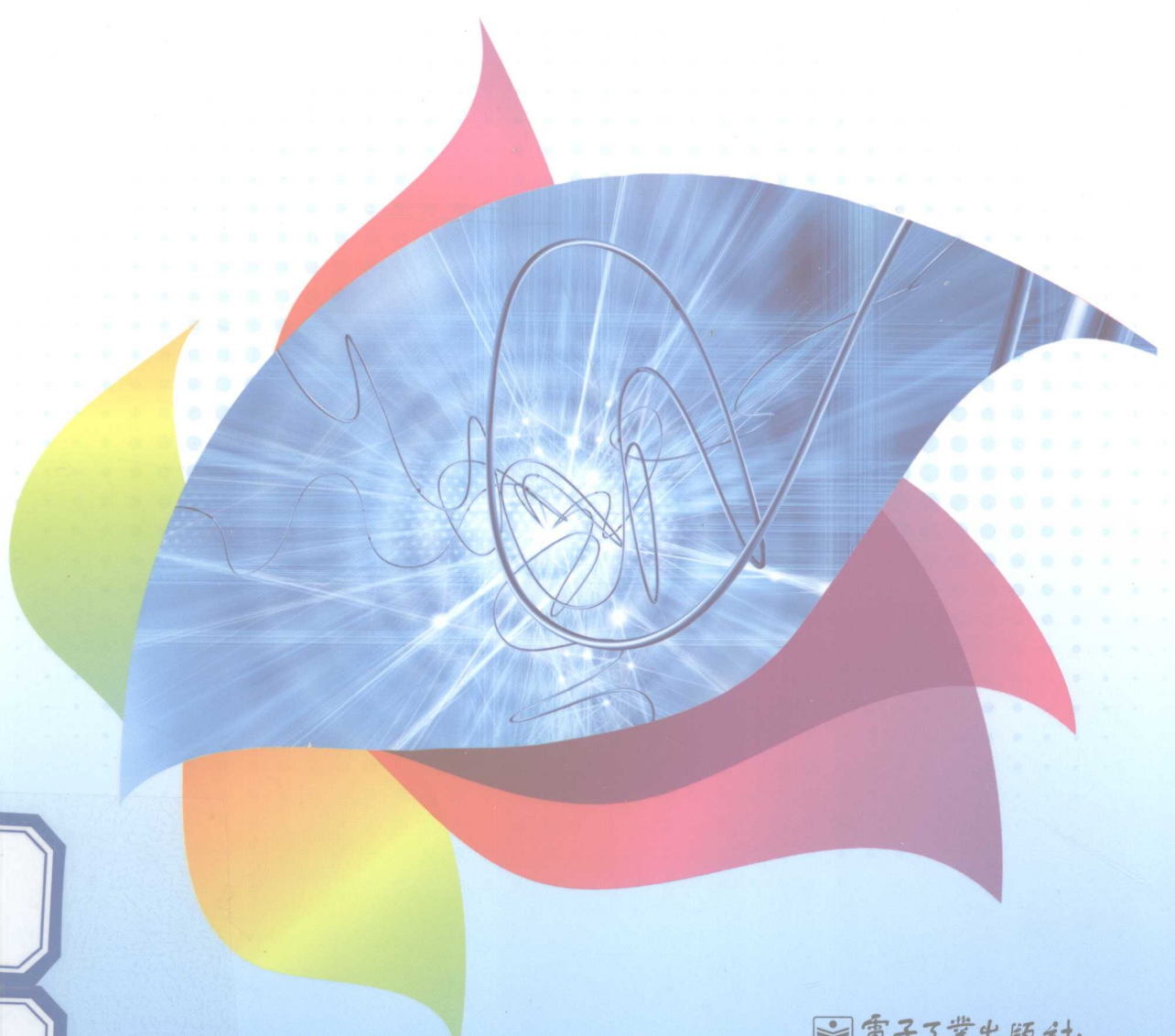


高等学校电子信息类教材

教育部高等学校特色专业规划教材
国家精品课程配套教材

传感器原理及应用

潘 炼 主编



 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息类教材

教育部高等学校特色专业规划教材
国家精品课程配套教材

传感器原理及应用

潘 炼 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

120822

内 容 简 介

本书是教育部高等学校特色专业规划教材、国家精品课程配套教材。全书重点介绍工程检测中常用的各种传感器的原理、特性及其应用技术,共19章,内容涵盖现代检测技术的理论,传感技术及基本特性,常见传感器的工作原理,如电阻应变式、电感式、电容式、压电式、磁学量、光电式、半导体、超声波、微波、辐射式、温度、压力、流量、物位、成分分析传感器,最后结合工程实际,介绍了传感技术在工程实际中的典型应用,并给出了传感器与单片机接口电路的硬件设计及软件设计。

本书取材新颖、内容丰富、系统性强、条理清晰、技术实用,反映了现代检测技术领域的新发展和新成果。书中穿插了大量的实践应用知识,充分体现了理论联系实际,重在工程实际的应用原则,以及传感器与单片机接口的最新实用技术。

本书可作为自动化、测控技术与仪器、机电工程及电气工程及其自动化等专业的教材,也可供其他专业的广大师生和相关领域的工程技术人员参考。

本书配有教学课件,读者可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后下载。

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

传感器原理及应用/潘炼主编. —北京:电子工业出版社,2012.1

高等学校电子信息类教材

ISBN 978-7-121-15091-3

I. ①传… II. ①潘… III. ①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234368号

策划编辑:田宏峰

责任编辑:谭丽莎

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

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:787×1092 1/16 印张:26 字数:681千字

印 次:2012年1月第1次印刷

印 数:4000册 定价:49.80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,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@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

传感技术、通信技术、计算机技术是信息产业的三大支柱。信息的获取对于机械电子工程、控制、测试、计量等领域来说都是必不可少的。本书从当前工程实际应用和技术发展的角度出发,全面系统地介绍了现代检测技术的相关理论、相关技术及其在工程实际中的应用。

本书是编者在多年的教学、科研、生产实际工作中的基础上总结提炼而成的。在编写过程中,编者对国内外检测技术领域的最新发展进行了充分的跟踪和调研,参考了国内外相关教材和学术成果,保留和精炼了传统检测技术的基础内容,对传感技术做了较为全面和详细的论述。本书注重传感技术基础理论的阐述,同时将工程实际应用贯穿全书始终,所介绍的实践应用知识大多来自工业企业现场,符合当前技术发展和生产实际要求。本书的具体内容包括目前已成熟的传感技术和仪器仪表,以及刚开始使用或即将使用的新理论、新技术、新方法和新设备等,紧跟该领域的技术发展步伐,实用性强。

全书内容分四方面:第一方面介绍测量及误差的有关知识,如测量及测量系统的概念,误差的分析与处理等;第二方面系统地介绍各种传感器的原理、结构和应用,目的在于使学生掌握使用各类传感器的技巧;第三方面介绍工程检测的基础知识及传感器在工程检测中的应用,将传感器和工程检测方面的知识有机地联系起来,使学生在掌握传感器原理的基础上,可以更进一步地应用这方面的知识来解决工程检测中的具体问题;第四方面根据传感器与单片机接口的不同方式,分别阐述几种典型常用传感器与单片机接口技术实例,使得学生可以利用计算机实现自动测量、信息处理和自动控制,从而达到智能检测的目的。

全书共分 19 章。第 1 章介绍现代检测技术的理论基础;第 2 章介绍传感技术及基本特性;第 3 章介绍电阻应变式传感器;第 4 章介绍电感式传感器;第 5 章介绍电容式传感器;第 6 章介绍压电式传感器;第 7 章介绍磁学量传感器;第 8 章介绍光电式传感器;第 9 章介绍半导体传感器;第 10 章介绍超声波传感器;第 11 章介绍微波传感器;第 12 章介绍辐射式传感器;第 13 章介绍温度传感器;第 14 章介绍压力传感器;第 15 章介绍流量传感器;第 16 章介绍物位传感器;第 17 章介绍成分分析传感器;第 18 章结合工程实际,介绍了传感技术在工程实际中的典型应用,具体包括陶瓷隧道窑温度、压力监测控制系统,以及传感器在模糊控制洗衣机、现代汽车、机器人、智能楼宇中的应用;第 19 章介绍传感器与单片机接口电路的硬件设计及软件设计,以新颖、实用、完整和典型的原则,详细给出了热电偶传感器、霍尔传感器、压电测力传感器、光电传感器等几种常用传感器与单片机接口技术实例的硬件电路和软件程序设计方法。

全书的每章内容都有其独立性,在使用本教材时,可根据不同专业的要求和特点,对内容适当进行取舍。实验是本课程不可缺少的重要组成部分,利用“基于嵌入式传感器与测控技术综合实验台”可对不同传感器(如电阻应变式、电感式、电容式、压电式、霍尔式、光电式等)的特性进行研究和分析。通过实验,可以深化理论课的理解,提高学生分析问题和解决问题的能力,从而取得良好的教学效果。

本综合实验台包括:主控台、各种信号源、电压源、显示仪表、单片机测控中心、ARM 测控中心等部分;由各类传感器与处理变送电路组成的传感器独立实验模块,以完成传感器特性实

验；由温度控制系统、转速控制系统、指纹识别系统、CCD 人脸检测系统、控制核心及软件、计算机测控系统、嵌入式 ARM 测控系统、基于 LabVIEW 的虚拟仪器测控系统、基于 MATLAB 的测控系统等各类测控对象及检测单元组成的测控系统。

本书可作为应用电子、工业自动化、机电一体化及计算机应用等专业的教材，也可供其他专业和相关工程技术人员参考。

本书由潘炼担任主编，田中捷、李忠虎担任副主编。第 1~12 章、第 14 章、第 15 章、第 18 章、第 19 章由潘炼教授和田中捷老师编写；第 13 章和第 15 章的 15.13 节由李文涛教授编写；第 16 章、第 17 章的 17.5~17.11 节和附录由李忠虎教授编写；第 17 章的 17.1~17.4 节由程继红教授编写。另外，钦小平、王薇、刘晓鸣等也参加了本书部分章节的编写工作，在此表示衷心的感谢！

本书在编写过程中参阅了大量相关书籍及国家标准，在此对相关作者和单位表示诚挚的感谢！

本书配有电子教案，请有需要的读者登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）免费注册后再进行下载，如有问题请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系（E-mail: hxedu@phei.com.cn）。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目录

Contents

第 1 章 现代检测技术的理论基础	1	2.3.8 高分子敏感材料	49
1.1 检测技术概论	1	2.3.9 合成材料	49
1.1.1 检测	1	2.4 传感器制作技术	49
1.1.2 检测方法	2	2.4.1 概述	49
1.1.3 检测系统	3	2.4.2 刻蚀(腐蚀)技术	50
1.1.4 检测误差	5	2.4.3 薄膜技术	51
1.2 检测数据的估计和处理	7	2.4.4 固相键合工艺	52
1.2.1 随机误差的统计处理	7	2.4.5 纳米技术(毫微技术)	52
1.2.2 系统误差的通用处理方法	13	2.4.6 微型传感器结构	53
1.2.3 粗大误差	15	2.5 传感器设计方法	55
1.2.4 检测数据处理中的几个问题	17	2.5.1 传感器的建模	55
1.2.5 检测不确定度	24	2.5.2 传感器应用到的各种定理、 法则、效应	55
思考题和习题	25	2.5.3 结构、材料与参数的合理选择	57
第 2 章 传感技术及基本特性	26	2.5.4 信号转换方式	57
2.1 传感器的特性与分类	26	2.5.5 传感器的标定与校准	58
2.1.1 传感器概论	26	2.6 传感器应用电路组成	59
2.1.2 传感器的基本特性	27	2.6.1 传感器应用电路的具体组成	59
2.1.3 传感器的性能指标	37	2.6.2 显示器	60
2.1.4 传感器特性的应用	37	2.6.3 执行机构	60
2.2 传感器的命名方法及代号	38	2.6.4 信号放大、比较	60
2.2.1 传感器的命名方法	38	2.6.5 系统信息处理	61
2.2.2 传感器代号的标记方法	40	2.6.6 微机在测控系统中的作用	62
2.2.3 传感器代号	41	2.7 检测技术的发展	62
2.2.4 传感器产品名称	43	2.7.1 检测技术的发展方向	62
2.3 传感器材料	44	2.7.2 检测技术的最新发展	63
2.3.1 半导体材料	45	思考题和习题	64
2.3.2 敏感陶瓷材料	46	第 3 章 电阻应变式传感器	66
2.3.3 石英敏感材料	46	3.1 常用弹性元件的结构和特性	66
2.3.4 金属氧化物及合金材料	47	3.1.1 弹性元件的概念	66
2.3.5 无机材料	48	3.1.2 弹性元件的特性	67
2.3.6 有机材料	48	3.1.3 对弹性元件材料的要求	68
2.3.7 生化材料	48	3.1.4 常用的弹性元件材料	68

3.1.5	弹性元件的分类	68	5.2	电容式传感器的灵敏度及非线性	112
3.1.6	变换力的弹性元件	68	5.3	电容式传感器的等效电路	114
3.1.7	变换压力的弹性元件	70	5.4	电容式传感器的测量电路	114
3.2	电阻应变效应	71	5.4.1	调频电路	114
3.2.1	电阻应变片的结构和性能	71	5.4.2	运算放大器式电路	115
3.2.2	电阻应变效应	72	5.4.3	二极管双 T 形交流电桥	116
3.2.3	电阻应变式传感器	73	5.4.4	环形二极管充、放电法	117
3.3	电阻应变片测量电路	73	5.4.5	脉冲宽度调制电路	117
3.3.1	测量电桥的工作方式	74	5.5	电容式传感器的应用	119
3.3.2	电桥电路的温度补偿	75		思考题和习题	124
3.3.3	应用举例	75	第 6 章	压电式传感器	125
3.4	电阻应变传感器的应用	78	6.1	压电效应及压电材料	125
	思考题和习题	80	6.1.1	石英晶体	126
第 4 章	电感式传感器	82	6.1.2	压电陶瓷	127
4.1	自感式电感传感器	82	6.1.3	压电式传感器	128
4.1.1	工作原理	82	6.2	压电式传感器的测量电路	129
4.1.2	输出特性	83	6.2.1	压电式传感器的等效电路	129
4.1.3	测量电路	85	6.2.2	压电式传感器的测量	130
4.1.4	自感式电感传感器的应用	87	6.3	压电式传感器的应用	132
4.2	差动变压器式互感传感器	88		思考题和习题	135
4.2.1	变隙式差动变压器式互感传感器	88	第 7 章	磁学量传感器	136
4.2.2	螺线管式差动变压器式互感传感器	91	7.1	磁电感应式传感器	136
4.3	电涡流式传感器	96	7.1.1	磁电感应式传感器的工作原理	136
4.3.1	工作原理	96	7.1.2	磁电感应式传感器的基本特性	138
4.3.2	基本特性	97	7.1.3	磁电感应式传感器的测量电路	139
4.3.3	电涡流的形成范围	98	7.1.4	磁电感应式传感器的应用	139
4.3.4	电涡流式传感器测量电路	99	7.2	霍尔式传感器	140
4.3.5	电涡流式传感器的应用	100	7.2.1	霍尔效应及霍尔元件	140
4.4	电感式传感器的应用	102	7.2.2	霍尔集成传感器	145
	思考题和习题	107	7.2.3	霍尔式传感器的应用	147
第 5 章	电容式传感器	108	7.3	新型磁学量传感器	151
5.1	电容式传感器的工作原理和结构	108	7.3.1	磁敏电阻	151
5.1.1	变极距型电容式传感器	109	7.3.2	磁敏二极管 (SMD)	153
5.1.2	变面积型电容式传感器	110	7.3.3	磁敏三极管	154
5.1.3	变介质型电容式传感器	110	7.3.4	应用	155
				思考题和习题	156

第 8 章 光电式传感器158	9.3 色敏传感器201
8.1 光电器件.....158	9.3.1 半导体色敏传感器的基本原理..201
8.1.1 光敏电阻.....159	9.3.2 半导体色敏传感器的基本特征..203
8.1.2 光敏二极管和光敏晶体管.....161	9.4 半导体传感器的应用203
8.1.3 光电电池.....163	9.4.1 实用酒精测试仪.....203
8.1.4 光电耦合器件.....165	9.4.2 直读式湿度计.....204
8.1.5 电荷耦合器件.....166	9.4.3 彩色信号处理电路.....204
8.1.6 光电式传感器的应用.....170	思考题和习题205
8.2 光纤传感器.....175	第 10 章 超声波传感器207
8.2.1 光纤结构及其传光原理.....175	10.1 超声波及其物理性质.....207
8.2.2 光纤的基本特性.....176	10.1.1 超声波的波形及其传播速度..207
8.2.3 光纤传感器.....177	10.1.2 超声波的反射和折射.....209
8.3 激光传感器.....181	10.1.3 超声波的衰减.....209
8.3.1 激光的产生和特点.....182	10.2 超声波传感器.....210
8.3.2 常用的激光器.....182	10.3 超声波传感器的应用.....210
8.3.3 激光探测器的应用.....183	思考题和习题216
8.4 固态成像传感器.....185	第 11 章 微波传感器217
8.4.1 概述.....185	11.1 微波概述.....217
8.4.2 光导摄像管.....185	11.2 微波传感器原理.....218
8.4.3 固态图像传感器.....186	11.2.1 微波传感器的测量原理及分类218
思考题和习题186	11.2.2 微波传感器的组成.....219
第 9 章 半导体传感器187	11.2.3 微波传感器的特点.....220
9.1 气敏传感器.....187	11.3 微波传感器的应用.....220
9.1.1 概述.....187	11.3.1 微波液位计.....220
9.1.2 半导体气敏传感器的机理.....188	11.3.2 微波湿度传感器.....220
9.1.3 半导体气敏传感器的类型及 结构.....188	11.3.3 微波测厚仪.....221
9.1.4 半导体气敏传感器的基本测 量电路.....190	11.3.4 微波辐射计(温度传感器) ..222
9.1.5 半导体气敏传感器的应用.....191	11.3.5 微波测定移动物体的速度和 距离.....222
9.1.6 使用半导体气敏传感器的注意 事项.....194	11.3.6 微波无损检测.....223
9.1.7 气敏传感器的新动态.....194	思考题和习题223
9.2 湿敏传感器.....195	第 12 章 辐射式传感器224
9.2.1 湿度的测量方法.....195	12.1 红外传感器.....224
9.2.2 氯化锂湿敏电阻.....196	12.1.1 红外辐射.....224
9.2.3 半导体陶瓷湿敏电阻.....197	12.1.2 红外探测器.....225
9.2.4 湿敏传感器的应用.....199	12.1.3 红外传感器的应用.....226
	12.2 核辐射传感器.....228
	12.2.1 核辐射及其性质.....228

12.2.2	核辐射探测器	229	14.3	弹性式压力传感器	285
12.2.3	核辐射传感器的应用	233	14.4	压阻式压力传感器	287
	思考题和习题	237	14.5	谐振式压力传感器	288
第 13 章	温度传感器	238	14.6	声表面波 (SAW) 压力传感器	288
13.1	概述	238	14.7	压力传感器应用举例	289
13.1.1	温度的基本概念	238	14.8	差压变送器	290
13.1.2	温标	238	14.8.1	力平衡式差压变送器	291
13.1.3	温度传感器的分类	240	14.8.2	电容式差压变送器	291
13.2	膨胀式温度传感器	241	14.8.3	扩散硅式差压变送器	292
13.2.1	玻璃管液体温度计	241	14.9	压力传感器的安装	293
13.2.2	双金属温度计	242		思考题和习题	294
13.2.3	压力式温度计	242	第 15 章	流量传感器	295
13.3	热电阻温度传感器	243	15.1	概述	295
13.3.1	金属热电阻温度计	243	15.2	节流式流量传感器	296
13.3.2	半导体热敏电阻温度计	245	15.2.1	节流装置	296
13.3.3	热电阻温度传感器的应用	249	15.2.2	节流原理与流量方程式	297
13.4	热电偶温度传感器	250	15.2.3	取压方式	299
13.4.1	热电偶的测温原理	250	15.2.4	节流式流量测量系统	299
13.4.2	热电偶的基本定律	252	15.3	电磁流量传感器	300
13.4.3	热电偶的种类与结构	254	15.3.1	基本原理	300
13.4.4	热电偶的冷端温度补偿	258	15.3.2	电磁流量传感器测量系统	301
13.4.5	热电偶测温线路	262	15.3.3	电磁流量传感器的应用问题	301
13.5	辐射式温度传感器	263	15.4	涡街流量传感器	301
13.5.1	辐射测温的物理基础	263	15.4.1	测量原理	302
13.5.2	亮度温度计	267	15.4.2	漩涡频率的测量	302
13.5.3	全辐射温度计	269	15.4.3	涡街流量传感器测量系统	303
13.5.4	比色温度计	271	15.4.4	应用问题	303
13.6	光纤温度传感器	272	15.5	涡轮流量传感器	303
13.6.1	光纤温度传感器的类型	272	15.6	光纤流量传感器	305
13.6.2	光纤温度传感器	273	15.7	质量流量传感器	305
13.7	集成温度传感器	277	15.7.1	直接式质量流量计	306
13.7.1	模拟集成温度传感器	278	15.7.2	间接式质量流量计	308
13.7.2	模拟集成温度控制器	280	15.8	靶式流量传感器	309
13.7.3	集成数字温度传感器/控制器	281	15.9	均速管流量传感器	310
	思考题和习题	283	15.10	容积式流量传感器	311
第 14 章	压力传感器	284	15.10.1	容积式流量计的测量机构与 流量公式	311
14.1	概述	284	15.10.2	几种容积式流量计	311
14.2	液柱式压力传感器	285			

15.10.3 容积式流量计的安装与使用	313
15.11 弯管流量传感器	313
15.12 转子流量传感器	313
15.12.1 结构及测量原理	314
15.12.2 转子流量计的安装	315
15.13 相关流量传感器	315
15.13.1 相关流量测量技术简介	315
15.13.2 相关流量计的基本原理	316
15.13.3 相关流量测量系统的构成	318
15.14 智能化流量积算仪	319
思考题和习题	320
第 16 章 物位传感器	321
16.1 概述	321
16.1.1 物位的定义	321
16.1.2 物位检测的作用及目的	321
16.1.3 物位检测仪表及其分类	321
16.2 直读式液位传感器	322
16.3 静压式液位传感器	323
16.3.1 检测原理	323
16.3.2 压力式液位计	324
16.3.3 差压式液位计	325
16.4 浮力式液位传感器	327
16.4.1 浮子式液位计	327
16.4.2 浮筒式液位计	330
16.5 电气式物位传感器	331
16.5.1 射频导纳物位计	331
16.5.2 电极式液位计	331
16.5.3 热电偶式液位计	333
16.6 超声波物位开关	333
16.7 机械接触式物位传感器	335
16.7.1 重锤式料位计	335
16.7.2 音叉式料位计	335
16.8 雷达式物位传感器	336
16.8.1 概述	336
16.8.2 反射式雷达液位计	337
16.8.3 调频式雷达物位计	338
16.8.4 导波式雷达液位计	338
16.8.5 雷达式物位计的选用	338
16.9 磁致伸缩式液位传感器	339
思考题和习题	340
第 17 章 成分分析传感器	341
17.1 概述	341
17.2 热导式气体分析传感器	342
17.2.1 工作原理	342
17.2.2 热导检测器	343
17.2.3 测量电路	343
17.3 色谱分析传感器	344
17.3.1 检测原理	344
17.3.2 气相色谱仪	345
17.4 氧分析传感器	347
17.4.1 热磁式氧分析仪	347
17.4.2 氧化锆氧分析仪	350
17.5 工业电导仪	352
17.5.1 溶液电导(电阻)的测量方法	352
17.5.2 电导池的结构	354
17.5.3 测量系统组成	355
17.6 浓度计	355
17.7 pH 计	356
17.7.1 pH 值测量原理	357
17.7.2 pH 计的电极	357
17.7.3 pH 计测量系统	357
17.7.4 pH 计的使用与维护	358
17.7.5 光纤 pH 计	358
17.8 硅酸根表	359
17.8.1 硅酸根含量测量原理	359
17.8.2 应用问题	359
17.9 钠表	360
17.9.1 测量系统组成及原理	360
17.9.2 应用问题	360
17.10 溶氧表	361
17.10.1 测量系统组成及原理	361
17.10.2 应用问题	361
17.11 成分分析仪表的选用	361
思考题和习题	362

第 18 章 传感技术的工程应用	363	第 19 章 传感器与单片机接口技术实例	384
18.1 陶瓷隧道窑温度、压力监测控制系统	363	19.1 热电偶传感器与单片机的接口实例	384
18.2 传感器在模糊控制洗衣机中的应用	365	19.2 霍尔传感器与单片机接口实例	388
18.3 传感器在现代汽车中的应用	366	19.3 压电测力传感器与单片机接口实例	390
18.3.1 汽车结构及工作过程概述	366	19.4 光电传感器与单片机接口实例	392
18.3.2 传感器在汽车运行中的作用	366	思考题和习题	396
18.4 传感器在机器人中的应用	370	附录 A 仪表工程图纸的相关图形及符号	397
18.4.1 机器人传感器的分类	370	附录 B 常用热电阻分度表	400
18.4.2 触觉传感器	371	附录 C 常用热电偶分度表	401
18.4.3 其他类型的机器人传感器	374	参考文献	403
18.5 传感器在智能楼宇中的应用	375		
思考题和习题	382		

现代检测技术的理论基础

1.1 检测技术概论

在科学技术高度发达的现代社会中,人类已进入瞬息万变的信息时代。人们在从事工业生产和科学实验等活动中,主要依靠的是对信息资源的开发、获取、传输和处理。传感器处于研究对象与测控系统的接口位置,是感知、获取与检测信息的窗口,自动检测和自动控制系统要获取的信息,都要通过传感器转换为容易传输与处理的电信号。

在工程实践和科学实验中提出的检测任务是正确、及时地掌握各种信息,大多数情况下是要获取被测对象信息的大小,即被测量的大小。这样,信息采集的主要含义就是检测,取得检测数据。

“检测系统”这一概念是传感技术发展一定阶段的产物。在工程中,需要将传感器与多台仪表组合在一起,才能完成信号的检测,这样便形成了检测系统。尤其是随着计算机技术及信息处理技术的发展,检测系统所涉及的内容也不断得以充实。为了更好地掌握传感器,需要对检测的基本概念、检测系统的特性、检测误差及数据处理等方面的理论及工程方法进行学习和研究,只有了解和掌握了这些基本理论,才能更有效地完成检测任务。

1.1.1 检测

检测是以确定被测量的值或获取测量结果为目的的一系列操作。因此,检测也就是将被测量与同种性质的标准量进行比较,确定被测量对标准量的倍数。它可用下式表示:

$$x = nu \quad (1-1)$$

$$n = \frac{x}{u} \quad (1-2)$$

式中, x 为被测量; u 为标准量; n 为比值(纯数),含有测量误差。

由检测所获得的被测量的量值叫检测结果，检测结果可用一定的数值表示，也可以用一条曲线或某种图形表示，但无论其表现形式如何，检测结果应包括比值和检测单位。由于检测结果仅仅是被测量的最佳估计值，并非真值，所以还应给出检测结果的质量，即检测结果的可信程度。这个可信程度用检测不确定度表示，检测不确定度表征检测值的分散程度。因此，检测结果的完整表述应包括比值、检测单位及检测不确定度。

被测量的量值和比值等都是检测过程的信息，这些信息依托于物质才能在空间和时间上进行传递。被测量作用到实际物体上，使其某些参数发生变化，参数承载了信息而成为信号。可选择其中适当的参数作为测量信号，如热电偶温度传感器的工作参数是热电偶的电势，差压流量传感器中的孔板工作参数是差压 Δp 。检测过程就是传感器从被测对象获取被测量的信息，建立起检测信号，经过变换、传输、处理，从而获得被测量的量值的过程。

1.1.2 检测方法

实现被测量与标准量比较得出比值的方法，称为检测方法。针对不同检测任务，进行具体分析，找出切实可行的检测方法，对检测工作是十分重要的。

对于检测方法，从不同角度，有不同的分类方法。它根据获得被测量的方法可分为直接检测、间接检测与组合检测；根据检测方式可分为偏差式检测、零位式检测与微差式检测；根据检测条件不同可分为等精度检测与不等精度检测；根据被测量变化快慢可分为静态检测与动态检测；根据检测敏感元件是否与被测介质接触可分为接触式检测与非接触式检测；根据检测系统是否向被测对象施加能量可分为主动式检测与被动式检测等。

1. 直接检测、间接检测与组合检测

在使用仪表或传感器进行检测时，将被测量直接与标准量进行比较，不需要经过任何运算便可直接得到被测量的数值，这种检测方法称为直接检测。被测量与测得值之间的关系可用下式表示：

$$y = x \quad (1-3)$$

式中， y 为被测量； x 为测得值。

例如，用磁电式电流表检测电路的某一支路电流，用弹簧管压力表检测压力等，都属于直接检测。直接检测的优点是检测过程简单而又迅速，缺点是检测精度不容易达到很高。

在使用仪表或传感器进行检测时，首先对与被测量有确定函数关系的几个量进行直接检测，再将直接测得值代入函数关系式，经过计算得到所需要的结果，这种检测称为间接检测。间接检测与直接检测不同，被测量 y 是一个测得值 x 或几个测得值 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数，即

$$y = f(x) \quad (1-4)$$

或
$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

被测量 y 不能直接检测求得，必须由测得值 x 或 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 与被测量 y 的函数关系确定。例如，直接检测电压值 U 和电阻值 R ，再根据式 $P=U^2/R$ 求电功率 P 即为间接检测的实例。间接检测手续较多，花费时间较长，一般用在直接检测不方便，或者缺乏直接检测手段的场合。

若被测量必须经过求解联立方程组求得，如有若干个被测量 y_1, y_2, \dots, y_m ，直接测得值为 x_1, x_2, \dots, x_n ，把被测量与测得值之间的函数关系列成方程组，即

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= f_1(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ x_2 &= f_2(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ &\vdots \\ x_n &= f_n(y_1, y_2, \dots, y_m) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

该方程组中方程的个数 n 要大于被测量 y 的个数 m ，用最小二乘法求出被测量的数值，这种检测方法称为组合检测。组合检测是一种特殊的精密检测方法，操作手续复杂，花费时间长，多适用于科学实验或特殊场合。

2. 偏差式检测、零位式检测与微差式检测

用仪表指针的位移（即偏差）决定被测量的量值，这种检测方法称为偏差式检测。应用这种方法检测时，仪表刻度应事先用标准器具分度。偏差式检测的检测过程简单、迅速，但检测结果的精度较低。

用指零仪表的零位反映检测系统的平衡状态，在检测系统平衡时，用已知的标准量检测被测量的量值，这种检测方法称为零位式检测。零位检测时，将已知标准量直接与被测量相比较（已知标准量应连续可调），当指零仪表指零时，被测量与已知标准量相等。例如，天平检测物体的质量、电位差计检测电压等都属于零位式检测。零位式检测的优点是可以获得比较高的检测精度，但检测过程比较复杂，费时较长，不适用于检测变化迅速的信号。

微差式检测是综合了偏差式检测与零位式检测的优点而提出的一种检测方法。它将被测量与已知的标准量相比较，取得差值后，再用偏差法测得此差值。应用这种方法检测时，不需要调整标准量，而只需检测两者的差值。例如，设 N 为标准量， x 为被测量， Δ 为二者之差，则 $x=N+\Delta$ 。由于 N 是标准量，其误差很小，所以可选用高灵敏度的偏差式仪表检测 Δ ，即使检测 Δ 的精度不高，但总的检测精度仍很高。微差式检测的优点是反应快，而且检测精度高，特别适用于在线控制参数的检测。

3. 等精度检测与不等精度检测

在整个检测过程中，若影响和决定误差大小的全部因素（条件）始终保持不变，如由同一个检测者，用同一台仪器，用同样的方法，在同样的环境条件下，对同一被测量进行多次重复检测，这种检测方法称为等精度检测。在实际中，极难做到影响和决定误差大小的全部因素（条件）始终保持不变，因此一般情况下只能近似认为是等精度检测。

有时在科学研究或高精度检测中，往往会在不同的检测条件下，用不同精度的仪表，不同的检测方法，不同的检测次数及不同的检测者进行检测和对比，这种检测称为不等精度检测。

4. 静态检测与动态检测

若认为被测量在检测过程中是固定不变的，则对这种被测量进行的检测称为静态检测。静态检测不需要考虑时间因素对检测的影响。

若被测量在检测过程中是随时间不断变化的，则对这种被测量进行的检测称为动态检测。

1.1.3 检测系统

1. 检测系统的构成

检测系统应具有对被测对象的特征量进行检测、传输、处理及显示等功能。一个检测系统是传感器、变送器（变换器）和其他变换装置等的有机组合。如图 1-1 所示为检测系统的组成结构框图。

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。



图 1-1 检测系统的组成结构框图

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 4~20 mA 直流电流）。

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间的输入、输出信号连接起来（通常用电缆连接或用光导纤维连接），以用来传输数据。

信号处理环节将对传感器的输出信号进行处理和变换，如对信号进行放大、运算、线性化、数-模或模-数转换，使其便于显示、记录。这种信号处理环节可用于自动控制系统，也可与计算机系统连接，以便对测量信号进行信息处理。

显示装置用于将被测量信息变成人的感官能接受的形式，以达到监视、控制或分析的目的。测量结果可以采用模拟显示，也可采用数字显示或图形显示，还可以由记录装置进行自动记录或通过打印机将数据打印出来。

2. 开环检测系统与闭环检测系统

1) 开环检测系统

开环检测系统的全部信息变换只沿着一个方向进行，如图 1-2 所示。其中 x 为输入量， y 为输出量， k_1 、 k_2 、 k_3 为各个环节的传递系数。输入/输出关系表示如下：

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-7)$$

因为开环检测系统是由多个环节串联而成的，所以系统的相对误差等于各环节的相对误差之和，即

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-8)$$

式中， δ 为系统的相对误差； δ_i 为各环节的相对误差。

采用开环方式构成的检测系统，结构较简单，但各环节特性的变化都会造成检测误差。



图 1-2 开环检测系统的结构框图

2) 闭环检测系统

闭环检测系统有两个通道，一个为正向通道，一个为反馈通道，其结构框图如图 1-3 所示。其中 Δx 为正向通道的输入量， β 为反馈环节的传递系数，正向通道的总传递系数 $k = k_3 k_2$ 。由图 1-3 可知：

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_1 - x_f \\ x_f &= \beta y \\ y &= k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y \\ y &= \frac{k}{1+k\beta} x_1 = \frac{1}{\frac{1}{k} + \beta} x_1 \end{aligned}$$

当 $k \gg 1$ 时, 则

$$y \approx \frac{1}{\beta} x_1 \quad (1-9)$$

系统的输入/输出关系为

$$y = \frac{kk_1}{1+k\beta} x \approx \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-10)$$

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检测误差, 或者说造成的误差很小。

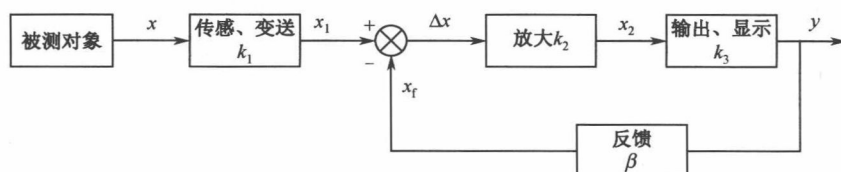


图 1-3 闭环检测系统的结构框图

1.1.4 检测误差

检测误差是测得值减去被测量后得到的值。

检测的目的是希望通过检测获取被测量的真实值。但由于种种原因, 例如, 传感器本身性能不十分优良, 测量方法不十分完善, 外界干扰的影响等, 造成被测量的测得值与真实值不一致, 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果来确定约定真值, 或用精度高的仪器示值代替约定真值)。

在工程技术及科学研究中, 对被测量进行检测时, 测量的可靠性至关重要, 不同场合对检测结果可靠性的要求也不同。例如, 在量值传递、经济核算、产品检验场合, 应保证测量结果有足够的准确度; 当测量值用做控制信号时, 则要注意测量的稳定性和可靠性。因此, 测量结果的准确程度, 应与测量的目的与要求相联系、相适应, 那种不惜成本, 不顾场合, 一味追求越准越好的做法是不可取的, 要有技术与经济兼顾的意识。

1. 检测误差的表示方法

检测误差的表示方法有多种, 含义各异。

1) 绝对误差

绝对误差可用下式定义:

$$\Delta = x - L \quad (1-11)$$

式中, Δ 为绝对误差; x 为测量值; L 为真值。绝对误差是有正、负并有量纲的。在实际检测过程中, 有时要用到修正值, 修正值是与绝对误差大小相等、符号相反的值, 即

$$c = -\Delta \quad (1-12)$$

式中, c 为修正值, 通常利用高一等级的测量标准或标准仪器来获得修正值。利用修正值可对测量值进行修正, 从而得到准确的实际值, 修正后的实际测量值 x' 为

$$x' = x + c \quad (1-13)$$

修正值给出的方式，可以是给出具体的数值，也可以是给出一条曲线或公式。

采用绝对误差表示测量误差，不能很好地说明测量质量的好坏。例如，在进行温度测量时，绝对误差 $\Delta=1^{\circ}\text{C}$ ，这对体温测量来说是不允许的，但对钢水温度测量来说却是极好的测量结果，因此用相对误差可以比较客观地反映测量的准确性。

2) 实际相对误差

实际相对误差的定义由下式给出：

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中， δ 为实际相对误差，一般用百分数给出； Δ 为绝对误差； L 为真值。

由于被测量的真值 L 无法知道，所以实际测量时用测量值 x 代替真值 L 进行计算，这个相对误差称为标称相对误差，即

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1-15)$$

3) 引用误差

引用误差是仪表中通用的一种误差表示方法。它是相对于仪表满量程的一种误差，又称满量程相对误差，一般也用百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中， γ 为引用误差； Δ 为绝对误差。

仪表精度等级是根据最大引用误差来确定的。例如，0.5 级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 0.5\%$ ；1.0 级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 1\%$ 。

在使用仪表和传感器时，还经常会遇到基本误差和附加误差这两个概念。

4) 基本误差

基本误差是指传感器或仪表在规定的标准条件下所具有的误差。例如，某传感器是在电源电压 $(220 \pm 5)\text{V}$ 、电网频率 $(50 \pm 2)\text{Hz}$ 、环境温度 $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $(65 \pm 5)\%$ 的条件下标定的。如果传感器在这个条件下工作，则传感器所具有的误差为基本误差。仪表的精度等级就是由基本误差决定的。

5) 附加误差

附加误差是指在传感器或仪表的使用条件偏离额定条件下出现的误差。例如，温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

2. 检测误差的性质

根据检测数据中的误差所呈现的规律及产生的原因可将检测误差分为随机误差、系统误差和粗大误差。

1) 随机误差

在同一测量条件下，多次测量被测量时，其绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差。

在我国新制订的国家计量技术规范 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中，随机误差是根据国际标准化组织 (ISO) 等七个国际组织制定的《测量不确定度表示指南》定义的，即随机