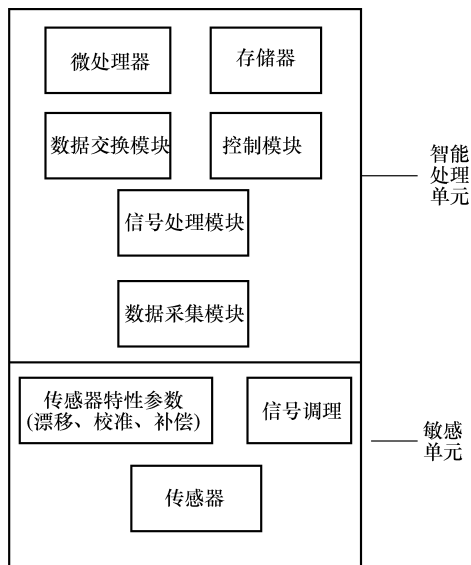


图 12-13 智能传感器的原理框图

高传感器的重复性和准确度。

(5) 性价比高 智能传感器所具有的高性能,不是像传统传感器技术那样通过追求传感器本身的完善、对传感器的各个环节进行精心设计与调试获得的,而是通过与微处理器相结合,采用廉价的集成电路工艺和芯片以强大的软件来实现的,所以具有较高的性价比。

12.2.3 智能传感器的实现

目前智能传感器主要有三条实现途径。

1. 非集成化实现

非集成化智能传感器是将传统的经典传感器(采用非集成化工艺制作的传感器,仅具有获取信号的功能)、信号调理电路、带数字总线接口的微处理器组合为一整体而构成的一个智能传感器系统。其框图如图12-14所示。图中的信号调理电路是用来调理传感器输出的信号的,即将

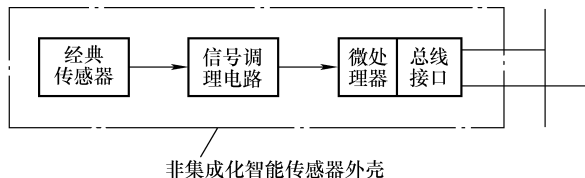


图 12-14 非集成化智能传感器框图

传感器输出的信号进行放大并转换为数字信号后送入微处理器,再由微处理器通过数字总线接口挂接在现场数字总线上。这是一种实现智能传感器系统的最快途径与方式。例如美国罗斯蒙特公司、SMAR公司生产的电容式智能压力(差)变送器系列产品,就是在原有传统非集成化电容式变送器基础上附加一块带数字总线接口的微处理器插板后组装而成的,并开发配备通信、控制、自校正、自补偿、自诊断等智能化软件,从而实现智能传感器。

模糊传感器也是一种非集成化的新型智能传感器。模糊传感器是在经典数值测量的基础上,通过模糊推理和知识合成,以模拟人类自然语言符号描述的形式输出测量结果。显然,模糊传感器的核心部分就是模拟人类自然语言符号的产生及其处理。模糊传感器的“智能”之处在于它可以模拟人类感知的全过程,不仅具有智能传感器的一般优点和功能,而且具有学习推理的能力。另外,模糊传感器还具有与上级系统交换信息的能力,以及自我管理和调节的能力。通俗地说,模糊传感器等同于一个具有丰富经验的测量工人,甚至更好。图12-15是模糊传感器的简单结构和功能示意。其中,经典数值测量单元不仅提取传感信号,而且对其进行数值预处理,如滤波、恢复信号等。符号产生和处理单元是模糊传感器的核心部分,它利用已有的知识或经验(通常存放在知识库中),对已恢复的传感信号进一步处理,得到符合客观对象的拟人类自然语言符号的描述信息。其实现方法是利用数值模糊化方法,得到符号测量结果。符号处理则是采用模糊信息处理技术,对模糊化后得到的符号形式的传感信号,结合知识库内的知识(主要有模糊判断规则、传感信号特征、传感器特性及测量任务要求等信息),经过模糊推理和运算,得到被测量的符号描述结果及其相关知识。当然,模糊传感器可以经过学习新的变化情况(如任务发生改变、环境变化等)来修正和更新知识库内的信息。

模糊传感器由硬件和软件层构成,突出特点是其具有丰富强大的软件功能。模糊传感器与一般的基于计算机的智能传感器的根本区别在于模糊传感器具有实现学习功能的单元和符号产生、处理单元。它能够实现专家指导下的学习和符号推理及合成,从而使模糊传感器具

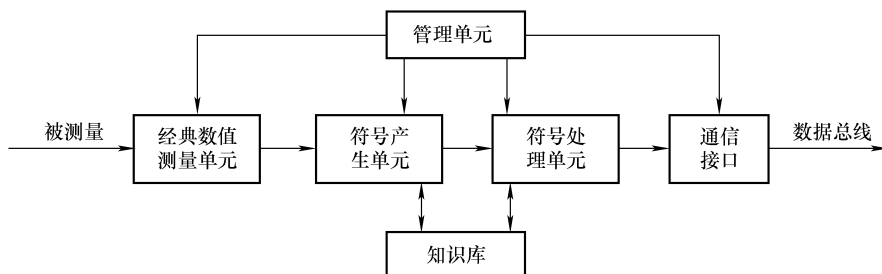


图 12-15 模糊传感器功能框图

有可训练性。经过学习与训练，使得模糊传感器能适合不同测量环境和测量任务的要求。因此，实现模糊传感器的关键就在于软件功能的设计。

2. 集成化实现

这种智能传感器系统是采用微机械加工技术和大规模集成电路工艺技术，利用硅作为基本材料来制作敏感元件、信号调理电路、微处理器单元，并把它们集成在一块芯片上而构成，故又可称为集成智能传感器（integrated smart / intelligent sensor）。其外形结构如图 12-16 所示。

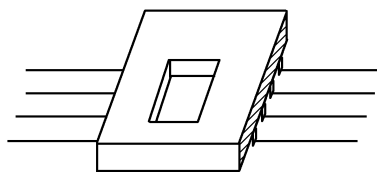


图 12-16 集成智能传感器结构示意图

传感器的集成化实现是传感器的发展方向，它又是传感器向微型化、阵列化、多功能化、智能化方向发展的基础。随着微电子技术的飞速发展，大规模集成电路工艺技术日臻完善，MEMS 技术、微纳米技术、现代传感器技术协同发展，现已有不同集成度的电路芯片及传感器系统芯片商品面市。

由于在一块芯片上实现智能传感器全系统不是必须的，所以一种更实际的途径是混合实现法。

3. 混合实现

根据需要与可能，将系统各个环节，如敏感单元、信号调理电路、微处理器单元、数字总线接口，以不同的组合方式集成在两块或三块芯片上，并装在一个外壳里，实现混合集成。可采用如图 12-17 所示的几种方式来实现。

集成化敏感单元包括（对结构型传感器）弹性敏感元件及变换器；信号调理电路包括多路开关、仪用放大器、基准、模/数转换器（ADC）等；微处理器单元包括数字存储器（EPROM、ROM、RAM）、I/O 接口、微处理器、数/模转换器（DAC）等。

在图 12-17a 中，三块集成化芯片封装在一个外壳里；在图 12-17b、c、d 中，两块集成化芯片封装在一个外壳里。

在图 12-17a、c 中的（智能）信号调理电路具有部分智能化功能，如自校零、自动进行温度补偿，这是因为这种电路带有零点校正电路和温度补偿电路，它们通常不与微处理器单元封装在一起而单独出售。图 12-17a、b 中的集成化敏感单元也可以代之以片外外接传感器。

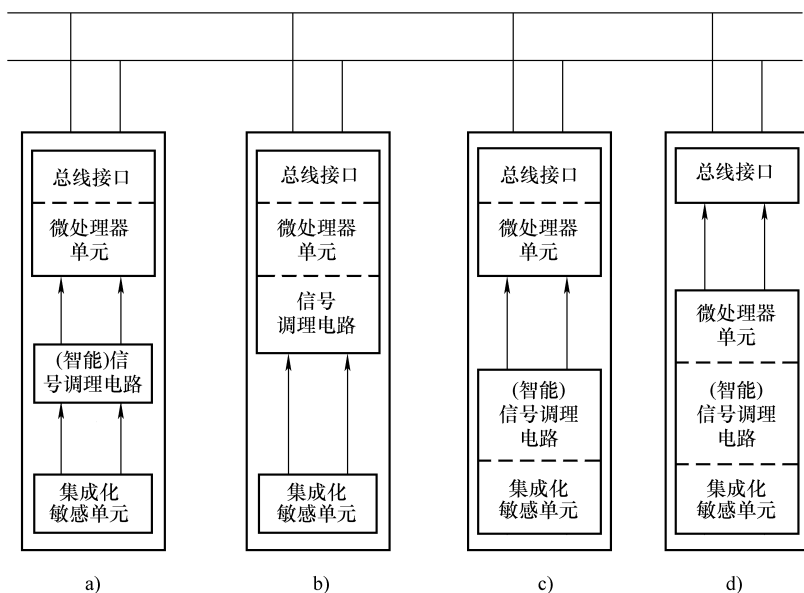


图 12-17 在一个封装中可能的混合集成实现方式

12.2.4 智能传感器的应用

1. 智能压力传感器

图 12-18 所示为 ST3000/900 系列全智能压力传感器的外形图，是由美国 HoneyWell 公司研制的产品。它将集成传感器与信号调理电路（即变送器）集成在一个 0.147cm^2 的硅片上，可以同时测量差压 (Δp)、静压 (p) 和温度 (T) 三个参数，并具有压力校准和温度补偿功能。ST3000 系列智能压力传感器的工作原理框图如图 12-19 所示。主要包括两个部分：传感器部分和信号调理部分。被测压力通过膜片作用于硅压敏电阻上，引起阻值变化。压敏电阻在惠斯顿电桥中，电桥的输出代表被测压力的大小。芯片上两个辅助传感器分别用于检测静压力和温度。在同一个芯片上检测出的差压、静压和温度信号，经多路开关分时地送到 A/D 转换器，转化为数字量后送到信号调理部分。信号调理部分以微处理器为核心，负责处理这些数字信号。储存在 ROM 中的主程序控制传感器工作的全过程。PROM 中分别存储着 3 个传感器的温度与静压特性参数、温度与压力补偿曲线，负责进行温度补偿和静压校准。测量过程中的数据暂存在 RAM 中并可随时转存到 E²PROM 中，保证突然断电时数据不会丢失。微处理器利用预先存入 PROM 中的特性参数对 Δp 、 p 和 T 信号进行运算，得到不受环境因素影响的高精度压力测量数据，再经 D/A 转换为 $4 \sim 20\text{mA}$ 的标准信号输出，也可经过数字 I/O 口直接输出数字信号。



图 12-18 智能压力传感器

这种新型传感器采用了离子注入硅技术，在差压传感器上集成了静压和温度传感器，随时修正过程温度和静压引起的误差。因此具有高可靠性（平均无故障时间 470 年）、高稳定性（ $\pm 0.015\%/年$ ）、高精度（ $\pm 0.075\%$ ）、宽量程比（550:1）、宽测量范围（ $0 \sim 3.5\text{MPa}$ ）等优点。该

类传感器普遍用于电力、冶金、石化、建筑、制药、造纸、食品和烟草等行业。

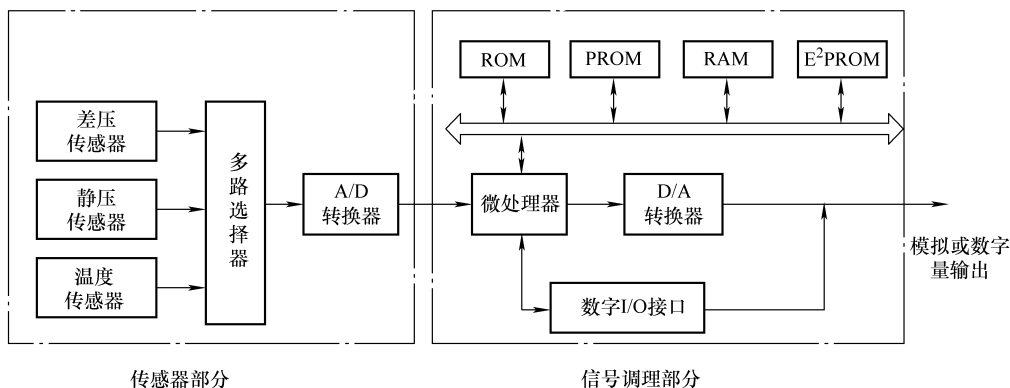


图 12-19 ST3000 系列智能压力传感器的工作原理框图

2. 智能固体图像传感器

智能固体图像传感器是现代视觉信息获取的一种基础器件，因其能实现信息的获取、转换和视觉功能的扩展，能给出直观、真实、层次最多、内容最丰富的可视图像信息。

目前智能固体图像传感器主要有三种类型，第一种是电荷耦合器件（CCD）；第二种是 MOS 图像传感器，又称为自扫描光电二极管阵列（SSPA）；第三种是电荷注入器件（CID）。由于传感器智能化和集成化的要求，使得智能固体图像传感器有三维集成的发展趋势，比如，在同一硅片上，用超大规模集成电路工艺制作三维结构的智能传感器。图 12-20 所示为三维结构的智能固体图像传感器。图 12-21 为三维智能图像传感器的三层结构示意图，它用以提取待测物体的轮廓图。第一层为光电转换面阵，它的输出信号并行进入第二层的电流型 MOS 模拟信号调理电路，输出的模拟信号再进入第三层转换成二进制数并存储在存储器中，与第三层相连的是信号读出（放大）单元。信号读出单元的作用是通过地址译码读取存储器中的信息。该传感器采用了新颖的并行信号传送与处理技术，第一层到第二层以及第二层到第三层均采用并行信号传送，大大提高了信号处理速度，可以实现高速的图像信息处理。

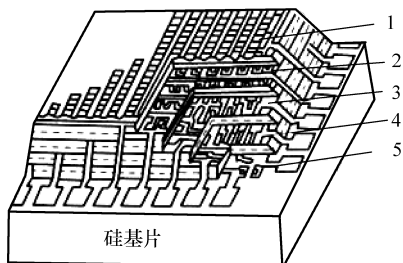


图 12-20 三维结构的固体图像传感器图

1—光电变换部分 2—信号传送部分 3—存储器
4—运算部分 5—电源驱动部分

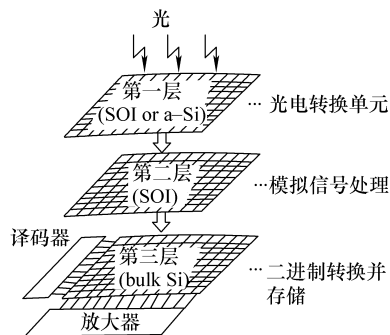


图 12-21 三维智能图像传感器的三层结构示意图

习 题

- 12-1 什么是 MEMS?
- 12-2 简述微型无源无线声表面波温度传感器的工作原理并说明它的主要用途。
- 12-3 传感器以后发展的主要趋势是什么? 我们应该主要去做哪些方面的工作?
- 12-4 什么是智能传感器?
- 12-5 智能传感器的基本组成是什么?
- 12-6 智能传感器有哪些实现方式?

参 考 文 献

- [1] 周真,苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- [2] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2010.
- [3] 董永贵. 微型传感器 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [4] Creed Huddleston. 智能传感器设计 [M]. 张鼎, 等译. 北京:人民邮电出版社, 2009.
- [5] 高国富, 等. 智能传感器及其应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [6] 陶艳红, 余成波. 传感器与现代检测技术 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [7] 何道清. 传感器与传感器技术 [M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [8] 梁福平. 传感器原理及检测技术 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2010.

第13单元

无线传感器网络

学习要点

- ◆ 无线传感器网络的基本概念；
- ◆ 无线传感器网络的特点；
- ◆ 无线传感器网络的关键技术；
- ◆ 无线传感器网络的应用。

相关知识链接

- ◆ 陈建峰. 无线传感器网络应用实例. 百度文库

引导案例

山体滑坡的无线传感器监测网络

在我国南部某沿海城市存在大量山地地貌，城市居民人口众多，要求土地必须保持较高的利用率，因此大量建筑和道路都位于山区附近。该地区降雨量常年偏高，尤其在每年夏季的梅雨季节，会出现大量的降水。不稳定的山地地貌在受到雨水侵蚀后，容易发生山体滑坡，对居民生命财产安全构成巨大的威胁。

有关部门尝试部署过多套有线方式的监测网络以对山体滑坡进行监测和预警，但是由于监测区域往往为人迹罕至的山间，缺乏道路，野外布线、电源供给等都受到限制，使得有线系统部署起来非常困难。此外，有线方式往往采用就近部署 Datalogger 的方式采集数据，需要专人定时前往监测点下载数据，系统得不到实时数据，灵活性较差。

对此，在与地理监测专家进行多次交流，并进行数次实地考察后，某公司提出了基于无线传感器网络的山体滑坡监测全套无线解决方案。

山体滑坡的监测主要依靠两种传感器的作用：液位传感器和倾角传感器。在山地容易发生危险的区域，沿着山势走向竖直设置多个孔洞。每个孔洞都会在最下端部署一个液位传感器，在不同深度部署数个倾角传感器。由于山体滑坡现象主要是由雨水侵蚀产生的，因此地下水位深度是标识山体滑坡危险度的第一指标。该数据由部署在孔洞最下端的液位传感器采集并由无线网络发送。通过倾角传感器可以监测山体的运动状况，山体往往由多层土壤或岩石组成，不同层次间由于物理构成和侵蚀程度不同，其运动速度不同。发生这种现象时部署在不同深度的倾角传感器将会返回不同的倾角数据。在无线网络获取到各个倾角传感器的数据后，通过数据融合处理，专业人员就可以据此判断出山体滑坡的趋势和强度，并判断其威胁性大小。

13.1 无线传感器网络的基本概念与体系结构

随着微电子技术、无线通信技术与传感器技术的进步,推动了具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器的快速发展。由这些微型传感器构成的无线传感器网络已经成为国际上备受关注的前沿热点研究领域。这种无线传感器网络综合了无线通信技术、传感器技术、嵌入式计算技术与分布式信息处理技术能够通过协作实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对这些信息进行处理,获得详尽而准确的数据,传送到需要这些信息的用户。无线传感器网络可以使人们在任何时间、任何地点和任何环境条件下获取大量详实而可靠的信息。因此,无线传感器网络具有十分广阔的应用前景。

13.1.1 无线传感器网络及其体系结构

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是由部署在监测区域内大量的廉价的微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一种多跳自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖范围内感知对象的信息,并发送给观察者或者用户。传感器、感知对象和观察者构成了传感器网络的三个要素。

无线传感器网络具有众多类型的传感器节点,可用来探测包括地震、电磁波、温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分等周边环境中多种多样的现象。无线传感器网络的任务是利用传感器节点来监测节点周围的环境,收集相关数据,然后通过无线收发装置采用多跳路由的方式将数据发送给汇聚节点,再通过汇聚节点将数据传送到用户端,从而达到对目标区域的监测。无线传感器网络扩展了人们的信息获取能力,将客观物理信息与逻辑上的传输网络融合在一起,改变了人类与自然界的交互方式。

无线传感器网络系统通常包括传感器节点(sensor node)、汇聚节点(sink node)和管理节点(manager node),如图 13-1 所示。有时汇聚节点也称为网关节点。

大量传感器节点随机部署在监测区域内部或者附近,能够通过自组织方式构成网络。传感器节点监测的数据沿着其

他传感器节点逐跳地进行传输,在传输过程中监测数据可能被多个节点处理,经过多跳后路由到汇聚节点,最后通过互联网或者卫星到达管理节点。用户通过管理节点对传感器网络进行配置和管理,发布监测任务以及收集监测数据。传感器节点通常是一个微型嵌入式系统,其处理能力、存储能力和通信能力相对较弱,通过携带能量有限的电池供电。从网络功能上看,每个传感器节点兼顾传统网络节点的终端和路由器双重功能,除了进行本地信息收集和数据处理外,还要对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合等处理,同时与其他节点协作完成一些特殊任务。

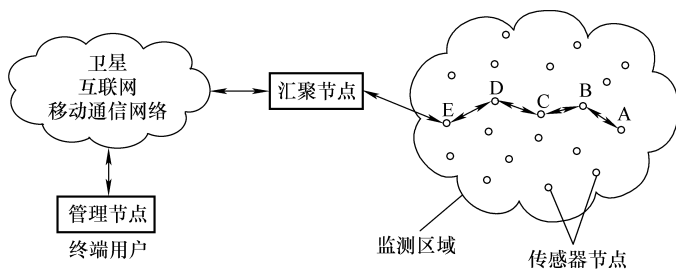


图 13-1 无线传感器网络结构示意图

汇聚节点的处理能力、存储能力和通信能力相对较强，它连接传感器网络与外部网络，主要负责将普通传感器节点传送回的数据分类汇总，并发布到外部网络；或者将管理节点的监测任务发布给传感器节点。

管理节点实际上是传感器网络使用者直接操纵的计算机终端或服务器，充当无线传感器网络服务器的角色，通过与管理基站的信息传递来监控整个网络的数据和状态。

13.1.2 传感器节点结构

传感器节点由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块四部分组成，如图 13-2 所示。

传感器模块负责监测区域内信息的采集和数据转换。一般来说，传感器模块有两种实现模式。一种是直接将传感器集成在节点上，这类设计方案主要针对体积较小，调理电路简单的传感器。节点上可以集成温度、湿度、加速度等传感器，并可根据应用需求完成多种传感功能。但集成型的传感器不易于系统的扩展，灵活性也不强。另一种是将传感器以插件的方式同节点连接，主要应用于规模较大的传感器模块，如南京邮电大学的 UbiCell 节点就是采用这样的结构。UbiCell 节点上的温度传感器、光照度传感器和湿度传感器分别采用的是 DS18B20、LX1970 和 HS1101，它们并不直接连接在节点上，而是集成在一个带有数码管的传感面板上，通过传感面板与节点之间的标准 I/O 接口实现传感数据传输。

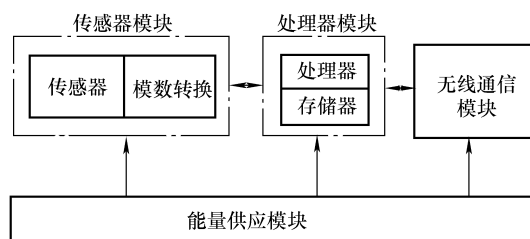


图 13-2 传感器节点结构框图

目前使用较为广泛的传感器节点是 Smart Dust、Mote 和 Mica。Smart Dust 是美国国防部资助的一个传感器网络项目的名称。该项目开发的产品也称 Smart Dust。Mote 系列节点也有美国军方资助。Mica 系列节点是美国加州大学伯克利分校研制的用于传感器网络研究的演示平台的实验节点。节点设计考虑了微型化即不易察觉，适合特殊任务；良好的稳定性和安全性，在恶劣环境下也不易损坏，防止外界因素造成的损坏；且敏感数据以秘文形式存储和发送；以及低成本，适于大量部署。

处理模块负责控制整个传感器节点的操作、存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据。无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信，交换控制信息和收发数据；能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量，通常采用微型电池。

13.1.3 无线传感器网络协议栈结构

无线传感器网络协议栈包括与互联网协议栈的五层协议相对应的物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层，还包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台，如图 13-3 所示。这些管理平台使得传感器节点能够按着能量高效的方式协同工作，在节点移动的无线传感器网络中转发数据，并支持多任务和资源共享。

1. 各协议层的功能

(1) 物理层 物理层提供简单但重要的信号调制和无线收发技术，负责频率选择、载

波生成、信号检测、调制解调、编码、定时和同步等问题，物理层设计直接影响电路的复杂度和传输能耗等问题，设计目标是以尽可能少的能量损耗获得较大的链路容量。

(2) 数据链路层 数据链路层负责数据成帧、帧监测、差错校验和介质访问控制（MAC）方法，以保证可靠的点到点和点到多点的通信。介质访问控制方法规定了不同的用户如何共享可用的信道资源，因此它是否合理与高效，直接决定了传感器节点间协调的有效性和对网络拓扑结构的适应性。

(3) 网络层 网络层主要负责路由生成和路由选择。以通信网络为核心，实现传感器与传感器、传感器与观察者之间的通信，支持多传感器协作完成大型感知任务。网络层和数据链路层协同工作，使各节点采用自组织的方式构建起网络，并确定网络拓扑结构。随后在给定网络的拓扑结构的情况下，进行有效路由选择。由于传感器网络的一些特点，其路由层除了高效地完成路由转发任务外，还要考虑节能问题、网络的动态性、拓扑发现和大规模性、数据传送模式、网络负载和能耗平衡、数据冗余和数据融合等问题。一个传感器网络通常是某个具体的应用场合设计的，具有很强的应用背景，因此很难采用通用的路由协议。

(4) 传输层 传输层负责数据流的传输控制，是保证通信服务质量的重要部分。现阶段对传输控制的研究主要集中于错误恢复机制，但是目前还没有专门适合无线传感器网络的协议。

(5) 应用层 应用层解决应用的共性问题，包括应用基础和典型应用，主要负责时间同步、节点定位、QoS、移动性控制、能量管理、配置管理、安全管理和远程管理，包括一系列基于监测任务的应用层软件。

2. 管理平台的功能

(1) 能量管理平台 能量管理平台管理传感器节点如何使用能量，综合协调各层节省能量。在传感器网络中电源能量是各个节点最宝贵的资源。为了使传感器网络的使用时间尽可能长，需要合理、有效地控制节点对能量的使用。每个协议层中都要增加能量控制代码，并提供给操作系统进行能量分配决策。

(2) 移动管理平台 移动管理平台用于监测和控制节点的移动，维护到汇集节点的路由，还可以使传感器节点跟踪其邻居的位置。

(3) 任务管理平台 任务管理平台在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。

这三个平台互相配合工作，使得传感器节点能够协调、高效地运转，为整个网络进行路由，在节点间进行资源共享。

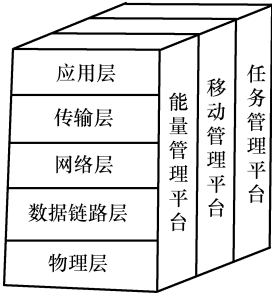


图 13-3 无线传感器网络协议栈

13.2 无线传感器网络的特点

13.2.1 与传统无线网络的区别

无线自组网（mobile ad hoc network）是一个由几十到上百个节点组成的、采用无线通信方式、动态组网的多跳移动性对等网络。它以传输数据、完成通信为目的，中间节点仅负

责分组数据的转发,通常中间节点具有持续的能量供应。它们注重在高度移动的环境中通过优化路由和资源管理策略,最大化带宽利用率,同时提供高性能的服务质量。

无线传感器网络是以数据为中心,以获取信息为目的,中间节点不仅要转发数据,还要进行与具体应用相关的数据处理、融合和缓存,除了少数节点可能移动外,大部分节点都是固定不动的。

另外,传统无线网络的首要设计目标是提供高服务质量和高效带宽利用,其次才考虑节约能源;而由于传感器节点的能量、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限,所以无线传感器网络的首要设计目标是能源的高效使用,这也是无线传感器网络 and 传统无线网络最重要的区别之一。

13.2.2 传感器节点的限制

无线传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时,存在一些限制和约束。

1. 电源能量有限

传感器节点体积微小,通常携带能量十分有限的电池。由于传感器节点数目庞大、分布区域广,而且部署环境复杂,有些区域甚至人员无法到达,无法通过更换电池的方式补充能量。

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺的进步,处理器和传感器模块的功耗变得很低,绝大部分能量消耗在无线通信模块上。

无线通信模块存在发送、接收、空闲和睡眠四种状态。在空闲状态,无线通信模块一直监听无线信道的使用情况,检查是否有数据发送给自己,而在睡眠状态则关闭通信模块。它在发送状态的能量消耗最大,在空闲状态和接收状态的能量消耗相当,略少于发送状态的能量消耗,在睡眠状态的能量消耗最少。如何让网络通信更有效率、减少不必要的转发和接收,不需要通信时尽快进入睡眠状态,是无线传感器网络协议需要重点考虑的问题。

2. 通信能力有限

无线通信的能耗 E 与通信距离 d 的关系为

$$E = kd^n$$

其中 k 是系数;参数 n 满足 $2 < n < 4$ 。 n 的取值与很多因素有关,例如传感器节点部署贴近地面时,障碍物多且干扰大, n 的取值就大;天线质量对信号发射质量的影响也很大。考虑诸多因素。通常取 n 为 3,即通信能耗与距离的三次方成正比。随着通信距离的增加,能耗将急剧增加。因此,在满足通信连通度的前提下,应尽量减小单跳通信距离。一般地,传感器节点的无线通信半径在 100m 以内比较合适。

考虑到传感器节点的能量限制和网络覆盖区域大,传感器网络采用多跳路由的传输机制。传感器节点的无线通信带宽有限,通常仅有几百 Kbit/s 的速率。由于节点能量的变化受到高山、建筑物、障碍物等地势、地貌以及风雨雷电等自然环境的影响,无线通信性能可能经常变化,频繁出现通信中断。在这样的通信环境和节点有限的通信能力下,如何设计网络通信机制以满足无线传感器网络的通信需求,是传感器网络应用需要考虑的重点问题。

3. 计算和存储能力有限

传感器节点是一种微型嵌入式设备,要求它价格低、功耗小,这些限制必然导致其携带

的处理器能力比较弱、存储器容量比较小。为了完成各种任务，传感器节点需要完成监测数据的采集和转换、数据的管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作。如何利用有限的计算和存储资源完成诸多协同任务成为无线传感器网络设计的挑战。

13.2.3 无线传感器网络的特点

1. 大规模性

为了获取准确信息，在监测区域通常部署大量传感器节点，其数量可能达到成千上万，甚至更多。传感器网络的大规模性包含两方面含义，一方面是传感器节点分布在很大的地理区域内，如在原始森林采用传感器网络进行森林防火和环境监测，需要部署大量的传感器节点；另一方面，在一个面积不是很大的空间内，部署大量的传感器节点，即传感器节点部署很密集。

无线传感器网络的大规模性具有如下优点：

- 1) 通过不同空间视角获得的信息具有更大的信噪比。
- 2) 分布式地处理大量的采集信息，能够提高监测的准确度，降低对单个节点传感器的精度要求。
- 3) 大量冗余节点的存在，使得系统具有很强的容错性能。
- 4) 大量节点能增大覆盖的监测区域，减少洞穴或者盲区的存在。

2. 自组织性与动态性

在无线传感器网络应用中，通常情况下传感器节点被放置在没有基础结构设施的地方。传感器节点的位置不能预先精确设定，节点之间的相互邻居关系预先也不知道，如通过飞机播撒大量传感器节点到面积广阔的原始森林中，或随意放置到人不可到达或危险的区域。这样就要求传感器节点具有自组织的能力，能够自动进行配置和管理，通过拓扑控制机制和网络协议自动形成转发监测数据的多跳无线网络系统。同时，由于部分传感器节点能量耗尽或环境因素造成失效，以及经常有新的节点加入，或是网络中的传感器、感知对象和观察者这三要素都可能具有移动性，这就要求传感器网络必须具有很强的动态性，以适应网络拓扑结构的动态变化。

3. 以数据为中心

传统的计算机网络是以地址（MAC 地址或 IP 地址）为中心的，数据的接收、发送和路由都按照地址进行处理。而无线传感器网络是任务型的网络，用户通常不需要知道数据来自于哪一个节点，而更关注数据及其所属的空间位置。例如，在目标跟踪系统中，用户只关心目标出现的位置和时间，并不关心是哪一个节点监测到目标。因此，在无线传感器网络中不一定按地址来选择路径，而可能根据感兴趣的数据建立起从发送方到接收方的转发路径。另外，传统的计算机网络要求实现端到端的可靠传输，传输过程中不会对数据进行分析和处理，而无线传感器网络要求的是高效率传输，需要尽量减少数据冗余，降低能量消耗，数据融合是传输过程中的重要操作。

4. 应用相关性

无线传感器网络用来感知客观物理世界，获取物理世界的信息。客观世界的物理量多种多样，不同的无线传感器网络应用关心不同的物理量，因此，对传感器的应用系统也有多种多样的要求。

不同的应用背景对无线传感器网络的要求不同,其硬件平台、软件系统和网络协议必然会有很大差别。所以传感器网络不能像 Internet 一样有统一的通信协议平台。对于不同的无线传感器网络应用,虽然存在一些共性问题,但在开发传感器网络应用中,更关心传感器网络的差异。只有让系统更贴近应用,才能做出更高效的目标系统。针对每一个具体应用来研究无线传感器网络技术,这是无线传感器网络设计不同于传统网络的显著特征。

5. 可靠性

无线传感器网络特别适合部署在恶劣环境或人类不宜到达的区域,传感器节点可能工作在露天环境中,遭受太阳的暴晒或风吹雨淋,甚至遭到无关人员或动物的破坏。传感器节点往往采用随机部署,如通过飞机撒播或发射炮弹到指定区域进行部署。这些都要求传感器节点非常坚固,不易损坏,适应各种恶劣环境条件。

由于监测区域环境的限制以及传感器节点数目巨大,不可能人工“照顾”每个传感器节点,以至于网络的维护十分困难甚至不可维护。传感器网络的通信保密性和安全性也十分重要,不但要防止监测数据被盗取还要防止获取伪造的监测信息。因此,无线传感器网络的软硬件必须具有较好的鲁棒性和容错性。

13.3 无线传感器网络的应用

无线传感器网络是由大量价格低廉的多种不同类型传感器构成的无线网络,可以用于监控温度、湿度、压力、土壤构成、噪声、机械应力等多种环境条件。传感器节点可以完成连续的监测、目标发现、位置识别和执行器的本地控制等任务。因此无线传感器网络的应用前景非常广阔,能够广泛应用于军事、环境监测、医疗健康、智能家居、工业领域、城市交通、空间探索和反恐、救灾等特殊的领域。

1. 军事领域

无线传感器网络的相关研究最早起源于军事领域。由于其具有可快速部署、自组织、隐蔽性强和高容错性的特点,因此能够实现对敌军地形和兵力布防及装备的侦察、战场的实时监视、定位攻击目标、战场评估、核攻击和生物化学攻击的监测和搜索等功能。

在战场中,指挥员往往需要及时、准确地了解敌我人员、武器装备、通信和军用物资供给的情况。通过随机撒播、特种炮弹发射等手段,可以将大量传感器节点密集地散布于预定区域,收集该区域内有价值的信息,并通过汇聚节点将数据传送至指挥所,也可经由卫星信道转发到指挥部,最后融合来自各战场的的数据形成我军完备的战区态势图。在战争中,对冲突区和军事要地的监视也是至关重要的,通过布设无线传感器网络,可以方便地监控我军布防的阵地是否有敌军入侵,或是以更为隐蔽的方式近距离地观察敌方的布防;当然,也可以直接将传感器节点撒向敌方阵地,在敌方还未来得及反应时迅速收集有关作战信息。无线传感器网络可以为火控和制导系统提供准确的目标定位信息。利用生物和化学传感器,可以准确地探测到生化武器的成分,及时提供情报信息,有利于正确防范和实施有效的反击。

作为 C4ISRT (command, control, communication, computing, intelligence, surveillance, reconnaissance and targeting) 系统的一个不可或缺的组成部分,无线传感器网络以其低成本、密集型、随机分布、自组织性和强容错能力的特点,及时、准确地为战场指挥系统提供高可靠的军事信息。即使在部分传感器节点失效时,无线传感器网络作为整体仍能完成观测

任务。

美国国防部远景计划研究局 (defense advanced research project agency, DARPA) 在 1998 年启动了 SensIT (sensor information technology) 计划。该计划的目的是将多种类型的传感器、可重编程的通用处理器和无线通信技术组合起来, 建立一个廉价的无处不在的网络系统, 用以监测光学、声学、震动、磁场、湿度、污染、毒物、压力、温度、加速度等物理量。

美国海军也确立了“传感器组网系统”研究项目。传感器组网系统的核心是一套实时数据库管理系统。该系统可以利用现有的通信机制对从战术级到战略级的传感器信息进行管理, 而管理工作只需通过一台专用的商用便携机即可, 不需要其他专用设备。该系统以现有的带宽进行通信, 并可协调来自地面和空中监视传感器以及太空监视设备的信息, 该系统可以部署到各级指挥单位。此外, 美国海军开展的协同交战能力 (cooperative engagement capability, CEC) 是一项革命性的技术。CEC 的实质就是把高性能传感器网络与高性能交战网络有机地结合起来, 高效的传感器网络能快速生成交战质量的态势信息, 交战网络则可把这一态势信息转化成更高的作战能力。CEC 传感器网络的感知数据是原始的雷达数据, 通过舰船或飞机战斗群携带的计算机进行感知数据的处理。每艘战船不但依赖于自己的雷达, 还依靠其他战船或者装载 CEC 的战机来获取感知数据。例如, 一艘战船除了从自己的雷达获取数据以外, 还从舰船战斗群的 20 个以上的雷达中获取数据, 也可以从战机上获取数据。空中的传感器负责侦察更大范围的低空目标, 这些传感器也是网络中的重要部分。利用这些数据合成的图片具有很高的精度。由于 CEC 可以从多方面探测目标, 极大地提高了测量精度, 利用 CEC 数据可以准确地击中目标。CEC 还可以快速而准确地跟踪混乱战争环境中的敌机和导弹, 使战船可以击中多个地平线或地平线以上近海面飞行的超声波目标。美国 BAE 系统公司为提高美军的电子战能力而研发的“狼群”地面无线传感器网络系统, 就是一个典型的无线传感器电磁信号监测网络。它具有多功能电子战能力, 不仅可以监听敌方雷达和通信, 分析敌方的网络和系统的运动, 还可干扰敌方发射机或用算法包来渗透敌方的计算机。

2. 环境监测和预报系统

无线传感器网络因其部署简单、布置密集、低成本和无需现场维护等优点为环境科学研究的数据获取提供了方便, 因而可广泛应用于气象和地理研究、自然和人为灾害 (如洪水和火灾) 监测、监视农作物灌溉情况、土壤空气变更、牲畜和家禽的环境状况以及大面积的地表检测; 还可以通过跟踪珍稀鸟类、动物和昆虫进行濒危种群的研究等。

美国研制的基于无线传感器网络的 ALERT 系统中, 利用多种传感器分别监测降雨量、河水水位和土壤水分, 通过预定义的方式向中心数据库提供信息, 并依此预测暴发山洪的可能性。类似地, 对于森林火灾的监测, 可以将传感器节点随机密布于森林之中。当发生火灾时, 这些节点会协同工作, 在很短的时间内将火源的具体地点、火势的大小等信息传回给有关部门。

2002 年, 美国加州大学伯克利分校 Intel 实验室和大西洋学院联合在大鸭岛上部署了用来监测岛上海鸟生活习性的无线传感器网络。他们使用了包括光、湿度、气压计、红外传感器、摄像头在内的近 10 种类型的传感器, 系统通过自组织无线网络, 将数据传输到 100m 外的基站计算机内, 再由此经卫星传输至加州的服务器进行分析研究。

为更好地了解地球气候的变化,挪威科学家利用 WSN 监测冰河的变化情况,目的在于通过分析冰河环境的变化来推断地球气候的变化。在没有基础设施支持的冰河中进行观测试验,WSN 成了最佳选择。网络节点被埋在冰床下面,深浅各不相同,节点除了可以测量压力和温度等基本参数外,还装备了特殊的传感器用来测方向,冰面上作为簇头的节点安装有 GPS 来定位,各簇头通过 GSM 链路将监测数据传回基站。

3. 医疗健康

无线传感器网络所具备的自组织、微型化和对周围区域的感知能力等特点,决定了它在检测人体生理数据、健康状况、医院药品管理以及远程医疗等方面可以发挥出色的作用,因而在医疗领域有着广阔的应用前景。

如果在住院病人身上安装特殊用途的传感器节点,如心率和血压监测设备,利用无线传感器网络,远端的医生就可以随时了解被监护病人的病情,进行及时处理。还可以利用无线传感器网络长时间地收集人体的生理数据,这些数据在研制新药品过程中非常有用。在药品管理方面,将传感器节点按药品种类分别放置,计算机系统即可帮助辨认所开的药品,从而减小病人用错药的可能性。在 SSIM (smart sensors and integrated microsystems) 项目中,100 个微型传感器被植入病人眼中,从而帮助盲人获得了一定程度的视觉。

哈佛大学的一个研究小组利用无线传感器网络构建了一个医疗监测平台,传感器节点安装在患者身上,医生通过手持 PDA 可以随时接收报警消息或查询病人状况。这样的无线传感器网络使患者摆脱了传统监测仪器线缆的束缚,可以自由活动。该系统已经在美国一些医院里进行了测试。

4. 智能家居

无线传感器网络在智能家居中有着广阔的应用空间,如在家具和家电中嵌入传感器,通过无线网络与 Internet 连接在一起,能够为人们提供更加舒适、方便和具有人性化的智能家居环境。用户可以方便地对家电进行远程监控,如在下班前遥控家里的电饭锅、微波炉、电话机、录像机、计算机等家电,按照自己的意愿完成相应的煮饭、烧菜、查收电话留言、选择电视节目以及下载网络资料等工作。无线传感器网络在家庭中的应用能够给人们的家居生活带来革命性的影响。

5. 智能交通

智能交通系统综合运用大量无线传感器网络,配合 GPS 系统、区域网络系统资源,实现对交通车辆的优化调度。通过传感器节点的探测可以得到实时的交通信息,如车辆的数量、长度、道路拥塞程度等,从而为个体交通推荐实时的、最佳的行车路线服务。

6. 空间探索

在太空探索方面,借助于航天器在外星体上撒播一些传感器节点可以实现对星球表面长期的监测,这是目前最为经济可行的探测方案。美国国家航空与航天局 (NASA) 的 JPL (jet propulsion laboratory) 实验室正在研制的 Sensor Webs 计划就是为火星探测进行技术准备。

7. 工业领域

在一些危险的工作环境,如煤矿、石油钻井、核电厂等。利用无线传感器网络可以探测工作现场有哪些员工、他们在做什么以及他们的安全保障等重要信息。

采用无线传感器网络,可以让大楼、桥梁及其他建筑物能够感知并汇报自身的状态信

息,从而让管理部门按照优先级来进行一系列的修复工作。对于许多老旧桥梁的桥墩长期受到水流的冲刷,传感器节点能够放置在桥墩底部来感测桥墩结构;也可放置在桥梁两侧或底部,搜集桥梁的温度、湿度、振动幅度、桥墩被侵蚀程度等,减少因桥梁损坏可能造成的生命财产损失。如美国最大的工程建筑公司贝克特营建集团公司采用了无线传感器网络监测伦敦地铁系统。科学家利用 200 多个 Mi-ca2 节点组成的 WSN 成功监测和评估了旧金山金门大桥在各种自然条件下的安全状况。

在机械故障诊断方面,Intel 公司曾在芯片制造设备上安装过 200 个传感器节点,用来监控设备的振动情况,并在测量结果超出规定时提供监测报告,效果非常显著。

8. 农业领域

无线传感器网络可以用于监视农作物灌溉情况、土壤空气变化、病虫害、畜牧和家禽的环境状况以及大面积的地表检测等,前景无限广阔。

北京市大兴区菊花生产基地使用无线传感器网络,采集日光温室和土壤的温湿度参数,并通过控制模块实现温湿度的控制,实现了温室生产智能控制和管理,提高了菊花生产的管理水平,使得生产成本下降了 25%。

Digital Sun 公司发展的自动洒水系统 S. Sense Wireless Sensor 目前受到国际上多家媒体的报道。它使用无线传感器感应土壤的水分,并在必要时与接收器通信,控制灌溉系统的阀门打开/关闭,从而达到自动、节水灌溉的目的。

9. 其他应用

德国某研究机构正在利用无线传感器网络技术为足球裁判研制一套辅助系统,以降低足球比赛中越位和进球的误判率。

在商务方面,无线传感器网络可用于物流和供应链的管理,监测物资的保存状态和数量。在仓库的每项存货中安置传感器节点,管理员可以方便地查询到存货的位置和数量。

无线传感器网络有着十分广泛的应用前景,可以预见,微型、智能、廉价、高效的无线传感器网络必将融入我们的生活,使我们感受到一个无处不在的、智能的网络世界。

13.4 无线传感器网络的关键技术

无线传感器网络作为当今信息领域新的研究热点,涉及多学科交叉的研究领域,有非常多的关键技术有待发现和研究,下面仅列出部分关键技术。

1. 网络拓扑控制技术

对于无线的自组织传感器网络而言,网络拓扑控制具有特别重要的意义。通过拓扑控制自动生成良好的网络拓扑结构,能够提高路由协议和 MAC 协议的效率,可为数据融合、时间同步和目标定位等很多方面奠定基础,有利于节省节点的能量来延长网络的生存期。所以,拓扑控制是无线传感器网络研究的核心技术之一。

传感器网络拓扑控制目前主要研究的问题是在满足网络覆盖度和连通度的前提下,通过功率控制和骨干网节点的选择,剔除节点之间不必要的无线通信链路,生成一个高效的数据转发的网络拓扑结构。拓扑控制可以分为节点功率控制和层次拓扑控制两个方面。功率控制机制调节网络中每个节点的发射功率,在满足网络连通度的前提下,减少节点的发送功率,均衡节点单跳可达的邻居数目。目前有 COMPOW 等统一功率分配算法, LINT/LILT 和 LMN/

LMA 等基于节点度数的算法, CBTC、LMST、RNG、DRNG 和 DLSS 等基于邻近图的近似算法。层次拓扑控制采用分簇机制实现, 在网络中选择少数关键节点作为簇首, 由簇首节点实现全网的数据转发, 簇成员节点可以暂时关闭通信模块, 进入睡眠状态以节省能量, 目前有 TopDisc 成簇算法、改进的 GAF 虚拟地理网格分簇算法, 以及 LEACH 和 HEED 等自组织成簇算法。除了传统的功率控制和层次拓扑控制, 人们也提出了启发式的节点唤醒和休眠机制。该机制能够使节点在没有事件发生时设置通信模块为睡眠状态, 而在有事件发生时及时自动醒来并唤醒邻居节点, 形成数据转发的拓扑结构。这种机制重点在于解决节点在睡眠状态和活动状态之间的转换问题, 不能够独立作为一种拓扑结构控制机制, 因此需要与其他拓扑控制算法结合使用。

2. 网络路由技术

由于传感器节点的计算能力、存储能力、通信能量以及携带的能量都十分有限, 每个节点只能获取局部网络的拓扑信息, 其上运行的网络协议也不能太复杂。同时, 传感器网络结构动态变化, 网络资源也在不断变化, 这些都对网络协议提出了更高的要求。无线传感器网络协议负责使各个独立的节点形成一个多跳的数据传输网络, 目前研究的重点是网络层协议和数据链路层协议。网络层的路由协议决定监测信息的传输路径; 数据链路层的介质访问控制用来构建底层的基础结构, 控制传感器节点的通信过程和工作模式。

在无线传感器网络中, 路由协议不仅关心单个节点的能量消耗, 更关心整个网络能量的均衡消耗, 这样才能延长整个网络的生存期。同时, 无线传感器网络是以数据为中心的, 这在路由协议中表现得最为突出, 每个节点没有必要采用全网统一的编址, 选择路径可以不用根据节点的编址, 更多的是根据感兴趣的数据建立数据源到汇聚节点之间的转发路径。目前提出了多种类型的传感器网络路由协议, 如多个能量感知的路由协议, 定向扩散和谣传路由等基于查询的路由协议, GEAR 和 GEM 等基于地理位置的路由协议, SPEED 和 ReInForM 等支持 QoS 的路由协议。

无线传感器网络的 MAC 协议首先要考虑节省能源和可扩展性, 其次才考虑公平性、利用率和实时性等。在 MAC 层的能量浪费主要表现在空闲侦听、接收不必要数据和碰撞重传等。为了减少能量的消耗, MAC 协议通常采用“侦听/睡眠”交替的无线信道侦听机制, 传感器节点在需要收发数据时才侦听无线信道, 没有数据需要收发时就尽量进入睡眠状态。近期提出了 S-MAC、T-MAC 和 Sift 等基于竞争的 MAC 协议, DEANA、TRAMA、DMAC 和周期性调度等时分复用的 MAC 协议, 以及 CSMA/CA 与 CDMA 相结合、TDMA 和 FDMA 相结合的 MAC 协议。由于传感器网络是应用相关的网络, 应用需求不同时, 网络协议往往需要根据应用类型或应用目标环境特征定制, 没有任何一个协议能够高效适应所有的不同的应用。

3. 网络安全技术

无线传感器网络作为任务型的网络, 不仅要进行数据的传输, 而且要进行数据采集和融合、任务的协同控制等。如何保证任务执行的机密性、数据产生的可靠性、数据融合的高效性以及数据传输的安全性, 就成为无线传感器网络安全问题需要全面考虑的内容。

为了保证任务的机密布置和任务执行结果的安全传递和融合, 无线传感器网络需要实现一些最基本的安全机制如机密性、点到点的消息认证、完整性鉴别、新鲜性、认证广播和安全管理。除此之外, 为了确保数据融合后数据源信息的保留, 水印技术也成为无线传感器网

络安全的研究内容。

虽然在安全研究方面,无线传感器网络没有引入太多的内容,但无线传感器网络的特点决定了它的安全与传统网络安全在研究方法和计算手段上有很大的不同。首先,无线传感器网络的单元节点的各方面能力都不能与目前 Internet 的任何一种网络终端相比,所以必然存在算法计算强度和安全强度之间的权衡问题,如何通过更简单的算法实现尽量坚固的安全外壳是无线传感器网络安全的主要挑战;其次,有限的计算资源和能量资源往往需要系统的各种技术综合考虑,以减少系统代码的数量,如安全路由技术等;另外,无线传感器网络任务的协作特性和路由的局部特性使节点之间存在安全耦合,单个节点的安全泄漏必然威胁网络的安全,所以在考虑安全算法的时候要尽量减小这种耦合性。

无线传感器网络 SPINS 安全框架在机密性、点到点的消息认证、完整性鉴别、新鲜性、认证广播方面定义了完整有效的机制和算法。安全管理方面目前以密钥预分布模型作为安全初始化和维护的主要机制,其中随机密钥对模型、基于多项式的密钥对模型等是目前最有代表性的算法。

4. 时间同步技术

时间同步是需要协同工作的传感器网络系统的一个关键机制。如测量移动车辆速度需要计算不同传感器检测事件时间差,通过波束阵列确定声源位置节点间时间同步。NTP 是 Internet 上广泛使用的网络时间协议,但只适用于结构相对稳定、链路很少失败的有线网络系统;GPS 能够以纳秒级精度与世界标准时间 UTC 保持同步,但需要配置固定的高成本接收机,而且在室内、森林或水下等有掩体的环境中无法使用 GPS。因此,它们都不适合应用在传感器网络中。

目前已提出了多个时间同步机制,其中 RBS、TINY/MINI-SYNC 和 TPSN 被认为是三个基本的同步机制。RBS 机制是基于接收者—接收者的时钟同步:一个节点广播时钟参考分组,广播域内的两个节点分别采用本地时钟记录参考分组的到达时间,通过交换记录时间来实现它们之间的时钟同步。TINY/MINI-SYNC 是简单的轻量级的同步机制,假设节点的时钟漂移遵循线性变化,那么两个节点之间的时间偏移也是线性的,可通过交换时标分组来估计两个节点间的最优匹配偏移量。TPSN 采用层次结构实现整个网络节点的时间同步:所有节点按照层次结构进行逻辑分级,通过基于发送者—接收者的节点对方式,每个节点能够与上一级的某个节点进行同步,从而实现所有节点都与根节点的时间同步。

5. 定位技术

位置信息是传感器节点采集数据中不可缺少的部分,没有位置信息的监测消息通常毫无意义。确定事件发生的位置或采集数据的节点位置是无线传感器网络最基本的功能之一。为了提供有效的位置信息,随机部署的传感器节点必须能够在布置后确定自身位置。由于传感器节点存在资源有限、随机部署、通信易受环境干扰甚至节点失效等特点,定位机制必须满足自组织性、健壮性、能量高效、分布式计算等要求。

根据节点位置是否确定,传感器节点分为信标节点和位置未知节点。信标节点的位置是已知的,位置未知节点需要根据少数信标节点,按照某种定位机制确定自身的位置。在传感器网络定位过程中,通常会使用三边测量法、三角测量法或极大似然估计法确定节点位置。根据定位过程中是否实际测量节点间的距离或角度,把传感器网络中的定位分类为基于距离的定位和距离无关的定位。

基于距离的定位机制就是通过测量相邻节点间的实际距离或方位来确定未知节点的位置,通常采用测距、定位和修正等步骤实现。基于距离的定位分为基于 TOA 的定位、基于 TDOA 的定位、基于 AOA 的定位和基于 RSSI 的定位等。由于要实际测量节点间的距离或角度,基于距离的定位机制通常定位精度相对较高,所以对节点的硬件也提出了很高的要求。距离无关的定位机制无须实际测量节点间的绝对距离或方位就能够确定未知节点的位置,目前提出的定位机制主要有质心算法、DV-Hop 算法、Amorphous 算法、APIT 算法等。由于无需测量节点间的绝对距离或方位,因而降低了对节点硬件的要求,使得节点成本更适合于大规模无线传感器网络。距离无关的定位机制的定位性能受环境因素的影响小,虽然定位误差相应有所增加,但定位精度能够满足多数传感器网络应用的要求,是目前重点关注的定位机制。

6. 数据融合技术

无线传感器网络存在能量约束,减少传输的数据量能够有效地节省能量,因此在从各个传感器节点收集数据的过程中,可利用节点的本地计算和存储能力处理数据的融合,去除冗余信息,从而达到节省能量的目的。由于传感器节点的易失效性,传感器网络也需要数据融合技术对多份数据进行综合,提高信息的准确度。

数据融合技术可以与传感器网络的多个协议层次进行结合。在应用层设计中,可以利用分布式数据库技术,对采集到的数据进行逐步筛选,达到融合的效果;在网络层中,很多路由协议均结合了数据融合机制,以期减少数据传输量;此外,还有研究者提出了独立于其他协议层的数据融合协议层,通过减少 MAC 层的发送冲突和头部开销达到节省能量的目的,同时又不损失时间性能和信息的完整性。数据融合技术已经在目标跟踪、目标自动识别等领域得到了广泛的应用。在无线传感器网络的设计中,只有面向应用需求设计针对性强的数据融合方法,才能最大限度地获益。

数据融合技术在节省能量、提高信息准确度的同时,要以牺牲其他方面的性能为代价。首先是延迟的代价,在数据传送过程中寻找易于进行数据融合的路由、进行数据融合操作、为融合而等待其他数据的到来,这三个方面都可能增加网络的平均延迟。其次是鲁棒性的代价,无线传感器网络相对于传统网络有更高的节点失效率以及数据丢失率,数据融合可以大幅度降低数据的冗余性,但丢失相同的数据量可能损失更多的信息,因而也降低了网络的鲁棒性。

7. 数据管理技术

从数据存储的角度来看,无线传感器网络可被视为一种分布式数据库。以数据库的方法在无线传感器网络中进行数据管理,可以将存储在网络中的数据逻辑视图与网络中的实现进行分离,使得无线传感器网络用户只需要关心数据查询的逻辑结构,无需关心实现细节。虽然对网络存储的数据进行抽象会在一定程度上影响执行效率,但可以显著增强无线传感器网络的易用性。

无线传感器网络的数据管理与传统的分布式数据库有很大的区别。由于传感器节点能量受限且容易失效,数据管理系统必须在尽量减少能量消耗的同时提供有效的数据服务。同时,无线传感器网络中节点数量庞大,且传感器节点产生的是无限的数据流,无法通过传统的分布式数据库的数据管理技术进行分析处理。此外,对无线传感器网络数据的查询经常是连续的查询或随机抽样的查询,这使得传统的分布式数据库的数据管理技术不适用于无线传

传感器网络。

无线传感器网络的数据管理系统的结构主要有集中式、半分布式、分布式以及层次式结构。目前大多数研究工作均集中在半分布式结构方面。无线传感器网络中数据的存储采用网络外部存储、本地存储和以数据为中心的三种存储方式。相对于其他两种方式,以数据为中心的存储方式可以在通信效率和能量消耗两个方面获得很好的折中。基于地理散列表的方法便是一种常用的以数据为中心的数据存储方式。

无线传感器网络数据查询可以分为历史查询、快照查询和连续查询三种类型。连续查询是用户最经常使用的查询类型。无线传感器网络查询系统一般由全局查询处理器和在每个传感器节点上的局部查询处理器协作构成。局部查询处理器必须具有适应环境变化的自适应性。

8. 无线通信技术

无线传感器网络需要低消耗、短距离的无线通信技术。IEEE 802.15.4/ZigBee 标准针对低速无线个人域网的无线通信标准,它把低功耗、低成本作为设计的主要目标,旨在为个人或者家庭范围内不同设备之间低速联网提供统一标准。由于 IEEE 802.15.4 标准的网络特征与无线传感器网络存在很多相似之处,因此很多无线传感器网络以它作为无线通信平台。

超宽带技术 (ultra wideband, UWB) 是极具潜力的无线通信技术。超宽带技术具有对信道衰减不敏感、发射信号功率谱密度低、数据传输速度快、保密性强、系统复杂度低、能提供数厘米的定位精度等优点,非常适合应用在无线传感器网络中。

9. 嵌入式操作系统

传感器节点是一个微型的嵌入式系统,携带非常有限的硬件资源,需要操作系统能够节能高效地使用其有限的内存、处理器和通信模块,且能够对各种特定应用提供最大的支持。在面向无线传感器网络的操作系统的支持下,多个应用可以并发地使用系统的有限资源。

传感器节点有两个突出的特点。一个特点是并发性密集,即可能存在多个需要同时执行的逻辑控制,这需要操作系统能够有效地满足这种发生频繁、并发程度高、执行过程比较短的逻辑控制流程;另一个特点是传感器节点模块化程度很高,要求操作系统能够让应用程序方便地对硬件进行控制,且保证在不影响整体开销的情况下,应用程序中的各个部分能够比较方便地进行重新组合。上述这些特点对设计面向无线传感器网络的操作系统提出了新的挑战。美国加州大学伯克利分校针对无线传感器网络研发了 TinyOS 操作系统,在科研机构的研究中得到比较广泛的使用,但仍然存在不足之处。

10. 应用层技术

传感器网络应用层由各种面向应用的软件系统构成,部署的传感器网络往往执行多种任务。应用层的研究主要是各种传感器网络应用系统的开发和多任务之间的协调,如作战环境侦查与监控系统、军事侦察系统、情报获取系统、战场监测与指挥系统、环境监测系统、交通管理系统、灾难预防系统、危险区域监测系统、有灭绝危险的动物或珍贵动物的跟踪监护系统、民用和工程设施的安全性监测系统、生物医学监测、治疗系统和智能维护等。

传感器网络应用开发环境的研究旨在为应用系统的开发提供有效的软件开发环境和软件工具,需要解决的问题包括传感器网络程序设计语言,传感器网络程序设计方法学,传感器网络软件开发环境和工具,传感器网络软件测试工具的研究,面向应用的系统服务 (如位置管理和服务发现等),基于感知数据的理解、决策和举动的理论与技术 (如感知数据的决

策理论、反馈理论、新的统计算法、模式识别和状态估计技术等)。

习 题

- 13-1 什么是无线传感器网络?
- 13-2 无线传感器网络体系结构包括哪些部分? 各部分的功能分别是什么?
- 13-3 无线传感器网络的有哪些关键技术?
- 13-4 举例说明无线传感器网络的应用。
- 13-5 说明无线传感器网络的特点。

参 考 文 献

- [1] 周真, 苑惠娟. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] 崔逊学, 左从菊. 无线传感器网络简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [3] 曾园园. 无线传感器网络技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [4] 王汝传, 孙力娟. 无线传感器网络技术导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [5] 唐文彦. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [6] 何道清. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] 陈建元. 传感器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

第14单元

传感器的标定

学习要点

- ◆ 传感器标定与校准的概念；
- ◆ 传感器标定的基本方法；
- ◆ 传感器的静态标定方法；
- ◆ 传感器的动态标定方法。

相关知识链接

- ◆ 吴文韬, 冯浩, 赵浩. 永磁式角加速度传感器及其标定方法的研究. 计量学报, 2014 (3);
- ◆ 陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法. 光学学报, 2015 (1)。

引导案例

由飞机失联系到的……

2014年3月8日, 马来西亚航空公司一架载有239人的飞机失去联系, 机上有154名中国人, 到目前为止人们还不清楚飞机失联的真正原因。飞机在天空中飞行, 承载着乘客的生命安全, 那么飞机是如何保障飞行安全的呢? 其实飞机上有很多的传感器, 正是这些传感器来保障飞机的飞行安全。例如倾角角传感器可以测量飞机飞行角度; 高度传感器测量飞机对地的绝对高度; 压力传感器测量飞机所处位置的气压; 温度传感器测量飞机发动机的温度; 温湿度传感器测量飞机室内的温湿度; 油位传感器测量飞机内油箱的油位; 加速度传感器和速度传感器测量飞机飞行的加速度和速度; 烟雾传感器监测机舱内烟雾; 超声波传感器来监控飞机的位置; 还有惯性传感器等等。飞机上有几千甚至上万个传感器, 每个都极其重要, 任何一个有问题都有可能带来机毁人亡的严重后果, 因此保证这些传感器准确、可靠地工作是十分重要的。而标定正是传感器实现量值传递准确性的必要保证。

14.1 标定的概念

任何一种传感器与所有仪器仪表一样, 在其制造、装配完成后都必须按原设计指标进行一系列严格试验, 以确定其实际性能, 这个过程称为标定; 在使用一段时间后或经过修理, 也必须对其主要技术指标进行校准试验, 以确保传感器的各项性能达到使用要求, 这个过程

称为校准。校准和标定的内容和方法是基本相同的。

国家标准《传感器通用术语》GB/T 7665—2005 对校准（标定）（calibration）的定义为：在规定的条件下通过一定的试验方法记录相应的输入—输出数据，以确定传感器性能的过程。传感器的标定就是利用准确度等级更高的标准器具对传感器进行定度的过程，从而确立传感器输出量与输入量之间的关系。同时，也确定不同使用条件下的误差关系。

标定的基本方法是将已知的被测量，亦即标准量，输入给待标定的传感器，得到传感器的输出量；建立传感器输出量与输入量之间的对应关系，从而得到一系列表征两者对应关系的标定曲线，进而得到传感器性能指标的实测结果。

按标准量的产生方式可以将标定分为绝对法和相对法，如图 14-1 为标定系统组成框图。图 14-1a 所示为绝对法标定系统，标准设备产生标准量，并作为输入量送给待标定传感器，测得传感器的输出量，从而得到校准数据和校准曲线；图 14-1b 所示为相对法标定，在没有标准设备情况下，用标准传感器测量输入给待标定传感器的输入量，将其测量结果即标准传感器的输出量作为标准量。

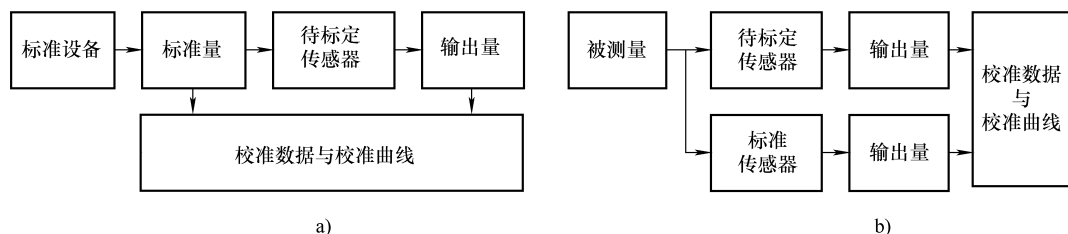


图 14-1 标定系统组成框图

a) 绝对法标定系统 b) 相对法标定系统

为了保证标定的精度，所用的标准设备或标准传感器的精度应比待标定传感器高一个数量级，并符合国家计量量值传递的规定。工程测试所用传感器的标定应在与其使用条件相似的环境下进行。有时为了获得较高的标定精度，可将传感器与配用的电缆、滤波器、放大器等测试系统一起标定。由于各种传感器原理及结构的不同，所以标定的方法也有一些差异。

传感器的标定可以分为静态标定和动态标定两种。

14.2 传感器的静态标定

传感器的静态标定目的是确定传感器的静态特性指标，如线性度、灵敏度、重复性和迟滞等。

14.2.1 传感器的静态标定方法

1. 静态标准条件

传感器的静态特性是在静态标准条件下标定的。静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击（除非这些参数本身就是被测量），环境温度一般为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于 85% RH，气压 $(101 \pm 7)\text{kPa}$ 等条件。

2. 静态标定系统的组成

传感器静态标定系统一般由以下几部分组成：

- 1) 被测物理量标准发生器，如测力机、活塞式压力计、恒温源等。
- 2) 被测物理量标准测试系统，如标准力传感器、压力传感器、标准热电偶、量块等。
- 3) 待标定传感器所配接的信号调理器和显示器、记录仪等，所配接仪器精度应是已知的。

3. 静态标定的步骤

- 1) 连接传感器与测试仪器，将传感器的量程（测量范围）分成若干个等间距点，一般以量程的 10% 为间隔。
- 2) 根据传感器量程分点的情况，由小到大，逐点递增地输入标准量值，并记录与各点输入值相对应的输出值。
- 3) 将输入量由大到小，逐点递减，同时记录与各点输入值相对应的输出值。
- 4) 按步骤 2)、3) 所述过程，对传感器进行正、反行程往复循环多次测试，将得到的输出—输入测试数据用表格形式列出或画成曲线。
- 5) 对测试数据进行必要的处理，根据处理结果就可以确定传感器的静态特性指标。

14.2.2 压力传感器的静态标定方法

国家标准《压力传感器性能试验方法》GB/T 15478—1995 规定压力传感器静态标定的一般试验条件是环境温度为 15 ~ 35℃；相对湿度为 60% ~ 70%；大气压力为 86 ~ 106kPa；除地磁场外无其他外界磁场；无机械振动。

校准系统由标准压力源、激励电源和读数记录装置三部分组成。

常用的标准压力源有工作基准活塞式压力计、工作基准微压计、标准活塞式压力计、标准活塞式真空压力计、气动活塞式压力计、标准浮球式压力计、标准液体压力计、数字式压力计、精密压力表以及其他相应准确度等级的压力计量标准器。

活塞式压力计是一种精度很高的压力标准器，它由压力发生系统（压力泵）和压力测量系统（活塞部分）组成，常用于标定压力传感器和压力表，如图 14-2 所示。

压力发生系统由手摇压力泵（螺旋压力发生器）4、油杯 10、进油阀 d 及两个针形阀 b、c 组成。两个针形阀上有连接螺帽，用以连接标准压力表 6 及待标定的传感器或压力表 11。活塞部分由具有精确截面积的活塞 1、与活塞直接相连的称重托盘及砝码 2 及活塞柱 3 组成。

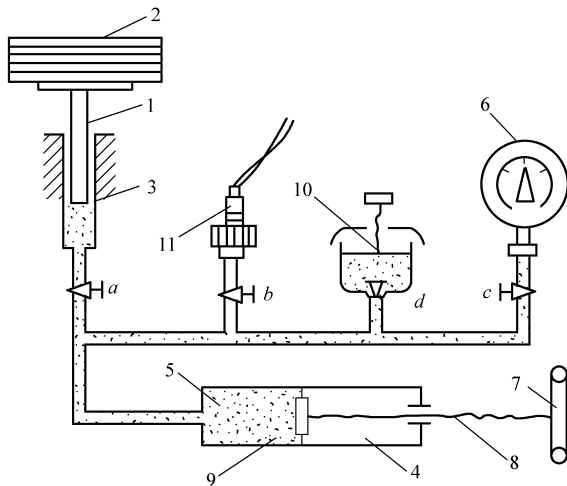


图 14-2 活塞式压力计

- 1—活塞 2—称重托盘及砝码 3—活塞柱 4—手摇压力泵
5—工作液 6—标准压力表 7—手轮 8—丝杠
9—工作活塞 10—油杯 11—待标定传感器或压力表

标定时，将待标定的压力传感器装在连接螺帽上。按活塞压力计的操作规程，转动压力泵的手轮 7 旋转丝杠 8 产生工作压力，推动工作活塞 9 挤压工作液 5，经油液传压给测量活塞 1，使托盘上升到规定的刻线位置。按所要求的压力间隔，逐点增加砝码重量，使压力计产生所需的压力 p ，同时记录下被标定的压力传感器在相应压力下的输出电压值 u 。这样就可以得到被标定压力传感器的输出特性曲线，根据这条曲线可以确定所需要的各静态特性指标。

在实际测试中，为了确定整个压力系统的输出特性，往往需要进行现场标定。为了操作方便，可以不用砝码加载（关闭针形阀 a），而直接用标准压力表读取所加的压力 p 。

上述标定方法不适合压电式压力测量系统，因为活塞式压力计的加载过程时间太长，致使传感器产生的电荷有泄漏，严重影响其标定精度。所以对压电式测压系统一般采用杠杆式压力标定机或弹簧测力计式压力标定机。

14.2.3 温度传感器的静态标定方法

1. 温度传感器的标定方法

温度传感器的标定有标准值法和标准表法两种方法。

标准值法就是用适当的方法建立起一系列国际温标定义的固定温度点，即按照国际计量委员会 1989 年通过的国际温标（IPT-90）的定义固定点为标准值，见表 14-1，把被标定温度传感器依次置于这些标准温度值之下，记录下温度传感器的输出，并根据国际温标规定的内插公式对温度传感器的分度进行对比记录，从而完成对温度传感器的标定；被标定后的温度传感器可作为标准温度传感器来测温度。

复现表 14-1 中温度基准点的方法是用一个内装有参考物质的密封容器，将待标定的温度传感器的敏感元件放在伸入容器中心位置的套管中；然后加热，使温度超过参考物质的熔点，待物质全部熔化；随即冷却，达到凝固点后，只要同时存在液态和固态（约几分钟），温度就稳定下来，并能保持规定的值不变。

表 14-1 IPT-90 定义固定点

定义固定点	IPT-90		定义固定点	IPT-90	
	℃	K		℃	K
³ He 和 ⁴ He 的蒸汽压点	-270.15— -268.15	3—5	铯熔点	29.7646	302.9146
平衡氢三相点	-259.3467	13.8033	铟凝固点	156.5985	429.7485
平衡氢 17K 点	≈ -256.15	≈ 17	锡凝固点	231.928	505.078
平衡氢沸点	≈ -252.85	≈ 20.3	锌凝固点	419.527	692.677
氦三相点	-248.5939	24.5563	铝凝固点	660.323	933.473
氧三相点	-218.7961	54.3584	银凝固点	961.78	1234.93
氩三相点	-189.3442	83.8058	金凝固点	1064.18	1337.33
汞三相点	-38.8344	234.3156	铜凝固点	1084.42	1357.77
水三相点	0.01	273.16			

0.65 ~ 5.0K 之间，由³He 和⁴He 的蒸汽压点与温度的关系式确定；3.0K 到氦三相点

24. 5561K 之间，用氦气体温度计作为标准器。对于定义固定点之间的温度，在平衡氢三相点 -259. 3467℃ 到银凝固点 961. 78℃ 之间，采用基准铂电阻温度计作为标准器；银凝固点 961. 78℃ 以上的温区，采用普朗克辐射定律确定。标准器在不同的温度范围内按照不同的内插公式计算固定点之间的温度。

标准表法是更为一般和常用的标定方法，即把被标定温度传感器与已被标定好的更高级精度的温度传感器，紧靠在一起，共同置于可调节的恒温槽中，分别把槽温调节到所选择的若干温度点，比较和记录两者的读数，获得一系列对应差值，经多次升温、降温、重复测试，若这些差值稳定，则把记录下的这些差值作为被标定温度传感器的修正量。

2. 工作用贵金属热电偶的标定方法

工作用贵金属热电偶是由两种不同的贵金属导体制成的热电偶温度计，包括工作用铂铑 10 - 铂（简称 S 型）热电偶、工作用铂铑 13 - 铂（简称 R 型）热电偶及工作用铂铑 30 - 铂铑 6（简称 B 型）热电偶。

标定所需的标准器有一等标准铂铑 10 - 铂热电偶、一等及二等标准铂铑 30 - 铂铑 6 热电偶。

被检热电偶按国家标准《工作用贵金属热电偶》检定规程 JJG 141—2013 的规定要求进行预处理后，用直径为 0. 3 ~ 0. 5mm 铂丝或铂铑丝将标准热电偶和被检热电偶捆扎成束，每束热电偶总数（包括标准热电偶）不应超过 5 支，再将各测量端用直径为 0. 2 ~ 0. 3mm 的清洁铂丝捆扎 2 ~ 3 圈在一起，捆扎时被检热电偶和标准热电偶的测量端应处于同一垂直平面且相互间接触良好，测量端之外的电极不应互相接触。将捆扎好的热电偶束置于管式检定炉中，使测量端面处于检定炉均匀温场的中心。

标定时参考端不得使用补偿导线延长，测量连接导线应使用同一卷单芯铜导线，导线的线径可选取 0. 7mm 左右。

S 型、R 型热电偶的参考端与测量导线应连接可靠，插入同一参考端恒温器内，插入深度大于 120mm，插入深度应相同，确保各参考端之间的温差不超过 0. 05℃；B 型热电偶的参考端与测量导线可置于 0 ~ 40℃ 的同一恒温器内。

热电偶的标定温度点见表 14-2 规定。标定顺序由低温向高温逐点进行，检定炉炉温偏离标定点温度不得超过 ±5℃。

表 14-2 热电偶检定温度点及对应热电势最大允许误差

分度号	检定温度点℃	I 级 μV	Ⅱ级 μV	Ⅲ级 μV
S	419. 527（锌凝固点）	± 10	± 14	—
	660. 323（铝凝固点）	± 10	± 17	—
	1084. 62（铜凝固点）	± 12	± 32	—
R	419. 527（锌凝固点）	± 10	± 16	—
	660. 323（铝凝固点）	± 12	± 19	—
	1084. 62（铜凝固点）	± 14	± 37	—
B	1100	—	± 27	± 54
	1300	—	± 35	± 71
	1500	—	± 43	± 87

标定方法有双极比较法和同名极比较法。

(1) 双极比较法 双极比较法的标定原理如图 14-3 所示。炉温升到设定的标定点后,当观测到炉温变化小于 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (S 型、R 型热电偶) 或 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (B 型热电偶) 时,开始测量。测量顺序为

标准→被检 1→被检 2→被检 3→被检 4→被检 4→被检 3→被检 2→被检 1→标准

测量时,每支热电偶的热电势测量次数不少于 4 次;整个测量过程中炉温变化不得超过 0.5°C 。测量结果保留到小数点后 4 位 ($0.1\mu\text{V}$)。

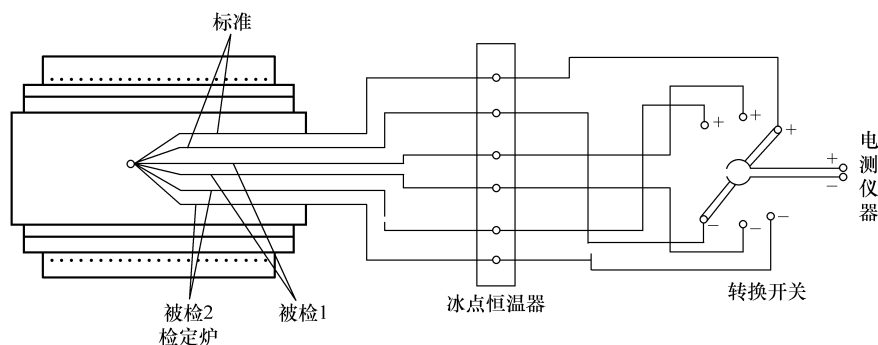


图 14-3 双极比较法检定原理示意图

标准热电偶与被检热电偶同分度号时,被检热电偶在各检定点上的热电势 E_i 计算式为

$$E_i = \bar{E}_{\text{被}} + (E_{\text{证}} - E_{\text{标}}) \quad (14-1)$$

式中 $\bar{E}_{\text{被}}$ ——在检定点测得的被检热电偶的热电势算数平均值 (mV);

$E_{\text{证}}$ ——标准热电偶证书中固定点上的热电势值 (mV);

$E_{\text{标}}$ ——在检定点测得的标准热电偶的热电势算数平均值 (mV)。

标准热电偶与被检热电偶不同分度号时,被检热电偶在各检定点上的热电势 E_i 计算式为

$$E_i = \bar{E}_{\text{被}} + \frac{E_{\text{证}} - \bar{E}_{\text{标}}}{S_{\text{标}}} S_{\text{被}} \quad (14-2)$$

式中 $S_{\text{标}}$ ——标准热电偶在检定点的微分热电势 ($\text{mV}/^{\circ}\text{C}$);

$S_{\text{被}}$ ——被检热电偶在检定点的微分热电势 ($\text{mV}/^{\circ}\text{C}$)。

(2) 同名极比较法 该方法适用于同分度号热电偶的检定,其检定原理如图 14-4 所示。被检热电偶的电极与电测仪器的“+”端相接,标准热电偶的电极与电测仪器的“-”端相接。检定时,炉温升到设定的检定点,炉温稳定后,即可开始测量,整个测量过程中炉温变化不得超过 5°C 。每支热电偶的热电势测量次数不少于 4 次,测量读数保留到小数点后 4 位 ($0.1\mu\text{V}$)。

用同名极比较法时,各检定点上的热电势 E_i 计算式为

$$E_i = E_{\text{证}} + (\bar{E}_{\text{p}} - \bar{E}_{\text{n}})$$

式中 $\bar{E}_{\text{p}}$ ——在检定点测得的被检热电偶和标准热电偶正极产生的热电势算数平均值 (mV);

$\bar{E}_{\text{n}}$ ——在检定点测得的被检热电偶和标准热电偶负极产生的热电势算数平均值 (mV)。

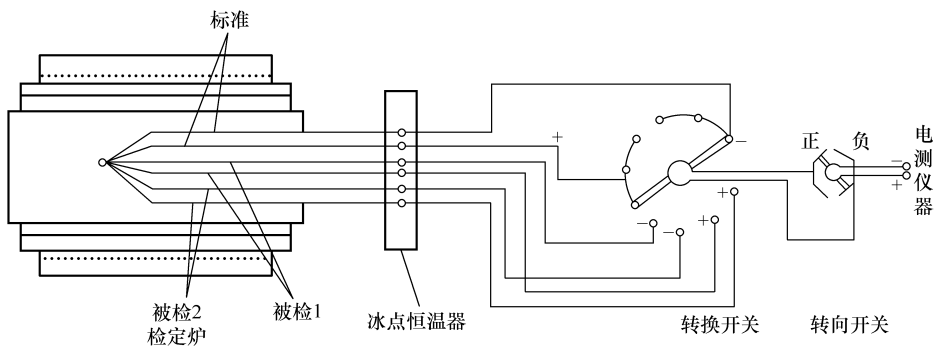


图 14-4 同名极法检定原理示意图

热电偶热电势的标定结果的有效位数应修约保留到小数点后 3 位，标定结果的示值误差不得超过表 14-2 给定的最大允许误差。

14.3 传感器的动态标定

传感器动态标定的目的是确定传感器的动态特性参数，如工作频带、时间常数、固有频率和阻尼比等。

传感器的动态特性标定，实质上就是向传感器输入一个“标准”动态信号，再根据传感器输出的响应信号，经分析计算、数据处理，确定它的动态性能指标的具体数值。如一阶传感器的动态性能指标是时间常数 τ ；二阶传感器则有固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 两个参数。

试验方法常常因传感器形式（电的、光的、机械的等）不同而有所不同。但从原理上通常可分为阶跃信号响应法、正弦信号响应法、随机信号响应法和脉冲信号响应法等。为了便于比较和评价，对传感器进行动态标定时，常用的标准信号有周期函数（如正弦函数）与瞬变函数（如阶跃函数）两类。

对一定的传感器，其动态特性参数是固有的，因此可选用任一种动态信号进行标定。

14.3.1 阶跃信号响应法

1. 一阶传感器时间常数 τ 的确定

一阶传感器输出 y 与被测量 x 之间的关系如式（1-30），当输入 x 是幅值为 A 的阶跃函数时，其解如式（1-36）。对于一阶传感器，在测得的阶跃响应曲线上，通常取输出值达到其稳态值的 63.2% 处所经过的时间作为其时间常数 τ 。但这样确定的 τ 值实际上没有涉及响应的全过程，测量结果的可靠性仅仅取决于某些个别的瞬时值。而采用下述方法，可获得较为可靠的 τ 值。

根据式（1-36）得 $1 - y(t)/(KA) = \exp(-t/\tau)$ ，令 $Z = -t/\tau$ ，可见 Z 与 t 呈线性关系，而且

$$Z = \ln \left[1 - \frac{y(t)}{kA} \right]$$

(14-3)

因此,根据测得的输出信号 $y(t)$ 作出 $Z-t$ 曲线,则 $\tau = -\Delta t/\Delta Z$,如图 14-5 所示。这种方法考虑了瞬态响应的全过程,并可以根据 $Z-t$ 曲线与直线的拟合程度来判断传感器接近一阶系统的符合程度。

2. 二阶传感器阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 的确定

二阶传感器一般都设计成 $\xi = 0.7 \sim 0.8$ 的欠阻尼系统,则测得的传感器阶跃响应输出曲线如图 1-9 所示,其上可以获得曲线振荡频率 ω_d 、稳态值 $y(\infty)$ 、最大过冲量 δ_m 及其发生的时间 t_m 。而

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{1 + [\pi/\ln(\delta_m/y(\infty))]^2}} \quad (14-4)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{\pi}{t_m \sqrt{1-\xi^2}} \quad (14-5)$$

由上面两式可确定出 ξ 和 ω_n 。

也可以利用任意两个过冲量来确定 ξ ,设 n 为第 i 个过冲量 δ_{mi} 和第 $i+n$ 个过冲量 $\delta_{m(i+n)}$ 之间相隔的周期数(整数),它们分别对应的时间是 t_i 和 t_{i+n} ,则 $t_{i+n} = t_i + (2\pi n)/\omega_d$ 。

令 $\delta_n = \ln(\delta_{mi}/\delta_{m(i+n)})$ 。此时,

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{1 + 4\pi^2 n^2 / [\ln(\delta_{mi}/\delta_{m(i+n)})]^2}} \quad (14-6)$$

那么,从传感器阶跃响应曲线上,测取相隔 n 个周期的任意两个过冲量 δ_{mi} 和 $\delta_{m(i+n)}$,然后代入式(14-6)便可确定 ξ 的值。

由于该方法用比值 $\delta_{mi}/\delta_{m(i+n)}$,因而消除了信号幅值不理想的影响。若传感器是精确的二阶传感器,则取任何正整数 n ,求得的 ξ 值都相同;反之,若 n 取不同值而获得不同的 ξ 值,就表明传感器不是线性二阶系统。所以,该方法还能判断传感器与二阶系统的符合程度。

14.3.2 正弦信号响应法

测量传感器正弦稳态响应的幅值和相角,然后得到稳态正弦输入输出的幅值比和相位差。逐渐改变输入正弦信号的频率,重复这个过程,即可得到幅频和相频特性曲线。

1. 一阶传感器时间常数 τ 的确定

将一阶传感器的频率特性曲线绘成伯德图,如图 1-10 所示,则其对数幅频曲线下降 3dB 处所测取的角频率 $\omega = 1/\tau$,由此可确定一阶传感器的时间常数 $\tau = 1/\omega$ 。

2. 二阶传感器阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 的确定

二阶传感器的幅频特性曲线如图 1-11 所示。在欠阻尼情况下,从曲线上可以测得三个特征量,即零频增益 k_0 、共振频率增益 k_r 和共振角频率 ω_y 。由式(14-7)或式(14-8)

$$\frac{k_r}{k_0} = \frac{1}{2\xi \sqrt{1-\xi^2}} \quad (14-7)$$

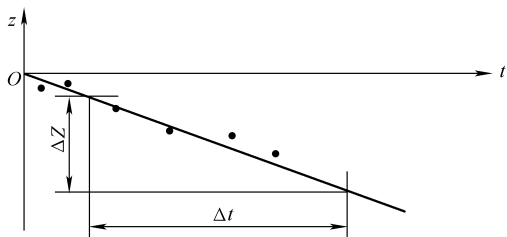


图 14-5 由 $Z-t$ 曲线求时间常数

$$\omega_n = \frac{\omega_r}{\sqrt{1 - 2\xi^2}} \quad (14-8)$$

即可确定 ξ 和 ω_n 。

虽然从理论上讲,也可通过传感器相频特性曲线确定 ξ 和 ω_n ,但是一般来说准确的相角测试比较困难,所以很少使用相频特性曲线。

14.3.3 其他信号响应法

如果用功率密度为常数 C 的随机白噪声作为待标定传感器的标准输入量,则传感器输出信号功率谱密度为 $Y(\omega) = C|H(\omega)|^2$ 。所以传感器的幅频特性 $k(\omega)$ 为

$$k(\omega) = \frac{1}{\sqrt{C}} \sqrt{Y(\omega)} \quad (14-9)$$

由此得到传感器频率响应的方法称为随机信号校验法,它可消除干扰信号对标定结果的影响。

如果用冲击信号作为传感器的输入量,则传感器的系统传递函数为其输出信号的拉普拉斯变换,由此可确定传感器的传递函数。

如果传感器属于三阶以上的系统,则需分别求出传感器输入和输出的拉普拉斯变换,或通过其他方法确定传感器的传递函数,或直接通过正弦响应法确定传感器的频率特性;再进行因式分解将传感器等效成多个一阶和二阶环节的串并联系统,进而分别确定它们的动态特性,最后以其中最差的作为传感器的动态特性标定结果。

14.3.4 振动传感器的动态标定

对性能的全面标定只在制造单位或研究部门进行,而在一般使用单位或使用场合,主要是标定其灵敏度、频率特性和动态线性范围。

振动传感器(或测振仪)的动态标定,常采用振动台作为正弦激励的信号源。振动台有机械的、电磁的、液压的等多种,常用的是电磁振动台。标定方法可以分为绝对法和比较法。绝对法是采用激光光波长度作为振幅量值的绝对基准。由于激光干涉基准系统复杂昂贵,而且一经安装调试后就不能移动,因此该方法仅用于复现振动量值的最高基准,以及标定的标准测振仪作为二等标准。比较法是最常用的标定方法,即将被标定的振动传感器与标准振动传感器相比较。标定时,将被标测振传感器与标准测振传感器一起安装在标准振动台上。为了使它们尽可能地靠近安装以保证感受的振动量相同,常采用“背靠背”法安装。标准振动传感器端面上常有螺孔供直接安装被标传感器或用刚性支架安装。设标准测振传感器与被标测振传感器在受到同一振动量时输出分别为 U_0 和 U ,已知标准测振传感器的加速度灵敏度为 S_{a0} ,则被标测振传感器的加速度灵敏度 S_a 为

$$S_a = \frac{U}{U_0} S_{a0} \quad (14-10)$$

频率响应的标定是在振幅恒定条件下,改变振动台的振动频率,所得到的输出电压与振动频率的对应关系,即传感器的幅频响应。频率响应的标定至少要做七点以上,并应注意有无局部谐振现象的存在,这可用频率扫描法来检查。比较待标定传感器与标准传感器输出信号间的相位差,就可以得到传感器的相频特性。相位差可以用相位计读出,它可以用示波器

观测它们的利萨如图形求得。

需要指出的是,上面仅通过几种典型传感器介绍了静态标定与动态标定的基本概念和方法。由于传感器种类繁多,标定设备与方法各不相同;各种传感器的标定项目也远不止上述几项。此外,随着技术的不断进步,不仅标准发生器与标准测试系统在不断改进,利用计算机进行数据处理、自动绘制特性曲线以及自动控制标定过程的系统也已在各种传感器的标定中出现。

习 题

- 14-1 传感器的标定与校准的意义是什么?它们有什么区别?
- 14-2 传感器标定的基本方法是什么?
- 14-3 传感器的静态标定系统由哪几部分组成?静态特性的标定步骤有哪些?
- 14-4 以工业用热电偶的分度检定为例,说明对温度传感器进行静态标定时需要哪些设备?
- 14-5 什么是传感器的动态标定?传感器的动态特性指标有哪些?

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 传感器通用术语: GB/T 7665—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 工作用贵金属热电偶检定规程: JJG 141—2013 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 压力传感器性能试验方法: GB/T 15478—1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [4] 国家技术监督局. 1990 年国际温标宣贯手册 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [5] 梁福平. 传感器原理及检测技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [6] 唐文彦. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 何道清, 张禾, 湛海云. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 吕勇军. 传感器技术实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [9] 徐科军, 马修水, 李晓林. 传感器与检测技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [10] 梁福平. 传感器原理及检测技术学习与实践指导 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014.

FUNDAMENTAL AND APPLICATION OF SENSOR



地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



机工教育微信服务号

ISBN 978-7-111-58175-8

策划编辑◎王康 / 封面设计◎张静

ISBN 978-7-111-58175-8



9 787111 581758 >

定价：48.00元