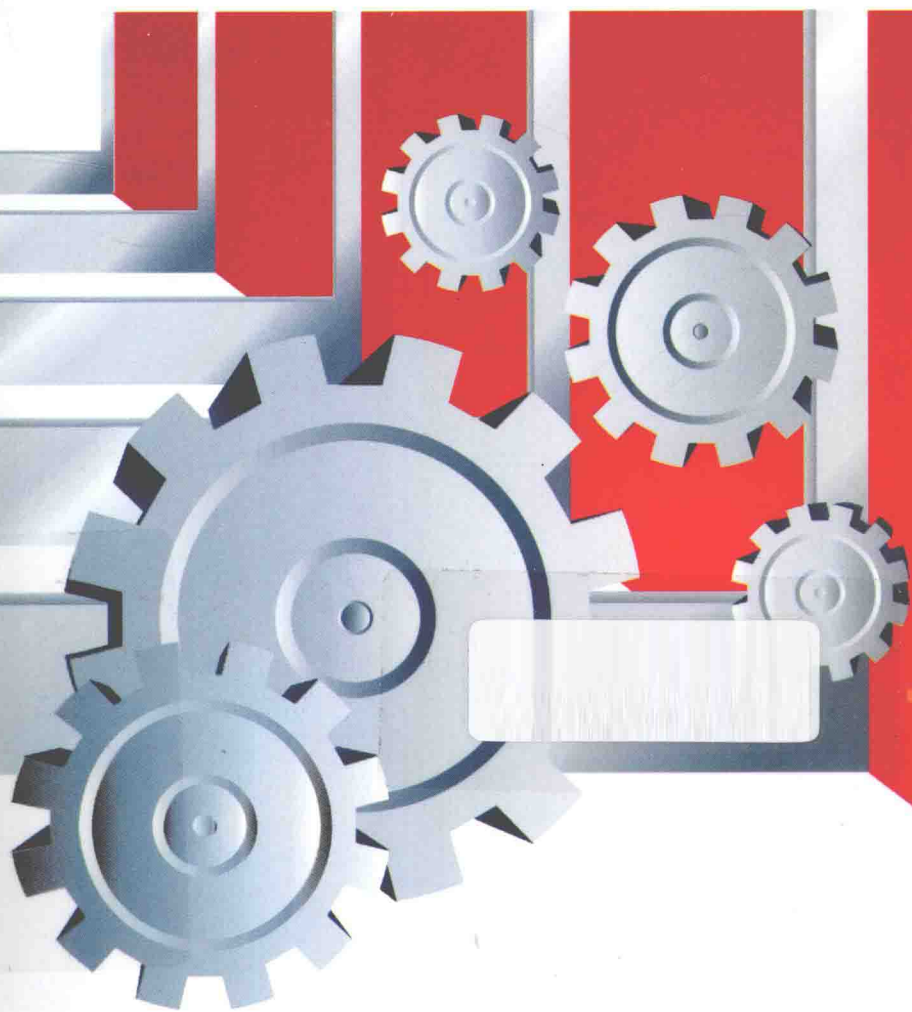


高职高专机电类专业“十二五”规划教材

# 传感器技术及应用

主编 陈艳红



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高职高专机电类专业“十二五”规划教材

# 传感器技术及应用

主 编 陈艳红  
副主编 宋 娟 刘自范 林吉靓  
参 编 曹红英 邵明进 张听雨  
主 审 刘德平

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书是依据高等职业教育“淡化理论，够用为度，培养技能，重在应用”的原则组织编写的。

本书以传感器的应用技术为主线安排内容。全书共12章。第1章介绍传感器的基础知识、基本概念，第2章至第11章分别介绍应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、霍尔式传感器、光电式传感器、热电式传感器、数字式传感器、化学传感器和新型传感器的工作原理、特性、测量电路及典型应用，第12章介绍现代检测系统、检测技术的综合应用及检测系统的抗干扰技术。本书还设有技能训练项目，可帮助读者在理论学习后进行操作技能训练。

本书可作为高职高专院校机电一体化技术、电气自动化技术、电子信息工程技术、应用电子技术等专业及相近专业的教材，也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及应用/陈艳红主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2013.8

高职高专机电类专业“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3097 - 7

I. ①传… II. ①陈… III. ①传感器—高等教育—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 176566 号

策 划 秦志峰

责任编辑 王 瑛 秦志峰

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

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 15.5

字 数 365千字

印 数 1~3000册

定 价 27.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3097 - 7/TP

**XDUP 3389001 - 1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

# 前 言

作为现代信息技术的三大核心技术之一的传感器技术，是人类探知自然界信息的“触觉延伸”，它为人们认识和控制相应的对象提供了条件和依据，已成为 21 世纪世界各国在高新技术发展方向争夺的一个重要领域。近年来，传感器技术以信息的获取、转换、显示和处理为主要内容，已发展成为一门完整的技术科学，在促进生产力发展和科技进步的广阔领域内发挥着重要作用。

“传感器技术及应用”是高职高专院校机电一体化技术、电气自动化技术、电子信息工程技术、应用电子技术等专业及相近专业的一门职业能力主干课程，也是上述专业后续的综合实训、职业资格证书取证、毕业设计、顶岗实习等基本技能养成课程，是学生职业素质养成与职业能力培养最基本的理论实践一体化课程。该课程是一门多学科交叉的专业课程，重点介绍各种传感器的工作原理和特性，结合工程应用实际，使学生了解传感器在各种电量和非电量检测系统中的应用，培养学生使用各类传感器的技巧和能力，掌握常用传感器的工程测量设计方法和实验研究方法，了解传感器技术的发展动向。

近几年，我国的高职高专教育蓬勃发展，已占领了高等教育的半壁江山。目前的高职高专传感器应用技术类教材大多是本科教材的压缩版，其内容偏重于传感器的理论分析和设计，过于强调知识的完整性，已不适应高职高专教育的需要。高等职业教育强调技能培养，在教学内容中注重应用性，重在培养学生选择和维护各种传感器的能力。而且由于高职高专学生的数理基础较为薄弱，对现有的传感器技术类教材中偏重理论性的分析和公式推导难以理解和接受。因此，编写适用性较强的高职高专传感器技术类教材已成为当务之急。这类教材应充分体现高等职业教育的以岗位核心能力为导向，遵循工学结合的高职教育理念，既保证学生基础知识的学习，又能使学生具有较强的职业能力。

本书主要针对高职高专学生的特点和高职高专教育的特色，在充分考虑各工科专业的不同需求的基础上编写而成。本书的特色如下：

(1) 充分研究高职高专学生的特点及知识结构、教学规律和培养目标等内容，吸取国内高职院校在教学改革、教材建设等方面取得的经验，以职业技能培养为目标，精选教学内容，将教材重点从“传感器理论分析、设计和制造工艺”转向“传感器的工程应用”，即实现非电量检测。内容的选取充分考虑到我国目前工业生产中检测与控制的

要求以及传感器的最新应用情况,简要阐述传感器的基本原理,重点研究传感器的工程应用。

(2) 主要着眼点在于将理论与实践一体化,在介绍理论知识的同时,嵌入实际操作训练,以培养学生的工程应用能力。为此,本书在内容上压缩了大量的理论推导,对一些涉及传感器理论的公式,只是直接引用,不进行深奥的理论分析和繁琐的公式推导;在给出相关的、必要的基础理论知识的同时,增加技能训练和应用性内容;依据传感器出现的先后顺序,共设计了19个训练项目,其中11个为验证性基础训练,9个为自主设计性拓展训练,旨在培养学生解决实际问题的能力。

(3) 注重近年来传感器领域的理论和技术的发展,有选择地将部分新理论、新方法和新技术编入其中。

(4) 充分考虑教材的立体化配套,根据教材内容、特点和教学需要,为教材配备电子教案及课后练习参考答案(见西安电子科技大学出版社网站),便于教师进行电化教学和学生参考。

本书由开封大学陈艳红担任主编,河南机电高等专科学校宋娟、中原工学院刘自范、开封大学林吉靓担任副主编,开封大学曹红英、开封仪表有限公司邵明进、张听雨参加编写。编写分工如下:陈艳红编写第2章、第8章、第9章,宋娟编写第5章、第12章,刘自范编写第10章、第11章,林吉靓编写第3章、第7章,曹红英编写第4章、附录,邵明进编写第1章,张听雨编写第6章。全书由陈艳红统稿。郑州大学刘德平教授审阅了本书,并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

本书在编写过程中得到了有关专家及兄弟院校的大力支持和帮助,部分内容参考了书后所列的参考文献,在此谨向所有给予帮助的同志和所列参考文献的作者深表谢意。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位专家和广大读者批评指正。

编者

2013年3月

# 目 录

<b>第 1 章 检测与传感技术基础</b> .....	1	思考题与习题 .....	35
1.1 检测技术基础 .....	1	基础训练 箔式应变片的性能和三种电桥 电路比较 .....	36
1.1.1 检测技术的概念与作用 .....	1	拓展训练 数字血压计的设计 .....	39
1.1.2 检测系统的基本组成 .....	2		
1.1.3 检测技术的发展趋势 .....	3		
1.2 测量概论 .....	4	<b>第 3 章 电感式传感器</b> .....	40
1.2.1 测量方法 .....	4	3.1 自感式传感器 .....	40
1.2.2 测量系统 .....	7	3.1.1 自感式传感器的工作原理 .....	40
1.2.3 测量误差 .....	8	3.1.2 自感式传感器的测量电路 .....	42
1.3 传感器技术基础 .....	12	3.1.3 自感式传感器的应用 .....	43
1.3.1 传感器的组成 .....	12	3.2 差动变压器式传感器 .....	44
1.3.2 传感器的分类 .....	12	3.2.1 差动变压器式传感器的 工作原理 .....	44
1.3.3 传感器的静态特性 .....	13	3.2.2 差动变压器式传感器的 测量电路 .....	45
1.3.4 传感器的选用原则 .....	17	3.2.3 差动变压器式传感器的应用 .....	46
本章小结 .....	18	3.3 电涡流式传感器 .....	46
思考题与习题 .....	18	3.3.1 电涡流式传感器的工作原理 .....	46
		3.3.2 电涡流式传感器的结构 .....	47
<b>第 2 章 应变式传感器</b> .....	20	3.3.3 电涡流式传感器的测量电路 .....	48
2.1 应变片的工作原理 .....	20	3.3.4 电涡流式传感器的应用 .....	49
2.2 应变片的种类、材料及粘贴 .....	22	本章小结 .....	51
2.2.1 金属电阻应变片的种类 .....	22	思考题与习题 .....	51
2.2.2 金属电阻应变片的材料 .....	23	基础训练 差动变压器式传感器的性能 测试与标定 .....	52
2.2.3 金属电阻应变片的粘贴 .....	24	拓展训练 电感式传感器在滚珠直径 分选中的应用 .....	54
2.2.4 应变片的温度误差及补偿 .....	25		
2.3 电阻应变片的测量电路 .....	27		
2.3.1 直流电桥 .....	27	<b>第 4 章 电容式传感器</b> .....	55
2.3.2 交流电桥 .....	30	4.1 电容式传感器的工作原理和结构 .....	55
2.4 应变式传感器的应用 .....	31	4.1.1 变极距型电容式传感器 .....	56
2.4.1 柱(筒)式力传感器 .....	31	4.1.2 变面积型电容式传感器 .....	57
2.4.2 应变式压力传感器 .....	32	4.1.3 变介电型电容式传感器 .....	58
2.4.3 应变式容器内液体重量传感器 .....	33	4.2 电容式传感器的测量电路 .....	60
2.4.4 应变式加速度传感器 .....	34	4.2.1 调频电路 .....	60
2.4.5 半导体力敏应变片在电子皮带秤 上的应用 .....	34		
本章小结 .....	35		

4.2.2 运算放大器式电路	61	6.2.3 金属计数器	89
4.2.3 二极管双 T 形交流电桥电路	61	6.2.4 霍尔式接近开关的应用	89
4.2.4 环形二极管充放电法电容 测量电路	62	本章小结	89
4.2.5 脉冲宽度调制电路	63	思考题与习题	90
4.3 电容式传感器的应用	65	基础训练 霍尔式传感器的性能测试 与标定	90
4.3.1 电容式油量表	65	拓展训练 油、气管道无损探伤系统的 设计	92
4.3.2 电容液位计	66		
4.3.3 差动电容式测厚传感器	66		
4.3.4 电容接近开关	67	<b>第 7 章 光电式传感器</b>	93
本章小结	68	7.1 光电效应	93
思考题与习题	68	7.1.1 外光电效应	93
基础训练 电容式传感器的性能测试	69	7.1.2 内光电效应	93
拓展训练 工业生产料位测量方案的设计	70	7.2 光电元件的原理与特性	94
		7.2.1 外光电元件的原理与特性	94
<b>第 5 章 压电式传感器</b>	71	7.2.2 内光电元件的原理与特性	97
5.1 压电效应及压电材料	71	7.3 光电式传感器的应用	103
5.1.1 压电效应	71	7.3.1 火焰探测报警器	103
5.1.2 压电材料	71	7.3.2 光电式纬线探测器	103
5.1.3 石英晶体	72	7.3.3 燃气器具中的脉冲点火控制器	104
5.1.4 压电陶瓷(多晶体)	74	7.3.4 烟尘浊度检测仪	105
5.2 压电式传感器和测量电路	74	7.3.5 路灯自动控制器	105
5.2.1 压电式传感器	74	7.4 光电开关与应用	106
5.2.2 压电式传感器的等效电路	75	7.4.1 光电开关	106
5.2.3 测量电路	76	7.4.2 光电开关的应用	107
5.3 压电式传感器的应用	78	本章小结	107
5.3.1 压电式测力传感器	78	思考题与习题	107
5.3.2 压电式加速度传感器	79	基础训练 光电式传感器测转速	108
5.3.3 压电式金属加工切削力测量	79	拓展训练 手机生产线表面安装元件定位 检测与控制系统设计	109
5.3.4 报警器电路	80		
本章小结	80		
思考题与习题	81	<b>第 8 章 热电式传感器</b>	110
基础训练 压电式加速度计的性能测试	81	8.1 热电偶	110
拓展训练 压电式传感器在汽车中的应用	83	8.1.1 热电效应和热电偶测温原理	110
		8.1.2 热电偶的基本定律	112
<b>第 6 章 霍尔式传感器</b>	84	8.1.3 热电偶类型和热电偶材料	113
6.1 霍尔效应及霍尔元件	84	8.1.4 热电偶的结构形式	115
6.1.1 霍尔效应	84	8.1.5 热电偶的补偿导线及冷端温度的 补偿方法	116
6.1.2 霍尔元件的基本结构	85	8.1.6 热电偶测温线路	119
6.1.3 霍尔元件的基本特性	86	8.1.7 热电偶的选择和安装	121
6.2 霍尔式传感器的应用	87	8.2 热电阻传感器	122
6.2.1 霍尔式微量位移的测量	87	8.2.1 常用热电阻	122
6.2.2 霍尔元件在转速测量上的应用	88		

8.2.2 热电阻的结构和测量电路 .....	124	10.2.1 氯化锂湿敏电阻 .....	163
8.3 热敏电阻 .....	125	10.2.2 半导体陶瓷湿敏电阻 .....	164
8.3.1 热敏电阻的工作原理 .....	125	10.2.3 湿敏传感器的应用 .....	167
8.3.2 热敏电阻的分类 .....	125	本章小结 .....	170
8.3.3 热敏电阻的结构及参数 .....	126	思考题与习题 .....	170
8.3.4 热敏电阻传感器的测温与 温度控制 .....	128	基础训练 湿敏电阻的性能测试 .....	171
8.4 PN 结温度传感器 .....	129	拓展训练 防止酒后开车控制器的设计 .....	172
8.4.1 PN 结温度传感器的工作原理 .....	130	<b>第 11 章 新型传感器</b> .....	173
8.4.2 PN 结温度传感器的应用 .....	130	11.1 光纤传感器 .....	173
本章小结 .....	131	11.1.1 光纤的结构 .....	173
思考题与习题 .....	132	11.1.2 光纤传感器的类型、调制原理 与特点 .....	174
基础训练 热电阻式传感器测温 .....	132	11.1.3 光纤传感器的应用 .....	177
拓展训练 火灾探测报警系统的设计 .....	134	11.2 超声波传感器 .....	178
<b>第 9 章 数字式传感器</b> .....	135	11.2.1 超声波传感器的工作原理 与结构 .....	178
9.1 光栅传感器 .....	135	11.2.2 超声波传感器的应用 .....	181
9.1.1 光栅的结构 .....	135	11.3 红外传感器 .....	184
9.1.2 光栅的工作原理 .....	136	11.3.1 红外辐射 .....	184
9.1.3 光栅数显表 .....	138	11.3.2 红外传感器的类型与原理 .....	185
9.1.4 光栅传感器的应用 .....	140	11.3.3 红外传感器的应用 .....	186
9.2 编码器 .....	141	11.4 核辐射传感器 .....	189
9.2.1 增量式编码器 .....	141	11.4.1 核辐射及其性质 .....	189
9.2.2 绝对式编码器 .....	143	11.4.2 核辐射探测器 .....	190
9.2.3 编码器的应用 .....	144	11.4.3 核辐射传感器的应用 .....	193
9.3 旋转变压器 .....	145	本章小结 .....	194
9.3.1 旋转变压器的工作原理 .....	146	思考题与习题 .....	195
9.3.2 旋转变压器的应用 .....	146	基础训练 光纤传感器测位移 .....	195
9.4 感应同步器 .....	148	拓展训练 入侵探测报警系统的设计 .....	196
9.4.1 感应同步器的结构与特点 .....	148	<b>第 12 章 检测技术的综合应用</b> .....	198
9.4.2 感应同步器的工作原理 .....	149	12.1 现代检测技术 .....	198
9.4.3 信号处理方式 .....	150	12.1.1 现代检测系统的基本结构 .....	198
9.4.4 感应同步器位移测量系统 .....	151	12.1.2 计算机检测系统 .....	199
本章小结 .....	152	12.1.3 现代检测技术的应用 .....	200
思考题与习题 .....	153	12.2 检测技术的综合应用实例 .....	202
基础训练 光栅位移传感器的使用 .....	153	12.2.1 传感器在现代汽车中的应用 .....	202
<b>第 10 章 化学传感器</b> .....	157	12.2.2 传感器在机器人中的应用 .....	209
10.1 气敏传感器 .....	157	12.2.3 检测技术在数控机床上的 应用 .....	215
10.1.1 气敏传感器的分类及原理 .....	157	12.2.4 传感器在智能楼宇中的应用 .....	219
10.1.2 气敏传感器的主要要求 .....	160	12.3 检测系统的抗干扰技术 .....	227
10.1.3 气敏传感器的应用 .....	160		
10.2 湿敏传感器 .....	163		



12.3.1 干扰源 .....	228	附录 A 常用传感器的性能及选择 .....	235
12.3.2 干扰的作用方式 .....	228	附录 B 工业热电阻分度表 .....	237
12.3.3 干扰的抑制方法 .....	229	附录 C 工业热电偶分度表 .....	238
本章小结 .....	231	参考文献 .....	240
思考题与习题 .....	231		
基础训练 自动测温系统 .....	231		

# 第1章 检测与传感技术基础

## 学习目标

(1) 了解检测技术的定义和内容,掌握测量的基本概念和测量方法,掌握测量误差的表示方法和分类。

(2) 掌握传感器的定义、组成和分类,了解传感器的静态特性和选用原则。

## 1.1 检测技术基础

### 1.1.1 检测技术的概念与作用

检测技术是人们为了对被测对象所包含的信息进行定性了解和定量掌握所采取的一系列技术措施,它是产品检验和质量控制的重要手段。人们十分熟悉借助于检测工具对产品进行质量评价,这是检测技术最重要的应用领域。另外,新型检测技术的不断发展和成熟,使得它在大型设备的安全经济运行和检测中得到了越来越广泛的应用。例如,电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备,通常都在高温、高压、高速和大功率状态下运行,保证这些关键设备的运行具有十分重要的意义。因此,通常设置故障检测系统对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态检测,以便及时发现异常情况,加强故障预防,达到早期诊断的目的。这样做可以避免突发严重的事故,保证设备和人员的安全,提高经济效益。随着计算机技术的发展,这类检测系统已经发展成故障自诊断系统,即采用计算机来处理检测信息,进行分析、判断,及时诊断出故障并自动报警或采取相应的对策。

检测技术也是自动化系统中不可缺少的组成部分。任何生产过程都可以看做是由物流和信息流组合而成的,反映物流的数量、状态和趋向的信息流则是管理和控制物流的依据。为了有目的地进行控制,首先必须通过检测获取有关信息,然后才能进行分析、判断,以便实现自动控制。因此,自动检测技术与转换是自动化技术中不可缺少的组成部分。

检测技术的发展和完善推动着现代科学技术的进步。人们在自然科学各个领域内从事的研究工作,一般是利用已知的规律对实验的结果进行概括、推理,从而对所研究的对象取得定量的概念,并发现它的规律性,然后上升到理论。因此,现代检测手段所达到的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平越高,提供的信息越丰富、越可靠,科学研究取得突破性进展的可能性就越大。从另一方面看,现代化生产和

科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求和课题，成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中，也有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系，使它成为一门十分活跃的技术学科，几乎渗透到了人类的一切活动领域，发挥着越来越重要的作用。表 1-1 为工业检测涉及的内容。

表 1-1 工业检测涉及的内容

被测量类型	被测量	被测量类型	被测量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力(压强)、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面	物体的性质和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量(重量)	状态量	工作机械的运动状态(启停等)、生产设备的异常状态(超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等)
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性能

### 1.1.2 检测系统的基本组成

一个完整的检测系统或装置通常是由传感器、信号调理电路和显示器等几部分组成的，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。当然，其中还包括电源和传输通道等不可缺少的部分。图 1-1 所示为检测系统组成框图。

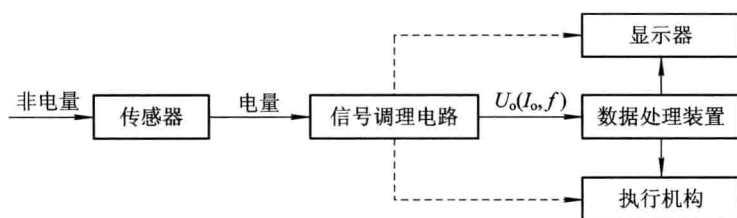


图 1-1 检测系统组成框图

#### 1. 传感器

传感器是把被测量转换成电化学量的装置。显然，传感器是检测系统与被检测对象直接发生联系的部件，是检测系统最重要的环节。检测系统获取信息的质量往往是由传感器的性能决定的，因为检测系统的其他环节无法添加新的检测信息，并且不易消除传感器所引入的误差。传感器通常以电信号的形式输出，以便传输、转换、处理和显示。输出电量的形式多种多样，如电压、电流等。输出信号的形式一般由传感器的原理确定。

#### 2. 信号调理电路

信号调理电路包括放大(衰减)电路、滤波电路、隔离电路等。其中，放大电路的作用

是把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的电压、电流或频率信号等，以推动后级的显示器、数据处理装置及执行机构。

### 3. 显示器

显示器是检测人员和监测系统联系的主要环节，其主要作用是使人们了解被测量的大小或变化的过程。

目前常用的显示记录装置有四类：模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。

模拟显示是利用指针对标尺的相对位置来表示读数的，常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等。

数字显示目前多采用发光二极管(LED)和液晶显示器(LCD)等，以数字的形式来显示读数。前者亮度高、耐震动、可适应较宽的温度范围；后者耗电省、集成度高。目前还研制出了带背光板的LCD，便于在夜间观看LCD的内容。

图像显示以CRT或点阵LCD来显示读数或被测参数的变化曲线、图表或彩色图等，以反映整个生产线上的多组数据。

记录仪主要用来记录被检测对象的动态变化过程。常用的记录仪有笔式记录仪、高速打印机、绘图仪、数字存储示波器、磁带记录仪、无纸记录仪等。

### 4. 数据处理装置

数据处理装置用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断、线性变换，对动态测试结果作频谱分析(幅值谱分析、功率谱分析)、相关分析等。完成这些工作必须采用计算机技术。

### 5. 执行机构

执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等，它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电器设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号，作为自动控制系统的控制信号，去驱动这些执行机构。

## 1.1.3 检测技术的发展趋势

科学技术的迅猛发展，为检测技术的现代化创造了条件，具体表现在以下两个方面：

(1) 人们研究新原理、新材料和新工艺所取得的成果，将产生更多品质优良的新型传感器，如光纤传感器、液晶传感器、以高分子有机材料为敏感元件的压敏传感器、微生物传感器等。

另外，代替视觉、嗅觉、味觉和听觉的各种仿生传感器及检测超高温、超高压、超低温和超高真空等极端参数的新型传感器将是今后传感器技术研究和发展的方向。新型传感器技术除了采用新原理、新材料和新工艺之外，还向着高精度、小型化和集成化的方向发展。传感器集成化的一个方向是具有同样功能的传感器集成化，从而使对一个点的测量变成对一个平面和空间的测量；另一个方向是不同功能的传感器集成化，从而使一个传感器可以同时测量不同种类的多个参数，如测量血液中各种成分的多功能传感器。除了传感器自身的集成化之外，还可以把传感器和后续电路集成化。传感器和集成电路的集成化可以减少干扰，提高灵敏度，方便使用。如果将传感器和数据处理电路集成在一起，则可以方便地实现实时数据处理。

(2) 检测系统或检测装置目前正迅速地由模拟式、数字式向智能化方向发展。带有微处理器的各种智能化仪表已经出现,这类仪表选用微处理器作为控制单元,利用计算机可编程的特点,使仪表内的各个环节自动地协调工作,并且具有数据处理和故障诊断功能,形成新一代崭新仪表,把检测技术自动化推进到一个新的水平。

## 1.2 测量概论

### 1.2.1 测量方法

测量是在有关理论的指导下,用专门的仪器或设备,通过实验和必要的数据处理,求得被测量的值的过程。在工业生产中,测量的目的是在限定的时间内,尽可能准确地收集被测对象的未知信息,以便掌握被测对象的参数,进而控制生产过程,例如电厂中对锅炉水位的检测,钢厂中对热风炉风温的检测等。

测量方法的正确与否直接关系到测量工作是否能正常运行,能否符合规定的技术要求。因此,必须根据不同测量任务的要求,找出切实可行的测量方法,然后根据测量方法选择合适的测量工具,组成测量装置,进行实际测量。如果测量方法不合理,即使有高级精密的测量仪器和设备,也不能得到理想的测量结果。

测量方法的分类多种多样。例如:按在测量过程中被测量是否随时间变化,可分为静态测量和动态测量;按测量手段的不同,可分为直接测量、间接测量和组合测量;按测量方式的不同,可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量等。除了上述分类外,还有另外一些分类方法。例如:按测量敏感元件是否与被测介质接触,可分为接触式测量和非接触式测量;按测量系统是否向被测对象施加能量,可分为主动式测量和被动式测量;按测量性质的不同,可分为时域测量、频率测量、数据测量和随机测量等。

#### 1. 直接测量、间接测量和组合测量

##### 1) 直接测量

用按已知标准标定好的测量仪器,对某一未知量直接进行测量,得出未知量的值,这类测量称为直接测量。例如,用弹簧压力表测压力,用磁电式电表测量电压或电流等都属于直接测量。

直接测量并不意味着就是用直读式仪表进行测量,许多比较式仪器如电桥、电位差计等,虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量的值,但因参与测量的对象就是被测量本身,所以仍属于直接测量。

直接测量的优点是测量过程简单且迅速,是工程技术中采用较为广泛的测量方法。

##### 2) 间接测量

对几个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后通过已知函数关系的公式、曲线或表格,求出该未知量,这类测量称为间接测量。例如,在直流电路中测出负载的电流  $I$  和电压  $U$ ,根据功率  $P=IU$  的函数关系,便可求得负载消耗的电功率,这属于间接测量。

间接测量方法操作较麻烦,花费时间也较多,一般在直接测量很不方便、误差较大及缺乏直接测量的仪器等情况下采用。这类方法多用在实验室,工程中有时也用。

### 3) 组合测量

在测量中,使各个未知量以不同的组合形式出现(或改变测量条件来获得这种不同的组合),根据直接测量和间接测量所得到的数据,通过解一组联立方程而求出未知量的数值,这类测量称为组合测量,又称联立测量。组合测量中,未知量与被测量存在已知的函数关系(表现为方程组)。

例如,为了测量电阻的温度系数,可利用电阻值与温度间的关系公式,即

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

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ ——电阻温度系数;

$R_{20}$ ——电阻在  $20^\circ\text{C}$  时的阻值;

$t$ ——测试时的温度。

为了测出电阻的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $R_{20}$  的值,采用改变测试温度的方法,在 3 种温度  $t_1$ 、 $t_2$  及  $t_3$  下,分别测出对应的电阻值  $R_{t_1}$ 、 $R_{t_2}$  及  $R_{t_3}$ ,代入式(1-1),得到一组联立方程,解此方程后便可求得  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $R_{20}$ 。

组合测量的测量过程比较复杂,费时较多,但易达到较高的精度,因此被认为是一种特殊的精密测量方法,一般适用于科学实验和特殊场合。

## 2. 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

### 1) 偏差式测量

在测量过程中,用仪表指针相对于刻度线的位移(偏差)来直接表示被测量,这类测量称为偏差式测量。偏差式测量的测量过程比较简单、迅速,但测量精确度较低,被广泛应用于工程测量。

如图 1-2 所示的压力表就是偏差式测量仪表。由于被测介质压力作用使弹簧变形,产生一个弹簧反作用力,当被测介质压力产生的作用力与弹簧变形反作用力相平衡时,活塞达到平衡,这时指针偏移在标尺所对应的刻度值,就表示被测介质压力值。显然,压力表的指示精度取决于弹簧质量及刻度校准情况。由于弹簧变形力不是力的标准量,必须用标准重量校准弹簧,因此这类仪表的精确度不高于 0.5%。

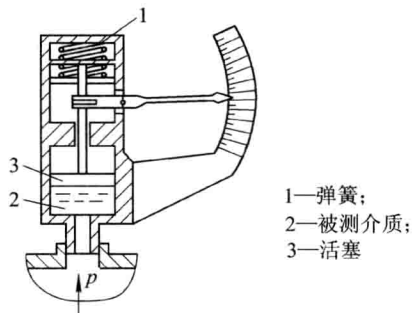


图 1-2 压力表

### 2) 零位式测量

零位式测量(又称补偿式或平衡式测量)是在测量过程中,用指零仪表的零位指示来检测测量系统是否处于平衡状态,当测量系统达到平衡时,用已知的基准量决定被测未知量的量值。例如,用电位差计测量待测电势就属于零位式测量。

图 1-3 所示为直流电位差计简化等效电路。测量前,先将被测电路断开,在电势  $E$  的

作用下,调节电位器  $R_{W1}$ ,校准回路的工作电流  $I$ ,从而在电位器上可得某一基准电压  $U_R$ 。测量时,调节电位器的活动触点,使检流计  $G$ (作为零示器)回零( $I_g=0$ ),则  $U_R=U_x$ ,这样,基准电压  $U_R$ 的值就表示被测未知电压值  $U_x$ 。

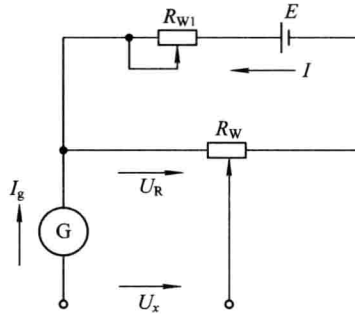


图 1-3 直流电位差计简化等效电路

只要零示器的灵敏度足够高,零位式测量就可以获得较高的灵敏度,因为它主要取决于标准量的精度。但此法在测量过程中要进行平衡操作,费时较多,所以不适宜于测量变化迅速的信号,只适用于测量变化缓慢的信号。它在工程实践和实验室中应用很普遍。

### 3) 微差式测量

微差式测量是综合了偏差式测量和零位式测量的优点而提出的一种测量方法,它将被测未知量与已知的标准量进行比较,并取出差值,然后用偏差式测量求出此偏差值。

设  $N$  为标准量,  $x$  为被测量,令  $\Delta$  为两者之差,即  $\Delta=x-N$ ,经移项后得  $x=N+\Delta$ ,即被测量是标准量与偏差值之和。因为  $N$  是标准量,故误差很小。由于  $\Delta \ll N$ ,因此可选用高灵敏度的偏差式仪表进行测量。即使  $\Delta$  的测量准确度较低,但因  $\Delta \ll N$ ,所以总的测量准确度仍然很高。

图 1-4 所示为利用高灵敏度电压表和电位差计,采用微差式测量测稳压电源的电路图。当负载波动时,输出电压有微小的变动值。

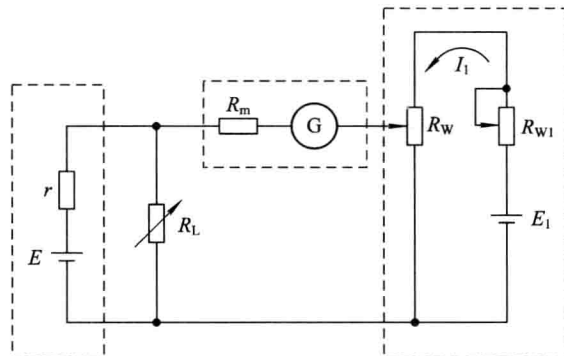


图 1-4 微差式测量测稳压电源输出电压的微小变化的电路图

在图 1-4 中,  $r$  和  $E$  分别表示稳压电源的等效内阻和电势,  $R_L$  表示稳压电源的负载电阻;  $R_W$ 、 $R_{W1}$  和  $E_1$  组成电位差计,  $G$  和  $R_m$  分别为高灵敏度电压表表头和内阻。在测量之前,应预先调节电位器  $R_{W1}$  的值,使电位器  $R_W$  的工作电流  $I_1$  为基准值。然后,使稳压电源的  $R_L$  为额定值,进而调节电位器  $R_W$  的活动触点位置,使高灵敏度电压表指零。增加和减

小  $R_L$  的值, 这时高灵敏度电压表的偏差指示值, 即是负载变动所引起的稳压电源输出电压的微小波动值。注意, 在这种电路中, 要求高灵敏度电压表的内阻  $R_m$  足够大, 即要求  $R_m$  的值远大于  $R_w$ 、 $R_L$ 、 $R_{w1}$  及  $r$  的值, 否则误差会较大。

微差式测量的优点是反应快, 不需要进行反复的平衡操作和测量精度高, 所以它在工程测量中已获得越来越广泛的应用。

## 1.2.2 测量系统

### 1. 测量系统的组成

测量系统应具有对被测对象的特征量进行检测、传输、处理及显示的功能。一个测量系统是传感器、变送器(变换器)和其他转换装置等的有机组合。图 1-5 所示为测量系统组成框图。



图 1-5 测量系统组成框图

传感器是感受被测量(物理量、化学量、生物量等)的大小, 并输出相对应的可用输出信号(一般多为电量)的器件或装置。

变送器将传感器输出的信号变换成便于传输和处理的信号。大多数变送器的输出信号是统一的标准信号(目前多为 4 mA~20 mA 直流电流), 信号标准是系统环节之间的通信协议。

当测量系统的几个功能环节独立地分隔开时, 必须由一个地方向另一个地方传输信号, 传输通道就是完成这种传输功能的。传输通道将测量系统各环节的输入、输出信号连接起来, 通常用电缆连接, 或用光纤连接, 以传输数据。

信号处理环节将传感器输出的信号进行处理和转换, 如对信号进行放大、运算、线性化、数/模或模/数转换, 使其输出信号便于显示、记录。这种信号处理环节可用于自动控制系统, 也可与计算机进行连接, 以便对测量信号进行信息处理。

显示装置是将测量信息变成人的器官能接收的形式, 以完成监视、控制或分析的目的。测量结果可以采用模拟显示、数字显示或图形显示, 也可以由记录装置进行自动记录或由打印机将数据打印出来。

### 2. 开环测量系统和闭环测量系统

#### 1) 开环测量系统

开环测量系统的全部信息转换只沿着一个方向进行, 如图 1-6 所示。其中  $x$  是输入量,  $y$  是输出量,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为各个环节的传递系数。输出关系表示为

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-2)$$

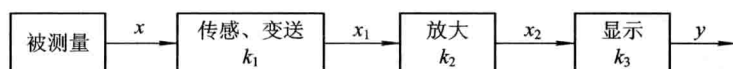


图 1-6 开环测量系统框图



因为开环测量系统是由多个环节串联而成的，因此系统的相对误差等于各环节相对误差之和，即

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \cdots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-3)$$

式中： $\delta$ ——系统的相对误差；

$\delta_i$ ——各环节的相对误差。

采用开环方式构成的测量系统结构较简单，但各环节特性的变化都会造成测量误差。

## 2) 闭环测量系统

闭环测量系统有两个通道，一个正向通道，一个反馈通道，其结构如图 1-7 所示。其中  $\Delta x$  为正向通道的输入量， $\beta$  为反馈环节的传递系数，正向通道的总传递系数  $k = k_2 k_3$ 。由图 1-7 得

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_1 - x_f \\ x_f &= \beta y \\ y &= k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y \end{aligned}$$

即

$$y = \frac{k}{1 + k\beta} x_1 = \frac{1}{\frac{1}{k} + \beta} x_1$$

当  $k \gg 1$  时，有

$$y \approx \frac{1}{\beta} x_1 \quad (1-4)$$

系统的输入、输出关系为

$$y = \frac{kk_1}{1 + k\beta} x \approx \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-5)$$

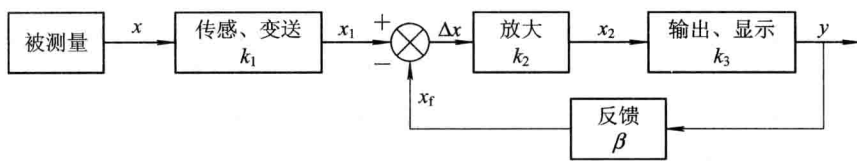


图 1-7 闭环测量系统框图

显然，这时整个系统的输入、输出关系由反馈环节的特性决定，放大器等环节特性的变化不会造成测量误差，或者造成的测量误差很小。

据以上分析可知，在构成测量系统时，应将开环系统与闭环系统巧妙地组合在一起加以应用，才能达到所期望的目的。

### 1.2.3 测量误差

测量误差是测得值与被测量的真值的差。由于真值往往不知道，因此测量的目的是希望通过测量获取被测量的真值。但由于种种原因，如传感器本身性能不十分优良、测量方法不完善、外界干扰的影响等，造成被测量的测得值与真值不一致，因而测量中总是存在误差。由于真值未知，所以在实际中，有时用约定真值代替真值，常用某量的多次测量结