



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京高等教育精品教材  
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

# 传感器技术及应用

## (第2版)

樊尚春 编著

 北京航空航天大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京高等教育精品教材  
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

# 传感器技术及应用 (第2版)

樊尚春 编著

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本教材较系统地介绍传感器的原理及其应用,包括传感器的特性及其评估;传感器中常用的弹性敏感元件的力学特性;电位器式传感器;应变式传感器;压阻式传感器;热电式传感器;电容式传感器;变磁路式传感器;压电式传感器;谐振式传感器;声表面波传感器;光纤传感器;微机械传感器以及智能化传感器等。

本教材在每一章都配有适量的思考题与习题,在一些重点章节有应用实例与分析。

本书可作为测控技术与仪器、机械工程及自动化、电气工程与自动化、过程装备与控制工程、探测制导与控制技术等专业本科生的教材,也可供相关专业的师生和有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及应用/樊尚春编著. --2 版. --北京  
:北京航空航天大学出版社,2010.10  
ISBN 978-7-5124-0115-0

I. ①传… II. ①樊… 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(2010)第 109519 号

版权所有,侵权必究。

## 传感器技术及应用

(第 2 版)

樊尚春 编著

责任编辑 蔡 喆

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:24.75 字数:634 千字

2010 年 10 月第 2 版 2010 年 10 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-0115-0 定价:44.00 元

## 第 2 版前言

本教材自 2004 年 8 月出版以来,得到了许多专家、教师和学生的关注。期间收到一些读者来信,就教材所涉及的传感器原理、技术与应用进行研讨,提出了一些宝贵的意见与建议。在准备修订过程中,适逢教育部遴选“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,本书顺利入选。在此,作者对为本书修订再版给予帮助与支持的专家表示衷心的感谢!

借再版之机,作者全面认真检查了初版教材,对当时编写及出版中的疏漏逐一进行了核实、修正、补充与完善。此外,结合当前传感器原理、技术与应用的发展现状,对一些重点内容进行了增补和修改。特别反映在:传感器的作用与功能,传感器的发展状况,热式气体质量流量传感器,谐振式科氏质量流量计分类与应用特点,具有直接输出频率量的谐振式微机械陀螺等。

希望各位读者继续关注本书,并对教学内容、教学方法提出宝贵意见。联系方式:shangcfan@buaa.edu.cn;010-82338323。

作 者

2010 年 5 月

# 前 言

本教材是根据国防科工委本科生仪器科学与技术一级学科专业重点教材建设计划制定的教学大纲而编写的,也适用于其他相关学科专业。

作为信息获取的关键环节,传感器在当代科学技术中占有十分重要的地位。现在,所有的自动化测控系统,都需要传感器提供赖以作出实时决策的信息。随着科学技术的发展与进步,特别是系统自动化程度和复杂性的增加,对传感器测量的准确度、稳定性、可靠性和实时性的要求越来越高。业已表明:传感器技术已经成为重要的基础性技术;掌握传感器技术,合理应用传感器几乎是所有技术领域工程技术人员必须具备的基本素养。本教材便是在这样的大背景下,综合国内外传感器技术发展过程和最新进展,参考借鉴国内外大量专家、学者的教材和论著,以及作者近20年在该技术领域积累的教学、科研与工程实践的体会编著而成的。

人们通常认为:传感器是通过敏感元件直接感受被测量,并把被测量转变为可用电信号的一套完整的测量装置。对于传感器,可以从三个方面来把握:一是传感器的工作机理——体现在其敏感元件上;二是传感器的作用——体现在完整的测量装置上;三是传感器的输出信号形式——体现在可以直接利用的电信号上。

本教材在编写中遵循“一条主线、三个重点、两个基础、若干个独立模块”的原则,注重传感器理论知识以及传感器结构组成、设计思路、误差补偿和应用特点等的介绍;注重典型的、常规的传感器与近年来出现的新型传感器技术的介绍;注重在国防工业与一般工业领域中应用的传感器的介绍。

本教材共分15章。

第1章是绪论,介绍有关传感器的基本概念、功能、发展过程、分类、特点以及本教材的主要内容等。

第2章则重点介绍传感器的静、动态特性的描述与数据处理。其中包括传感器静、动态特性的一般描述方式;典型静、动态测试数据的获取过程;典型静、动态数据处理过程,即利用实际数据计算、分析和评估传感器自身的静、动态特性等。同时,本章对非线性传感器静态性能指标计算

进行了有益的讨论,对传感器的噪声及其减小的方法进行了简要介绍。

第3章介绍在传感器中应用的基本弹性敏感元件的力学特性;基于实际的测量过程,结合具体弹性敏感元件(如弹性柱体、弹性弦丝、梁、平膜片、波纹膜片、E形膜片、圆柱壳、弹簧管、波纹管等)的几何边界条件和被测物理量的作用方式,给出其位移特性、应变特性、应力特性以及振动特性;简要介绍了弹性敏感元件常用的材料。

第2,3章属于传感器技术内容中重要的基础部分。

第4~7章介绍变电阻传感器,包括电位器式、应变式、压阻式和热电阻式传感器等。在电位器式传感器部分,介绍其基本构造、工作原理、输出特性、阶梯特性和阶梯误差,非线性电位器的特性及其实现,电位器的负载特性、负载误差以及改善措施,电位器的结构与材料等。在应变式传感器部分,介绍金属电阻丝产生应变效应的机理,金属应变片的结构及应变效应,应变片的横向效应及减小横向效应的措施,应变片的动态响应特性,电阻应变片的温度误差及补偿方法;详细介绍电桥原理、差动检测原理及其应用特点等。在压阻式传感器部分,介绍半导体材料产生压阻效应的机理、特点,单晶硅的晶向、晶面,压阻效应与金属应变效应的比较,单晶硅的压阻系数,扩散电阻的阻值与几何参数的确定,压阻式传感器温度漂移的补偿等。在热电阻式传感器部分,重点介绍金属热电阻和半导体热敏电阻的特性、应用特点及测温电桥。考虑到热电式传感器的测量对象的特殊性,还有针对性地介绍温度的概念、温度标准的传递以及温度传感器的标定与校正等;同时也介绍了在温度测量中常用的热电偶、半导体P-N结传感器的测温原理;介绍常用的非接触测温系统,如全辐射式测温系统、亮度式测温系统和比色式测温系统等。

第8章对电容式传感器进行讨论,介绍电容式变换元件的基本结构形式、特性、等效电路以及典型的信号转换电路;介绍电容式传感器的结构及抗干扰问题等。

第9章对变磁路式传感器进行讨论,介绍电感式和差动变压器式变换元件的基本结构形式、特性、等效电路以及典型的信号转换电路;介绍电涡流效应、霍尔效应等;还介绍了磁栅式位移传感器与感应同步器。

第10章介绍压电式传感器。其中分析并讨论石英晶体、压电陶瓷、聚偏二氟乙烯等常用压电材料的压电效应及应用特点,还介绍压电换能元件的等效电路及信号转换电路;对压电式传感器的抗干扰问题进行了讨论。

第11章介绍先进的谐振式传感器。其中详细讨论机械谐振敏感元

件的谐振现象,谐振子的机械品质因数 $Q$ 值,谐振式传感器闭环自激系统的基本结构及幅值、相位的实现条件和敏感机理及特点,谐振式传感器输出信号的检测等。

第12章介绍声表面波传感器。其中包括声表面波叉指换能器的基本特性及其基本分析模型,声表面波谐振器的结构组成、工作原理以及频率与温度的稳定性问题。

第13章介绍光纤传感器。其中包括光纤的结构与种类、传光原理、集光能力及其传输损耗;详细介绍光纤传感器中应用的强度调制、相位调制、偏振态调制、频率调制的原理及其应用特点;简要介绍分布式光纤传感器。

第14章介绍近年来迅速发展起来的微机械传感器,包括其发展过程、所应用的材料与加工工艺;通过微机械传感器的典型实例说明其特点、发展前景。

第15章对代表传感器发展大趋势的智能化传感器的组成原理、功能和涉及到的基本传感器、应用软件以及发展前景进行扼要讨论,并以一些实例说明它能完成过去传统传感器无法实现的功能。

在第4~15章中都介绍一些测量典型参数的传感器,包括其结构组成、设计思路、应用特点以及误差补偿等。

本教材由北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院测控与信息技术系樊尚春教授编著。

教材中的一些内容,是作者近年来在国家自然科学基金“谐振式直接质量流量传感器结构优化及系统实现(69674029)”、“科氏质量流量计若干干扰因素影响机理与抑制(60274039)”、“谐振式硅微结构压力传感器优化设计与闭环系统实现(50275009)”、航空科学基金“谐振式硅微结构压力传感器的热学特性研究(99I51006)”和“谐振式硅微结构压力传感器闭环系统研究(02I51018)”等资助下取得的阶段性研究成果,在此向国家自然科学基金委员会和航空科学基金委员会表示衷心感谢。

在教材编写过程中,参考并引用了许多专家、学者的教材与论著;严谱强教授、李德胜教授审阅了全稿并提出了许多宝贵的意见与建议,在此一并表示衷心感谢。

传感器技术领域内容广泛且发展迅速,由于编著者学识、水平有限,教材中的错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2004年3月

# 目 录

第1章 绪论	1	2.3.11 综合误差	21
1.1 传感器的作用与功能	1	2.3.12 计算实例	23
1.2 传感器的分类	3	2.4 非线性传感器静态性能指标计算的进一步讨论	26
1.2.1 按工作原理分类	3	2.4.1 问题的提出	26
1.2.2 按被测量分类	4	2.4.2 数据的基本处理	26
1.3 传感器技术的特点	4	2.4.3 误差的描述	27
1.4 传感器技术的发展	5	2.4.4 符合度的计算	27
1.4.1 新原理、新材料和新工艺传感器的发展	6	2.4.5 迟滞的计算	28
1.4.2 传感器的微型化、集成化、多功能化和智能化发展	8	2.4.6 符合性迟滞的计算	28
1.4.3 多传感器融合与网络化发展	10	2.4.7 重复性的计算	29
1.5 传感器技术相关的一些基本概念	10	2.4.8 综合误差的计算	30
1.6 本教材的特点及主要内容	11	2.4.9 计算实例	31
思考题与习题	12	2.5 传感器动态特性方程	39
第2章 传感器的特性	13	2.5.1 微分方程	39
2.1 传感器静态特性的一般描述	13	2.5.2 传递函数	40
2.2 传感器的静态标定	13	2.5.3 状态方程	40
2.2.1 静态标定条件	14	2.6 传感器动态响应及动态性能指标	41
2.2.2 传感器的静态特性	14	2.6.1 时域动态性能指标	41
2.3 传感器的主要静态性能指标及其计算	15	2.6.2 频域动态性能指标	47
2.3.1 测量范围与量程	15	2.7 传感器动态特性测试与动态模型建立	53
2.3.2 静态灵敏度	15	2.7.1 传感器动态标定	53
2.3.3 分辨力与分辨率	16	2.7.2 由实验阶跃响应曲线获取传感器传递函数的回归分析法	54
2.3.4 时漂与温漂	16	2.7.3 由实验频率特性获取传感器传递函数的回归法	59
2.3.5 传感器的测量误差	17	2.7.4 应用实例——高频响、低量程的加速度传感器幅频特性测试及改进	60
2.3.6 线性度	17	2.8 传感器噪声及其减小的方法	64
2.3.7 符合度	19	2.8.1 传感器噪声产生的原因	64
2.3.8 迟滞	19	2.8.2 传感器的信噪比	65
2.3.9 非线性迟滞	20		
2.3.10 重复性	20		



2.8.3 传感器低噪声化的方法	66	4.3.2 实现途径	105
思考题与习题	67	4.4 电位器的负载特性及负载误差	107
<b>第3章 基本弹性敏感元件的力学特性</b>	69	4.4.1 电位器的负载特性	107
3.1 概述	69	4.4.2 电位器的负载误差	107
3.2 弹性敏感元件的基本特性	70	4.4.3 减小负载误差的措施	108
3.2.1 刚度与柔度	70	4.5 电位器的结构与材料	110
3.2.2 弹性滞后	70	4.5.1 电阻丝	110
3.2.3 弹性后效与蠕变	70	4.5.2 电刷	111
3.2.4 弹性材料的机械品质因数	71	4.5.3 骨架	112
3.2.5 位移描述	72	4.6 非线性绕式电位器	113
3.2.6 应变描述	73	4.7 典型的电位器式传感器	113
3.2.7 应力描述	75	4.7.1 电位器式压力传感器	113
3.2.8 广义胡克定律	77	4.7.2 电位器式加速度传感器	115
3.2.9 固有谐振频率	78	思考题与习题	115
3.2.10 弹性元件的热特性	78	<b>第5章 应变式传感器</b>	118
3.3 基本弹性敏感元件的力学特性	80	5.1 应变式变换原理	118
3.3.1 弹性柱体	80	5.2 金属应变片	119
3.3.2 弹性弦丝的固有振动	83	5.2.1 结构及应变效应	119
3.3.3 悬臂梁	84	5.2.2 横向效应及横向灵敏度	120
3.3.4 双端固支梁	86	5.2.3 电阻应变片的种类	122
3.3.5 周边固支圆平膜片	87	5.2.4 电阻应变片的材料	123
3.3.6 周边固支矩形平膜片	89	5.2.5 应变片的主要参数	126
3.3.7 周边固支波纹膜片	93	5.3 应变片的动态响应特性	127
3.3.8 E形圆膜片	94	5.3.1 应变波的传播过程	127
3.3.9 薄壁圆柱壳体	96	5.3.2 应变片工作频率范围的估算	128
3.3.10 弹簧管(包端管)	99	5.4 应变片的温度误差及其补偿	130
3.3.11 波纹管	100	5.4.1 温度误差产生的原因	130
3.4 弹性敏感元件的材料	100	5.4.2 温度误差的补偿方法	131
思考题与习题	101	5.5 电桥原理	133
<b>第4章 电位器式传感器</b>	103	5.5.1 电桥的平衡	133
4.1 概述	103	5.5.2 电桥的不平衡输出	134
4.2 线绕式电位器的特性	104	5.5.3 电桥的非线性误差	135
4.2.1 灵敏度	104	5.6 典型的应变式传感器	137
4.2.2 阶梯特性和阶梯误差	104	5.6.1 应变式力传感器	138
4.2.3 分辨率	105	5.6.2 应变式加速度传感器	146
4.3 非线性电位器	105	5.6.3 应变式压力传感器	147
4.3.1 功用	105	5.6.4 应变式位移传感器	150

5.6.5 应变式转矩传感器·····	152	7.5.2 亮度式测温系统·····	195
思考题与习题·····	153	7.5.3 比色式测温系统·····	197
<b>第6章 压阻式传感器</b> ·····	156	7.6 应用实例·····	198
6.1 压阻式变换原理·····	156	7.6.1 基于热敏电阻的双功能温度报警器·····	198
6.1.1 半导体材料的压阻效应·····	156	7.6.2 基于热电阻的气体质量流量传感器·····	202
6.1.2 单晶硅的晶向、晶面的表示·····	157	思考题与习题·····	203
6.1.3 压阻系数·····	158	<b>第8章 电容式传感器</b> ·····	205
6.2 扩散电阻的阻值与几何参数的确定·····	162	8.1 基本电容式敏感元件·····	205
6.3 典型的压阻式传感器·····	164	8.2 电容式敏感元件的主要特性·····	206
6.3.1 压阻式压力传感器·····	164	8.2.1 变间隙电容式敏感元件·····	206
6.3.2 压阻式加速度传感器·····	171	8.2.2 变面积电容式敏感元件·····	208
6.4 压阻式传感器温度漂移的补偿·····	174	8.2.3 变介电常数电容式敏感元件·····	209
思考题与习题·····	177	8.2.4 电容式敏感元件的等效电路·····	209
<b>第7章 热电式传感器</b> ·····	178	8.3 电容式变换元件的信号转换电路·····	210
7.1 概 述·····	178	8.3.1 运算放大器式电路·····	210
7.1.1 温度的概念·····	178	8.3.2 交流不平衡电桥·····	210
7.1.2 温 标·····	178	8.3.3 变压器式电桥线路·····	211
7.1.3 温度标准的传递·····	179	8.3.4 二极管电路·····	212
7.1.4 温度计的标定与校正·····	180	8.3.5 差动脉冲调宽电路·····	214
7.1.5 测温方法与测温仪器的分类·····	180	8.4 典型的电容式传感器·····	215
7.2 热电阻测温传感器·····	181	8.4.1 电容式压力传感器·····	215
7.2.1 金属热电阻·····	181	8.4.2 电容式加速度传感器·····	216
7.2.2 半导体热敏电阻·····	183	8.5 电容式传感器的结构及抗干扰问题·····	217
7.2.3 测温电桥电路·····	185	8.5.1 温度变化对结构稳定性的影响·····	217
7.3 热电偶测温·····	186	8.5.2 温度变化对介质介电常数的影响·····	217
7.3.1 热电效应·····	186	8.5.3 绝缘问题·····	218
7.3.2 热电偶的工作机理·····	187	8.5.4 寄生电容的干扰与防止·····	218
7.3.3 热电偶的基本定律·····	188	思考题与习题·····	220
7.3.4 热电偶的误差及补偿·····	190	<b>第9章 变磁路式传感器</b> ·····	222
7.3.5 热电偶的组成、分类及特点·····	193	9.1 电感式变换原理·····	222
7.4 半导体P-N结测温传感器·····	194		
7.5 其他测温系统·····	195		
7.5.1 全辐射式测温系统·····	195		

9.1.1 简单电感式变换原理·····	222	10.2.3 常用压电陶瓷·····	258
9.1.2 差动电感式变换元件·····	227	10.3 聚偏二氟乙烯·····	259
9.2 差动变压器式变换元件·····	228	10.4 压电换能元件的等效电路·····	259
9.2.1 磁路分析·····	228	10.5 压电换能元件的信号转换电路·····	260
9.2.2 电路分析·····	230	10.5.1 电荷放大器与电压放大器·····	260
9.3 电涡流式变换原理·····	230	10.5.2 压电元件的并联与串联·····	261
9.3.1 电涡流效应·····	230	10.6 压电式传感器的抗干扰问题·····	262
9.3.2 等效电路分析·····	231	10.6.1 环境温度的影响·····	262
9.3.3 信号转换电路·····	232	10.6.2 环境湿度的影响·····	263
9.4 霍尔效应及元件·····	233	10.6.3 横向灵敏度·····	264
9.4.1 霍尔效应·····	233	10.6.4 基座应变的影响·····	264
9.4.2 霍尔元件·····	235	10.6.5 声噪声·····	265
9.5 典型的变磁路式传感器·····	235	10.6.6 电缆噪声·····	265
9.5.1 变磁阻式加速度传感器·····	235	10.6.7 接地回路噪声·····	265
9.5.2 霍尔式振动位移传感器·····	235	10.7 典型的压电式传感器·····	266
9.5.3 电涡流式振动位移传感器及其 应用·····	236	10.7.1 压电式加速度传感器·····	266
9.5.4 电磁式振动位移传感器及其应用 ·····	236	10.7.2 压电式压力传感器·····	268
9.5.5 差动电感式压力传感器·····	237	10.7.3 压电式超声波传感器·····	269
9.5.6 力平衡伺服式加速度传感器·····	238	10.7.4 压电式温度传感器·····	271
9.5.7 磁电式涡轮流量传感器·····	241	思考题与习题·····	274
9.5.8 磁栅式位移传感器·····	242	<b>第11章 谐振式传感器</b> ·····	276
9.5.9 感应同步器式位移传感器·····	244	11.1 谐振状态及其评估·····	276
思考题与习题·····	248	11.1.1 谐振现象·····	276
<b>第10章 压电式传感器</b> ·····	251	11.1.2 谐振子的机械品质因数 $Q$ 值 ·····	278
10.1 石英晶体·····	251	11.2 闭环自激系统的实现·····	279
10.1.1 石英晶体的压电机理·····	251	11.2.1 基本结构·····	279
10.1.2 石英晶体的压电常数·····	253	11.2.2 闭环系统的实现条件·····	280
10.1.3 石英晶体几何切型的分类·····	255	11.3 敏感机理及特点·····	281
10.1.4 石英晶体的性能·····	256	11.3.1 敏感机理·····	281
10.1.5 石英压电谐振器的热敏感性·····	256	11.3.2 谐振式测量原理的特点·····	281
10.2 压电陶瓷·····	257	11.4 频率输出谐振式传感器的测量方法 比较·····	282
10.2.1 压电陶瓷的压电机理·····	257	11.5 谐振弦式压力传感器·····	283
10.2.2 压电陶瓷的压电常数·····	257	11.5.1 结构与原理·····	283
		11.5.2 特性方程·····	283
		11.5.3 激励方式·····	284

11.6 振动筒式压力传感器 .....	284	13.2 光 纤 .....	319
11.6.1 结构与原理 .....	284	13.2.1 光纤的结构与种类 .....	319
11.6.2 特性方程 .....	285	13.2.2 传光原理 .....	320
11.6.3 激励方式 .....	286	13.2.3 光纤的集光能力 .....	322
11.6.4 特性的解算 .....	287	13.2.4 光纤的传输损耗 .....	323
11.7 谐振膜式压力传感器 .....	288	13.3 强度调制光纤传感器 .....	325
11.7.1 结构与原理 .....	288	13.3.1 光纤微弯传感器 .....	325
11.7.2 特性方程 .....	289	13.3.2 反射式光纤位移传感器 .....	326
11.8 石英谐振梁式压力传感器 .....	289	13.3.3 反射式光纤压力传感器 .....	329
11.8.1 结构与原理 .....	289	13.4 相位调制光纤传感器 .....	330
11.8.2 特性方程 .....	290	13.4.1 相位调制的原理 .....	330
11.9 谐振式科里奥利直接质量流量 传感器 .....	291	13.4.2 相位调制光纤压力传感器 .....	331
11.9.1 结构与工作原理 .....	291	13.4.3 相位调制光纤力传感器 .....	332
11.9.2 信号检测电路 .....	294	13.4.4 基于萨格纳克干涉仪的光纤 陀螺 .....	333
11.9.3 密度的测量 .....	295	13.5 频率调制光纤传感器 .....	334
11.9.4 双组分流体的测量 .....	295	13.6 分布式光纤传感器 .....	336
11.9.5 分类与应用特点 .....	296	思考题与习题 .....	338
思考题与习题 .....	298	<b>第 14 章 微机械传感器</b> .....	339
<b>第 12 章 声表面波传感器</b> .....	300	14.1 概 述 .....	339
12.1 概 述 .....	300	14.1.1 微传感器的发展 .....	339
12.2 声表面波叉指换能器 .....	301	14.1.2 微传感器中应用的材料 .....	340
12.2.1 叉指换能器的基本特性 .....	301	14.1.3 微传感器中应用的加工工艺 .....	340
12.2.2 叉指换能器的基本分析模型 .....	303	14.1.4 微传感器中敏感结构的模型 问题 .....	341
12.3 声表面波谐振器 .....	304	14.1.5 微传感器中微弱信号的处理 问题 .....	341
12.3.1 结构组成及其工作原理 .....	304	14.2 硅电容式集成压力传感器 .....	342
12.3.2 频率和温度的稳定性 .....	306	14.3 硅电容式微机械加速度传感器 .....	343
12.4 典型的声表面波传感器 .....	306	14.3.1 单轴加速度传感器 .....	343
12.4.1 SAW 应变传感器 .....	307	14.3.2 三轴加速度传感器 .....	344
12.4.2 SAW 压力传感器 .....	308	14.4 微机械陀螺 .....	345
12.4.3 SAW 加速度传感器 .....	311	14.4.1 硅电容式表面微机械陀螺 .....	345
12.4.4 SAW 气体传感器 .....	312	14.4.2 输出频率的硅微机械陀螺 .....	346
12.4.5 SAW 流量传感器 .....	315		
12.4.6 SAW 湿度传感器 .....	317		
思考题与习题 .....	318		
<b>第 13 章 光纤传感器</b> .....	319		
13.1 概 述 .....	319		

14.5 微机械磁通门传感器 .....	347	15.4 典型应用 .....	362
14.6 微机械二氧化碳气体传感器 .....	347	15.4.1 光电式智能化压力传感器 .....	362
14.7 微机械科氏质量流量传感器 .....	348	15.4.2 智能化差压传感器 .....	363
14.8 毫米波图像传感器 .....	349	15.4.3 全向空速智能化传感器 .....	365
14.9 基于皮拉尼真空计的微小型压力 传感器 .....	350	15.4.4 智能化结构传感器系统 .....	366
14.10 硅谐振式压力微传感器 .....	351	15.4.5 嵌入式智能化大气数据传感器 系统 .....	367
14.10.1 热激励硅微结构谐振式压力 传感器 .....	351	15.4.6 智能化流量传感器系统 .....	367
14.10.2 差动输出的微结构谐振式压力 传感器 .....	355	15.5 发展前景 .....	368
思考题与习题 .....	356	思考题与习题 .....	369
<b>第15章 传感器技术的智能化发展</b> .....	<b>358</b>	<b>附 录</b> .....	<b>370</b>
15.1 传感器技术智能化的含义 .....	358	附录 A 基本常数 .....	370
15.2 基本传感器 .....	360	附录 B 国际制词冠 .....	371
15.3 智能化传感器中的软件 .....	361	附录 C 国际单位制(SI)的主要单位 .....	371
15.3.1 标度变换技术 .....	361	附录 D 国际单位制(SI)下空气与常见液 体的物理性质 .....	377
15.3.2 数字调零技术 .....	362	<b>参考文献</b> .....	<b>378</b>
15.3.3 非线性补偿 .....	362		
15.3.4 温度补偿 .....	362		
15.3.5 数字滤波技术 .....	362		

# 第 1 章 绪 论

基本内容：

测量 敏感 电信号

传感器的功能

传感器的分类

传感器技术的特点

传感器的新原理、新材料、新功能

微机械加工工艺

传感器的多功能化

传感器的智能化

传感器模型及其仿真

多传感器融合与传感器网络

传感器 仪表 仪器 变送器

## 1.1 传感器的作用与功能

什么是传感器？其作用是什么？以两个用于机载的压力传感器作为实例进行说明。

实例 1: 电位器式压力传感器 (potentiometer pressure transducer), 如图 1.1.1 所示。该传感器的核心部件为真空膜盒, 由它直接感受被测气体压力。气体压力使膜盒产生位移, 经放大传动机构带动电刷在电位器上滑动, 则可从电位器电刷与电源地端间得到相应的输出电压, 因此该输出电压的大小即可反映出被测压力的大小。若想知道被测气体压力与传感器输出电压信号的定量关系, 就必须深入研究、分析传感器的敏感元件, 即真空膜盒自身在气体压力作用下, 其中心位移特性变化的有关规律; 还要研究真空膜盒的几何结构参数、材料参数对这种定量关系的影响规律。在此基础上, 合理设计、选择真空膜盒的有关参数, 以便使所实现的电位器式压力传感器达到较理想的工作状态。

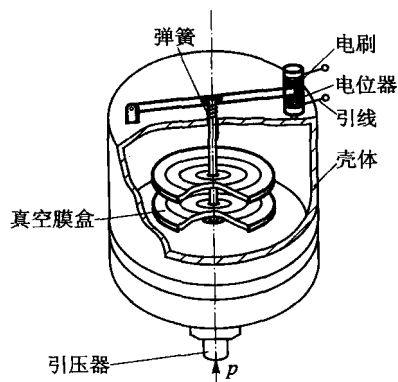


图 1.1.1 电位器式压力传感器

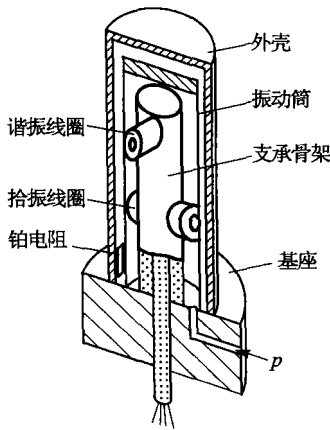


图 1.1.2 谐振筒压力传感器

实例 2: 谐振筒压力传感器(resonant cylinder pressure transducer), 如图 1.1.2 所示。它也是用于测量气体压力的, 即测量飞机所在高度的大气静态压力和总压力。谐振筒能够测量气体压力的原理是什么呢? 因为气体压力变化时, 将引起谐振筒的应力变化, 导致其等效刚度发生变化; 这个过程中谐振筒的等效质量几乎没有变化, 因此, 谐振筒的谐振频率发生了变化。所以通过对谐振筒谐振频率的测量就可以得到作用于谐振筒内的气体压力的量值。至于被测气体压力与传感器输出频率信号的定量关系, 就必须深入研究、分析传感器的敏感元件, 即谐振筒自身在气体压力作用下, 其固有振动特性的有关规律; 还要研究谐振筒的几何结构参数和材料参数对这种定量关系的影响规律。在此基础上, 合理设计、选择谐振筒的有关参数, 以便使所实现的谐振筒压力传感器达到较理想的工作状态。

两个实例说明, 传感器直接的作用与功能就是测量, 即获取被测量的信息。利用传感器, 可以实现对被测对象(被测目标)的测量, 在此基础上进行分析、反馈(监控)、处理, 从而掌握被测对象的运行状态与趋势。

国家标准 GB/T 7665—2005 对传感器(transducer/sensor)的定义是: 能感受被测量并按一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置, 通常由敏感元件和转换元件组成。敏感元件(sensing element), 指传感器中能直接感受或响应被测量的部分; 转换元件(transducing element), 指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。

根据国标的定义和传感器的内涵, 传感器应当从三个方面来理解与把握, 即

1. 传感器的作用——体现在测量上。获取被测量, 是应用传感器的目的, 也是学习本课程的目的。

2. 传感器的工作机理——体现在其敏感元件上。敏感元件是传感器技术的核心, 也是研究、设计和制作传感器的关键, 更是学习本课程的重点。

3. 传感器的输出信号形式——体现在其适于传输或测量的电信号上。输出信号时需要解决非电量向电信号转换以及不适于传输或测量的微弱电信号向适于传输与测量的可用的电信号转换的技术问题, 反映了传感器技术在自动化技术领域的时代性。

因此, 认识一个传感器就必须从其功能、作用上入手, 分析它是用来测量什么“量”的; 这个“量”为什么能够被测量, 基于什么敏感机理感受被测量; 通过什么样的转换装置或信号调理电路才能够给出可用的电信号输出。

事实上, 人类的日常生活、生产活动和科学实验都离不开测量。从本质上说, 测量的功能就是人们感觉器官(眼、耳、鼻、舌、身)所产生的视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉的延伸和替代。如果把计算机看作自动化系统的“电脑”, 就可以把传感器形象地比喻为自动化系统的“电五官”。可见, 传感器技术是信息系统、自动化系统中信息获取的首要环节。如果没有传感器对原始参数进行准确、可靠、在线、实时地测量, 那么无论信号转换、信息分析处理的功能多么强大, 都没有任何实际意义。

在信息技术领域, 传感器是源头。没有传感器, 就不能实现测量; 没有测量, 就没有科学,

就没有技术。因此,大力发展传感器技术在任何领域、任何时候都是重要的和必要的。

## 1.2 传感器的分类

传感器主要按其工作原理和被测量来分类。

### 1.2.1 按工作原理分类

传感器按其敏感的工作原理,一般可分为物理型、化学型和生物型三大类,如图 1.2.1 所示。

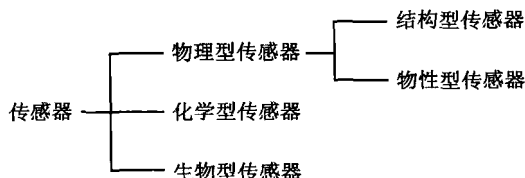


图 1.2.1 传感器的分类

物理型传感器是利用某些敏感元件的物理性质或某些功能材料的特殊物理性能制成的传感器。如利用金属材料在被测量作用下引起的电阻值变化的应变效应的应变式传感器;利用半导体材料在被测量作用下引起的电阻值变化的压阻效应制成的压阻式传感器;利用电容器在被测量的作用下引起电容值的变化制成的电容式传感器;利用磁阻随被测量变化的简单电感式、差动变压器式传感器;利用压电材料在被测力作用下产生的压电效应制成的压电式传感器等。

物理型传感器又可以分为结构型传感器和物性型传感器。

结构型传感器是以结构(如形状、尺寸等)为基础,利用某些物理规律来感受(敏感)被测量,并将其转换为电信号实现测量的。例如电容式压力传感器,必须有按规定参数设计制成的电容式敏感元件;当被测压力作用在电容式敏感元件的动极板上时,引起电容间隙的变化导致电容值的变化,从而实现对压力的测量。又比如谐振式压力传感器,必须设计制作一个合适的感受被测压力的谐振敏感元件;当被测压力变化时,改变谐振敏感结构的等效刚度,导致谐振敏感元件的固有频率发生变化,从而实现对压力的测量。

物性型传感器就是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应感受(敏感)被测量,并转换成可用电信号的传感器。例如利用具有压电特性的石英晶体材料制成的压电式压力传感器,就是利用石英晶体材料本身具有的正压电效应而实现对压力测量的;利用半导体材料在被测压力作用下引起其内部应力变化导致其电阻值变化制成的压阻式传感器,就是利用半导体材料的压阻效应而实现对压力的测量的。

一般而言,物理型传感器对物理效应和敏感结构都有一定要求,但侧重点不同。结构型传感器强调要依靠精密设计制作的结构才能保证其正常工作;而物性型传感器则主要依靠材料本身的物理特性、物理效应来实现对被测量的敏感。

近年来,由于材料科学技术的飞速发展与进步,物性型传感器应用越来越广泛。这与该类传感器便于批量生产、成本较低及易于小型化等特点密切相关。

化学传感器是利用电化学反应原理,把无机或有机化学的物质成分、浓度等转换为电信号



的传感器。最常用的是离子敏传感器,即利用离子选择性电极,测量溶液的 pH 值或某些离子的活度,如  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  等。电极的测量对象不同,但其测量原理基本相同,主要是利用电极界面(固相)和被测溶液(液相)之间的电化学反应,即利用电极对溶液中离子的选择性响应而产生的电位差。所产生的电位差与被测离子活度对数成线性关系,故检测出其反应过程中的电位差或由其影响的电流值,即可给出被测离子的活度。化学传感器的核心部分是离子选择性敏感膜。膜可以分为固体膜和液体膜。玻璃膜、单晶膜和多晶膜属固体膜;而带正、负电荷的载体膜和中性载体膜则为液体膜。

化学传感器广泛应用于化学分析、化学工业的在线检测及环保检测中。

生物传感器是近年来发展很快的一类传感器。它是一种利用生物活性物质选择性来识别和测定生物化学物质的传感器。生物活性物质对某种物质具有选择性亲和力,也称其为功能识别能力;利用这种单一的识别能力来判定某种物质是否存在,其浓度是多少,进而利用电化学的方法进行电信号的转换。生物传感器主要由两大部分组成。其一是功能识别物质,其作用是对被测物质进行特定识别。这些功能识别物有酶、抗原、抗体、微生物及细胞等。用特殊方法把这些识别物固化在特制的有机膜上,从而形成具有对特定的从低分子到大分子化合物进行识别功能的功能膜。其二是电、光信号转换装置,此装置的作用是把在功能膜上进行的识别被测物所产生的化学反应转换成便于传输的电信号或光信号。其中最常应用的是电极,如氧电极和过氧化氢电极。近来有把功能膜固定在场效应晶体管上代替栅-漏极的生物传感器,使得传感器整个体积做得非常小。如果采用光学方法来识别在功能膜上的反应,则要靠光强的变化来测量被测物质,如荧光生物传感器等。变换装置直接关系着传感器的灵敏度及线性度。生物传感器的最大特点是能在分子水平上识别被测物质,不仅在化学工业的监测上,而且在医学诊断、环保监测等方面都有着广泛的应用前景。

本书将重点讨论物理型传感器。

### 1.2.2 按被测量分类

按传感器的被测量——输入信号分类,能够很方便地表示传感器的功能,也便于用户使用。按这种分类方法,传感器可以分为温度、压力、流量、物位、加速度、速度、位移、转速、力矩、湿度、粘度、浓度等传感器。生产厂家和用户都习惯于这种分类方法。

上面所述仍很概括,仅温度传感器中就包括有用不同材料和方法制成的各种传感器,如热电偶温度传感器、热敏电阻温度传感器、金属热电阻温度传感器、P-N 结二极管温度传感器、红外温度传感器等。通常对传感器的命名就是将其工作原理和被测参数结合在一起,先说工作机理,后说被测参数,如硅压阻式压力传感器、电容式加速度传感器、压电式振动传感器、谐振式质量流量传感器等。

针对传感器的分类,不同的被测量可以采用相同的测量原理,同一个被测量可以采用不同的测量原理。因此,必须掌握在不同的测量原理之间测量不同的被测量时,各自具有的特点。

## 1.3 传感器技术的特点

传感器技术是涉及到传感器的机理研究与分析、传感器的设计与研制、传感器的性能评估与应用等的综合性技术。因此,传感器技术具有以下特点: