



高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

# 测试技术基础

■ 李孟源 主编 郭爱芳 张发玉 副主编



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

 高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

# 测试技术基础

李孟源 主编

郭爱芳 张发玉 副主编

西安电子科技大学出版社

2006

## 内 容 简 介

本书主要介绍了测试系统的基础知识。全书以测试系统的组成为线索,讲述了常用传感器的原理及应用、测试系统的静动态特性、信号调理电路、测试信号的分析与处理、测试系统的干扰及其抑制和机械振动测量等内容。本书条理清晰,由浅入深,既便于教学又利于自学。

本书可作为仪器仪表类、机械类、机电类等相关专业的教材,也可供从事测试技术工作的工程技术人员参考。

★ 本书配有电子教案,需要的教师可来电索取,免费赠送。

## 图书在版编目(CIP)数据

测试技术基础/李孟源主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2006. 2

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 7-5606-1629-1

I. 测... II. 李... III. 测试技术—高等学校—教材 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 155873 号

策 划 臧延新 云立实

责任编辑 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: [xdupfxb@pub.xaonline.com](mailto:xdupfxb@pub.xaonline.com)

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 12.875

字 数 301 千字

印 数 1~4000 册

定 价 15.00 元

ISBN 7-5606-1629-1/TM·0023

**XDUP 1921001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

本书是根据仪器仪表及自动化类专业“测试技术”教学大纲编写的,主要介绍了非电量电测量的基础理论知识和应用技术,其中包括测试系统的组成、传感器、中间调理电路、测试系统特性、测试系统的干扰及其抑制、信号分析与处理等内容。本书既有测试系统静、动态特性,信号分析与处理等方面比较系统的理论,又具有传感器器件、系统抗干扰技术等方面的实用参考价值。

为了便于读者学习与掌握测试技术的基础理论和技术,本书在编排上遵循由浅入深、循序渐进的规律,从被测非电物理量或化学量的拾取环节,即测试系统的首要关键环节——传感器开始,依次对测试系统各组成部分的原理、功能及应用等做了较详细的介绍,从而使教材的章节结构与工程实际中的测试系统紧密地结合在一起。这种结构体系不仅贴近学习者的思维习惯,同时也利于工程技术人员学习参考,具有很强的适用性。

参加本书编写的有河南科技大学的李孟源、郭爱芳、张发玉、尚振东、王恒迪和山东威海职业技术学院的姜诚君等老师,其中李孟源编写第1章,郭爱芳编写第3章,张发玉编写第6章,尚振东编写第5章和第2章的第4节到第7节,王恒迪编写第4章,姜诚君编写第2章的第1节到第3节。全书由李孟源统稿、定稿并任主编,郭爱芳和张发玉任副主编。

本书由河南理工大学武良臣教授审稿,并提出了很多宝贵建议和意见。此外在本书的编写过程中得到了河南科技大学教务处和机电学院领导的大力支持,西安电子科技大学出版社的臧延新编辑也付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,加上时间仓促,书中疏漏及错误之处在所难免,恳请广大师生、读者批评指正,提出宝贵意见。

李孟源  
2006年1月

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....          | 1  |
| 1.1 课程内容 .....          | 1  |
| 1.2 本课程的特点及任务要求 .....   | 2  |
| 第 2 章 常用传感器 .....       | 4  |
| 2.1 概述 .....            | 4  |
| 2.2 能量控制型传感器 .....      | 5  |
| 2.2.1 电阻式传感器 .....      | 5  |
| 2.2.2 电容式传感器 .....      | 13 |
| 2.2.3 电感式传感器 .....      | 18 |
| 2.3 能量转换型传感器 .....      | 23 |
| 2.3.1 压电式传感器 .....      | 23 |
| 2.3.2 磁电式传感器 .....      | 28 |
| 2.3.3 热电偶传感器 .....      | 29 |
| 2.3.4 热电阻温度传感器 .....    | 32 |
| 2.4 磁敏传感器 .....         | 37 |
| 2.4.1 霍尔式传感器 .....      | 37 |
| 2.4.2 磁敏电阻传感器 .....     | 39 |
| 2.5 光敏传感器 .....         | 40 |
| 2.5.1 光电式传感器 .....      | 40 |
| 2.5.2 色敏传感器 .....       | 42 |
| 2.5.3 CCD 图像传感器 .....   | 42 |
| 2.5.4 红外热释电式光敏传感器 ..... | 43 |
| 2.6 湿、气敏传感器 .....       | 43 |
| 2.6.1 湿敏传感器 .....       | 43 |
| 2.6.2 气敏传感器 .....       | 44 |
| 2.7 其它传感器 .....         | 45 |
| 2.7.1 光纤传感器 .....       | 45 |
| 2.7.2 光栅传感器 .....       | 47 |
| 2.7.3 感应同步器 .....       | 49 |
| 2.7.4 生物传感器 .....       | 51 |
| 2.7.5 离子敏传感器 .....      | 52 |
| 2.7.6 集成传感器及智能传感器 ..... | 53 |
| 练习与思考 .....             | 54 |
| 第 3 章 测试系统的特性 .....     | 56 |
| 3.1 概述 .....            | 56 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 3.1.1 测试系统的基本要求 .....   | 56 |
| 3.1.2 线性系统及其主要性质 .....  | 57 |
| 3.2 测试系统的静态特性 .....     | 58 |
| 3.2.1 测试系统的误差与精度 .....  | 58 |
| 3.2.2 测试系统的静态特性参数 ..... | 60 |
| 3.3 测试系统的动态特性 .....     | 63 |
| 3.3.1 传递函数 .....        | 63 |
| 3.3.2 频率特性 .....        | 64 |
| 3.3.3 瞬态响应 .....        | 70 |
| 3.3.4 动态特性参数的测定 .....   | 76 |
| 3.3.5 实现不失真测试的条件 .....  | 80 |
| 3.3.6 负载效应 .....        | 81 |
| 练习与思考 .....             | 85 |

## 第4章 信号调理电路 ..... 87

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 4.1 测量电桥 .....                 | 87  |
| 4.1.1 直流电桥 .....               | 87  |
| 4.1.2 交流电桥 .....               | 91  |
| 4.1.3 带感应耦合臂的电桥 .....          | 93  |
| 4.2 调制与解调 .....                | 94  |
| 4.2.1 调幅及解调 .....              | 95  |
| 4.2.2 调频及解调 .....              | 99  |
| 4.3 滤波器 .....                  | 101 |
| 4.3.1 概述 .....                 | 101 |
| 4.3.2 理想滤波器 .....              | 102 |
| 4.3.3 实际滤波器 .....              | 104 |
| 4.3.4 MATLAB在滤波器分析中的应用实例 ..... | 110 |
| 练习与思考 .....                    | 111 |

## 第5章 信号分析与处理 ..... 113

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 5.1 概述 .....               | 113 |
| 5.1.1 信号的概念和分类 .....       | 113 |
| 5.1.2 信号的时域分析和频域分析 .....   | 114 |
| 5.2 周期信号及其频谱 .....         | 115 |
| 5.2.1 周期信号的定义 .....        | 115 |
| 5.2.2 傅里叶级数的三角函数展开 .....   | 115 |
| 5.2.3 周期信号的频谱 .....        | 116 |
| 5.2.4 复数形式的傅里叶级数 .....     | 118 |
| 5.3 非周期信号及其频谱 .....        | 122 |
| 5.3.1 傅里叶积分 .....          | 122 |
| 5.3.2 傅里叶变换与非周期信号的频谱 ..... | 123 |
| 5.3.3 傅里叶变换的性质 .....       | 126 |
| 5.3.4 几种特殊信号的频谱 .....      | 127 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 5.4 数字信号分析与处理 .....              | 131 |
| 5.4.1 信号的数字化 .....               | 131 |
| 5.4.2 离散傅里叶变换(DFT) .....         | 133 |
| 5.4.3 数字化分析处理中的问题 .....          | 135 |
| 5.4.4 快速傅里叶变换(FFT) .....         | 139 |
| 5.5 随机信号分析与处理 .....              | 141 |
| 5.5.1 基本概念 .....                 | 141 |
| 5.5.2 各态历经随机过程的统计参数 .....        | 142 |
| 5.5.3 相关分析 .....                 | 144 |
| 5.5.4 功率谱分析 .....                | 149 |
| 5.6 虚拟测试系统中的信号处理模块 .....         | 151 |
| 5.6.1 虚拟仪器概述 .....               | 151 |
| 5.6.2 LabVIEW 简介 .....           | 152 |
| 5.6.3 LabVIEW 应用程序的构成 .....      | 153 |
| 5.6.4 LabVIEW 中的信号分析与处理工具箱 ..... | 154 |
| 练习与思考 .....                      | 159 |
| <b>第6章 测试技术在工程中的应用</b> .....     | 161 |
| 6.1 测试系统中的抗干扰问题 .....            | 161 |
| 6.1.1 电磁干扰 .....                 | 161 |
| 6.1.2 屏蔽、接地、隔离、布线与灭弧技术 .....     | 163 |
| 6.1.3 电源干扰的抑制 .....              | 168 |
| 6.1.4 软件干扰抑制技术 .....             | 170 |
| 6.2 测试系统的标定 .....                | 171 |
| 6.2.1 概述 .....                   | 171 |
| 6.2.2 力、应力和压力测试系统的标定 .....       | 172 |
| 6.2.3 温度测试系统的标定 .....            | 175 |
| 6.3 机械振动的测量 .....                | 176 |
| 6.3.1 振动的概述 .....                | 176 |
| 6.3.2 单自由度系统的受迫振动 .....          | 179 |
| 6.3.3 振动的激励及激振器 .....            | 183 |
| 6.3.4 振动的测量 .....                | 189 |
| 6.3.5 测振系统的校准 .....              | 193 |
| 练习与思考 .....                      | 196 |
| <b>参考文献</b> .....                | 198 |

# 第1章 绪 论

人类认识和改造客观世界往往都是以测量工作为基础的,进入以知识经济为特征的信息时代,传感技术、计算机技术与通信技术一起构成了现代信息的三大基础。

公元前,我国历史上第一位中央集权的统治者秦始皇,在建立政权不久就统一了度量衡,这对发展生产、促进社会交往起到极大的推动作用;17世纪开普勒发明制造的望远镜,可观测到数亿颗星星;利用现代宇宙航天、遥感、遥测技术,可在数万米的高空识别地面 $1\text{ m}^2$ 内的事物;扫描隧道电子显微镜的分辨力达 $0.1\text{ nm}$ ,可以检测空气或液体中有生命状态的样品。这些强有力的观测工具在为人类揭开物质世界的新的微观世界提供了大量信息的同时,也对电子技术、材料科学的发展做出了突出贡献,因此测试技术的水平在相当程度上影响着科学技术发展的速度和深度。历来许多新的发明制造都是与测试、测量技术的发展分不开的,科学技术上的某些突破也是以某一测试方法的突破为基础的。

在生产过程中,为了保证正常、高效的生产,对生产过程的自动化程度提出了愈来愈高的要求。产品的性能、品质参数和加工过程中的在线测量,以及产品的包装等都离不开测试,先进的测试技术已成为生产系统不可缺少的组成部分。

随着国民经济、科学技术的发展,测控技术与仪器起着越来越重要的作用,因为没有性能好、精度高、质量可靠的传感器检测到各种有关信息,要实现诸如宇航飞行器、激光器就是一句空话。

## 1.1 课 程 内 容

本课程主要研究和阐述动态信号测试的基础理论和方法,其中包括测试原理、测量方法、测量系统、测量数据处理等内容。

测试是具有试验性质的测量;试验是对未知事物探索认识的过程;测量则是为确定被测对象量值而进行的实验过程。

测试技术有时也称检测技术,又称广义测量,即将被测量(信号)转换为可检测、传输、处理、显示或记录的量,再与标准量比较的过程。测量过程中各环节由专门的设备来完成,这些设备组成的系统通常称为测试系统。

以商业用电子秤为例来说明测试技术与测试系统的概念。待秤物品置于秤盘上,与秤盘接触的荷重传感器感受被测重量的信息并将其转换为电参量的变化,经信号调理电路(如电桥)转换为便于传输、处理的电信号,再经模/数转换和运算处理单元对电信号进行处理,最后显示或记录出被秤物的重量及相关信息。此例表明,典型的测试系统组成通常如图1.1所示。

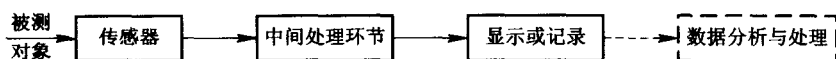


图 1.1 测试系统的组成框图

不难看出，传感器作为测试系统的首要环节，是获取信息的工具，就像人们为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官一样。如果将计算机比作神经指挥中枢，类似于人类大脑的话，传感器就类似于人类的感官。很难想像，人们仅有大脑而失去感官会如何对外界信息进行准确获取！如果计算机技术、通信技术没有传感器技术做基础，现代工业、航空航天、生物工程、医学诊断等将如何发展！

传感器的输出信号一般很微弱，需要通过滤波、放大、调制解调等中间处理环节将传感器输出的信号转换成便于传输处理、适于观察记录的信号。

显示或记录装置的作用是将中间处理环节输出的电信号指示或记录下来，供人们观察或进一步分析处理。

测试信号携带的信息中既有人们需要的信息，也含有人们不感兴趣的成分，后者称为干扰噪声。测试工作的任务就是剔除干扰噪声，提取有用信息。

信号有多种类型，分析的方法也很多，从分析域上看，经典的分析方法有时域法和频域法。时域分析又称波形分析、幅值域分析，通过分析信号的幅值随时间变化的图形或数学表达式，研究信号幅值的变化规律和分布情况。频域分析又称频谱分析，频谱分析是现代信号分析的重要手段，它把信号的幅值、相位、能量等变换为以频率表示的函数或图形，进而分析其频率结构和频率特性，可获取更多的有用信息。

## 1.2 本课程的特点及任务要求

测试技术是一门技术基础课，涉及到工程数学、电工电子学、控制技术、计算机技术、机械技术、数据处理技术等多门学科和技术。在学习上要综合运用所学的各种知识，在获得测试技术知识和技能的基础上，着重培养灵活合理应用基础知识解决工程实际问题的能力。

本课程实践性很强，为了使学困巩固和加深所学的基础知识，提高解决测试问题的能力，不仅配有一定量的习题，同时还开设较多的实验，使学生掌握测试技术基础理论和方法的同时，了解并熟悉几种测试设备的原理和使用方法，为将来工作打下坚实的基础。

通过本课程的学习，学生应做到：

- (1) 掌握测试技术的基本理论；
- (2) 熟练掌握测试系统静、动态特性的评价方法和实现不失真测试的条件；
- (3) 掌握常用传感器及其调理电路的工作原理、性能并能合理地选用；
- (4) 具有设计测试方案、分析和处理测试信号的能力。

在现代社会，获取自然信息已经成为几乎所有自然科学与工程技术领域、社会经济生活的共同需求。随着人类活动领域的扩大和探索过程的深化，以传感器为基础的测试技术

已成为科学研究与现代技术相互融合的新领域。它汇集和包容多种学科的成果，成为人类探索活动最活跃的部分之一。如“智能传感网络”概念，就是将传感网络、通信功能的研究和多种技术融合，做到信息获取、传输、处理的集成与协同等。

自然科学研究的新成果不断丰富，以传感器为基础的测试技术设计思想，不断超越测试技术的局限，获取更多的信息，不同学科领域的交叉和融合，通过多重参数转换获取信息，使测试的空间尺度同时向微观和宏观延伸。

## 第2章 常用传感器

### 2.1 概 述

能够把特定的被测量信息(物理量、化学量、生物量等)按一定规律转换成某种可用信号(电信号、光信号等)的器件或装置称为传感器。传感器是生物体感官的工程模拟物;反过来,生物体的感官又可以看作是天然的传感器。

传感器技术与现代通信技术、计算机技术并列为现代信息产业的三大支柱,是现代测量技术、自动化技术的重要基础,如美国阿波罗 10 号共用了 3295 个传感器。传感器的作用类似于人的感觉器官,是实现测试与控制的首要环节。美国的 NMD 计划(国家导弹防御系统)2001 年 1 月和 7 月两次实验均因传感器发生故障而使每次耗资 9 千万美元的实验以失败告终;又如 2005 年 7 月 13 日“发现号”航天飞机外挂燃料箱上的 4 个引擎控制传感器之一发生故障,直接导致原发射计划推迟,使得本已一波三折的美国重返太空计划再次受挫。可见,没有高保真和性能可靠的传感器对原始信息进行准确可靠的捕获与转换,一切准确的测试与控制将无法实现。

传感器技术是一种知识密集型技术,与很多学科有关。现已发展起来的传感器用途纷繁、原理各异、形式多样,其分类方法也很多。

按被测量与输出电量的转换原理划分,传感器可分为能量转换型和能量控制型两大类。能量转换型传感器直接将被测对象(如机械量)的输入转换成电能;属于这种类型的传感器有压电式传感器、磁电式传感器、热电偶传感器等。能量控制型传感器直接将被测量转换成电参量(如电阻等),依靠外部辅助电源才能工作,并且由被测量控制外部供给能量的变化,属于这种类型的传感器有电阻式、电感式、电容式等。例如,电阻式传感器将被测量(如应变)转换成应变片电阻值的变化,应变片作为电阻元件接于电桥电路,电桥工作能源由外部供给,应变片电阻值的变化控制电桥的失衡程度,从而导致测量电路的输出量发生变化。

按被测量的性质不同,传感器可划分为位移传感器、力传感器、温度传感器等。

按工作原理的不同,传感器可划分为电阻应变式传感器、电容式传感器、磁电式传感器等。

按输出信号的性质不同,传感器可分为开关型(二值型)传感器、数字型传感器、模拟型传感器等。

传感器一般由敏感元件、转换元件和基本转换电路组成,如图 2.1 所示。其中,敏感元件是传感器中能感受或响应被测量的部分;转换元件是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信号(一般指电信号)部分;基本转换电路可以对获得的微弱电信

号进行放大、运算调制等。此外,基本转换电路工作时必须有辅助电源。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,传感器的基本转换电路可安装在传感器壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上,构成集成传感器(如 ADI 公司生产的 AD22100 型模拟集成温度传感器)。

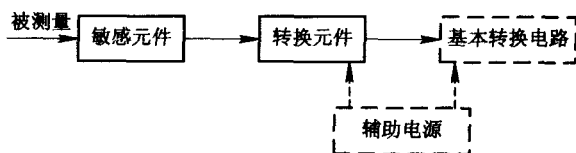


图 2.1 传感器的组成

传感器的正确选用是保证不失真测量的首要环节,因此在选用传感器之前,对传感器的基本特性做些了解是必要的。

(1) 灵敏度:是指传感器输出量的变化量与输入量的变化量之比。一般情况下,灵敏度越高越好。

(2) 线性度:传感器的输出信号与输入信号之间成比例关系,即线性度好。这样才能避免或减小线性度误差。

(3) 重复性:是衡量在同一工作条件下,对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的不一致程度的指标。所得结果分散范围越小,重复性越好。

(4) 稳定性:是指在相同条件且相当长时间内,其输入特性和输出特性不发生变化的能力。影响传感器稳定性的因素是时间和环境。

(5) 精确度:表示传感器的输出结果与被测量的实际值之间的符合程度,是测量值的精密程度与准确程度的综合反映。

(6) 动态特性:反映传感器对于随时间变化的动态量的响应特性。当被测量是一随时间而变化的动态信号时,就必须考虑其输出能否跟得上输入信号的变化,它会产生多大的动态误差。因此要求传感器能够迅速地、精确地跟踪输入信号,并具有相应的输出。

(7) 环境参数:主要是指传感器允许使用的工作温度范围及湿度环境压力、环境振动和冲击等引起环境压力误差、环境振动误差和冲击误差等。

目前,传感器的选用通常以其基本参数和环境参数作为检验使用和评价的依据。在满足量程的情况下,保证传感器的主要参数性能指标,放宽对次要指标的要求,从而达到高的性价比。

## 2.2 能量控制型传感器

能量控制型传感器将被测非电量转换成电参量,在工作过程中不能起换能作用,需从外部供给辅助能源使其工作,故又称作无源传感器。电阻式、电容式、电感式(包括自感式、互感式、电涡流式、压磁式)传感器等均属这一类型。

### 2.2.1 电阻式传感器

电阻式传感器是将被测非电量转换成电阻变化的一种传感器。电阻式传感器结构简单、易于制造、价格便宜、性能稳定、输出功率大,在检测系统中得到了广泛的应用。

## 1. 电阻式传感器的工作原理

对于长度、截面积一定的金属丝,其阻值  $R$  可用下式表示

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

式中:  $L$ ——电阻丝的长度;

$A$ ——电阻丝的截面积;

$\rho$ ——电阻丝的电阻率,取决于导体材料的性质。

由上式可见,若导体的三个参数中的任一个或数个参数发生变化,则电阻值也随之变化,因此,可利用该原理来构成传感器。

## 2. 电阻应变式传感器

电阻应变片简称应变片,是利用金属的电阻应变效应将被测机械量转换成电阻变化,常用来测量构件的受力情况和机械变形等。

### 1) 金属的电阻应变效应

金属电阻丝在外力作用下发生机械变形时,其电阻值也将发生变化,这种现象称为电阻应变效应。

对式(2.1)全微分,并用相对变化量来表示,则

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.2)$$

式中的  $\Delta L/L = \epsilon$  代表电阻丝的轴向相对伸长,称为应变,是一个无量纲的量。 $\Delta A$  是因电阻丝受轴向力作用引起的截面变化量,设电阻丝原来半径为  $r$ ,径向应变为  $\Delta r/r$ ,由材料力学可知  $\Delta r/r = -\mu(\Delta L)/L = -\mu\epsilon$ ,式中  $\mu$  为电阻丝材料的泊桑系数。电阻丝截面积的变化

$$\Delta A = \pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2 = \pi(r - \mu\epsilon r)^2 - \pi r^2 \approx -2\pi r^2 \mu\epsilon$$

故

$$\frac{\Delta A}{A} \approx -2\mu\epsilon \quad (2.3)$$

将式(2.3)代入式(2.2)中得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.4)$$

或

$$\frac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\epsilon} \quad (2.5)$$

式(2.5)的物理意义为单位应变引起电阻丝的电阻变化率,称为电阻丝的灵敏系数,用  $S_0$  表示,即

$$S_0 = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\epsilon} \quad (2.6)$$

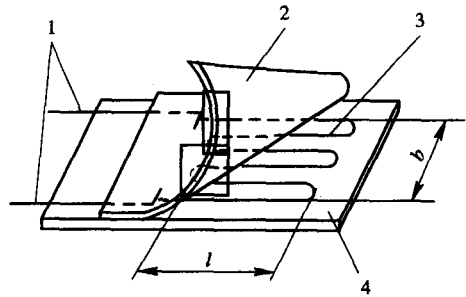
由式(2.6)可知,  $S_0$  的大小受两个因素影响:  $1 + 2\mu$  为电阻丝受力后几何尺寸的变化;  $(\Delta \rho/\rho)/\epsilon$  为材料的电阻率相对变化。对于金属而言,以前者为主;而对于半导体材料,  $S_0$  值主要由电阻率相对变化所决定。 $S_0$  值只能由实验来确定。另外,式(2.6)还表明  $S_0$  是个常数,即应变与电阻变化率呈线性关系。

## 2) 金属应变片的基本结构及类型

金属应变片的结构如图 2.2 所示。实际使用的电阻应变片都是将金属导体(丝或箔片)在绝缘基底上制成栅状,称为敏感栅。敏感栅的两端焊接有引线,敏感栅的上面有保护的覆盖层。

按敏感栅的结构形式,金属应变片可分为以下几种。

(1) 丝绕式应变片:其结构如图 2.2 所示。它的敏感栅由康铜等高阻值的金属丝制成。这种应变片的制造技术和设备都较简单,价格低廉,多用纸作基底,粘贴方便,一般多用在短期的室内试验中。其缺点是其端部弧形段会产生横向效应。



1—引线; 2—覆盖层; 3—敏感栅; 4—基底

图 2.2 金属应变片的结构

(2) 短接丝式应变片:其结构如图 2.3(a)所示。它的敏感栅也是用康铜等金属丝制成,但敏感栅各线段间的横接线是采用截面积较大的铜导线,电阻很小,因而可减小横向效应。但是由于敏感栅上焊点较多,因而疲劳性能差,不适于长期的动应力测量。

(3) 箔式应变片:其结构如图 2.3(b)所示。它的敏感栅是由很薄的康铜、镍铬合金等箔片通过光刻腐蚀而制成,采用胶膜基底。其横向效应小,敏感栅比较容易制成不同的形状,散热条件好,受交变载荷时疲劳寿命长,长时间测量时蠕变小。由于箔式应变片的这些优点,因而应用比较广泛,目前,在常温条件下,已逐步取代了金属丝式应变片。

图 2.3(c)和 2.3(d)所示的金属箔式应变片分别用于扭矩和流体压力测量,也称作应变花。其优点是敏感栅的形状与弹性元件上的应力分布相适应。

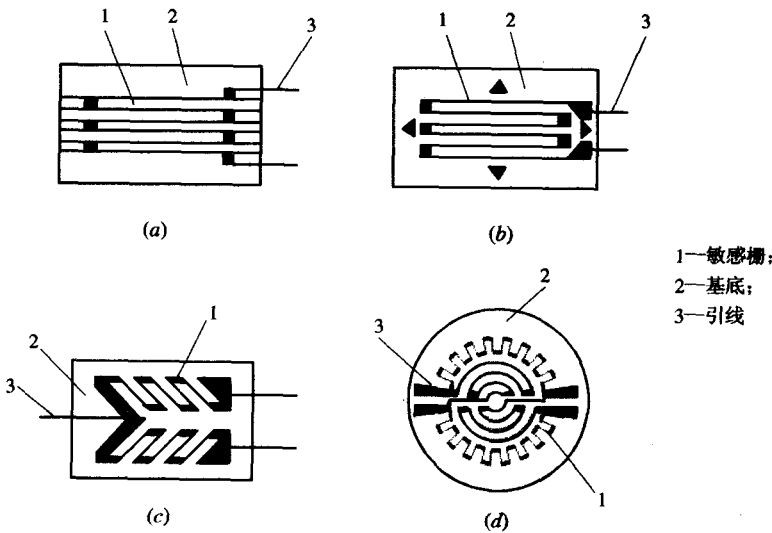


图 2.3 金属应变片的类型

(a) 短接丝式应变片; (b) 箔式应变片

(c) 用于扭矩测量的箔式应变片; (d) 用于流体压力测量的箔式应变片

### 3) 金属应变片的主要特性参数

(1) 几何尺寸: 应变片敏感栅的尺寸  $b \times l$  (见图 2.2) 反映了应变片的有效工作面积。基宽  $b$  是在应变片轴线相垂直的方向上敏感栅最外侧之间的距离, 一般在 10 mm 以下。基长  $l$  则表示应变片的敏感栅在纵轴方向的长度, 通常为 2~30 mm。

(2) 电阻值: 应变片电阻值是指应变片没有粘贴、也不受力时, 在室温下测定的电阻值。目前应变片的电阻值(名义阻值)也有一个系列, 如 60、120、350、600、1000  $\Omega$  等, 其中以 120  $\Omega$  最为常用。实际使用的应变片的阻值相对于名义阻值均可能存在一些偏差, 因此使用前要进行测量分选。

(3) 最大工作电流: 是指允许通过应变片而不影响其工作特性的最大电流值。当应变片接入测量电路后, 在敏感栅中要流过一定的电流, 此电流使得应变片温度上升, 从而影响测量精度, 甚至烧毁应变片。通常在静态测量时, 允许电流一般规定为 25 mA, 动态测量时可达 75~100 mA, 箔式应变片则可更大些。

(4) 灵敏系数: 将金属电阻丝做成应变片后, 由于横向效应以及粘贴剂传递变形中的损失, 应变片的灵敏系数  $S$  与金属丝的灵敏系数  $S_0$  不同, 因而必须用实验的方法重新测定灵敏系数  $S$ 。应变片灵敏系数的测量是在一个加载后能产生已知应变的专用装置上进行的, 因应变片粘贴到试件上就不能取下再用, 所以只能在每批产品中按规定进行抽样测定, 并在应变片包装上说明这批产品由抽样测得的灵敏系数  $S$  的平均值, 同时指出其正、负偏差。这样, 对于金属应变片, 电阻变化率与应变之间的关系可以用下式表示:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \epsilon \quad (2.7)$$

### 4) 金属应变片的温度误差

在采用应变片进行应变测量时, 希望它的阻值变化只与应变有关, 而不受其它因素的影响, 但实际上并非如此。例如, 环境温度的变化就会引起应变片的电阻值发生变化。因温度变化导致电阻变化的主要原因有:

#### (1) 敏感栅材料电阻温度系数的影响。

在温度变化时, 敏感栅的电阻丝阻值随温度变化而变化, 其相对电阻增量为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_a = \alpha \Delta t \quad (2.8)$$

式中:  $\alpha$ ——应变片敏感栅的电阻温度系数, 指温度变化 1 $^{\circ}\text{C}$  时电阻的相对变化;

$\Delta t$ ——环境温度的变化量。

#### (2) 试件材料和敏感栅材料线膨胀系数的影响。

当两者线膨胀系数不一致时, 环境温度变化会使敏感栅产生附加变形, 其电阻值也会改变。其相对电阻增量为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_p = S(\beta_1 - \beta_2) \Delta t \quad (2.9)$$

式中:  $S$ ——应变片的灵敏系数;

$\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——分别为试件和敏感栅材料的线膨胀系数。

因此, 由温度变化引起的总的相对电阻增量为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_a + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_p = [\alpha + S(\beta_1 - \beta_2)] \Delta t \quad (2.10)$$

$$\text{或} \quad \Delta R_t = R[\alpha + S(\beta_1 - \beta_2)] \Delta t \quad (2.11)$$

即使在常温下测量,因环境温度很难保持恒定,所以必须采取一定的措施减小或消除温度变化的影响,称之为温度补偿。常用的温度补偿方法有三种:第一种是桥路补偿法,主要是通过贴片和接桥方法消除温度的影响,补偿原理和方法将在第4章中详细介绍;第二种是应变片的自补偿,它是从电阻应变片的敏感栅材料及制造工艺上采取措施,使应变片在一定的温度范围内满足  $\alpha + S(\beta_1 - \beta_2) = 0$  的关系;第三种方法是热敏电阻法,利用热敏电阻的特性和选择合适的分流电阻达到温度补偿的目的。

#### 5) 应变式传感器应用举例

应变式传感器除直接用于测定试件的应力、应变外,还可以制成各种专门的应变式传感器,用于测定力、扭矩、加速度、压力等各种机械量。下面简要地介绍几种应变式传感器的结构原理。

(1) 应变式力传感器:在测力传感器中有一个弹性元件,利用它可把被测力的变化转换成应变量的变化。由于弹性元件上粘贴有应变片,因而可把应变量的变化转换成应变片电阻的变化。

作为测力传感器的弹性元件,其形式多种多样,常见的有柱形、环形、梁形、轮辐形等,如图2.4所示。柱形弹性元件(见图2.4(a))结构简单紧凑,可承受很大的载荷,常用于大的拉压力及荷重的测量,最大载荷可达  $10^7 \text{ N}$ 。环形弹性元件(见图2.4(b))应力分布变化大,有正有负,可以选择有利部位粘贴应变片,便于接成差动电桥,以得到较高的灵敏度。悬臂梁形弹性元件(见图2.4(c))结构简单,应变片粘贴容易,灵敏度也较高,适用于测量小载荷。双孔梁(见图2.4(d))和“S”形弹性元件(见图2.4(e))利用弹性体的弯曲变形,采用对称贴片组桥方案,可以减小力点位置的影响,提高测量精度,广泛用于小量程工业电子秤和商业电子秤。图2.4(f)为轮辐形弹性元件,应变片粘贴在轮辐的侧面,通过测量轮辐上的剪应力来测量载荷,具有精度高、抗偏载能力强、高度低、承载能力大的特点,多用于大规格的荷重传感器。

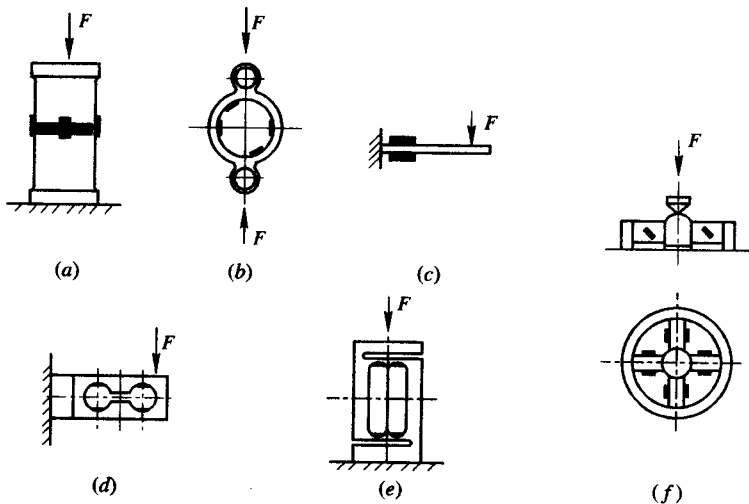


图 2.4 应变式测力传感器的弹性元件

(a) 柱形弹性元件; (b) 环形弹性元件; (c) 悬臂梁形弹性元件;  
(d) 双孔梁弹性元件; (e) “S”形弹性元件; (f) 轮辐形弹性元件

(2) 应变式压力传感器：主要用于测量液体、气体的压力，可直接将图 2.3(d) 所示的应变片粘贴在弹性膜片上。图 2.5 所示为组合式压力传感器结构。

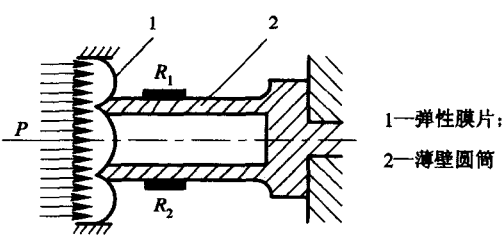


图 2.5 组合压力传感器

(3) 应变式加速度传感器：通常由悬臂梁、质量块和壳体组成，如图 2.6 所示。质量块固定在悬臂梁的一端，梁的上下表面粘贴有应变片。测量时将传感器的壳体与被测对象刚性连接，在一定的频率范围内，质量块产生的加速度与被测加速度相等，因而作用于悬臂梁上的惯性力亦与被测加速度成正比。应变式加速度传感器常用于低频振动测量。

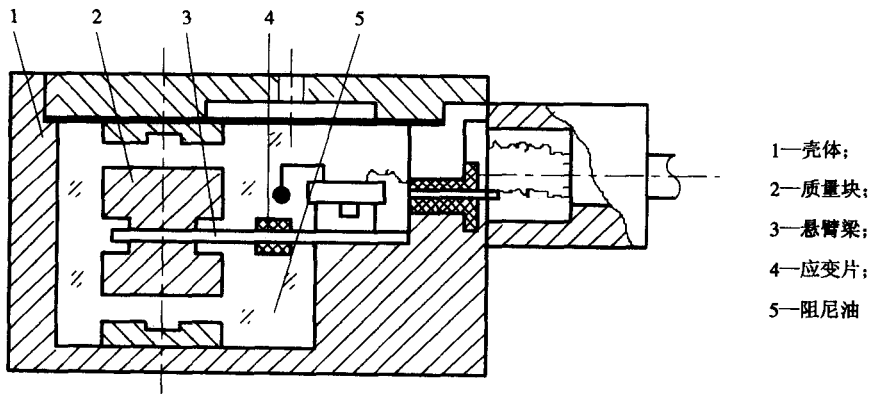


图 2.6 应变式加速度传感器

(4) 应变式扭矩传感器：扭矩传感器采用实心圆柱或空心圆柱形式的弹性元件。其应变片按  $45^\circ$  方向粘贴在圆柱外表面上，通常贴 4 片组成全桥，这样既可以提高灵敏度，又可以消除弯曲产生的影响。但是，由于传动轴是转动的，因而不能直接从应变片引出信号，可采用电刷式集流环（见图 2.7）、水银槽式集流环将应变信号由旋转轴引到静止的导线和仪器上。也可以采用非接触式测量方法（如感应式或遥测式）。

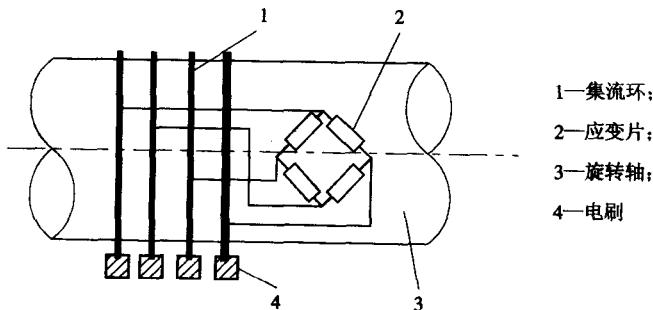


图 2.7 应变式扭矩传感器