

免费提供电子教案



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

自动检测技术

李现明 吴皓 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电气工程及其自动化工作的工程技术人员参考。

自动检测技术

李现明 吴皓 编著

机械工业出版社

北京 100070 机械工业出版社发行部

（电话：010-68993822，010-68993823）

http://www.cmpbook.com

机械工业出版社（北京）

机械工业出版社（天津）

机械工业出版社（上海）

机械工业出版社（重庆）

机械工业出版社（西安）

机械工业出版社（昆明）

机械工业出版社（成都）

机械工业出版社（贵阳）

机械工业出版社（长沙）

机械工业出版社（武汉）

机械工业出版社（郑州）



机械工业出版社

地址：北京市西城区百万庄大街24号

本书扼要介绍了传感器特性与性能指标、测量误差处理等自动检测技术的基本概念,以传感器工作原理为主线,深入阐述了电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、热电偶、热电阻、霍尔传感器、压电传感器等基础传感器的工作原理、组成结构、传感特性、使用要点、传感信号调理电路、典型应用,对其他常见传感器也有选择地进行了简要介绍。书中还介绍了若干传感器专用集成电路。传感器的典型应用举例覆盖了常见的各种物理量检测技术。在上述知识的基础上阐述了传感与检测学科的共性关键技术,并设专门章节讲述自动检测系统的设计问题。

本书基础性与工程实用性并重,可作为自动化、测控技术与仪器、电气工程及自动化等专业的本科教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/李现明,吴皓编著. —北京:机械工业出版社,2008.9

(21世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 978-7-111-25173-6

I. 自… II. ①李…②吴… III. 自动检测-高等学校-教材 IV. TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第146466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:时静 郝建伟

责任印制:杨曦

三河市国英印务有限公司印刷

2009年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·17印张·417千字

0001—5000册

标准书号:ISBN 978-7-111-25173-6

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页,倒页,脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294 68993821

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

传感器是“信息获取—处理—传输—应用”链条中的源头技术。传感器技术已成为工科各专业都应掌握的公共技术，机械工程、材料工程、动力工程、电气工程、信息工程等各类工科专业都开设了与传感器相关的课程。其中，自动化、测控技术及仪器、生物医学工程、电气工程及自动化等专业把传感器课程作为专业基础课或专业课。

作者从1995年开始给自动化专业主讲传感器课程，深感有必要吸取现有多种同类优秀教材的优点，进一步改进课程体系、更新教学内容，特别是丰富例题、习题。在现有教材基础上，编写一本自动化专业传感器课程新教材，力争使学生通过该教材的系统学习，能够掌握典型的传感器、掌握传感器学科的共性关键技术，独立设计检测系统。本教材具有如下特点：

1) 基础性与实用性有机融合：将目标定位于学完本书，学生能够掌握传感器学科的基本理论与技术，利用现有市场提供的元器件进行检测系统的设计、调试、维修。

2) 科学处理深度与宽度之间的矛盾：对阻抗式传感器、热电偶、压电式传感器等应用最为广泛的传感器进行深入阐述，而对其余传感器只作最基本的阐述。

3) 突出传感器学科的共性关键技术：通过对典型传感器的深入阐述，使传感器的共性关键技术得以充分体现，在此基础上再设专门章节进一步对共性技术进行总结、强化。作者认为传感器课程的任务是使学生在掌握典型传感器的基础上进一步掌握传感器的共性技术，以便举一反三，触类旁通。

4) 按传感器原理为主线划分章节，通过阐述传感器的典型应用举例，使学生既能掌握传感器技术，又能掌握常见被测量的检测方法。

5) 更新传感器信号调理电路的教学内容，以合理篇幅介绍某些传感器专用集成电路。

6) 合理增加有工程实际背景的例题、习题，引导学生借助网络资源，完成若干简单检测系统的设计。

本书由山东大学李现明、吴皓合编，第5、6章由吴皓编写，其余各章由李现明编写。电子教案由马庆制作，课件由陈振学完成。编写过程中参考了多种同类教材、著作，在此向原作者及出版社致谢！对于本教材中存在的不当之处，请读者批评、指正，以便再版时予以改进。作者联系方式：mingli@sdu.edu.cn，本书电子教案下载网址为www.cmpedu.com。

李现明 吴皓

目 录

出版说明

前言

第1章 自动检测技术的基本概念	1
1.1 自动检测技术概述	1
1.1.1 自动检测技术在自动化专业中的地位与作用	1
1.1.2 自动检测系统的基本组成	2
1.1.3 传感器的分类、命名与图形符号	3
1.2 测量方法	4
1.2.1 直接测量、间接测量、联立测量	4
1.2.2 偏差式测量、零位测量、微差式测量	5
1.2.3 接触式测量、非接触式测量	5
1.3 传感器的一般特性	5
1.3.1 传感器的静态特性与静态特性指标	5
1.3.2 传感器的动态特性与动态特性指标	13
1.3.3 传感器的标定与校准	14
1.4 测量误差与数据处理	15
1.4.1 测量误差的概念和分类	15
1.4.2 粗大误差的判别和分类	17
1.4.3 系统误差的处理	18
1.4.4 随机误差的处理	21
1.5 习题	23
第2章 电阻式传感器及其信号调理	24
2.1 电阻应变片	24
2.1.1 电阻应变片的工作原理——应变效应	24
2.1.2 电阻应变片的结构、种类	25
2.1.3 电阻应变片的主要特性	26
2.1.4 电阻应变片的粘贴技术	28
2.1.5 电阻应变片的典型应用举例	29
2.2 其他电阻式传感器	30
2.2.1 压阻式传感器	30
2.2.2 热电阻	31
2.2.3 热敏电阻	34
2.2.4 气敏电阻	36
2.2.5 光敏电阻	37

2.2.6	磁敏电阻	39
2.3	电阻式传感器的信号调理	40
2.3.1	惠斯登电桥	40
2.3.2	测量放大电路	44
2.3.3	多功能传感信号调理电路 AD693	50
2.4	习题	56
第3章	电感式传感器及其信号调理	58
3.1	自感式传感器	58
3.1.1	单线圈自感传感器	58
3.1.2	差动自感传感器	60
3.2	差动变压器	62
3.2.1	工作原理	62
3.2.2	输出特性	65
3.2.3	典型应用举例	67
3.3	电涡流传感器	69
3.3.1	反射式电涡流传感器	69
3.3.2	透射式电涡流传感器	71
3.4	压磁式传感器	72
3.5	电感式传感器的信号调理	73
3.5.1	交流电桥	73
3.5.2	调幅、调频与调相电路	74
3.5.3	相敏整流电路	76
3.5.4	单片差动变压器信号调理电路 AD598	78
3.6	习题	82
第4章	电容式传感器及其信号调理	84
4.1	工作原理	84
4.1.1	传感原理	84
4.1.2	基本结构	84
4.2	传感特性	86
4.2.1	变间隙式电容传感器	86
4.2.2	变面积式电容传感器	87
4.2.3	变介电常数式电容传感器	87
4.3	等效电路	88
4.4	电容式传感器的信号调理	88
4.4.1	交流电桥电路	88
4.4.2	运算放大器式电路	91
4.4.3	脉冲宽度调制电路	92
4.4.4	调频式电路	93
4.4.5	单片电容传感器信号调理电路 CS2001	93

4.5	电容式传感器的典型应用举例	96
4.5.1	电容传感系统的设计要点	96
4.5.2	电容传感器应用举例	98
4.6	习题	102
第5章	电动势式传感器及其信号调理	103
5.1	热电偶	103
5.1.1	热电偶的工作原理	103
5.1.2	热电偶的基本定律	106
5.1.3	热电偶的冷端补偿	108
5.1.4	标准化热电偶	109
5.1.5	热电偶的结构形式	111
5.1.6	单片热电偶冷端温度补偿电路	112
5.2	霍尔式传感器	117
5.2.1	霍尔传感器的工作原理	118
5.2.2	霍尔传感器的组成与基本特性	119
5.2.3	霍尔传感器的测量误差及其补偿	121
5.2.4	霍尔传感器的典型应用举例	124
5.3	压电式传感器	127
5.3.1	压电式传感器工作原理	127
5.3.2	压电式传感器的等效电路	129
5.3.3	压电式传感器的测量电路	131
5.3.4	压电式传感器的应用	132
5.4	光电式传感器	133
5.4.1	光电器件	133
5.4.2	光电器件的基本特性	137
5.4.3	光电式传感器的基本组成	143
5.4.4	光电式传感器的典型应用举例	144
5.5	习题	145
第6章	其他传感器简介	147
6.1	光栅传感器	147
6.1.1	光栅传感器的结构	147
6.1.2	莫尔条纹及其特点	148
6.1.3	光栅的光路	149
6.1.4	辨向原理	150
6.1.5	电子细分技术	151
6.2	感应同步器	151
6.2.1	感应同步器的结构	151
6.2.2	感应同步器的工作原理	152
6.3	编码器	153

6.3.1	直接编码器	154
6.3.2	增量编码器	155
6.4	光纤传感器	156
6.4.1	光纤的结构	157
6.4.2	光纤的传光原理	157
6.4.3	光纤传感器的分类	158
6.4.4	光纤传感器的原理	158
6.4.5	光纤传感器的特点	159
6.4.6	光纤传感器应用举例	159
6.5	超声波传感器	160
6.5.1	超声波及其性质	160
6.5.2	超声波检测原理	161
6.5.3	超声波传感器的结构	162
6.5.4	超声波传感器的应用	163
6.6	红外传感器	164
6.6.1	红外辐射	165
6.6.2	红外探测器	165
6.7	电荷耦合器件	166
6.7.1	电荷耦合器件的结构和工作原理	166
6.7.2	CCD 图像传感器的结构	168
6.7.3	图像传感器的应用	169
6.8	习题	170
第7章 传感器的共性关键技术		171
7.1	传感器的构成方法	171
7.1.1	基本型	171
7.1.2	电路参数型	172
7.1.3	多级变换型	172
7.1.4	参比补偿型	172
7.1.5	差动结构型	174
7.1.6	反馈型	174
7.2	传感器的信号获取方式	174
7.2.1	固定方式	175
7.2.2	补偿方式	175
7.2.3	差动方式	176
7.2.4	滤波方式	176
7.2.5	同步方式	177
7.3	提高传感器性能的若干技术途径	177
7.3.1	合理选择结构、材料与参数	177
7.3.2	采用线性化技术	177

7.3.3	采用差动对称结构	177
7.3.4	采用零位法、微差法与闭环技术	178
7.3.5	采用多信号测量法	178
7.3.6	集成化与智能化	181
7.4	传感器系统温度漂移的硬件补偿	181
7.4.1	温度补偿的必要性	181
7.4.2	温度补偿原理	182
7.4.3	传感器温度补偿举例	184
7.5	采用数字化技术改进传感器系统的性能	187
7.5.1	传感器非线性特性的数字化校正	187
7.5.2	传感器的自校准	189
7.5.3	传感器系统温度漂移的自补偿	194
7.5.4	系统误差的数字化修正	197
7.6	传感器系统抗干扰技术	201
7.6.1	干扰的类型及产生	201
7.6.2	噪声耦合方式	203
7.6.3	主要抗干扰措施	208
7.6.4	传感器系统抗干扰技术的综合应用	213
7.7	测量不确定度评定	223
7.7.1	测量不确定度的定义及与测量误差的比较	224
7.7.2	不确定度的评定	224
7.7.3	测量结果的表示和处理方法	227
7.8	习题	230
第8章	自动检测系统设计	232
8.1	自动检测系统的设计原则与步骤	232
8.1.1	自动检测系统的设计原则	232
8.1.2	自动检测系统的设计步骤	233
8.2	传感器的合理选用	234
8.2.1	确定传感器的类型	234
8.2.2	线性范围和量程	234
8.2.3	灵敏度的选择	234
8.2.4	精度	234
8.2.5	频率响应特性	234
8.2.6	稳定性	235
8.3	自动检测系统的性能估计	235
8.3.1	检测系统分辨率与量程的预估	235
8.3.2	动态性能的预估	236
8.3.3	静态性能的预估	237
8.4	在线微量水分测量系统设计	239

8.4.1	系统总体设计	239
8.4.2	传感器选用	240
8.4.3	信号调理电路设计	240
8.4.4	微量水分测量系统的软件设计	242
8.5	啤酒瓶残留清洗液在线检测系统设计	242
8.5.1	设计任务	242
8.5.2	设计任务难点分析	243
8.5.3	检测原理研究	243
8.5.4	检测系统设计	246
8.5.5	数字处理单元设计	252
8.6	空气压缩机的曲轴工作应力测试	253
8.6.1	曲轴材料性能及测点布置	254
8.6.2	应变计与测试仪的选用	255
8.6.3	测试	255
8.6.4	数据处理	256
8.6.5	误差分析	258
8.7	习题	258
	参考文献	260

第1章 自动检测技术的基本概念

本章将阐述自动检测技术的地位与作用,自动检测系统的基本组成;传感器的分类与命名方法;测量方法分类;传感器的动静态特性及动静态性能指标体系;误差理论的基础知识。本章内容是全书的基础。

1.1 自动检测技术概述

1.1.1 自动检测技术在自动化专业中的地位与作用

根据国际通用计量学基本名词定义,测量(measurement)是以确定量值(value of a quantity)为目的的一种操作。这种操作就是测量中的比较过程——将被测参数(measurand)的量值与作为单位的标准量进行比较,通过比较得出的倍数即为测量结果。

与测量相近的概念是检验,它常常只需分辨出被测参数的量值是否归属某一范围带,从而判别被测参数是否合格、现象是否存在等。

检测包含了测量与检验两方面的内容。在自动化领域中,需要对某些重要参数进行实时、自动的测量、检验。这类无需手工操作而自动完成的检测,称为自动检测。自动检测技术的核心是如何将各种非电量转换为电信号,通过对该电信号的测量来检测原非电量,因此自动检测技术又常称为非电量检测技术。

本教材是为自动化类专业的学生编写。下面以啤酒生产过程为例,说明自动化类专业在现代化工业生产过程中的地位与作用以及自动检测技术在自动化类专业中的地位与作用。

要酿造啤酒,首先应该具备啤酒酿造工艺方面的技术,例如酿造啤酒需要哪些原料?这些原料要经过哪些处理过程才能形成啤酒?在这些处理过程中对有关物理、化学参数有哪些具体要求等,这是啤酒工艺人员的任务。

在确定啤酒酿造工艺后,下一步就需要设计、制造或购买能够实现所需工艺的生产设备,这是啤酒设备人员的任务。

在生产工艺、生产设备明确之后,自动化类专业的技术人员开始工作了。对自动化类专业的技术人员而言,生产工艺对各种物理、化学、生物参数的具体要求,就是控制目标;实现生产工艺的主要生产设备,例如糖化罐、发酵罐就是被控对象;生产设备上的调整机构,例如电动阀门,就是执行元件。自动化类专业人员的任务就是设计一个自动控制系统,在该系统中,执行元件接受控制器的指令,自动运行,调整阀门开启程度,从而控制过热蒸汽或冷媒的流量,实现糖化体系或发酵液的温度控制。

那么,控制器又是依据什么信息来发出控制指令的呢?自动控制原理告诉我们,要控制某一物理量,就需要引入该量的负反馈。现在被控制的物理量是温度,因此需要引入温度的负反馈。所谓引入温度的负反馈,就是将温度的理想值与温度的实际值相比较,形成偏差信号送入控制器中,控制器依据偏差信号按一定的控制规律形成控制指令。控制器一般由微型计算机

承担,也可由运算放大器配合适当外围电路形成。前者称为数字控制器,后者称为模拟控制器。控制器的实质是运算器,完成从偏差到控制指令之间的映射运算,运算规律一般为偏差、偏差的微分、偏差的积分三种分量按一定的加权值进行合成,通常称这种控制器为 PID 控制器。具体加权值可以根据自动控制原理的有关知识计算得出,也可以通过一定的工程方法进行现场整定。

无论是数字控制器还是模拟控制器,它们都是电子装置,只能接受电信号,然而温度属于非电信号。因此必须有一个装置,将温度这一非电信号按一一对应的关系转换为电信号。例如,糖化阶段温度的下限为 0°C ,上限为 100°C ,我们可以设计一个装置,该装置可以感受糖化过程的温度,并按一一对应的固定规律输出电信号。当实际温度为 0°C 时,该装置输出 4 mA 直流电流;当实际温度为 100°C 时,该装置输出 20 mA 直流电流; $4\sim 20\text{ mA}$ 的直流电流变化范围按线性规律对应 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围。如当实际温度为 50°C 时,该装置输出 12 mA 直流电流。该装置有“传感器”、“测量装置”、“变送器”、“检测装置”等多种称谓,属于本课程——“自动检测技术”的研究范围。

由此我们得出结论:要对被控对象实施闭环控制,检测装置是必须配置的,它将被控制的参数转换为控制器能够接受的电信号。被控制的参数一般为非电量。

图 1-1 给出了糖化罐温度控制系统方框图。

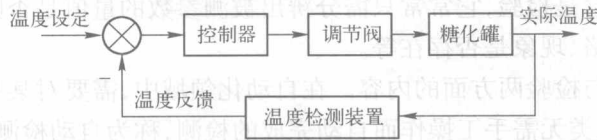


图 1-1 糖化过程温度控制系统框图

从图 1-1 可见,控制器、电动调节阀、糖化罐构成了该闭环系统的前向通道,温度检测装置构成了该闭环系统的反馈通道。

不仅闭环控制系统离不开检测装置,事实上,开环控制系统往往也需要配置检测装置。开环控制系统往往需要人工监控,由操作工根据生产过程的实际运行情况对生产设备作某些人工干预。而“实际运行情况”往往通过某些参数的具体数值来表征。利用检测装置将这些参数转换为电信号,再通过电子装置将这些参数显示出来。

推而广之,现代化的大工业生产都是建立在一系列标准、规范基础上的,这些标准、规范往往也都是通过对相关参数的具体要求来表述的。与开环控制类似,这些参数往往也是通过检测装置将非电量转换为电量来测量、显示的。从这个意义上说,自动检测技术不仅对自动化类专业是不可缺少的专业知识,它对其他工科专业也是非常重要的。

1.1.2 自动检测系统的基本组成

自动检测系统的基本组成框图如图 1-2 所示。

1. 传感器 (sensor)

传感器处于被测对象与检测系统的接口位置,是一个信号变换器。传感器是直接感受规定的被测量并按照一定规律将其转换成可用输



图 1-2 自动检测系统组成框图

出信号的器件或装置,通常由敏感元件和传感元件组成。其中,敏感元件是指传感器中直接感受被测量的部分,传感元件是指能将敏感元件的输出转换为电信号的部分。需要说明的是,并不是所有的传感器都能明显区分敏感元件与传感元件两个部分,有时二者是合二为一的。例如,半导体气体传感器、半导体气体湿度传感器等,它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号,没有中间转换环节。

传感器输出信号有很多形式,如电阻、电感、电容、电压、电流、频率、脉冲等,输出信号的形式由传感器的原理确定。传感器是自动检测系统最重要的组成部件。

2. 测量电路(信号调理器)

测量电路又称信号调理器或中间转换器。它的作用是将传感器的输出信号进行放大、转换、传输等,使其适合于显示、记录、数据处理或控制。例如测量电桥、滤波器、放大器、电压/频率变换器、电压/电流变换器、交流/直流变换器等。

3. 计算机(数据处理装置)

现代检测系统大多含有微型计算机,构成智能检测系统,用于完成数字滤波、误差补偿、线性化、自诊断等各种数据处理功能,提高检测系统的性能。

4. 输出环节

输出环节包含显示装置、打印记录装置、数据通信接口等。

1.1.3 传感器的分类、命名与图形符号

分门别类研究问题是近现代科学技术的基本研究方法。传感器分类方法多种多样,归纳如下:

- 按传感器的结构特点分,可分为结构型传感器、物性型传感器、复合型传感器。
- 按传感器的功能特点分,可分成单功能传感器、多功能传感器、智能传感器。
- 按传感器的输出信号分,可分为模拟传感器、数字传感器。
- 按传感器的能源供给方式分,可分为有源传感器、无源传感器。
- 按被测量所属范畴分,可分为物理量传感器、化学量传感器、生物量传感器。
- 按转换原理分,可分为电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、热电式传感器等。

国家标准制定的传感器分类体系,将传感器分为物理量传感器、化学量传感器以及生物量传感器三大类,下含 12 个小类:力学量传感器、热学量传感器、光学量传感器、磁学量传感器、电学量传感器、声学量传感器、射线传感器(以上属于物理量传感器)、气体传感器、离子传感器、湿度传感器(以上属化学量传感器)以及生化量传感器和生理量传感器(属于生物量传感器)。各小类又分成若干具体品种。根据国标 GB7666 规定,一个传感器的全称应由“主题词 + 四级修饰语”组成,即:

- 主题词——传感器。
- 一级修饰语——被测量,包括修饰被测量的定语。
- 二级修饰语——转换原理,一般可后续以“式”字。
- 三级修饰语——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。
- 四级修饰语——主要技术指标(如量程、精确度、灵敏度范围等)。

示例:“100 mm 应变计式位移传感器”;“100 ~ 160 dB 电容式声压传感器”。

在实际应用中,可根据产品具体情况省略任何一级修饰语。但国家标准规定,传感器作为

商品出售时,第一级修饰语不得省略。

示例:“本公司购进了150只各种测量范围的电感式线位移传感器”(省略了第三、第四级修饰语);“压电式传感器是一种很有发展前途的物性型传感器”(省略了第一、第三、第四级修饰语)。

传感器图用图形符号是电气图用图形符号的一个组成部分。根据GB/T14479—93《传感器图用图形符号》的规定,传感器图用图形符号由符号要素正方形和等边三角形组成,如图1-3所示,图中正方形表示转换元件,三角形表示敏感元件。图1-4给出了一个电容式压力传感器的图用图形符号。



图 1-3 传感器图用图形符号

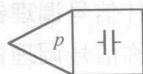


图 1-4 电容式压力传感器的图用图形符号

1.2 测量方法

对测量方法,从不同角度出发有不同的分类结果。按测量手续分类为:直接测量、间接测量、联立测量;按测量方式分类为:偏差式测量、零位式测量、微差式测量;按敏感元件是否与被测介质接触分类为:接触式测量、非接触式测量;按被测量变化快慢分类为:静态测量、动态测量;按测量系统是否向被测对象施加能量分类为:主动式测量、被动式测量;按被测量是否是在生产进行的实际过程中被测分类为:在线测量、离线测量。

1.2.1 直接测量、间接测量、联立测量

在使用测量仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算,就能直接得到测量结果,称为直接测量。例如用弹簧管式压力表测量流体压力、用热敏双金属温度表测量温度就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单、迅速,缺点是难以达到较高测量精度。直接测量方法在工程实践中被广泛应用。

首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,将测量值代入函数关系式,经过计算得到测量所需的结果,这种测量称为间接测量。例如材料电阻率 ρ 的测量就是间接测量:首先经过直接测量得到一段圆柱体材料的电阻值、长度和直径,按电阻定律经计算得到所需要的结果 ρ 值。间接测量可以实现对难以直接测量的被测量的测量,这是其最大优势。相对于直接测量,间接测量过程手续较多,所需时间较长,有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于实验室测量,工程测量中也有应用。

若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,则称这样的测量为联立测量。在进行联立测量时,一般需要改变测试条件,才能获得一组联立方程所需要的数据。联立测量操作手续很复杂,花费时间长,是一种特殊的测量方法,一般只适用于科学实验。例如,需要测量某种绕线电阻的温度系数。已知该电阻可由下式给出

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (1-1)$$

式中 R_t 、 R_{20} 分别为温度为 t 、 20°C 时的电阻值;

α 、 β 分别为待求电阻的两个温度系数。

为测得 α 、 β ,必须测出三个温度值及其所对应的电阻值,得到三个方程,求解联立方程式,

可得 R_{20} 、 α 、 β 。

1.2.2 偏差式测量、零位测量、微差式测量

测量过程中用测量仪表指针的位移(即偏差)决定被测量,这种测量方法称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具不装在仪表内,而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准。它以间接方式实现与标准量的比较,例如用磁电式电流表测电路支路中的电流。偏差式测量法简单、迅速,但由于是间接与标准量进行比较,测量结果精度较低。

零位式测量又称补偿式测量或平衡式测量。测量过程中,用指零仪表的零位指示测量系统的平衡状态,在测量系统达到平衡时,用已知的基准量决定未知量的测量方法,称为零位式测量法。用此方法进行测量时,标准量具设置在仪表内,在测量过程中标准量直接与被测量相比较;测量时,要调整标准量,即进行平衡操作,一直到被测量与标准量相等,即指零仪回零。例如使用天平称重即为零位式测量,其原理是人工调整标准砝码的数量,使砝码重量与重物重量相平衡,由于天平的两个力臂长度相等,因此砝码重量即等于重物重量;再如,使用惠斯登电桥测量电阻值也是零位式测量。惠斯登电桥有4个桥臂,设其阻值分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ,当相对臂阻值乘积相等时,即 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 时,电桥平衡,精密检流计指零。设 R_1 为待测电阻, R_2 、 R_3 是高精度、固定阻值的电阻,且 $R_2 = R_3$, R_4 为可人工调整的精密电阻箱。测量时,人工调整 R_4 ,很显然,当精密检流计指零时, $R_1 = R_4$ 。用零位式测量方法测量的优点是可获得高的测量精度,但由于需要可调的标准量,在测量过程中需要进行标准量的动态调节,致使仪表构成复杂,难以测量快变信号,一般只适用于测量变化缓慢的信号。

微差式测量方法综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点,此方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较,取得差值,然后用偏差法测得此差值。应用此方式测量时,标准量具装在仪表内,该标准量具的值与被测量非常接近。在测量过程中,标准量直接与被测量进行比较,由于两者的值很接近,测量过程中不需调整标准量,而只需测两者的差值。微差式测量法的优点是反应快、精度高,特别适用于自动控制系统中的实时检测。在自动检测技术中得到广泛应用的不平衡电桥,就属于微差式测量方法。后续章节将详细讨论。

1.2.3 接触式测量、非接触式测量

接触检测,指在测量过程中敏感元件与被测介质产生实际物理上的接触。在接触检测过程中,敏感元件或多或少地要对被测量产生一定影响。

非接触检测,是指利用物理、化学及声、光学的原理,使被测对象与敏感元件之间不发生物理上的直接接触而对被测量进行检测的方法。一般而言,非接触测量的快速性优于接触测量。例如,红外线测温的快速性优于热电阻测温。有时,由于生产工艺所限,必须采用非接触检测。例如,啤酒灌装生产线上啤酒灌装前的空瓶裂纹检测、卫生状况检测和灌装后灌装量检测等。

1.3 传感器的一般特性

1.3.1 传感器的静态特性与静态特性指标

为了正确地使用传感器,必须充分地了解传感器的特性。传感器的输出—输入关系特性是传感器的基本特性。传感器的各种性能指标都是根据传感器输出和输入的对对应关系进行描

述的。输出—输入特性是传感器的外部特性,但却是由其内部结构、参数决定的。不同的传感器有不同的内部结构、参数,因而有不同的输出—输入特性。

传感器所测量的物理量(输入信号)有两种形式:一种是静态(或准静态)的形式,这种信号不随时间变化(或变化很缓慢,在观测时间内可忽略其变化);另一种是动态形式,这种信号随时间变化而变化。因此检测过程被分为静态检测和动态检测,相应其输出—输入特性分为静态特性和动态特性。

在研究传感器特性时,无论是静态还是动态,都必须用一定的数学表达式来表示输出和输入的关系。静态检测时,描述传感器静态特性的是一个代数方程,可表示为下列函数关系

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

传感器的静态特性又称为刻度方程,是在静态标准条件下进行校准和标定的。静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击;环境温度一般在室温 20 ~ 25℃;相对湿度不大于 85%;大气压力为 10 ± 18 kPa 的情况。在这种标准条件下,利用一定等级的标准设备,对传感器进行往复循环测试,而实际静态特性就是传感器对应各测试点的输出值的算术平均值的连线。

下面阐述衡量传感器静态特性优劣的指标体系。

1. 测量范围(measuring range)和量程(span)

传感器所能测量的被测量的最大数值称为测量上限,被测量的最小数值则称为测量下限。用测量下限和测量上限表示的区间,则称为测量范围。

测量范围有单向(只有正向或负向)、双向对称、双向不对称、无零值等多种情况。

测量上限和测量下限的差值称为量程。以力传感器为例,若测量范围为 0 ~ +10 N,则量程为 10 N;测量范围为 -10 ~ +10 N,则量程为 20 N。

2. 灵敏度(sensitivity)

灵敏度 S 表示传感器输出量的增量 Δy 与相应的输入量增量 Δx 之比。它是传感器在静态输出—输入特性曲线上各点的斜率,可用下式表示

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} \quad (1-3)$$

灵敏度表示单位被测量的变化所引起传感器输出值的变化量。很显然,灵敏度属于越大越好的指标。

非线性传感器各处的灵敏度是不相同的。对于线性传感器,其灵敏度为

$$S = \frac{y - y_0}{x - x_0} \quad (1-4)$$

图 1-5a 和图 1-5b 为上述两种情况下灵敏度的图解表示。

一般,人们希望传感器的灵敏度在整个测量范围内保持恒定。灵敏度是一个有单位的量。当我们讨论某一传感器的灵敏度时,必须确切地说明它的单位。例如,某传感器的压力灵敏度的单位是 mV/Pa,即每 Pa 压力引起多少 mV 电压输出。

3. 阈值(threshold value)与分辨力(resolution)

有时,输入量开始变化,但输出量并不随之相应变化,而是输入量变化到某一程度时输出

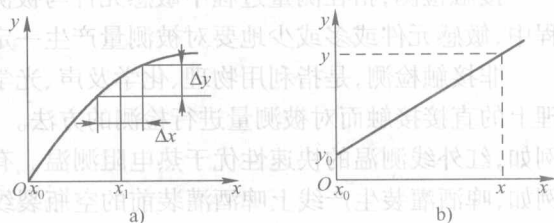


图 1-5 灵敏度定义的图解表示