



全国高等职业教育规划教材

自动检测技术

刘丽红 编著

电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

自动检测技术

刘丽红 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、霍尔传感器、光电传感器、压电式传感器、数字式传感器、热电偶传感器、超声波传感器、光纤传感器的结构、原理、测量电路、应用等,书中例举了传感器在工农业生产、国防工业、医疗卫生、家用电器等方面的应用60余例,每章后均配有习题。

本书取材广泛,技术实用,内容详实,适合作为高职高专电气自动化专业的教学用书,也可作为电气自动化专业人员的参考材料。

为了配合教学,本书配有电子教案,读者可以登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 免费注册后下载,或联系编辑索取(QQ:1239258369,电话:(010)88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/刘丽红编著. —北京:机械工业出版社,2011.4

全国高等职业教育规划教材

ISBN 978-7-111-33524-5

I. ①自… II. ①刘… III. ①自动检测—高等职业教育—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第029279号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吴鸣飞 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·9.5印张·232千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-33524-5

定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

全国高等职业教育规划教材 机电类专业编委会成员名单

主 任	吴家礼					
副 主 任	任建伟	张 华	陈剑鹤	韩全立	盛靖琪	谭胜富
委 员	(按姓氏笔画排序)					
	王启洋	王国玉	王晓东	代礼前	史新民	田林红
	龙光涛	任艳君	刘靖华	刘 震	吕 汀	纪静波
	何 伟	吴元凯	张 伟	李长胜	李 宏	李柏青
	李晓宏	李益民	杨士伟	杨华明	杨 欣	杨显宏
	陈文杰	陈志刚	陈黎敏	苑喜军	金卫国	奚小网
	徐 宁	陶亦亦	曹 凤	盛定高	程时甘	韩满林
秘 书 长	胡毓坚					
副 秘 书 长	郝秀凯					

出版说明

根据“教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见”中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位，促进学生技能的培养，以及教材内容要紧密结合生产实际，并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神，机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补，并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师，针对相关专业的课程设置，融合教学中的实践经验，同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的，具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中，本系列教材获得了较高的评价，并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中，除了保持原有特色外，针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中，核心基础课程的教材在保持扎实的理论基础的同时，增加实训和习题；实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合；涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时，根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来，本系列教材具有以下特点：

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度，强调专业技术应用能力的训练，适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述容易理解、清晰简洁，多用图表来表达信息；增加相关技术在生产中的应用实例，引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新，及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念，并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合，提高教学服务水平，为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快，加之我们的水平和经验有限，因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息，以利于我们今后不断提高教材的出版质量，为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

高等职业教育主要为国家培养高素质、高技能型的人才。高职教育要求以技术应用为关键，以能力培养为主线，理论知识以“必需、够用”为度，实现学生知识与技能的整合。在高职教育改革中，教材的改革十分重要。以往的有些教材和高职教育培养目标相比，内容偏多，理论偏深，应用性内容不足。编写本书的目的是为了克服上述缺点。

本书介绍了目前应用非常广泛的 10 种传感器，叙述了这些传感器的结构、工作原理、测量转换电路，着重介绍了这些传感器的应用。本书在编写的过程中坚持科学性、实用性、综合性和新颖性的原则，突出高职教育的特色，强调理论联系实际，降低理论深度，注重应用能力的培养。

本书编者有多年本学科的教学经验，把教学中的体会和对本课程专业知识的理解，以及与相关专业的联系都融入到本书的编写中，使书中内容通俗易懂，详略得当，突出实际应用，适用于高职教学。

本书适合作为电气自动化、机电一体化、供电技术等专业的教学用书，也可以作为成人教育、函授培训的教材，还可以作为从事自动化专业的工程技术人员的参考用书。

由于编者水平有限，书中难免有错漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明	
前言	
绪论	1
0.1 误差	1
0.2 现代测试系统的基本结构	4
0.3 现代电测技术的发展趋势	5
第1章 电阻式传感器	7
1.1 电阻应变式传感器	7
1.1.1 工作原理	7
1.1.2 应变片的结构和特点	8
1.1.3 测量转换电路	10
1.1.4 温度补偿	11
1.1.5 应变效应的应用	12
1.2 热电阻式传感器	15
1.2.1 热电阻的工作原理及结构	15
1.2.2 测量应用	16
1.3 热敏电阻传感器	17
1.3.1 热敏电阻概述	17
1.3.2 热敏电阻的工作原理及特性	18
1.3.3 热敏电阻的应用	20
1.4 习题	22
第2章 电感式传感器	24
2.1 电感式传感器	24
2.1.1 工作原理	24
2.1.2 变隙式电感传感器的输出特性	25
2.1.3 差动变隙式电感传感器的测量电路	26
2.1.4 电感式传感器的应用	28
2.2 差动变压器式传感器	29
2.2.1 工作原理	29
2.2.2 基本特性	30
2.2.3 差动变压器式传感器的应用	31
2.3 电涡流式传感器	32
2.3.1 工作原理	32
2.3.2 电涡流式传感器的应用	33
2.4 习题	35
第3章 电容式传感器	36
3.1 电容式传感器的工作原理和结构	36
3.1.1 变极距式电容传感器	36
3.1.2 变面积式电容传感器	38
3.1.3 变介质式电容传感器	39
3.2 电容式传感器的灵敏度及非线性	40
3.3 电容式传感器的测量电路	41
3.3.1 调频测量电路	41
3.3.2 运算放大器测量电路	41
3.3.3 二极管双T形交流电桥	42
3.3.4 脉冲宽度调制电路	43
3.4 电容式传感器的应用	45
3.4.1 电容式压力传感器	45
3.4.2 电容式加速度传感器	45
3.4.3 电容测厚传感器	45
3.4.4 电容式料位传感器	46
3.5 习题	46
第4章 霍尔传感器	48
4.1 霍尔效应与霍尔器件的材料	49
4.1.1 霍尔效应	49
4.1.2 霍尔器件的材料	49
4.2 霍尔器件的主要技术指标	50
4.3 霍尔集成电路	50
4.4 霍尔器件的温度误差及补偿	52
4.5 霍尔器件不等位电动势的补偿	52
4.6 霍尔器件的应用	53
4.7 习题	57
第5章 光电式传感器	58
5.1 光电效应及光电元器件	59
5.1.1 光电效应	59
5.1.2 光电元器件介绍	59
5.1.3 光电元器件的基本特性	62

5.1.4	光电阵列	64	7.4.2	工作原理	104
5.1.5	光电池	65	7.4.3	信号处理方式及其电路原理	105
5.2	光电式传感器的应用	66	7.4.4	应用实例	108
5.3	习题	71	7.5	习题	110
第6章	压电式传感器	73	第8章	热电偶传感器	111
6.1	压电式传感器的工作原理	74	8.1	热电偶传感器的工作原理	111
6.1.1	压电效应	74	8.1.1	热电效应	111
6.1.2	压电材料	75	8.1.2	与热电偶有关的几个定律	113
6.2	压电式传感器的测量转换电路	76	8.2	热电偶的常用材料及结构	114
6.2.1	压电元件的等效电路	76	8.2.1	热电偶的常用材料	114
6.2.2	电荷放大器	77	8.2.2	热电偶的结构	115
6.3	压电式传感器的应用	78	8.3	热电偶冷端的延长	116
6.3.1	压电陶瓷传感器的应用	78	8.4	热电偶的冷端温度补偿及技术处理	117
6.3.2	高分子压电材料的应用	80	8.5	热电偶实用测温线路	118
6.4	习题	81	8.6	习题	120
第7章	数字式传感器	84	第9章	超声波传感器	122
7.1	数字式角编码器	84	9.1	超声波概述	122
7.1.1	绝对式光电编码器	84	9.2	超声波传感器的原理	124
7.1.2	增量式编码器	85	9.2.1	超声波发生器	124
7.1.3	角编码器的应用	86	9.2.2	超声波接收器	125
7.2	光栅传感器	87	9.3	超声波探头及耦合技术	126
7.2.1	光栅的类型与结构	87	9.3.1	超声波探头	126
7.2.2	光栅副的工作原理	88	9.3.2	耦合技术	127
7.2.3	辨向原理与细分技术	90	9.4	超声波传感器的应用	127
7.2.4	零位光栅与信号波形	92	9.5	习题	132
7.2.5	光栅传感器的应用	93	第10章	光纤传感器	133
7.3	磁栅传感器	95	10.1	光纤的导波原理	133
7.3.1	磁栅	95	10.2	光调制技术	137
7.3.2	磁头	96	10.3	光纤传感器的应用	138
7.3.3	信号处理方式	97	10.4	习题	140
7.3.4	应用实例	98	附录		141
7.4	感应同步器	100	参考文献		144
7.4.1	类型与结构	100			

绪 论

0.1 误差

对自然界所发生现象的研究，常要通过各式各样的实验与测量来完成。在实际测量中，由于测量仪器和工具的不准确、测量方法的不完善以及各种因素的影响，实验中测得的值和其真实值并不一致，这种矛盾在数值上的表现即为误差。随着科学水平的提高和人们的经验、技巧和专门知识的丰富，误差可以被控制得越来越小，但是不能使误差降低为零。误差产生的必然性，已被大量实践所证实，也为一切从事科学实验的人们所公认。因此得到下面的误差公理：

一切实验结果都具有误差，误差自始至终存在于一切科学实验的过程中。

1. 误差概念

(1) 绝对真误差

绝对真误差简称真误差，它等于某物理量的给出值与它的真值之差，即

$$\text{绝对真误差} = \text{给出值} - \text{真值}$$

或用符号表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (0-1)$$

式中 x ——给出值，包括测量值、标称值、近似值等；

x_0 ——真值，是指在规定的时空内被测定值的真实大小。

例如，真值为 6.12A 的电流，在电流表的示值为 6.08A，则电流表示值 6.08A 的真误差为 -0.04A；标称值为 10Ω 的电阻器，其实际值为 9.998Ω，则该电阻器的真误差为 0.002Ω； π 的近似值取 3.14 时，其误差约为 -0.0016。

一般说来，真值是未知的，因此真误差也是未知的。有些情况是可以知道真值的，有些情况从相对意义上来说也是知道真值的。

(2) 相对误差

绝对误差的表示方法有不足之处，因为它不能确切地反映出测量的准确程度。例如，测量两个电阻，其中电阻 $R_1 = 10\Omega$ ，绝对误差 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$ ；电阻 $R_2 = 1000\Omega$ ，绝对误差 $\Delta R_2 = 1\Omega$ 。从例中可以看到，尽管 ΔR_1 小于 ΔR_2 ，但不能由此得出测量电阻 R_1 较测量电阻 R_2 的准确度为高的结论。因为 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$ 相对于 10Ω 来讲为 1%，而 $\Delta R_2 = 1\Omega$ 相对于 1000Ω 来讲为 0.1%，即 R_2 的测量比 R_1 的测量更准确，所以，又引出了相对误差或误差率的概念，定义如下

$$\text{相对误差} = (\text{绝对误差} \div \text{真值}) \times 100\% \approx (\text{绝对误差} \div \text{给出值}) \times 100\%$$

即

$$r = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (0-2)$$

例如：有一只 0~5A 的 0.5 级电流表，当指针指在 4.00A 刻度时，若电流的实际值为

4.02A, 则该刻度的相对误差为

$$r = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% = \frac{4 - 4.02}{4.02} \times 100\% = -0.4975\%$$
$$\approx \frac{I - I_0}{I} \times 100\% = \frac{4 - 4.02}{4} \times 100\% = -0.5\%$$

相对误差通常用于衡量测量（或量具及测量仪器）的准确度。相对误差越小，准确度越高。

相对误差（或相对修正值）只有大小、符号，而无量纲。

(3) 引用误差

引用误差是一种简化的和实用方便的相对误差，常有多档和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表可测范围不是一个点，而是一个量程。这时若按式（0-2）计算，由于分母的改变，所以计算很麻烦。为了计算和划分准确度等级的方便，通常取该仪器仪表量程中的量上限（满刻度值）作为分母。由此引出定义

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{满刻度值}} \times 100\%$$

用符号表示为

$$r_n = \frac{\Delta x}{x_n} \times 100\% \quad (0-3)$$

在检测系统全程所有测量值引用误差的最大者，称为该系统的最大引用误差，用符号 $r_{n\max}$ 表示。工业检测仪器常以最大引用误差作为判断精度等级的尺度，人为规定：用最大引用误差去掉正负号和百分号后的数字来表示精度等级，用符号 G 来表示。为了统一和方便使用，国家标准 GB776—76《测量指示仪表通用技术条件》规定，测量仪表的精度等级 G 分别为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。这是工业检测仪表（系统）常用的精度等级。一般说来，若仪表为 α 级，则仅说明该仪表的最大引用误差不超过 $\alpha\%$ ，而不能认为它在各刻度点上的示值误差都具有 $\alpha\%$ 的精度。设某电表的满刻度值为 x_n ，测量点为 x ，则该电表在 x 点邻近处的示值误差应为

$$\text{绝对误差} \leq x_n \times \alpha\%$$

$$\text{相对误差} \leq \frac{x_n}{x} \times \alpha\% \quad (0-4)$$

2. 误差的来源与分类

(1) 误差的来源

1) 装置误差。根据电测及非电量电测的情况，装置误差又可分为以下 3 种。

① 标准器误差。标准器是提供标准量值的器具，如标准电池、标准电阻等，它们本身的标称值都有误差。

② 仪表误差，也称工具误差或简称仪差。这是由于测量所用的工具本身不完善而产生的误差，如电工仪表、电桥、温度计和秒表等的误差。

③ 装备、附件误差。这里指的是电源的波形、三相电源的不对称度、各种测量附件（如转换开关、触头、接线）以及测试设备和电路的安装、布置或调整不完善等而产生的误差。

2) 方法误差。方法误差也称为理论误差,这种误差是由于测量方法本身的理论根据不完善或采用了近似公式所造成的。

3) 人员误差。人员误差简称人差,这是由于测量人员的感觉器官和运动器官不完善而产生的误差。例如,当记录一个信号时,测量者有滞后或超前的趋向而对测量结果产生影响;读表时,人员因位置偏差而对读表数据产生误差等。这类误差都属于人员误差,它往往因人而异,并与个人当时的生理与心理状态密切相关。

4) 环境误差。这是由于测量环境的影响量(如温度、湿度、气压、电磁场等)偏离规定值时而产生的误差。

(2) 误差的分类

根据误差的性质,测量误差可分为系统误差、随机误差与过失误差3类。

1) 系统误差。在相同条件下多次测量同一物理量时,误差的绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,按某一确定规律变化的误差称为系统误差,简称系差。例如,标准器量值的不准确和仪器示值的不准确而引起的误差。

如果存在着某项系统误差而人们却不知道,这是危险的,因为不一定能通过对测量数据的统计处理来发现它是否存在。特别是系统恒差,即当试验条件变化时,仍保持恒定的系统误差,仅凭数据的统计处理是既不能发现,也不能消除的。

2) 随机误差。随机误差又称为偶然误差,简称随差。在相同条件下多次测量同一物理量时,误差的绝对值和符号均发生变化,其值时大时小,其符号时正时负,没有确定的变化规律,也不能事先预定,但是具有抵偿性的误差。

随机误差主要是由于各种影响量(例如,电源的波动、磁场的微变、热起伏、空气扰动、气压及湿度的变化、测量人员感觉器官的生理变化等一些互不相关的独立因素)对测定值的综合影响所造成的。因此,在测量过程中,尽管测量条件“不变”,但在仔细地进行多次重复测量后,就能发现各次测量结果不完全一样,其原因就是由于各种随机因素造成的。如果各次测量结果完全一样,就只能表明所用的测量装置灵敏度不够,不足以发现随差罢了。单次测量的随机误差没有规律,但多次测量的总体却是服从统计规律的。通过对测量数据的统计处理,将尽可能消除这种影响。

系统误差与随机误差之间并不存在不可逾越的鸿沟。

3) 过失误差。过失误差又称粗差,是一种显然与事实不符的误差。它主要是由于粗枝大叶、过度疲劳、操作不正确或匆忙实验等引起的。例如,读错刻度、记录错误、计算错误等。含有粗差的测量结果称为坏值或异常值。正确的结果不应包含粗差,即所有坏值都应该剔除。因此,在进行误差分析时,要估计的误差只有系统误差与随机误差两类。

误差的归类不是绝对的,一个具体的误差可以归入这一类,有时也可能归入另一类。

3. 提高精度的条件

- 1) 剔除含有粗差的坏值。
- 2) 尽可能消除系统误差。
- 3) 进行多次测量以削弱随机误差的影响。

0.2 现代测试系统的基本结构

以计算机为中心的现代测试系统，采用数据采集与传感器相结合的方式，能最大限度地完成测试工作的全过程。它既能实现对信号的检测，又能对所获信号进行分析处理求得有用信息。而传统的测试则是由传感器或某些仪表获得信号，再由专门的测试仪器对信号进行分析处理以获得有限的信息。

图 0-1 所示为计算机控制现代测试系统的基本形式。它能完成对多点、多种随时间变化参量的快速、实时测量，并能排除噪声干扰，进行数据处理、信号分析，由测得的信号求出与研究对象有关信息的量值或给出其状态的判别。

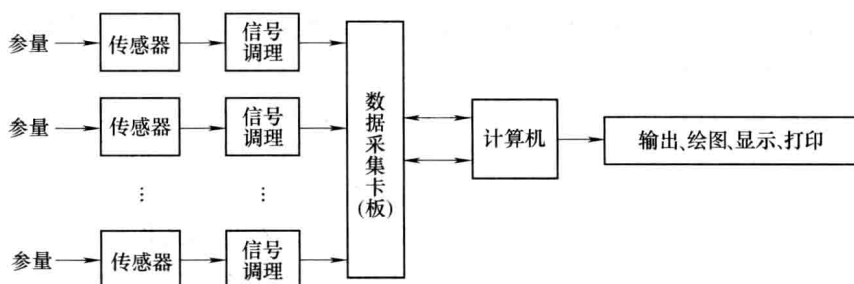


图 0-1 计算机控制现代测试系统的基本形式框图

系统各组成部分的功能如下所述。

1. 传感器

传感器完成信号的获得，它将被测参量转换成相应的可用输出信号，被测参量可以是各种非电气参量，也可以是电气参量。例如，对电力输电线路高电压电网，可通过电压互感器将高电压变为 100V 的电压，通过电流互感器将电网大电流变为 5A 后，仍需采用电压、电流传感器或变送器将 100V 电压及 5A 电流分别转换成 5V 低电压再送入数据采集卡（板）中的 A/D 转换器中。

2. 信号调理

信号调理要处理的信号来自传感器的输出信号，通常是含有干扰噪声中的微弱信号。因此，配接的信号调理电路的基本作用有两个：其一是放大作用，将信号放大到与数据采集卡（板）中的 A/D 转换器相适配；其二是预滤波作用，抑制干扰噪声信号的高频分量，将频带压缩以降低采样频率，避免产生混淆。如果信号调理电路输出的是规范化的标准信号，即 4 ~ 20mA 的电流信号，就称这种信号调理电路为变送器。此外，根据需要还可进行信号隔离与变换等。

3. 数据采集卡（板）

数据采集卡的主要功能有三个：其一功能是由衰减器和增益可控放大器进行量程自动切换；其二功能是由多路切换开关完成对多点、多通道信号的分时采样，时间连续信号 $x(t)$ 经过采样后变为离散时间序列 $x(n)$ ， $n=0, 1, 2, \dots$ ；其三功能是将信号的采样值由 A/D 转换器转换为幅值离散化的数字量或由 V/F 转换器转换为脉冲频率，以适应计算机工作。

4. 计算机

计算机是系统的神经中枢，它使整个测量系统成为一个智能化的有机整体，在软件导引下按预定的程序自动进行信号采集与存储，自动进行数据的运算分析与处理，并将指令以适当形式输出、显示或记录测量结果。

还需特别指出的是，随着微电子技术的发展，将传感器与信号调理电路集成为一体化的芯片已经实现，甚至将传感器、信号调理电路、数据采集以及微计算机或微处理器全部系统都集成在一起的芯片也已面世。因此，传感器与仪器的界线正在消失。

0.3 现代电测技术的发展趋势

随着微电子技术、计算机技术及数字信号处理（DSP）等先进技术在测试技术中的应用，就共性及基础技术而言，现代电测技术的发展趋势是：集成仪器、测试系统的体系结构、测试软件、人工智能测试技术等方面。下面，将着重说明集成仪器和测试软件两个方面。

1. 集成仪器概念

仪器与计算机技术的深层次结合产生了全新的仪器结构概念。一般说来，将数据采集卡插入计算机空槽中，利用软件在屏幕上生成虚拟面板，在软件导引下进行信号采集、运算、分析和处理，实现仪器功能并完成测试的全过程，这就是所谓的集成仪器，即由数据采集卡、计算机、输出（D/A）及显示器这种结构模式组成仪器通用硬件平台，在此平台基础上调用测试软件完成某种功能的测试任务，便构成集成仪器。

2. 测试软件

在测试平台上，调用不同的测试软件就构成不同功能的仪器，因此，软件在系统中占有十分重要的地位。在大规模集成电路迅速发展的今天，系统的硬件越来越简化，软件越来越复杂；集成电路器件的价格逐年大幅下降，而软件成本费用则大幅上升。测试软件不论对大的测试系统还是对单台仪器子系统来讲都是十分重要的，而且是未来发展和竞争的焦点。有专家预言：“在测试平台上，下一次大变革就是软件”。信号分析与处理要求取的特征值，如峰值、真有效值、均值、均方值、方差、标准差等，若用硬件电路来获取，其电路则是极为复杂的；若要获得多个特征值，电路系统则很庞大。而另一些数据特征值，如相关函数、频谱、概率密度函数等，是不可能用一般硬件电路来获取的，即使是具有微处理器的智能化仪器，如频谱分析仪、传递函数分析仪等也很难发挥作用。而在测试平台上，信号数据特征的定义式用软件编程却很容易实现，从而使得那些只能是“贵族式”分析仪器才具有的信号分析与测量功能得以在一般工程测量中实现，使得信号分析与处理技术能够广泛普及地为工程生产实践服务。

软件技术对于现代测试系统的重要性，表明计算机技术在现代测试系统中的重要地位。但不能认为，掌握了计算机技术就等于掌握了测试技术。这是因为，其一，计算机软件永远不可能全部取代测试系统的硬件；其二，不懂得测试系统的基本原理就不可能正确地组建测试系统，不可能正确应用计算机。一个专门的程序设计者，可以熟练而又巧妙地编制科学算题的程序，但若不懂测试技术，则根本无法编制测试程序。测试程序是专业程序编制人员无法编写的，而必须且只能由精通测试技术的工程人员来编写。因此，现代测试技术要求测试

人员既要熟练掌握计算机的应用技术，又要更深入地掌握测试技术的基本理论。

因此，通用集成仪器平台的构成技术与数据采集、数字信号分析处理的软件技术是决定现代测试仪器、系统性能与功能的两大关键技术。以虚拟/集成仪器为代表的现代测试仪器和系统与传统测试仪器相比较的最大特点是：用户只要在集成仪器平台上根据自己的要求开发相应的应用软件，就能构成需要的实用仪器和实用测试系统，其仪器的功能不限于厂家的规定。可见，学习和了解测量原理是非常必要的。

第 1 章 电阻式传感器

【本章主要内容】

- 1) 电阻应变式传感器的工作原理、应变片的结构和特点、测量转换电路、温度补偿及应变效应的应用。
- 2) 热电阻式传感器的工作原理、结构及测量应用。
- 3) 热敏电阻的工作原理、特性及应用。

【需要掌握的知识】

- 1) 了解电阻应变式传感器的结构和特点，理解电阻应变式传感器的工作原理，掌握测量转换电路，掌握温度补偿，学会用电阻应变片测量应变以及能转化成应变的非电量。
- 2) 了解热电阻式传感器的结构，掌握热电阻式传感器的原理，学会用热电阻测量温度。
- 3) 了解热电阻的工作原理，重点掌握热电阻的特性和热敏电阻的应用。

电阻式传感器在现实生活中应用非常广泛，可以测量温度、压力、流量、加速度、转矩、位移、湿度等非电量。它的工作原理是把非电量的变化转换成电阻值的变化，再用转换电路转换成易于处理的电压、电流信号。按其转换原理，可以分为电阻应变式传感器、热电阻式传感器、热敏电阻传感器、气敏传感器、湿敏传感器、电位器传感器等。本章介绍电阻应变式传感器、热电阻式传感器、热敏电阻传感器。

1.1 电阻应变式传感器

金属电阻丝的电阻值与其长度、半径、电阻率有关，我们可以做这样一个较简单的实验：取一根细金属电阻丝，两端接欧姆表（分辨率为 1/2000），记下其初始值。当用力将该电阻丝拉长时，会发现其阻值有增加。应用这一点，可以用电阻丝测量应变，进而测量引起应变的应力。

1.1.1 工作原理

导体或半导体材料在外界力的作用下，会产生机械变形，其电阻值也将随着发生变化，这种现象称为应变效应。下面以金属丝应变片为例分析这种效应。

设有一长度为 l 、截面积为 A 、半径为 r 、电阻率为 ρ 的金属单丝，如图 1-1 所示，它的电阻值 R 可表示为

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

当沿金属丝的长度方向作用均匀力时，上式中 ρ 、 r 、 l 都将发生变化，从而导致电阻值 R 发生变化。对上式求全微分可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s} \quad (1-2)$$

因为 $s = \pi r^2$ ，所以有

$$\frac{ds}{s} = 2 \frac{dr}{r} \quad (1-3)$$

由材料力学可知

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} - \mu \varepsilon_x \quad (1-4)$$

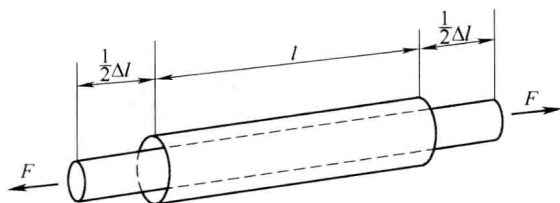


图 1-1 电阻丝应变效应示意图

式中 μ ——电阻丝材料的泊松比，钢的泊松比约为 0.3；

$\varepsilon_x = dl/l = \Delta l/l$ ——表示电阻丝轴向的相对变化，即轴向应变；

$\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x = \frac{\Delta r}{r}$ ——表示电阻丝径向的相对变化，即径向应变。

应变 ε 是无量纲的量。 ε 通常很小，常用 10^{-6} 表示，也常将其称之为微应变。对金属材料而言，在它受力之后产生的轴向应变最好不要大于 1×10^{-3} ，即 $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ ，否则有可能超过材料的极限而导致断裂。

将式 (1-3) 和式 (1-4) 代入式 (1-2)，有

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} = \left[\frac{l}{\rho} \frac{d\rho}{dl} + (1 + 2\mu) \right] \frac{dl}{l} \quad (1-5)$$

$$\text{即} \quad \frac{\Delta R}{R} = \left(1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon_x} \right) \varepsilon_x \quad (1-6)$$

定义 K 为金属丝应变灵敏度系数，有

$$K = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon_x} \quad (1-7)$$

对于不同的金属材料， K 是不同的，一般为 2 左右。

对半导体而言，由于材料的关系，所以灵敏度 K 主要取决于 $\frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon_x}$ 。

金属单丝的灵敏度与相同材料做成的应变片的灵敏度稍有不同。实验表明前者略大于后者，原因主要一是由于胶体的传递变形失真；二是由于金属丝绕成的栅网在圆弧段存在的横向效应。为了减小横向效应，可采用直角线栅或箔式应变片（见图 1-3b）。

实验证明，电阻应变片的电阻相对变化量 $\Delta R/R$ 与 ε_x 的关系在很大范围内是线性的，即有

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_x \quad (1-8)$$

式中 K ——电阻应变片的灵敏度。

1.1.2 应变片的结构和特点

应变片的材料一般有金属和半导体两种类型。金属应变片通常用直径很小的，具有高电阻率的电阻丝制成。为了获得高的电阻值，电阻丝排列成栅网状，并粘贴在绝缘基片上，上面覆盖一层绝缘保护层，电阻丝两端焊有引线。其结构图如图 1-2 所示。金属应变片有金属

丝式应变片、金属箔式应变片、薄膜应变片等几种。应变片类型示意图如图 1-3 所示。

由于金属丝在应变片中存在弯角，将使得其应变灵敏度有所下降（弯角部分在感受应变时，由于存在径向尺寸变化，将影响金属丝轴向总的电阻变化。即使 dR/R 变小，而 $K = (dR/R) / \varepsilon_x$ ，所以 K 也变小）。此外，金属丝电阻对湿度很敏感。因而测试环境温度的变化将可能会造成测量误差，在实际应用中需加以补偿。

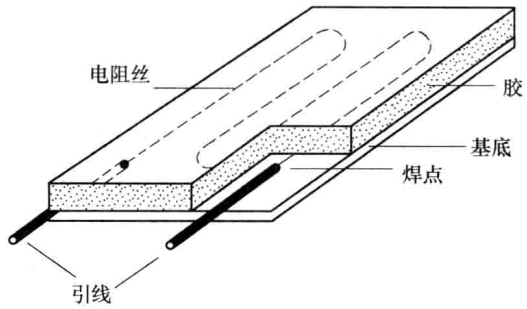


图 1-2 金属应变片结构图

半导体应变片是利用单晶硅的压阻效应制成的一种敏感元件。压阻效应是半导体晶体材料在某一方向受力产生变形时材料电阻率发生变化的现象。半导体应变片主要应用于飞机、导弹、车辆、船舶、机床、桥梁等各种设备的机械量测量。

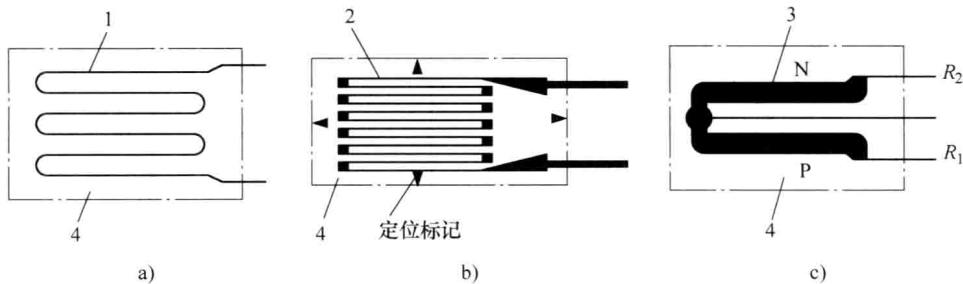


图 1-3 应变片类型示意图

a) 金属丝式应变片 b) 金属箔式应变片 c) 半导体应变片

1—电阻丝 2—金属箔 3—半导体 4—基底

制造半导体应变片的材料有锗、硅、锑化铟、磷化镓、磷化铟、砷化铟等。一般常用锗、硅，因为它能获得很大的压阻效应。

半导体应变片有以下几种类型：

1) 体型半导体应变片。

这是一种将半导体材料硅或锗晶体按一定方向切割成的片状小条，经腐蚀压焊粘贴在基底上而形成的应变片。

2) 薄膜型半导体应变片。

这种应变片是利用真空沉积技术将半导体材料沉积在带有绝缘层的试件上制成的。

3) 扩散型半导体应变片。

将 P 型杂质扩散到 N 型硅单晶基底上，形成一层极薄的 P 型导电层，再通过超声波和热压焊法接上引出线，就形成了扩散型半导体应变片。

应变片具有体积小、精度高、频率响应好、价格便宜等优点。半导体应变片最突出的优点是灵敏度高、机械滞后小、横向效应小，其最大的缺点是温度稳定性差、灵敏度离散程度大以及在较大应变作用下非线性误差大等。

将应变片粘贴在被测应变的弹性梁上，即可测量应变的大小。