

135

7PZ12-43
SP6

高等学校教材

感测技术基础

孙传友 孙晓斌 编著



A0965973

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是根据教学内容和课程体系改革的要求,将原有的传感器技术、自动检测技术、电子测量技术等课程的主要内容,有机整合而成感测技术基础课程的新编教材。全书共分3大部分12章,每一章都附有思考题与习题及答案。

本书注重教学内容的精选和更新,强调课程体系的优化与综合,可作为高等学校电子信息工程、自动化、测控技术与仪器等专业的教材,也可作为有关工程技术人员参考或学习用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

感测技术基础/孙传友等编著. —北京:电子工业出版社,2001. 8

高等学校教材

ISBN 7-5053-6872-9

I. 感... II. 孙... III. ①传感器—高等学校—教材②非电量测量—高等学校—教材③电磁波测距—高等学校—教材 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第053342号

丛 书 名: 高等学校教材

书 名: 感测技术基础

编 著 者: 孙传友 孙晓斌

责任编辑: 张荣琴

特约编辑: 晓鸽

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京兴华印刷厂

装 订 者: 三河市双峰装订厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.5 字数: 479千字

版 次: 2001年8月第1版 2001年8月第1次印刷

书 号: ISBN7-5053-6872-9
TP·3900

印 数: 5000册 定价: 24.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社，各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我部教材办经各专指委、出版社，审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需，尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

原电子工业部教材办公室

前 言

目前,全国各高校都在执行教育部1998年颁布的新的本科专业目录,积极推进“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”,编选“面向21世纪课程教材”。为此,我们把三门课“整合”为一门课,是我们对教学内容和课程体系改革的尝试,并非教育部颁布的“专业目录”的规定。但专业目录中的确把《感测技术》列为电子信息工程专业的“主要课程”。自动化、测控技术与仪器专业也有类似的“主要课程”,因此本书可作为这三个专业的教材。我们把历年开设的内容联系较紧密的传感器技术、自动检测技术和电子测量技术等课程的主要内容,有机整合为一门课程——感测技术基础,并编写了试用讲义。近几年试用效果证明,这样“整合”不仅加强了课程内容间的“联系与综合”,“避免脱节和不必要的重复”,大大节省了学时,而且也有利于“拓宽学生的专业面,培养学生的创新能力”。这次公开出版,在原试用讲义的基础上,又作了进一步的修改和调整。希望本书公开出版能对教学内容和课程体系改革起抛砖引玉的作用。

全书共分3大部分12章:传感器原理(包括无源传感器、有源传感器、半导体传感器、数字式传感器、新型传感器等5章)、常见电量测量(包括频率时间和相位测量、电压电流和功率测量、电阻电容和电感测量等3章)、常见非电量电测量(包括几何量电测法、机械量电测法、热工量电测法、成分与含量电测法等4章)。每一章都附有思考题与习题及答案。

本书与其他同类教材相比,在内容编排上有以下三个特点:第一,本书不是着眼于传感器的“设计”,而是着眼于传感器的“应用”,对传感器的理论阐述以“够用”为止,同时注意从应用角度介绍传感器前端的敏感器和后端的接口电路。第二,本书不是在讲完每一种传感器后就列举它的应用,而是把传感器的应用按被测量分类归并到非电量电测量的相应章节。这样编排既便于学习掌握传感器的工作原理,又便于学习掌握各类非电量电测量本身的基本理论和多种测量方法。第三,本书不是逐个介绍每一种传感器的接口电路,而是把接口电路相近的传感器归并为一类,同时把各类传感器接口电路归并到内容相近的电量测量的有关章节。这样编排既能避免不必要的重复,又能使学生举一反三、触类旁通。

全书计划学时为72学时,删去部分章节后也适用于48~64学时。本书可作为电子信息工程、自动化、测控技术与仪器等专业的教材,也可供有关工程技术人员参考或作为自学读物。

为了进一步培养学以致用动手能力和创新能力,建议学生课外多收集一些感测技术应用的实例进行剖析,自己动手搞一些小制作小发明。

本书由孙传友教授和孙晓斌博士编著。西安交通大学万明习教授担任主审,电子工业出版社教材编辑部张荣琴主任担任责任编辑,他们提出了很多宝贵的意见。胡文宝、余厚全、刘绍平、张光明等领导同志给予了大力支持和帮助。本书在编写和修改过程中参阅了八十多种有关文献。在此,谨向这些专家、领导及参考文献的作者,一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编著者

2001年4月

目 录

绪论	(1)
第1章 无源传感器	(6)
1.1 电阻式传感器	(6)
1.1.1 电位器式传感器	(6)
1.1.2 应变式传感器与压阻式传感器	(8)
1.1.3 热电阻与热敏电阻	(14)
1.2 电容式传感器	(18)
1.2.1 基本原理与结构类型	(18)
1.2.2 输出特性	(18)
1.2.3 等效电路分析	(21)
1.3 电感式传感器	(22)
1.3.1 自感式传感器	(22)
1.3.2 互感式传感器(差动变压器)	(27)
1.3.3 压磁式传感器	(31)
1.3.4 电涡流式传感器	(34)
思考题与习题	(38)
第2章 有源传感器	(39)
2.1 磁电式传感器	(39)
2.1.1 基本原理与组成	(39)
2.1.2 结构类型	(39)
2.1.3 测量电路	(41)
2.2 压电式传感器	(41)
2.2.1 压电效应及其表达式	(41)
2.2.2 压电材料	(44)
2.2.3 压电元件	(46)
2.2.4 测量电路	(49)
2.3 热电偶传感器	(51)
2.3.1 热电效应	(51)
2.3.2 热电偶测温	(54)
2.3.3 热电偶的材料及结构	(57)
2.4 光电式传感器	(58)
2.4.1 光电器件	(58)
2.4.2 光电器件的基本特性	(62)
2.4.3 光电式传感器的基本组成和类型	(67)
思考题与习题	(69)

第3章 半导体传感器	(70)
3.1 磁敏传感器	(70)
3.1.1 霍尔传感器	(70)
3.1.2 磁敏二极管和三极管	(79)
3.2 气敏传感器	(83)
3.2.1 气敏电阻	(83)
3.2.2 非电阻型气敏器件	(85)
3.3 湿敏传感器	(86)
3.3.1 半导体湿敏材料的导电机理	(87)
3.3.2 半导体湿敏电阻的典型结构	(88)
3.3.3 测湿电路	(89)
3.4 热敏传感器	(90)
3.4.1 PN 结型温度传感器	(90)
3.4.2 集成温度传感器	(91)
思考题与习题	(91)
第4章 数字式传感器	(93)
4.1 编码器	(93)
4.1.1 直接编码器	(93)
4.1.2 增量编码器	(97)
4.2 光栅与磁栅	(98)
4.2.1 光栅	(98)
4.2.2 磁栅	(103)
4.3 感应同步器	(106)
4.3.1 感应同步器的类型与结构	(107)
4.3.2 感应同步器的工作原理	(108)
4.4 频率式传感器	(112)
4.4.1 振弦式传感器	(113)
4.4.2 振筒式传感器	(116)
4.4.3 振膜式和振梁式传感器	(118)
4.4.4 石英晶体谐振式传感器	(119)
思考题与习题	(120)
第5章 新型传感器	(121)
5.1 光纤传感器	(121)
5.1.1 光导纤维的结构和传光原理	(121)
5.1.2 光纤传感器的基本原理与类型	(123)
5.2 CCD 图像传感器	(125)
5.2.1 CCD 的工作原理	(125)
5.2.2 CCD 图像传感器的结构	(127)
5.3 激光与红外传感器	(129)
5.3.1 激光传感器	(129)

5.3.2 红外传感器	(131)
5.4 超声波与声表面波传感器	(133)
5.4.1 超声波传感器	(133)
5.4.2 声表面波传感器	(135)
5.5 核辐射传感器	(135)
5.5.1 核辐射检测的物理基础	(136)
5.5.2 核辐射传感器	(137)
5.6 传感器发展的新趋向	(138)
思考题与习题	(139)
第6章 频率、时间和相位的测量	(141)
6.1 频率的测量	(141)
6.1.1 频率(周期)的数字测量	(141)
6.1.2 频率的模拟测量	(148)
6.2 时间间隔的数字测量	(150)
6.2.1 测量原理	(150)
6.2.2 测量误差与测量范围	(150)
6.3 相位差的数字测量	(153)
6.3.1 相位-电压转换法	(153)
6.3.2 相位-时间转换法	(154)
思考题与习题	(155)
第7章 电压、电流和功率的测量	(156)
7.1 电压的测量	(156)
7.1.1 直流电压的测量	(156)
7.1.2 交流电压的测量	(158)
7.2 电流的测量	(163)
7.2.1 电流表直接测量法	(163)
7.2.2 电流-电压转换法	(163)
7.2.3 电流-频率转换法	(165)
7.2.4 电流-磁场转换法	(166)
7.2.5 电流互感器法	(167)
7.3 功率的测量	(168)
7.3.1 用电动系功率表测量功率	(168)
7.3.2 用时分割乘法器测量功率	(171)
7.3.3 用霍尔功率变换器测量功率	(172)
思考题与习题	(173)
第8章 阻抗(电阻、电容、电感)的测量	(174)
8.1 电桥法	(174)
8.1.1 平衡电桥法	(174)
8.1.2 不平衡电桥法	(178)
8.2 阻抗-电压转换法	(185)

8.2.1 欧姆法 (恒流法)	(185)
8.2.2 比例运算法	(187)
8.2.3 差动脉冲调宽法	(188)
8.3 阻抗-频率转换法	(190)
8.3.1 调频法	(190)
8.3.2 积分法	(191)
8.4 阻抗-数字转换法	(192)
8.4.1 电阻-数字转换法	(192)
8.4.2 电感电容-数字转换法	(194)
思考题与习题	(196)
第 9 章 几何量电测法	(197)
9.1 位移电测法	(197)
9.1.1 位移电测法的分类	(197)
9.1.2 位移的间接电测法	(197)
9.1.3 各种位移传感器性能比较	(200)
9.2 倾角电测法	(202)
9.2.1 摆锤式	(202)
9.2.2 液体摆式	(204)
9.2.3 气体摆式	(205)
9.3 厚度电测法	(205)
9.3.1 电感式和电涡流式	(205)
9.3.2 电容式	(206)
9.3.3 核辐射式和超声波式	(206)
9.4 物 (液) 位电测法	(208)
9.4.1 超声波法测液位和界位	(208)
9.4.2 浮力法测液位	(210)
9.4.3 差压法测液位	(210)
9.4.4 电容法测液位和物位	(211)
思考题与习题	(212)
第 10 章 机械量电测法	(213)
10.1 转速的电测法	(213)
10.1.1 模拟式电测法	(213)
10.1.2 计数式电测法	(215)
10.2 振动的电测法	(219)
10.2.1 相对振动与绝对振动电测法	(219)
10.2.2 振动位移电测法	(221)
10.2.3 振动速度电测法	(222)
10.2.4 振动加速度电测法及其实例	(224)
10.2.5 新型 (涡流式) 加速度传感器	(229)
10.3 力与荷重的电测法	(231)

10.3.1	力传感器	(231)
10.3.2	力的间接电测法	(233)
10.3.3	荷重传感器与电子秤	(234)
10.3.4	各类型力传感器的比较	(235)
10.4	力矩的电测法	(236)
10.4.1	扭轴(扭矩敏感器)	(236)
10.4.2	力矩的扭轴式电测法	(237)
	思考题与习题	(240)
第 11 章	热工量电测法	(243)
11.1	压力和差压的电测法	(243)
11.1.1	压力的概念、单位和测量方法	(243)
11.1.2	压力敏感器	(244)
11.1.3	压力电测法	(245)
11.1.4	差压电测法	(250)
11.2	温度的电测法	(251)
11.2.1	温度的概念、单位和测量方法	(251)
11.2.2	接触式测温法	(251)
11.2.3	接触式测温电路实例	(253)
11.2.4	非接触式测温法	(257)
11.3	流量的电测法	(260)
11.3.1	流量的概念	(260)
11.3.2	流量-转速转换法	(260)
11.3.3	流量-差压、力、位移转换法	(262)
11.3.4	流量-频率转换法	(264)
11.3.5	流量-温度转换法(量热式流量计)	(266)
11.3.6	非接触式流量测量法	(267)
	思考题与习题	(270)
第 12 章	成分与含量的电测法	(271)
12.1	水分和湿度电测法	(271)
12.1.1	水分和湿度的定义及表示方法	(271)
12.1.2	固体水分电测法	(271)
12.1.3	气体湿度电测法	(273)
12.2	密度和浓度电测法	(274)
12.2.1	密度电测法	(274)
12.2.2	浓度电测法	(275)
12.3	气体分析与检测	(277)
12.3.1	气体分析	(277)
12.3.2	家用气体检测器	(281)
	思考题与习题	(282)
	参考文献	(284)

绪 论

一、本课程的研究内容及性质

本课程是根据高等学校教学内容和课程体系改革的需要,将传感器技术、自动检测技术、电子测量技术等联系紧密的课程的主要内容有机地整合而成的一门专业基础课,主要研究传感器的基本原理、常见电量的测量方法和常见非电量的电测法。这三部分内容合称为传感器与测试技术,简称感测技术。

“测试”既包括定量的测量,也包括定性的试验。“测试”与“检测”基本上是同义语。就被测对象而言,工业上需要测试或检测的量有电量 and 非电量两大类,非电量种类比电量的种类多得多。

非电量早期多用非电的方法测量,例如用尺测量长度,用水银温度计测量温度。但是随着科学技术的发展,对测量的精确度、速度都提出了新的要求,尤其对动态变化的物理过程进行测量,以及对物理量的远距离测量,用非电的方法已经不能满足要求了,必须采用电测法。

电测法就是把非电量转换为电量来测量,同非电的方法相比,电测法具有无可比拟的优越性:

1. 便于采用电子技术,用放大和衰减的办法灵活地改变测量仪器的灵敏度,从而大大扩展仪器的测量幅值范围(量程)。

2. 电子测量仪器具有极小的惯性,既能测量缓慢变化的量,也可测量快速变化的量,因此采用电测技术将具有很宽的测量频率范围(频带)。

3. 把非电量变成电信号后,便于远距离传送和控制,这样就可实现远距离的自动测量。

4. 把非电量转换为数字电信号,不仅能实现测量结果的数字显示,而且更重要的是能与计算机技术相结合,便于用计算机对测量数据进行处理,实现测量的微机化和智能化。

非电量电测法涉及两个基本问题:一是怎样用传感器将非电量转换为电量,二是怎样对电量进行测量。因此非电量电测法同传感器技术、电子测量技术是紧密联系不可分割的。把三者整合为一门课,不仅能加强课程内容间的联系与综合,避免脱节和不必要的重复,大大节省学时,而且也有利于拓宽学生专业面,培养学生的创新能力。因此这样“整合”是与高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求相适应的。

二、现代感测技术的地位和作用

测试是人类认识世界和改造世界必不可少的重要手段。在科学技术的发展过程中,人们根据对客观事物所做的大量的试验和测量,形成定性和定量的认识,总结出客观世界的规律;通过试验和测量进一步检验这些规律是否符合客观实际;在利用这些客观规律改造客观世界的过程中,又通过试验和测量来检验实际效果。科学的发展、突破是以测试技术的水平为基础的。例如人类在光学显微镜出现以前,只能用肉眼来分辨物质。16 世纪出现了光学显微镜,这就使人们能够借助显微镜来观察细胞,从而大大推动了生物科学的发展。而到

20 世纪 30 年代出现了电子显微镜，又使人们的观察能力进入微观世界，推动了生物科学、电子科学和材料科学的发展……。

当前，世界上正面临着一场新的技术革命，这场革命的主要基础就是信息技术。信息技术的发展给人类社会和国民经济的各个部门及各个领域带来了巨大的、广泛的、深刻的变化，并且正在改变着传统工业的生产方式，带动着传统产业和其他新兴产业的更新和变革，是当今人类社会发展的强大动力。

现代信息技术主要有三大支柱：一是信息的采集技术（感测技术），二是信息的传输技术（通信技术），三是信息的处理技术（计算机技术）。

所谓信息的采集是指从自然界中、生产过程中或科学实验中获取人们需要的信息。信息的采集是通过感测技术实现的，因此感测技术实质上也就是信息采集技术。显而易见，在现代信息技术的三大环节中，“采集”是首要的基础的一环，没有“采集”到的信息，通信“传输”就是“无源之水”，计算机“处理”更是“无米之炊”。

众所周知，在工业生产中采用自动化技术是提高劳动生产率和经济效益最有效的措施。采用自动检测系统进行实时测量及分析产品性能，采用自动控制系统对产品加工过程进行实时控制，则是提高产品质量的现代化方法。可以说，一个国家现代化水平是用自动化水平来衡量的，而在自动化技术中，现代感测技术同样有极其重要的地位和作用。

图 0-1（a）和图 0-1（b）是自动化检测系统和自动化控制系统的简化框图。将图 0-1（a）与图 0-1（b）对比可见，自动控制系统只不过在自动检测系统中增加了一个“控制器”。因此可以认为现代感测技术是自动检测系统和自动控制系统共用的基础技术，从这个意义上说，现代感测技术也是自动化技术的重要支柱。

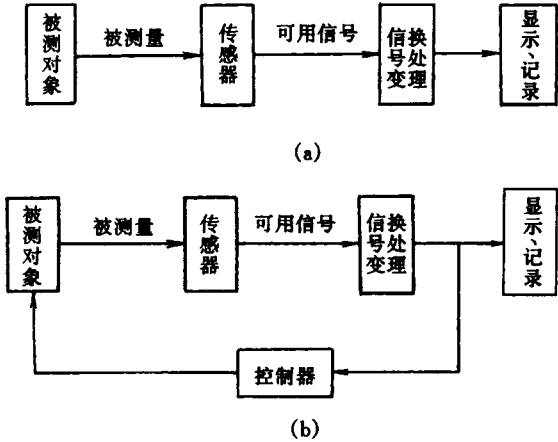


图 0-1 自动化检测与控制系统对比

(a) 自动检测系统简化框图；(b) 自动控制系统简化框图

除此之外，军事国防、航空航天、海洋开发、生物工程、医疗保健、商检质检、环境保护、安全防范、家用电器等等，几乎每一个现代化项目也都离不开感测技术。

三、传感器与敏感器

传感器是将非电量转换为与之有确定对应关系电量输出的器件或装置，它本质上是非电系统与电系统之间的接口。在非电量电测量中，传感器是必不可少的转换元件。

传感器一般都是根据物理学、化学、生物学的效应和规律设计而成的，因此大体上可分为物理型、化学型和生物型三大类。化学传感器是利用电化学反应原理，把无机和有机化学物质的成分、浓度等转换为电信号的传感器。生物传感器是利用生物活性物质选择性识别、测定生物和化学物质的传感器。这两类传感器广泛应用于化学工业、环保监测和医学诊断。因篇幅所限，本书不涉及化学型、生物型传感器，只介绍应用于工业测控技术领域的物理型传感器。

按构成原理，物理型传感器又可分为物性型传感器和结构型传感器。物性型传感器是利用其转换元件物理特性变化实现信号转换，例如热敏电阻、光敏电阻等。结构型传感器是利用其转换元件的结构参数变化实现信号转换，例如变极距型电容传感器、变气隙型电感传感器等。

根据能量观点，物理型传感器又可分为能量转换型和能量控制型两类。前者将非电能量转换为电能量，不需要外电源，故又称为有源传感器也称为换能器。压电式、磁电式传感器和热电偶等就属于这一类。另一类传感器需要外部电源供给能量，故又称无源传感器。这类传感器本身不是一个换能器，被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用。电阻式、电感式和电容式传感器都属于这一类。

按输出信号表示形式，物理型传感器又可分为模拟式和数字式两类。

如果所要测量的非电量正好是某传感器能转换的那种非电量，而该传感器转换出来的电量又正好能为后面的显示记录电路所利用（例如热电偶测温度时产生的热电势可以驱动动圈式毫伏计），那么，就只要由传感器和显示仪表便可构成一个非电量测量系统。这真是再简单不过的了。

然而，很多情况下，我们所要测量的非电量并不是我们所持有的传感器所能转换的那种非电量，这就需要在传感器前面增加一个能把被测非电量转换为该传感器能够接受和转换的非电量（即可用非电量）的装置或器件。这种能把被测非电量转换为可用非电量的器件或装置我们称之为敏感器。如果把传感器称为变换器，那么敏感器则可称作预变换器。例如用电阻应变片测压力时就要将应变片粘贴到受压力的弹性元件上，弹性元件将压力转换为应变，应变片再将应变转换为电阻变化。这里应变片便是传感器，而弹性元件便是敏感器。敏感器与传感器虽然都是对被测非电量进行转换，但敏感器是把被测非电量转换为可用非电量，而不是像传感器那样把非电量转换成电量。

由于传感器的种类很多，敏感器的种类也很多，传感器和敏感器的组合方式更多，因此，一种非电量常常可以用多种电测方法来测量。尽管非电量的电测方法很多，但就其转换关系而言可以归纳为两大类：直接法和间接法。

直接法就是用传感器直接将非电量 x 转换为电量 y 。直接法所使用的传感器的可用非电量必须正好是被测量，而且其输出电量 y 应是被测量 x 的单值函数，即

$$y = f(x) \quad (0-1)$$

直接法所使用的这种传感器本书称之为直接传感器。

间接法就是先用敏感器将被测量 x 转换为传感器的可用非电量 z ，再用传感器将可用非电量 z 转换为电量 y 。设传感器的转换关系为

$$y = \varphi(z) \quad (0-2)$$

敏感器的转换关系为

$$z = \psi(x) \quad (0-3)$$

由敏感器与传感器组合成的非电量 x 的电测装置的转换关系便为复合函数

$$y = \varphi [\psi (x)] = f (x) \quad (0-4)$$

按照传感器定义, 这种敏感器与传感器的组合装置仍可称为传感器, 但却不是原来的非电量 z 传感器, 而是被测量 x 的传感器。因为其转换关系为复合函数, 故本书称之为复合传感器或间接传感器。

传感器与被测对象的关联方式有接触式和非接触式两种。接触式的优点是传感器与被测对象视为一体, 传感器的标定无须在使用现场进行, 缺点是传感器与被测对象接触会对被测对象的状态或特性不可避免地产生或多或少的影晌。非接触式则没有这种影响, 但是非接触式传感器的输出会受到被测对象与传感器之间介质或环境的影响。因此传感器标定必须在使用现场进行。

在很多情况下, 传感器所转换得到的电量并不是后面的显示记录电路所能直接利用的。例如电阻式应变传感器把应变转换为电阻变化, 电阻虽然属电量, 但不能像热电偶产生的热电势那样被电压显示仪表所接受。这就需要某种电路来对传感器转换出来的电量进行变换和处理, 使之成为便于显示、记录、传输或处理的可用电信号。接在传感器后面具有这种功能的电路, 我们称之为测量电路或传感器接口电路。例如电阻应变片接入电桥, 将电阻变化转换为电压变化, 这里电桥便是电阻传感器常用的测量电路。

很多介绍传感器的书把我们这里所说的敏感器、直接传感器和测量电路分别称为敏感元件、传感元件(或转换元件)和转换电路, 并把这三部分作为传感器的三个组成部分。本书为了突出共性, 避免重复, 把接口电路相近的传感器归并为一类, 同时把各类传感器接口电路归并到内容相近的电量测量的有关章节。把敏感器和传感器应用按被测非电量分类后归并到非电量电测法的有关章节。

四、测量仪表与系统的组成原理

测量是人们借助专门的技术和设备, 通过实验方法取得某一客观事物数量信息的过程。专门用于测量的仪表或系统称为测量仪表或测量系统, 其基本任务是从测量对象获取被测量, 并向测量者展示测量结果。因此它至少应包括三个基本组成部分: 感受被测量的传感器或敏感器、展示测量结果的显示器和联系二者的测量电路。普通的电测仪表就是由这三部分组成的, 如图 0-2 所示。

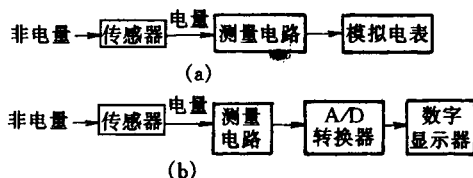


图 0-2 普通电测仪表的基本组成

(a) 为模拟式电测仪表; (b) 为数字式电测仪表

无论是电量测量还是非电量测量, 早期都是采用模拟方式显示和记录测量结果。从 20 世纪 50 年代初数字电压表问世以来, 许多传统的模拟式电测仪表已经或正在被数字仪表所取代。微型计算机出现后, 迅速应用到测试领域, 形成了一代崭新的自动化测试系统——微机化测试系统。现代典型的微机化测试系统的基本组成框图可用图 0-3 表示。传感器用于把被测非电量转换为电量, 测量电路用于把被测电量转换为可供模数转换的模拟电信号, 模数

转换电路把模拟电信号转换为数字信号。单片微机对采集的数据进行处理以供显示和记录(如果测试系统与控制系统相联系,微机处理后的数据还将送往控制器)。同时,单片微机也对整个测试过程进行控制,使测试过程按操作人员的指令自动进行。图 0-3 中去掉传感器便是一个微机化电量测量系统,因此非电量测量系统与电量测量系统除传感器外,其余部分都是相同或相似的。

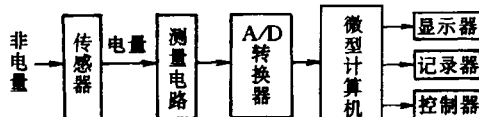


图 0-3 典型的微机化测试系统组成框图

测量仪表或测量系统的基本功能是向测量者展示测量结果。测量结果的展示方式有模拟方式和数字方式两种。

模拟方式通常是用指针式仪表或示波器显示被测量的大小或变化波形。数字方式就是用数字显示器(如 LED、LCD 等)显示被测量 x 的数值 N

$$N = \frac{x}{x_0} \quad (0-5)$$

式中 x_0 为被测量的计量单位。

指针式仪表的指针偏转角 y 与被测量 x 有一一对应的关系。此对应关系可表示为

$$y = f(x) \quad (0-6)$$

所谓“标定”(或“校准”、“校正”)就是在规定的条件下,通过试验建立仪表或系统输入量(被测量) x 与输出量(指针偏转角) y 之间的关系。一般是在测量范围内选定 n 个标准输入量(被测量) x_i ($i = 1, 2, \dots, n$),在指针式仪表的刻度盘上,对应于 x_i 产生的指针偏转 y_i 处刻一刻线并标上 x_i 的值。如果测量时,正好指针偏转到 y_i 处,那就可把 y_i 处标示的 x_i 值作为被测量的值;如果指针偏转在 y_i 和 y_{i+1} 之间,那么就可从 x_i 、 x_{i+1} 、 $(x_i + x_{i+1})/2$ 三者中取误差最小的作为 x 读数值。

通常希望指针式仪表的度盘为线性刻度,即 y 与 x 呈线性关系

$$y = sx \quad (0-7)$$

式中 s 称为灵敏度。

由于图 0-2 和图 0-3 中的传感器大多存在非线性,为保证测量仪表或系统的显示量与被测量之间的线性关系,即(0-5)式或(0-7)式成立,常常需要加入非线性校正电路,或采取非线性校正的软件措施。

第 1 章 无源传感器

1.1 电阻式传感器

电阻式传感器是将非电量变化转换为电阻变化的传感器。电阻式传感器的用途很广、种类很多,除本节介绍的三种外,还有光敏电阻、气敏电阻、湿敏电阻等,将在相关章节中分别予以介绍。

1.1.1 电位器式传感器

电位器是一种常用的机电元件,广泛用于各种电气和电子设备中。主要是把机械位移转换为与其成一定函数关系的电阻或电压输出。它除了用于线位移和角位移测量外,还可用于测量一切能转换为位移的其他非电量如压力、加速度、液位等。

电位器的优点是:结构简单、尺寸小、重量轻、输出特性精度高(可达 0.1% 或更高)且稳定性好,可以实现线性及任意函数特性;受环境因素(如温度、湿度、电磁干扰等)影响较小;输出信号较大,一般不需放大。因此,它是最早获得工业应用的传感器之一,至今在某些场合下还在使用。

一、基本工作原理

电位器式传感器由电阻器和电刷两部分组成,如图 1-1-1(a)、(b) 所示。当电刷触点 C 在电阻器 R_{AB} (阻值为 R) 上移动时,AC 间的电阻就会发生变化,而且阻值 R_{AC} 与触点的直线位移或角位移 x 成一定的函数关系。如果把 CB 短接如图 1-1-1(c) 所示,则电位器便作为变阻器用,其电阻值为位移 x 的函数,即

$$R_x = R_{AB} = R_{AC} = f(x) \quad (1-1-1)$$

如果把电位器作分压器使用,如图 1-1-1 (d) 所示,则输出电压为位移 x 的函数,即

$$U_x = U_{AC} = \frac{U}{R_{AB}} \cdot R_{AC} = \frac{U}{R} \cdot f(x) \quad (1-1-2)$$

二、输出-输入特性

按输出-输入特性,电位器传感器可分为线性电位器和非线性电位器两类。

空载时其输出电压(电阻)与电刷位移之间具有线性关系的电位器称为线性电位器,其输出电压(电阻)与电刷位移成正比

$$R_x = \frac{R}{L} \cdot x \quad (1-1-3)$$

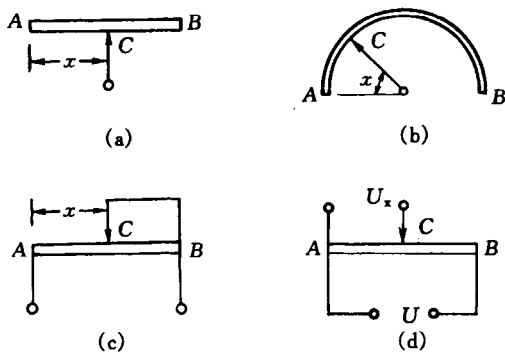


图 1-1-1 电位器式传感器工作原理

$$U_x = \frac{U}{R} \cdot R_x = \frac{U}{L} \cdot x \quad (1-1-4)$$

式中 L ——电位器触点行程；
 x ——电位器电刷位移；
 U ——输入电压；
 U_x ——输出电压；
 R_x ——输出电阻。

非线性电位器是指在空载时其输出电压（电阻）与电刷位移之间具有非线性函数关系的电位器，也称函数电位器。用非线性电位器可使传感器获得各种特殊要求的非线性函数（如指数函数、三角函数、对数函数及其他任意函数）输出；也可以通过它的非线性来修正仪表与传感器或带有负载的电位器的非线性，从而最终获得线性输出特性。

三、结构形式

按结构形式，电位器传感器可分为线绕电位器和非线绕电位器两类。

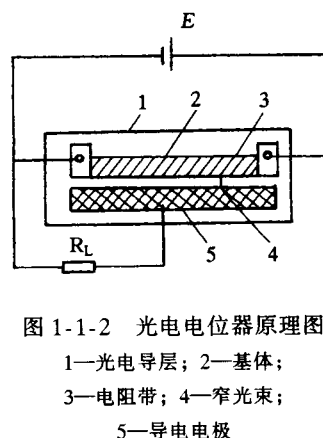
线绕电位器的电阻器是由电阻系数很高的极细的绝缘导线，按照一定规律整齐地绕在一个绝缘骨架上制成的。在它和电刷相接触的部分，将导线表面的绝缘层去掉，然后加以抛光，形成一个电刷可在其上滑动的光滑而平整的接触道。电刷通常由具有弹性的金属薄片或金属丝制成，其末端弯曲成弧形。利用电刷本身的弹性变形所产生的弹性力，使电刷与电阻元件之间有一定的接触压力，以使两者在相对滑动过程中保持可靠地接触和导电。

线绕电位器的优点是精度高、性能稳定，易于达到较高的线性度和实现各种非线性特性。但它也存在许多缺点，如阶梯误差、分辨力低、耐磨性差、寿命较短等。因此发展了在某些性能方面优于线绕式电位器的非线绕电位器。

非线绕电位器目前常见的有合成膜、金属膜、导电塑料、导电玻璃釉电位器等。它们在结构上的共同特点是在绝缘基座上制成各种电阻薄膜元件，因此比线绕电位器具有高得多的分辨力，且耐磨性好，寿命长，如导电塑料电位器使用寿命可达上千万次。它们的缺点是对温度和湿度变化比较敏感，且要求接触压力大，只能用于推动力大的敏感元件。

上述几种电位器都是接触式电位器。光电电位器是一种非接触式电位器，它以光束代替常规的电刷，克服了接触式电位器共有的耐磨性差、寿命短的缺点。

光电电位器的结构原理如图 1-1-2 所示。图中基体 2（常用材料为氧化铝）上沉积一层硫化镉或硒化镉的光电导层 1，然后再在其上沉积一条金属（金或银）导电条作为导电电极 5 和一条



薄膜电阻（镍铝合金等）带 3，在电阻带和导电电极间留有很窄的间隙，作为电刷的窄光束 4 就照射在这个窄间隙上。由于处在间隙中的光电导材料（光电导层 1）的暗电阻（无光照时的电阻）和亮电阻（有光照射的电阻）之比可达 $10^5 \sim 10^8$ ，所以当一窄光束照射到间隙上时，就相当于把电阻带和导电电极接通，在外施电源 E 的情况下，负载电阻 R_L 上便有输

出电压，且输出电压值随光束位置而改变。

光电电位器阻值宽（500Ω~15MΩ）、无摩擦、无磨损、寿命长（可达亿万次循环），分辨力也高。缺点是由于光电导层虽经窄光束照射而导通，但照射处的电阻还是相当高（可达10kΩ或更高），因而光电电位器输出大电流困难，需配高输入阻抗放大器工作。另外，它的结构比较复杂，工作温度范围比较窄（目前最高达150℃），线性度也不高。

1.1.2 应变式传感器和压阻式传感器

一、应变电阻效应和压阻效应

导体或半导体材料在受到外界力（拉力或压力）作用时，产生机械变形，机械变形导致其阻值变化，这种因形变而使其阻值发生变化的现象称为“应变电阻效应”。

对于横截面均匀的导体（或半导体），其电阻为

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1-1-5)$$

式中 l ——导体（或半导体）长度；

A ——导体（或半导体）截面积；

ρ ——导体（或半导体）电阻率。

当它受到轴向力 F 而被拉伸（或压缩）时，其 l ， A ， ρ 均发生变化，如图 1-1-3 所示，因而其电阻值随之变化。通过对（1-1-5）式两边取对数再作微分，即可求得其电阻相对变化

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-1-6)$$

在材料力学中，上式右边第一项称为轴向线应变（或纵向线应变） ϵ 。

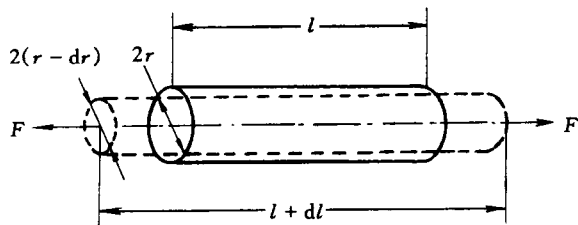


图 1-1-3 导体受拉伸后的参数变化

$$\epsilon = dl/l \quad (1-1-7)$$

受拉（或受压）时，半径缩小（或扩大）产生径向线应变（或横向线应变） dr/r ，它与轴向（纵向）线应变符号相反，二者的比值称为泊松比，即

$$\mu = \frac{dr/r}{dl/l} = -\frac{dr/r}{\epsilon} \quad (1-1-8)$$

（1-1-6）式中第二项称为面应变，因 $A = \pi r^2$ ，故有

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} = -2\mu\epsilon \quad (1-1-9)$$

因体积 $V = A \cdot l$ ，故相应的体应变为

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{dA}{A} = (1 - 2\mu)\epsilon \quad (1-1-10)$$

实验证明，金属导体材料的电阻率相对变化与其体应变成正比

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C(1 - 2\mu)\epsilon \quad (1-1-11)$$

式中 C 为由一定的材料和加工方式决定的常数。