



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材



感测技术基础

(第三版)

Fundamental Sensor
and Measurement Technique

The Third Edition

◎ 孙传友 张 一 主编
◎ 李 涛 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业精品教材

感测技术基础

(第三版)

孙传友 张 一 主编
李 涛 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”和省精品课程教材《感测技术基础》的第三版。本书将“传感器技术”、“自动检测技术”和“电子测量技术”三门内容联系紧密的课程中的主要内容,有机地整合成一门课程。全书分为四部分,共13章:第1~3章为常见电量测量,内容包括电压电流和功率测量、频率时间和相位测量、电阻电容和电感测量等;第4~8章为传感器原理,内容包括阻抗型传感器、电压型传感器、半导体传感器、数字式传感器、新型传感器等;第9~12章为常见非电量电测量,内容包括几何量电测法、机械量电测法、热工量电测法、成分与含量电测法等,第13章为感测新技术简介。

本书每一章都有例题、习题及习题解答,还有与本教材配套的大量教学辅导资料,读者可从本课程专用的教学网站免费下载。

本书可作为电子信息工程、电气工程及自动化、测控技术与仪器等专业的本科生教材,也可供有关工程技术人员参考或作为自学读物。

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,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

感测技术基础 / 孙传友, 张一主编. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2011. 2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-121-12861-5

I. ①感… II. ①孙… ②张… III. 传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 013891 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 18.25 字数: 593 千字

印 次: 2011 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 33.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本教材把“传感器技术”、“自动检测技术”和“电子测量技术”三门内容联系紧密课程的主要内容有机地整合为一门课程。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”，大大节省了教学学时，而且也有利于“拓宽学生的专业面，培养学生的创新能力”。本教材在内容编排上又特别注意归纳共性、总结规律，化“多而繁”为“少而简”，启发和诱导学生的创新思维。因此，受到中国工程院院士、天津大学叶声华教授等专家和广大师生的好评，被遴选为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”和湖北省精品课程教材。目前，本书第1版和第2版累计已印刷11次，销售量达35000册之多，已有数十所高校选用本书作为教材，有些重点大学还指定本书为硕士生入学考试参考书或博士生入学考试参考书。

为了使本书能跟上感测技术的发展，更好地适应今后的教学工作，本书第3版在保持前两版的特色和体系基本不变的前提下，对第2版的内容进行了修订，增加了感测新技术简介和CCD数码照相机等内容。此外，为了方便教师教学和学生自学，第3版书后还汇集了各章例题解答和全部习题的详细解答。

我们建议学生在做作业时，先不要看书后答案，自己独立思考地做完后，再与课后答案对比，自己给自己的作业批改和打分，自己发现学习中的问题自己纠正。任课教师可以检查和记录学生自己完成和批改作业的情况，利用课堂小测验和期末考试考核学生学习的效果。这样把作业主动权交给学生，有利于培养学生的自学能力和提高学生的学习自觉性。

我们建议学生不要只忙于应付作业和考试，而要在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，还可把自己的研究心得撰写成论文在科技期刊上发表甚至申报专利，多创造些社会认可的成果以提升自己今后在人才市场的竞争力。

为此，我们除了编写与本教材配套的CAI课件、电子教案、实验指导、例题汇集、试题汇集等教辅资料外，还收集整理案例教学、双语教学、论文选读、参考图书、产品说明，以及学生学习本课程后发表的论文和作品等大量参考资料。所有这些资料都全部挂在“感测技术”精品课程网站上，供师生和读者免费下载。网站网址是：

<http://dxxxy.yangtzeu.edu.cn:81/>或 <http://dxxxy.yangtzeu.edu.cn/gcjc/>

本书绪论和第1~11章由张一编写，其余章节和例题、习题解答均由孙传友编写。全书由长江大学孙传友教授和辽宁石油化工大学张一教授主编，长江大学李涛博士主审。李涛博士对本书的修订提出了很多宝贵意见，而且一直负责“感测技术”精品课程网站的建设和维护，作者借此机会对他表示衷心的感谢。

本课程建设过程中，先后得到西安交通大学万明习教授、华中科技大学杨坤涛教授和天津大学

叶声华院士的大力支持和帮助。本书在编写和修改过程中,参考了 80 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。

E-mail 请寄 scy321@126. com。

作者

2011 年 1 月

目 录

绪论	1
第 1 章 电流、电压和功率的测量	6
1.1 电流的测量	6
1.1.1 电流表直接测量法	6
1.1.2 电流-电压转换法	9
1.1.3 电流-频率转换法	11
1.1.4 电流-磁场转换法	11
1.1.5 电流互感器法	12
1.2 电压的测量	12
1.2.1 直流电压的测量	13
1.2.2 交流电压的测量	15
1.3 功率的测量	18
1.3.1 用电动系功率表测量功率	18
1.3.2 用时分割乘法器测量功率	21
思考题与习题	22
第 2 章 频率、时间和相位的测量	23
2.1 频率的测量	23
2.1.1 频率的模拟测量	23
2.1.2 频率(周期)的数字测量	25
2.2 时间间隔的数字测量	28
2.2.1 测量原理	28
2.2.2 测量误差与测量范围	29
2.3 相位差的数字测量	29
2.3.1 相位-电压转换法	29
2.3.2 相位-时间转换法	30
思考题与习题	31
第 3 章 阻抗(电阻、电容、电感)的测量	32
3.1 电桥法	32
3.1.1 惠斯顿电桥	32
3.1.2 平衡电桥法	33
3.1.3 不平衡电桥法	34
3.2 阻抗-电压转换法	38
3.2.1 欧姆法(恒流法)	38
3.2.2 比例运算法	39
3.2.3 差动脉冲调宽法	40
3.3 阻抗-频率转换法	41
3.3.1 调频法	41

3.3.2 积分法	42
3.4 阻抗-数字转换法	43
3.4.1 电阻-数字转换法	43
3.4.2 电感、电容-数字转换法	44
思考题与习题	45
第4章 阻抗型传感器	46
4.1 电阻式传感器	46
4.1.1 电位器式传感器	46
4.1.2 应变式传感器和压阻式传感器	47
4.1.3 热电阻和热敏电阻	54
4.1.4 气敏电阻	57
4.1.5 湿敏电阻	59
4.2 电容式传感器	61
4.2.1 基本原理与结构类型	61
4.2.2 输出特性	62
4.2.3 等效电路分析	64
4.2.4 接口电路选择	64
4.3 电感式传感器	65
4.3.1 自感式传感器	65
4.3.2 互感式传感器(差动变压器)	69
4.3.3 压磁式传感器	72
4.3.4 电涡流式传感器	75
思考题与习题	77
第5章 电压型传感器	79
5.1 磁电式传感器	79
5.1.1 基本原理和组成	79
5.1.2 结构类型	79
5.1.3 测量电路	80
5.2 压电式传感器	81
5.2.1 压电效应及其表达式	81
5.2.2 压电材料	83
5.2.3 压电元件	85
5.2.4 接口电路	87
5.3 热电偶传感器	89
5.3.1 热电效应	89
5.3.2 热电偶的材料、型号及结构	91
5.3.3 热电偶测温	93
5.4 光电式传感器	95
5.4.1 光电器件	95
5.4.2 光电器件的基本特性	98
5.4.3 光电式传感器的基本组成和类型	102
5.5 霍尔传感器	104

5.5.1 霍尔效应	104
5.5.2 霍尔传感器组成与基本特性	105
5.5.3 霍尔传感器的应用	107
5.5.4 测量误差及其补偿办法	108
思考题与习题	111
第6章 半导体传感器	113
6.1 半导体管传感器	113
6.1.1 磁敏二极管和磁敏三极管	113
6.1.2 热敏管	117
6.1.3 气敏管	117
6.1.4 湿敏管	118
6.2 半导体集成传感器	119
6.2.1 集成霍尔传感器	119
6.2.2 集成温度传感器	120
6.2.3 湿度、压力、加速度集成传感器	121
思考题与习题	122
第7章 数字式传感器	123
7.1 编码器	123
7.1.1 直接编码器	123
7.1.2 增量编码器	126
7.2 光栅与磁栅	127
7.2.1 光栅	127
7.2.2 磁栅	131
7.3 感应同步器	134
7.3.1 感应同步器的类型和结构	134
7.3.2 感应同步器的工作原理	136
7.4 频率式传感器	139
7.4.1 振弦式传感器	139
7.4.2 振筒式传感器	141
7.4.3 振膜式和振梁式传感器	143
7.4.4 石英晶体谐振式传感器	144
思考题与习题	144
第8章 新型传感器	145
8.1 光纤传感器	145
8.1.1 光导纤维的结构和传光原理	145
8.1.2 光纤传感器的基本原理和类型	147
8.2 CCD 图像传感器	148
8.2.1 CCD 的工作原理	148
8.2.2 CCD 图像传感器的结构	150
8.2.3 CCD 数码照相机	151
8.3 激光与红外传感器	152
8.3.1 激光传感器	152

8.3.2 红外传感器	154
8.4 超声波与声表面波传感器	156
8.4.1 超声波传感器	156
8.4.2 声表面波传感器	157
8.5 核辐射传感器	158
8.5.1 核辐射检测的物理基础	158
8.5.2 核辐射传感器	159
8.6 传感器发展的新趋向	160
8.6.1 社会发展对传感器需求的新动向	160
8.6.2 传感器的发展趋势	161
思考题与习题	161
第9章 几何量电测法	162
9.1 位移电测法	162
9.1.1 位移电测法的分类	162
9.1.2 位移的间接电测法	162
9.1.3 各种位移传感器的性能比较	164
9.2 倾角电测法	166
9.2.1 摆锤式	166
9.2.2 液体摆式	167
9.2.3 气体摆式	168
9.3 厚度电测法	168
9.3.1 电感式和电涡流式	168
9.3.2 电容式	169
9.3.3 核辐射式和超声波式	170
9.4 物(液)位电测法	171
9.4.1 超声波法	171
9.4.2 浮力法	172
9.4.3 差压法	173
9.4.4 电容法	174
思考题与习题	174
第10章 机械量电测法	175
10.1 转速的电测法	175
10.1.1 模拟式电测法	175
10.1.2 计数式电测法	176
10.2 振动的电测法	179
10.2.1 相对振动传感器与绝对振动敏感器	180
10.2.2 绝对振动电测法	182
10.2.3 振动加速度传感器实例	186
10.2.4 压电式加速度电测系统分析	188
10.3 力与荷重的电测法	189
10.3.1 力敏感器	189
10.3.2 力的间接电测法	191

10.3.3 荷重传感器与电子秤	193
10.3.4 各类型力传感器比较	194
10.4 力矩的电测法	194
10.4.1 扭轴(扭矩敏感器)	194
10.4.2 力矩的扭轴式电测法	195
思考题与习题	197
第 11 章 热工量电测法	199
11.1 压力和差压的电测法	199
11.1.1 压力的概念、单位和测量方法	199
11.1.2 压力敏感器	200
11.1.3 压力电测法	201
11.1.4 差压电测法	205
11.2 温度的电测法	206
11.2.1 温度的概念、单位和测量方法	206
11.2.2 接触式测温法	207
11.2.3 接触式测温电路实例	208
11.2.4 非接触式测温法	212
11.3 流量的电测法	214
11.3.1 流量的概念	214
11.3.2 流量-转速转换法	215
11.3.3 流量-差压、力、位移转换法	216
11.3.4 流量-频率转换法	218
11.3.5 流量-温度转换法	219
11.3.6 非接触式流量测量法	219
思考题与习题	222
第 12 章 成分与含量的电测法	223
12.1 水分和湿度电测法	223
12.1.1 水分和湿度的定义及表示方法	223
12.1.2 固体水分电测法	223
12.1.3 气体湿度电测法	224
12.2 密度和浓度电测法	226
12.2.1 密度电测法	226
12.2.2 浓度电测法	227
12.3 气体分析与检测	229
12.3.1 气体分析	229
12.3.2 家用气体检测器	232
思考题与习题	233
第 13 章 感测新技术简介	234
13.1 虚拟仪器	234
13.1.1 虚拟仪器的概念	234
13.1.2 虚拟仪器的组成特点	234
13.2 网络化仪器和网络化传感器	236

13.2.1	网络化仪器	236
13.2.2	网络化传感器	237
13.3	微电子机械系统和微型传感器	238
13.3.1	微电子机械系统(MEMS)	238
13.3.2	微型传感器(MEMS 传感器)	239
13.4	软测量技术	239
13.4.1	软测量技术的概念	239
13.4.2	软测量技术的实现方法	240
13.4.3	软测量技术应用举例	241
13.5	多传感器数据融合	242
13.5.1	多传感器数据融合的概念及优点	242
13.5.2	基本原理及融合过程	242
	思考题与习题	243
附录 A	例题解答	244
附录 B	习题解答	260
主要参考文献		282

绪 论

一、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 世纪出现的光学显微镜,使得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……

“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和非电量两大类,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。我们把传感器原理、非电量测量、电量测量这三部分内容合称为传感器与测试技术,简称感测技术。

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公用的基础技术,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。

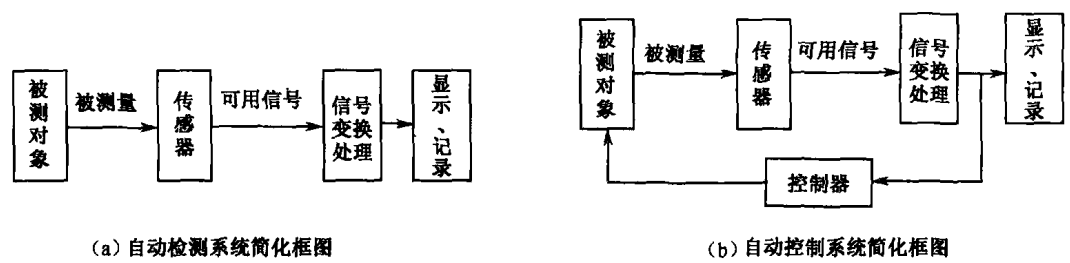


图 0-1 自动化检测与控制系统对比

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都离不开感测技术。

二、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。化学型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。生物型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等阻抗型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。模拟式传感器又可分为阻抗型(输出量为阻抗)和电压型(输出量为电压)。

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,那么敏感器则可称为预变换器。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,但不是原来的非电量 z 的传感器,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 响。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。这就需要用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。

三、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。

无论是电量测量还是非电量电测量,早期都是采用模拟方式显示和记录测量结果。模拟方式通常是用指针式仪表显示被测量的大小。指针式仪表的“表头”即图 0-2(a)中的“模拟表头”是一种能够在电流作用下,引起指针发生偏转的机构,该机构通常又称为“测量机构”。图 0-2 中的传感器用于把被测非电量转换为电量,这种电量通常要通过“测量电路”转换成表头电流,使表头指针偏



图 0-2 普通电测仪表的基本组成

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

$$y = f(x) \quad (0-5)$$

通常希望指针式仪表的度盘为线性刻度,即 y 与 x 呈线性正比关系

$$y = sx \quad (0-6)$$

式中, s 为灵敏度。

为了便于从表头上直接读出被测量的大小,通常表头的度盘不按照电流刻度,而按照被测量刻度,即进行“标定”: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,那就可以把 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,那就可以从 $x_i, x_{i+1}, (x_i + x_{i+1})/2$ 三者中取误差最小的作为 x 读数。

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式仪表所取代。数字式普通电测仪表如图 0-2(b) 所示,它是在模拟式电测仪表的基础上发展起来的,即用“数字显示器”(如 LED、LCD 等)取代了“模拟表头”,直接显示被测量 x 的数值 N

$$N = \frac{x}{x_0} \quad (0-7)$$

式中, x_0 为被测量的计量单位。图 0-2(b) 中的“测量电路”将传感器输出的电量转换成电压信号,“A/D 转换器”将电压信号转换成数字信号,送“数字显示器”显示出来。

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。它是在数字式电测仪表的基础上发展起来的,即在“A/D 转换器”之后接入了微型计算机(通常采用单片微机)。在图 0-3 中,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

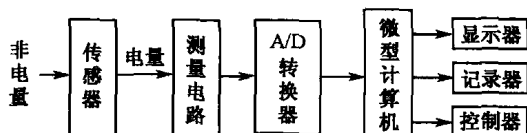


图 0-3 典型的微机化测试系统组成框图

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,使测试过程按照操作人员的指令自动进行。

图 0-2 中去掉传感器后便是一个普通的电量测量仪表,图 0-3 中去掉传感器后便是一个微机化电量测量系统,因此非电量测量仪表或系统与电量测量仪表或系统的区别仅在于有没有传感器,其余部分都是相同或相似的。自然界被测量的量,可分为电量和非电量两大类,非电量的种类比电量的种类多得多。因此实际的检测工作中,大量的常见的测量是非电量的测量,但是电量的测量是非电量测量的基础。

四、本课程的研究内容及性质

从图 0-2 和图 0-3 可见,传感器是非电量测量仪表或系统的第一道重要环节,要从事非电量测量工作,就必须了解传感器的工作原理。但是,我们还要看到,传感器只是非电量测量仪表或系统的一部分,而不是全部。对从事检测仪表工作和教学的读者来说,不仅需要了解传感器,而且还需要了解检测仪表或系统的其他组成部分的工作原理。检测仪表或系统的其他组成部分的主要任务就是对传感器转换成的电量进行测量,并把测量结果显示出来。因此非电量的测量与电量的测量是分不开的,与传感器是分不开的。把传感器和电量测量分列为两门独立的课程,容易造成课程内

容间的脱节和重复。

《感测技术基础》是根据高等学校教学内容和课程体系改革的需要,将内容联系紧密的传感器技术、自动检测技术、电子测量技术等课程的主要内容有机地整合而成的一门专业基础课,主要研究常见电量的测量方法、传感器的基本原理和常见非电量的电测法。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,培养学生创新能力。因此这样“整合”是与高等教育 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求相适应的。

传感器技术包括“设计”和“应用”两方面,但是“用”传感器的人比“做”传感器的人要多得多。对多数“用”传感器进行非电量测量的读者来说,没有必要去细究传感器内部结构的设计理论和制作工艺,而应该从“应用”角度,了解传感器工作的基本原理,掌握传感器与外部的连接即传感器前端的敏感器和后端的接口电路。这也正是作者编写本书传感器部分的基本指导思想,也是本书与其他传感器教材不同的特点。

一般来说,输出电量相同的传感器,接口电路也大体相近。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。这样编排既避免不必要重复,又能使学生举一反三、触类旁通。

传感器的任务就是把非电量转换成电量。但是,实际工作中,要测量的非电量并不一定是手头现有传感器所能转换的非电量,此时,就应选用或设计适当的敏感器,把待测非电量转换成手头现有传感器所能转换的非电量。因此,一种传感器配接不同的敏感器后,就可以测量多种非电量。一种非电量也就可以用多种方法来测量。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测量本身的基本理论和多种测量方法。

由于一种传感器可以测量多种非电量,而每一种非电量又有多种测量方法,因此,非电量检测仪器仪表的种类和型号是很多很多的。如果把常见的各类检测仪器仪表“化整为零”地解剖开来,我们会发现它们的内部组成模块大多是相同的。如果把各个模块“化零为整”地组装起来,我们会发现它们的整机原理、总体设计思想也是大体相近的,都可用图 0-2 或图 0-3 的简化框图表示。这就是说,不同应用领域常见的检测仪器或系统,虽然名称、型号、性能各不相同,但它们有很多共性,而且共性与个性相比,共性还是主要的。它们的共同的理论基础和技术基础实质就是感测技术。各种不同的仪器仪表产品只不过是“共同基础”即感测技术与各应用领域的“特殊要求”相结合的产物。读者没有必要也没有那么多时间去学习一个个具体的仪器仪表产品。只要掌握了通用的感测技术,今后遇到具体的仪器仪表时再了解一下该仪器仪表应用领域的特殊要求和某些专用电路,就能很快适应所从事仪器仪表或检测系统的具体工作。

第 1 章 电流、电压和功率的测量

1.1 电流的测量

1.1.1 电流表直接测量法

直接测量电流的方法通常是在被测电流的通路中串入适当量程的电流表,让被测电流的全部或一部分流过电流表,从电流表上直接读取被测电流值或被测电流分流值。

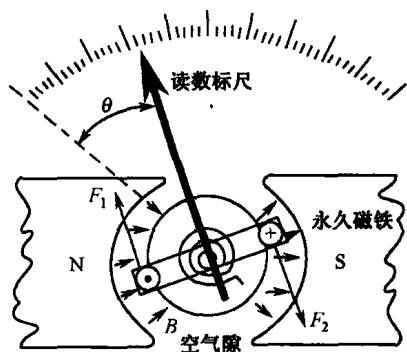


图 1-1-1 动圈式磁电系测量机构

一、直流电流表

直流电流表的表头通常采用图 1-1-1 所示的动圈式磁电系测量机构。“动圈”(即可以转动的线圈)是用具有绝缘层的细铜线绕制成的矩形框,长度为 L ,宽度为 b ,由弹性支承悬挂在永久磁铁产生的磁场中。目前应用较多的弹性支承是张丝支承,动圈旋转时张丝被扭转而产生弹性力矩,另一种是轴尖—轴承支承,其弹性力矩靠游丝的卷曲产生。张丝或游丝同时还作为动圈电流的引入与引出线。

当动圈中流过电流 i 时,动圈的两个有效边 L 就要受到大小相等方向相反的两个电磁力 F_1 和 F_2 的作用,如图 1-1-1 所示。

$$F_1 = F_2 = F = NBLi \quad (1-1-1)$$

式中, B 为磁场的磁感应强度; N 为动圈的匝数。

永久磁铁的极靴形状,通常设计成使其磁力线在圆形气隙中处处都为径向(亦即与动圈平面的夹角为 0°),因而使动圈在磁场中受到的电磁力矩为

$$M_c = bF = bNLBi = Ci \quad (1-1-2)$$

式中, $C = NLBb$ 表示穿过动圈面积的磁链。

动圈转动时受到弹性支承作用的弹性力矩为

$$M_k = k\theta \quad (1-1-3)$$

式中, k 为弹性支承的弹性系数; θ 为动圈的转角。

动圈转动时受到与转动角速度成正比的阻尼力矩(即转动体与周围接触介质的摩擦力矩或附加阻尼线圈的电磁阻尼力矩)

$$M_d = D \frac{d\theta}{dt} \quad (1-1-4)$$

式中, D 为阻尼系数。

M_c 驱使动圈转动,而 M_d 、 M_k 则阻止动圈转动,因此根据转动定律有

$$M_c - M_k - M_d = J \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

式中, J 为动圈和与其固定连接的动圈框架及笔尖或指针构成的惯性体的转动惯量; $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ 为该惯性体的转动角加速度。

将 M_c 、 M_d 、 M_k 代入上式得