



应用型本科规划教材

(第二版)

TRANSDUCER AND TECHNOLOGY OF DETECTION

传感器与检测技术

◆ 主 编 马修水

副主编 钟伟红 陈 琢 刘西琳

主 审 徐科军



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

应用型本科规划教材

传感器与检测技术

(第二版)

主 编 马修水

副主编 钟伟红 陈 琢 刘西琳

主 审 徐科军



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

内 容 提 要

本书包括自动检测技术的基础知识、传感器原理与应用和检测仪表三部分内容。第一部分介绍传感器与检测技术的基本概念、测量误差与数据处理以及传感器的静态特性。第二部分介绍电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器的工作原理与应用。第三部分介绍温度检测、流量检测和物位检测。

本书可以作为自动化、电气工程及自动化、测控技术与仪器等专业的本科生教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/马修水主编. —杭州:浙江大学出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-308-10871-3

I. ①传… II. ①马… III. ①传感器—检测 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 286689 号

传感器与检测技术(第二版)

主编 马修水

责任编辑 王 波

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 杭州丰源印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15

字 数 365 千

版 次 2012 年 12 月第 2 版 2012 年 12 月第 3 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-10871-3

定 价 30.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571) 88925591

应用型本科院校自动化专业规划教材

编 委 会

主 任 宋执环

委 员 (以姓氏笔画为序)

卫 东 马修水 王培良 石松泉

刘勤贤 那文波 任国海 邵世凡

肖 铎 庞文尧 胡即明

总 序

近年来我国高等教育事业得到了空前的发展,高等院校的招生规模有了很大的扩展,在全国范围内涌现了一大批以独立学院为代表的应用型本科院校,这对我国高等教育的全方位、持续、健康发展具有重大的意义。

应用型本科院校以着重培养应用型人才为目标,开设的大多是一些针对性较强、应用特色明确的本科专业,但目前所采用的教材大多是直接选用普通高校的那些适用于研究型人才培养的教材。这些教材往往过分强调系统性和完整性,偏重基础理论知识,而对应用知识的传授却不足,难以充分体现应用型本科人才的培养特点,无法直接有效地满足应用型本科院校的实际教学需要。

浙江大学出版社认识到,高校教育层次化与多样化的发展趋势对出版社提出了更高的要求,即无论在选题策划,还是在出版模式上都要进一步细化,以满足不同层次的高校的教学需求。应用型本科院校是介于研究型本科与高职之间的一个新兴办学群体,它有别于普通的本科教育,但又不能偏离本科生教学的基本要求,因此,教材编写必须围绕本科生所要掌握的基本知识与概念展开。但是,培养应用型与技术型人才又是应用型本科院校的教学宗旨,这就要求教材改革必须有利于进一步强化应用能力的培养。

在人类科技进步的历史进程中,自动化科学和技术的产生改变了人们的生产方式和工作方式,控制和反馈思想则一直影响着人们的思维方式。蒸汽机和电机的应用,延伸了人的体力劳动,推动了自动化技术的发展,催生了工业革命,使人类社会通过工业化从农业社会发展到工业社会。而现代信息技术的应用,则延伸了人的脑力劳动,引发了以数字化、自动化为主要特征的新的工业革命,使人类社会通过信息化从工业社会发展到信息社会。信息时代的自动化技术有了更加宽广的应用领域和难得的发展机遇。为了满足当今社会对自动化专业应用型人才的需要,国内百余所应用型本科院校都设置了自动化及相关专业。

针对这一情况,浙江大学出版社组织了十几所应用型本科院校自动化类专业教师共同开展了“应用型本科自动化专业教材建设”项目的研究,共同研究

目前教材的不适应之处,并探讨如何编写能真正做到“因材施教”、适合应用型本科层次自动化类专业人才培养的系列教材。在此基础上,组建了编委会,确定共同编写“应用型本科院校自动化专业规划教材”系列。

本套规划教材具有以下特色:

在编写的指导思想上,以“应用型本科”学生为主要授课对象,以培养应用型人才为基本目的,以“实用、适用、够用”为基本原则。“实用”是对本课程涉及的基本原理、基本性质、基本方法要讲全、讲透,概念准确清晰。“适用”是适用于授课对象,即应用型本科层次的学生。“够用”就是以就业为导向,以应用型人才为培养目的,讲透关键知识点,达到理论够用,不追求理论深度和内容的广度。突出实用性、基础性、先进性,强调基本知识,结合实际应用,理论与实践相结合。

在教材的编写上重在基本概念、基本方法的表述。编写内容在保证教材结构体系完整的前提下,注重基本概念,追求过程简明、清晰和准确,重在原理,压缩繁琐的理论推导。做到重点突出、叙述简洁、易教易学。还注意掌握教材的体系和篇幅能符合各学院的计划要求。

在作者的遴选上强调作者应具有丰富的应用型本科教学经验,有较高的学术水平并具有教材编写经验。为了既实现“因材施教”的目的,又保证教材的编写质量,我们组织了两支队伍,一支是了解应用型本科层次的教学特点、就业方向的一线教师队伍,由他们通过研讨决定教材的整体框架、内容选取与案例设计,并完成编写;另一支是由本专业的资深教授组成的专家队伍,负责教材的审稿和把关,以确保教材质量。

相信这套精心策划、认真组织、精心编写和出版的系列教材会得到广大院校的认可,对于应用型本科院校自动化专业的教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会主任

宋执环

2008年11月12日

前 言

在工农业生产、科学研究、国防建设和日常生活中,人们需要测量一些非电量,例如位移、速度、加速度、力、力矩、温度、压力、流量和物位等,以便及时、准确地获取信息,这就要求能合理选择和善于应用各种传感器和检测仪表。随着高等教育大众化及高等学校的扩招,传统的研究型大学和研究型大学自动化专业的本科生教材已不能适应应用型本科人才培养的需要,有必要组织编写适应应用型本科教学需要的教材。《传感器与检测技术》是浙江省自动化学会教学工作委员会、浙江大学出版社组织的应用型本科自动化专业系列教材之一,也是作者在多年从事传感器及检测技术的教学和科学研究基础上编写的。本书在编写过程中,注意与其他课程之间知识点的衔接,对基本概念、基本理论的介绍,注重应用型本科学生认知的特点,以够用为原则,强调工程的概念,从工程应用的角度出发来编写教材,而不是仅仅作为知识点的介绍,同时注重近年来本领域理论和技术的发展,根据本科教学的需要,有选择性地将部分新方法和新技术编入本教材中。

全书内容分三个部分。第一部分介绍自动检测技术的基本知识,包括测量误差和数据处理的基本知识、传感器静态特性;第二部分系统地介绍各种传感器的原理、结构和应用,目的在于培养学生使用各类传感器的能力;第三部分介绍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结合起来,以温度检测、流量检测和物位检测为例,使学生能够进一步应用传感器方面的知识解决工程检测中的具体问题。

本书作为应用型本科自动化专业规划系列教材之一,2009年被评为浙江省十一五重点建设教材。浙江省自动化学会教学工作委员会副主任、浙江大学教授、浙江大学宁波理工学院专业责任教授宋执环为系列教材的编写,特别是本

教材的编写倾注了大量的心血。本书由合肥工业大学徐科军教授担任主审。徐教授仔细审阅了书稿,并提出了许多宝贵的修改意见。本书第一次印刷后,曾多次召集编写人员及有关任课教师进行研讨,对书中存在的问题进行修订,同时讨论了第2版的编写大纲及目录。

本书由浙江大学宁波理工学院马修水担任主编。浙江大学宁波理工学院钟伟红编写了第4章的第1、2、3、4、5节,第7章的第5节和第8章;浙江大学城市学院陈琢编写了第9章;浙江科技学院刘西琳编写了第2章;浙江工业大学应艳杰编写了第3章的第1、3节;中国计量学院何金龙编写了第7章的第2、3、4节;中国计量学院金英莲编写了第7章的第1节和第10章;中国计量学院郑恩辉编写了第5章和第6章;浙江工业大学应艳杰和浙江大学宁波理工学院马修水共同编写了第3章的第2节;浙江大学宁波理工学院马修水编写第1章和第4章的第6节。全书由浙江大学宁波理工学院马修水统稿。在本书编写过程中,参阅了许多专家的教材、著作和论文,还得到了国内外有关企业和同行的支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书提供配套的电子课件,可登录浙江大学出版社的网站:www.zjupress.com,免费下载。

由于编者水平有限,出现差错在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2012年9月

目 录

第 1 章 自动检测的基础知识	1
1.1 自动检测技术概述	1
1.1.1 自动检测技术的地位和作用	1
1.1.2 自动检测系统的组成	2
1.1.3 自动检测技术的发展趋势	2
1.2 传感器概述	3
1.2.1 传感器定义	3
1.2.2 传感器的组成	3
1.2.3 传感器分类	4
1.3 测量误差及其不确定度	4
1.3.1 测量误差的概念	4
1.3.2 精度	5
1.3.3 测量误差的表示方法	6
1.3.4 测量不确定度	7
1.4 测量数据处理	13
1.4.1 测量数据的统计特性	13
1.4.2 系统误差的削弱和消除	17
1.4.3 粗大误差的判别与剔除	20
1.4.4 数据处理的基本方法	20
1.5 传感器的一般特性	21
1.5.1 传感器的静态特性	21
1.5.2 传感器的动态特性	25
思考题与习题	29
第 2 章 电阻式传感器	30
2.1 金属电阻应变式传感器	30
2.1.1 金属电阻应变式传感器工作原理	30

2.1.2	电阻应变式传感器特性	32
2.1.3	电阻应变式传感器测量电路	35
2.1.4	电阻应变式传感器应用	37
2.2	压阻式传感器	43
2.2.1	半导体压阻效应和压阻式传感器工作原理	43
2.2.2	测量电路和温度补偿	44
2.2.3	压阻式传感器应用	45
	思考题与习题	47
第3章	电感式传感器	48
3.1	自感式传感器	48
3.1.1	变气隙式自感传感器	50
3.1.2	变面积式自感传感器	52
3.1.3	螺线管式自感传感器	53
3.1.4	自感式传感器测量电路	55
3.1.5	自感式传感器应用	60
3.2	差动变压器	62
3.2.1	变隙式差动变压器	63
3.2.2	螺线管式差动变压器	65
3.2.3	差动变压器应用	70
3.3	电涡流传感器	72
3.3.1	工作原理	72
3.3.2	转换电路	75
3.3.3	电涡流式传感器的应用	76
	思考题与习题	79
第4章	电容式传感器	80
4.1	电容式传感器的工作原理	80
4.1.1	工作原理	80
4.1.2	类型	81
4.2	电容式传感器主要性能	81
4.2.1	变极距式	81
4.2.2	变面积式	82
4.2.3	变介电常数式	83
4.3	电容式传感器的特点和设计要点	84
4.3.1	电容式传感器的特点	84
4.3.2	电容式传感器的设计要点	85

4.4 电容式传感器测量电路	86
4.4.1 交流电桥	86
4.4.2 调频电路	87
4.4.3 二极管双T型电路	88
4.4.4 脉冲宽度调制电路	88
4.4.5 运算放大器式电路	90
4.5 电容式传感器应用	91
4.5.1 电容式差压传感器	91
4.5.2 电容测厚仪	91
4.5.3 电容式加速度传感器	92
4.5.4 电容式湿敏传感器	92
4.5.5 电容式接近开关	92
4.6 容栅式传感器	93
4.6.1 基本类型及工作原理	93
4.6.2 容栅式传感器应用	97
思考题与习题	97
第5章 磁电式传感器	98
5.1 磁电感应式传感器	98
5.1.1 工作原理和结构类型	98
5.1.2 测量电路	100
5.1.3 磁电感应式传感器应用	104
5.2 霍尔传感器	105
5.2.1 霍尔传感器工作原理	105
5.2.2 霍尔元件的结构和基本电路	106
5.2.3 霍尔元件的主要特性参数	108
5.2.4 霍尔元件的误差及补偿	109
5.2.5 霍尔传感器应用	111
思考题与习题	115
第6章 压电式传感器	116
6.1 压电式传感器的工作原理	116
6.1.1 石英晶体的压电效应	116
6.1.2 压电陶瓷的压电效应	119
6.1.3 压电材料	121
6.2 压电式传感器测量电路	122
6.2.1 等效电路	122

6.2.2 测量电路	123
6.3 压电式传感器应用	126
6.3.1 压电式加速度传感器	126
6.3.2 压电式压力传感器	127
6.3.3 压电式流量计	128
思考题与习题	128
第7章 光电式传感器	130
7.1 光电效应和光电器件	130
7.1.1 光电效应	130
7.1.2 光电管	131
7.1.3 光电倍增管	131
7.1.4 光敏电阻	131
7.1.5 光敏二极管和光敏晶体管	132
7.1.6 光电池	133
7.1.7 光电式传感器应用	133
7.2 光电编码器	134
7.2.1 结构及原理	135
7.2.2 码盘和码制	135
7.2.3 二进制码和格雷码的转换	137
7.2.4 光电编码器的应用	138
7.3 电荷耦合器件(CCD)	140
7.3.1 CCD 的工作原理	140
7.3.2 CCD 应用	142
7.4 光纤传感器	144
7.4.1 光纤传感器工作原理	144
7.4.2 光纤传感器分类	145
7.4.3 光纤传感器的应用	146
7.5 光栅传感器	149
7.5.1 光栅传感器基本工作原理	149
7.5.2 莫尔条纹及其特点	150
7.5.3 辨向原理和细分技术	150
思考题与习题	153
第8章 温度检测	154
8.1 概述	154
8.1.1 温标	154

8.1.2 温度检测的主要方法和分类	155
8.2 热电阻传感器	156
8.2.1 金属热电阻	156
8.2.2 半导体热敏电阻	157
8.2.3 热电阻传感器应用	158
8.3 热电偶	160
8.3.1 热电偶测温原理	160
8.3.2 热电偶的基本定律	162
8.3.3 热电偶结构形式	163
8.3.4 标准化热电偶	164
8.3.5 热电偶冷端处理和补偿	166
8.4 非接触式测温	168
8.4.1 工作原理	169
8.4.2 光学高温计	170
8.4.3 光电高温计	171
8.4.4 辐射温度计	172
8.4.5 比色温度计	172
思考题与习题	173
第9章 流量检测	175
9.1 流量测量概述	175
9.1.1 流量测量的基本概念	175
9.1.2 流量检测仪表的分类和主要技术参数	177
9.2 差压式流量计	179
9.2.1 节流式差压流量计的工作原理	180
9.2.2 标准节流装置	182
9.3 电磁流量计	187
9.3.1 工作原理	187
9.3.2 电磁流量传感器	187
9.3.3 电磁流量转换器	188
9.3.4 电磁流量计的特点及使用	188
9.4 涡轮流量计	189
9.4.1 涡轮流量计工作原理	189
9.4.2 涡轮流量变送器的结构	189
9.4.3 涡轮流量计的特点及使用注意事项	190
9.5 涡街流量计	191
9.5.1 涡街流量计工作原理	191

9.5.2 漩涡频率的检测方法	192
9.5.3 涡街流量计特点与使用注意事项	193
9.6 超声波流量计	193
9.6.1 传播速度法测量原理	194
9.6.2 多普勒法测量原理	195
9.6.3 超声波流量计的特点	196
9.7 质量流量计	196
9.7.1 间接式质量流量计	196
9.7.2 直接式质量流量计	197
9.7.3 科里奥利质量流量计	198
9.8 流量仪表的选用	201
思考题与习题	202
第 10 章 物位检测	203
10.1 物位检测方法	203
10.2 常用物位检测仪表	204
10.2.1 电容式物位传感器	204
10.2.2 压力式液位变送器	205
10.2.3 浮力式液位传感器	206
10.3 物位检测仪表的选用	209
思考题与习题	210
附录 1 铂热电阻分度表	211
附录 2 铜热电阻分度表	214
附录 3 铂铑 10—铂热电偶分度表	216
附录 4 镍铬—镍硅热电偶分度表	222
参考文献	225

第 1 章 自动检测的基础知识

1.1 自动检测技术概述

1.1.1 自动检测技术的地位和作用

在科学研究中,一些研究成果必须要通过实验来证实,这就需要一定的测试手段来完成;在工农业生产中,为了保证能正常、高效地生产,也要有一定的测试手段进行生产过程的检查和监视,这些测试手段就是仪器仪表。

关于仪器仪表,最早得到广泛应用的是机械式仪表,以后发展到光学的、电学的仪表等。仪表的发展也是随着科学技术的发展而发展的,每当科学技术前进一步,就要求能够提供新的测试手段,因而推动了仪器仪表的发展,同时,科学技术的成果也为发展新型仪器仪表提供了条件。

由于微电子技术、计算机技术、通信技术及网络技术的迅速发展,对电量的测量技术相应地得到了提高,如准确度高、灵敏度高、反应速度快、能够连续进行测量、自动记录、远距离传输和组成控制网络等。可是,在工程上所要测量的参数大多数为非电量,如机械量(位移、尺寸、力、振动、速度等)、热工量(温度、压力、流量、物位等)、成分量(化学成分、浓度等)和状态量(颜色、透明度、磨损量等)等,因而促使人们使用电测的方法来测量非电量的仪器仪表,研究如何能正确和快速地测量非电量的技术。

由于非电量电测技术具有测量精度高、反应速度快、能自动连续地进行测量、可以进行遥测、便于自动记录、可以与计算机连接进行数据处理、可采用微处理器做成智能仪表、能实现自动检测与转换等优点,在国民经济各部门得到了广泛应用。

在机械制造业中,需要测量位移、尺寸、力、振动、速度、加速度等机械量参数,利用非电量电测仪器,监视刀具的磨损和工件表面质量的变化,防止机床过载,控制加工过程的稳定性。此外,还可用非电量电测单元部件作为自动控制系统中测量反馈量的敏感元件(如光栅尺、容栅尺等)来控制机床的行程、启动、停止和换向。在化工行业需要在线检测生产过程的温度、压力、流量、物位等热工量参数,实现对工艺过程的有效控制,确保生产过程能正常高效地进行,确保安全生产,防止事故发生。在烟草行业,如卷烟包装等自动化生产线,利用非电量电测技术,监控产品质量,剔除废品,并在线统计产品的产量、合格率等管理信息,为生产自动化、管理现代化提供可靠的技术保障。在环境保护等部门需要检测物质的化学成分、

浓度等分量。在现代物流行业,如在控制搬运机器人作业过程中,需要实时地检测工件安放的位置参数,以便准确地控制执行机构工作,可靠地安放货物。在科学研究和产品开发中,将非电量电测技术应用到逆向设计和逆向加工过程中,可缩短产品设计和开发周期。甚至在文物保护领域,研究人员已开始用非电量电测技术进行文物的保护和修复。

综上所述,自动检测技术与我们的生产、生活密切相关。它是自动化领域重要的组成部分,尤其在自动控制中,如果对控制参数不能有效准确地检测,控制就成为无源之水、无本之木。

1.1.2 自动检测系统的组成

在自动检测系统中,各个组成部分常以信息流的过程划分,一般可分为信息的提取、转换、处理和输出几个部分。它首先要获取被测量的信息,把它转换成电量,然后把已转换成电量的信息进行放大、整形等处理,再通过输出单元(如指示仪和记录仪)把信息显示出来,或者通过输出单元把已处理的信息送到控制系统其他单元使用,成为控制系统的一部分等。其组成框图如图 1.1.1 所示。



图 1.1.1 检测系统的组成

在检测系统中,传感器是把被测非电量转换成为与之有确定对应关系,且便于应用的某些物理量(通常为电量)的检测装置。传感器获得信息的正确与否,关系到整个检测系统的精度,如果传感器的误差很大,即使后续检测电路等环节精度很高,也难以提高检测系统的精度。

检测电路的作用是把传感器输出的变量转换成电压或电流信号,使之能在输出单元的指示仪上指示或记录仪上记录;或者能够作为控制系统的检测或反馈信号。测量电路的种类常由传感器类型而定,如电阻式传感器需用一个电桥电路把电阻值变化转换成电流或电压值变化输出,由于电桥输出信号一般比较微弱,常常要将电桥输出信号加以放大,所以在检测电路中一般还带有放大器。

输出单元可以是指示仪、记录仪、累加器、报警器、数据处理电路等。若输出单元是显示器或记录器,则该检测系统为自动测量系统;若输出单元是计数器或累加器,则该检测系统为自动计量系统;若输出单元是报警器,则该检测系统为自动保护系统或自动诊断系统;如果输出单元是处理电路,则该检测系统为部分数据分析系统,或部分自动管理系统,或部分自动控制系统。

1.1.3 自动检测技术的发展趋势

随着微电子技术、通信技术、计算机网络技术的发展,对自动检测技术也提出了越来越高的要求,也进一步推动了自动检测技术的发展,其技术发展趋势主要有以下几个方面。

(1) 不断提高仪器的性能、可靠性,扩大应用范围。随着科学技术的发展,对仪器仪表的性能要求也相应地提高,如提高其分辨力、测量精度,提高系统的线性度、增大测量范围等,使其技术性能指标不断地提高,应用领域不断扩大。

(2) 开发新型传感器。开发新型传感器主要包括:利用新的物理效应、化学反应和生物功能来研发新型传感器,采用新技术、新工艺填补传感器空白,开发微型传感器,仿照生物的感觉功能研究仿生传感器等。

(3) 开发传感器的新型敏感元件材料和采用新的加工工艺。

新型敏感元件材料的开发和应用是非电量电测技术中的一项重要任务,其发展趋势为:从单晶体到多晶体、非晶体,从单一型材料到复合型材料,原子(分子)型材料的人工合成。其中,半导体敏感材料在传感器技术中具有较大的技术优势,陶瓷敏感材料具有较大的技术潜力,磁性材料向非晶体化、薄膜化方向发展,智能材料的探索在不断地深入。智能材料指具备对环境的判断和自适应功能、自诊断功能、自修复功能和自增强功能的材料,如形状记忆合金、形状记忆陶瓷等。

在开发新型传感器时,离不开新工艺的采用。如把集成电路制造工艺技术应用于微型传感器的制造。

(4) 微电子技术、微型计算机技术、现场总线技术与仪器仪表和传感器的结合,构成新一代智能化测试系统,使测量精度、自动化水平进一步提高。

(5) 研究集成化、多功能化和智能化传感器或测试系统。

传感器集成化主要有两层含义:一是同一功能的多元件并列化,即将同一类型的单个传感元件在同一平面上排列起来,排成一维构成线型传感器,排成二维构成面型传感器(如CCD)。另一层含义是功能一体化,即将传感器与放大、运算及温度补偿和信号输出等环节一体化,组装成一个器件(如容栅传感器动栅数显单元)。

传感器多功能化是指一器多能,即用一个传感器可以检测两个或两个以上的参数。多功能化不仅可以降低生产成本、减小体积,而且可以有效地提高传感器的稳定性、可靠性等性能指标。

传感器的智能化就是把传感器与微处理器相结合,使之不仅具有检测功能,还具有信息处理、逻辑判断、自动诊断等功能。

1.2 传感器概述

1.2.1 传感器定义

传感器是一种以一定精确度把被测量(主要是非电量)转换为与之有确定关系、便于应用的某种物理量(主要是电量)的测量装置。这一定义包含了以下几个方面的含义:① 传感器是测量装置,能完成检测任务;② 它的输入是某一被测量,如物理量、化学量、生物量等;③ 它的输出是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,这种量可以是气、光、电量,但主要是电量;④ 输出与输入间有对应关系,且有一定的精确度。

在某些学科领域,传感器又称为敏感元件、检测器、转换器、发讯器等。这些不同提法,反映了在不同的技术领域中,只是根据器件的用途对同一类型的器件使用着不同的技术语而已,它们的内含是相同或相似的。

1.2.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、测量电路三部分组成,组成框图如图 1.2.1 所示。

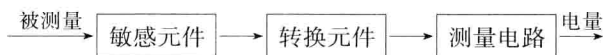


图 1.2.1 传感器组成框图