

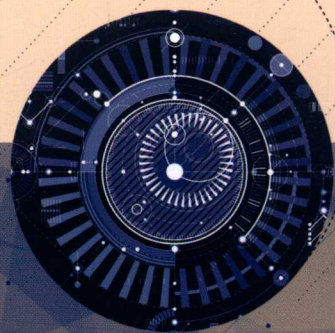
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）

传感器技术案例教程

樊尚春 编著

Sensor Technology Case Study



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
 (电气工程及其自动化、自动化专业)

传感器技术案例教程

樊尚春 编著

主任委员
 樊尚春
 副主任委员
 王福生
 刘敏强
 周本华
 赵光吉
 李一斌
 刘德平
 吴宝平
 吴晓辉
 刘丁
 原晓金
 尹庆华
 牛少延
 林松
 委员 (按姓氏笔画)
 于海生
 王 健
 王老平
 王美玲
 文 斌
 吴在军
 吴美平
 汪青平
 梁 涛
 张恒旭
 李 杰
 曹 钢



机械工业出版社

本书分13章,介绍传感器的原理及其应用,包括传感器的特性与评估、热电式传感器、电位器式传感器、应变式传感器、硅压阻式传感器、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、光纤传感器、微机械传感器,以及智能化传感器等。每章都给出了较丰富的应用实例及分析,并配有适量的思考题与习题。

本书可作为普通高校电气工程、自动化、测控技术与仪器、机械工程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。

本书配有免费电子课件和习题答案,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jincamp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术案例教程/樊尚春编著. —北京:机械工业出版社,2019.9
“十三五”国家重点出版物出版规划项目 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材. 电气工程及其自动化、自动化专业
ISBN 978-7-111-63566-6

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(2019)第186057号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 王荣 刘丽敏
责任校对:佟瑞鑫 封面设计:鞠杨
责任印制:孙炜
天津嘉恒印务有限公司印刷
2020年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·15印张·370千字
标准书号:ISBN 978-7-111-63566-6
定价:38.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
(电气工程及其自动化、自动化专业)

编审委员会

主任委员

郑南宁 中国工程院 院士, 西安交通大学 教授, 中国工程教育专业认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会 主任委员

副主任委员

汪樨生 中国工程院 院士, 浙江大学 教授

胡敏强 东南大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 主任委员

周东华 清华大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 主任委员

赵光宙 浙江大学 教授, 中国机械工业教育协会自动化学科教学委员会 主任委员

章兢 湖南大学 教授, 中国工程教育专业认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会 副主任委员

刘进军 西安交通大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员

戈宝军 哈尔滨理工大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员

吴晓蓓 南京理工大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员

刘丁 西安理工大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员

廖瑞金 重庆大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员

尹项根 华中科技大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员

李少远 上海交通大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员

林松 机械工业出版社 编审 副社长

委员 (按姓氏笔画排序)

于海生 青岛大学 教授

王超 天津大学 教授

王志华 中国电工技术学会
教授级高级工程师

王美玲 北京理工大学 教授

艾欣 华北电力大学 教授

吴在军 东南大学 教授

吴美平 国防科技大学 教授

汪贵平 长安大学 教授

张涛 清华大学 教授

张恒旭 山东大学 教授

黄云志 合肥工业大学 教授

穆钢 东北电力大学 教授

王平 重庆邮电大学 教授

王再英 西安科技大学 教授

王明彦 哈尔滨工业大学 教授

王保家 机械工业出版社 编审

韦钢 上海电力学院 教授

李炜 兰州理工大学 教授

吴成东 东北大学 教授

谷宇 北京科技大学 教授

宋建成 太原理工大学 教授

张卫平 北方工业大学 教授

张晓华 大连理工大学 教授

蔡述庭 广东工业大学 教授

鞠平 河海大学 教授

序

工程教育在我国高等教育中占有重要地位，高素质工程科技人才是支撑产业转型升级、实施国家重大发展战略的重要保障。当前，世界范围内新一轮科技革命和产业变革加速进行，以新技术、新业态、新产业、新模式为特点的新经济蓬勃发展，迫切需要培养、造就一大批多样化、创新型卓越工程科技人才。目前，我国高等工程教育规模世界第一。我国工科本科在校生约占我国本科在校生总数的1/3，近年来我国每年工科本科毕业生约占世界总数的1/3以上。如何保证和提高高等工程教育质量，如何适应国家战略需求和企业需要，一直受到教育界、工程界和社会各方面的关注。多年以来，我国一直致力于提高高等教育的质量，组织并实施了多项重大工程，包括卓越工程师教育培养计划（以下简称卓越计划）、工程教育专业认证和新工科建设等。

卓越计划的主要任务是探索建立高校与行业企业联合培养人才的新机制，创新工程教育人才培养模式，建设高水平工程教育教师队伍，扩大工程教育的对外开放。计划实施以来，各相关部门建立了协同育人机制。卓越计划要求试点专业要大力改革课程体系和教学形式，依据卓越计划培养标准，遵循工程的集成与创新特征，以强化工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力为核心，重构课程体系和教学内容；加强跨专业、跨学科的复合型人才培养；着力推动基于问题的学习、基于项目的学习、基于案例的学习等多种研究性学习方法，加强学生创新能力训练，“真刀真枪”做毕业设计。卓越计划实施以来，培养了一批获得行业认可、具备很好的国际视野和创新能力、适应经济社会发展需要的各类型高质量人才，教育培养模式改革创新取得突破，教师队伍建设初见成效，为卓越计划的后续实施和最终目标的达成奠定了坚实基础。各高校以卓越计划为突破口，逐渐形成各具特色的人才培养模式。

2016年6月2日，我国正式成为工程教育“华盛顿协议”第18个成员国，这标志着我国工程教育真正融入世界工程教育，人才培养质量开始与其他成员国达到了实质等效，同时，也为以后我国参加国际工程师认证奠定了基础，为我国工程师走向世界创造了条件。专业认证把以学生为中心、以产出为导向和持续改进作为三大基本理念，与传统的内容驱动、重视投入的教育形成了鲜明对比，是一种教育范式的革新。通过专业认证，把先进的教育理念引入了我国工程教育，有力地推动了我国工程教育专业教学改革，逐步引导我国高等工程教育实现从课程导向向产出导向转变、从以教师为中心向以学生为中心转变、从质量监控向持续改进转变。

在实施卓越计划和开展工程教育专业认证的过程中，许多高校的电气工程及其自动化、自动化专业结合自身的办学特色，引入先进的教育理念，在专业建设、人才培养模式、教学内容、教学方法、课程建设等方面积极开展教学改革，取得了较好的效果，建设了一大批优质课程。为了将这些优秀的教学改革经验和教学内容推广给广大高校，中国工程教育专业认证

协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会、教育部高等学校电气类专业教学指导委员会、教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会、中国机械工业教育协会自动化学科教学委员会、中国机械工业教育协会电气工程及其自动化专业教学委员会联合组织规划了“卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）”。本套教材通过国家新闻出版广电总局的评审，入选了“十三五”国家重点图书。本套教材密切联系行业 and 市场需求，以学生工程能力培养为主线，以教育培养优秀工程师为目标，突出学生工程理念、工程思维和工程能力的培养。本套教材在广泛吸纳相关学校在“卓越工程师教育培养计划”实施和工程教育专业认证过程中的经验和成果的基础上，针对目前同类教材存在的内容滞后、与工程脱节等问题，紧密结合工程应用和行业企业需求，突出实际工程案例，强化学生工程能力的教育培养，积极进行教材内容、结构、体系和展现形式的改革。

经过全体教材编审委员会委员和编者的努力，本套教材陆续跟读者见面了。由于时间紧迫，各校相关专业教学改革推进的程度不同，本套教材还存在许多问题。希望各位老师对本套教材多提宝贵意见，以使教材内容不断完善提高。也希望通过本套教材在高校的推广使用，促进我国高等工程教育教学质量的提高，为实现高等教育的内涵式发展贡献一份力量。

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材

（电气工程及其自动化、自动化专业）

编审委员会

前言

本书列入“‘十三五’国家重点出版物出版规划项目”的“卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材”子项目，主要适用于电气工程、自动化、测控技术与仪器、机械工程等专业的本科生，也适用于其他相关专业的学生。

传感器技术是信息获取的首要环节，在当代科学技术中占有十分重要的地位。所有的自动化测控系统，都需要传感器提供赖以做出实时决策的信息。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，对传感器测量的精度、稳定性、可靠性和实时性的要求越来越高。传感器技术已经成为重要的基础性技术，掌握传感器技术，能够合理应用传感器，对每个科技工作者与工程技术人员来说是应该具备的基本素养。

就技术内涵而言，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，应从三个方面来把握：一是传感器的工作机理，体现在敏感元件上；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。

本书围绕着上述三个方面进行内容的组织，注重传感器的敏感机理、整体结构组成、参数设计、误差补偿和应用特点等的介绍，注重在工业自动化领域典型的、常用的传感器的介绍，注重近年来出现的新型传感器技术的介绍。

本书以便于读者阅读、理解所涉及的知识点为原则，突出典型案例分析。对重要知识点给出有针对性的分析、讨论；对需要进行定量分析的重要知识点，通过简单算例讨论、计算实例、设计计算实例，给出较详细的计算过程与分析、讨论。在介绍具体传感器的第3~13章中，给出许多传感器的典型实例及其分析、讨论。为了便于读者系统掌握传感器技术的主要内容，开展深入学习、研究，每一章配置一定数量的思考题与习题。

本书共分13章。

第1章是绪论。介绍有关传感器的基本概念，传感器的作用实例分析，传感器的功能、分类、技术特点；论述传感器新原理、新材料、新工艺的发展，传感器微型化、集成化、多功能和智能化的发展，多传感器融合与网络化的发展以及量子传感技术的发展；简要介绍本书的特点。

第2章介绍传感器的特性与评估。介绍传感器静态标定、主要静态性能指标、传感器的动态响应及动态性能指标、动态标定与动态模型建立；给出传感器静态特性的计算实例和动态特性的计算实例。

第3章介绍热电式传感器。介绍温度概念、温度标准、测温方法与测温仪器分类，金属热电阻、半导体热敏电阻的特性及测温电桥电路，热电偶、半导体温度传感器的测温原理，

全辐射式、亮度式和比色式三种常用的非接触式测温原理。

第4章介绍电位器式传感器。介绍电位器的基本结构与功能、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途径,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。

第5章介绍应变式传感器。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,电阻应变片的温度误差及补偿方法;详细介绍电桥电路原理、差动检测原理及其应用特点等。

第6章介绍硅压阻式传感器。介绍半导体材料产生压阻效应的机理、特点,单晶硅的晶向、晶面的表示,压阻效应与金属应变效应的比较,单晶硅的压阻系数矩阵与任意方向压阻系数的计算,压阻式传感器温度漂移的补偿等。

第7章介绍电容式传感器。介绍电容式敏感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;讨论电容式传感器温度变化对结构稳定性和介质介电常数的影响、绝缘问题以及寄生电容的干扰与防止等。

第8章介绍变磁路式传感器。介绍电感式、差动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,磁电感应式变换原理、电涡流式变换原理和霍尔效应等。

第9章介绍压电式传感器。介绍石英晶体、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,压电换能元件的等效电路及信号转换电路;讨论压电式传感器的抗干扰问题。

第10章介绍谐振式传感器。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;介绍谐振式传感器闭环自激系统的基本结构,在复频域、时域中的幅值与相位条件,谐振式传感器测量原理及特点等。

第11章介绍光纤传感器。介绍光纤的结构与种类、传光原理、集光能力及其传输损耗,光纤传感器中应用的强度调制、相位调制、频率调制的原理、应用特点等。

第12章介绍近年来迅速发展起来的微机械传感器。简要介绍微传感器的发展过程、应用的材料与加工工艺、传感器中敏感结构的建模与微弱信号处理问题等。

第13章介绍代表传感器发展大趋势的智能化传感器。简要介绍智能化传感器的组成原理、功能和涉及的基本传感器、应用软件以及发展前景。

第3~13章分别介绍了一些测量典型参数的传感器,包括传感器的结构组成、敏感机理、设计思路、误差补偿,以及典型应用实例与特点等。

本书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,内容结合了作者30多年在该技术领域积累的教学、科研与工程实践的体会,特别地,还包括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)”“谐振式硅微结构传感器综合测试系统(科学仪器专项,60927005)”“频率型微陀螺谐振子振动非线性特性的理论与实验研究(61273060)”“具有差动检测结构的石墨烯谐振式压力传感器研究(61773045)”等项目资助下取得的部

分研究结果，在此向国家自然科学基金委员会表示衷心感谢。

在本书编写过程中，为了充分反映国内外传感器技术的发展过程和最新进展，参考了一些国内外专家学者的教材与论著，清华大学丁天怀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，限于作者的学识与水平，教材中的错误与不妥之处，敬请读者批评指正。作者的联系方式：shangcfan@buaa.edu.cn。

作者

目录 Contents

序 前言

第1章 绪论	1
1.1 传感器的作用实例分析	1
1.2 传感器的分类	5
1.2.1 按输出信号的类型分类	5
1.2.2 按传感器能量源分类	5
1.2.3 按被测量分类	6
1.2.4 按工作原理分类	6
1.3 传感器技术的特点	7
1.4 传感器技术的发展	8
1.4.1 新原理、新材料和新工艺的发展	8
1.4.2 微型化、集成化、多功能和智能化的发展	10
1.4.3 多传感器融合与网络化的发展	11
1.4.4 量子传感技术的快速发展	12
1.5 本书的特点	13
思考题与习题	13
第2章 传感器的特性与评估	15
2.1 传感器的静态标定	15
2.1.1 静态标定条件	15
2.1.2 传感器的静态特性	16
2.2 传感器的主要静态性能指标	17
2.2.1 测量范围与量程	17
2.2.2 静态灵敏度	17
2.2.3 分辨力与分辨率	17
2.2.4 温漂	18
2.2.5 时漂(稳定性)	18
2.2.6 传感器的测量误差	19
2.2.7 线性度	19
2.2.8 迟滞	21
2.2.9 非线性迟滞	22
2.2.10 重复性	22
2.2.11 综合误差	23
2.3 传感器的动态特性与评估	24
2.3.1 传感器的动态特性方程	24

2.3.2 传感器的动态响应及动态性能指标	25
2.3.3 传感器的动态标定	30
2.3.4 传感器的动态模型建立	31
2.4 传感器静态特性的计算实例	34
2.4.1 传感器灵敏度的计算与分析	34
2.4.2 传感器分辨力与分辨率的计算	35
2.4.3 传感器主要静态性能指标的计算与评估	35
2.4.4 传感器温度漂移的计算	39
2.4.5 传感器稳定性的计算	39
2.5 传感器动态特性计算实例	40
2.5.1 利用传感器阶跃响应建立传递函数	40
2.5.2 传感器幅频特性的测试及改进	41
思考题与习题	43
第3章 热电式传感器	46
3.1 概述	46
3.1.1 温度的概念	46
3.1.2 温标	46
3.1.3 测温方法与测温仪器的分类	47
3.2 热电阻温度传感器	47
3.2.1 金属热电阻	47
3.2.2 半导体热敏电阻	49
3.2.3 测温电桥电路	50
3.3 热电偶	53
3.3.1 热电效应	53
3.3.2 热电偶的工作原理	54
3.3.3 热电偶的基本定律	54
3.3.4 热电偶的误差及补偿	55
3.3.5 热电偶的组成、分类及特点	58
3.4 半导体温度传感器	59
3.5 非接触式温度传感器	60
3.5.1 全辐射式温度传感器	60

3.5.2 亮度式温度传感器	60	5.4.1 应变式力传感器	88
3.5.3 比色式温度传感器	61	5.4.2 应变式加速度传感器	96
3.6 温度传感器的典型实例	62	5.4.3 应变式压力传感器	97
3.6.1 典型的测温电桥电路	62	5.4.4 应变式转矩传感器	102
3.6.2 基于热电阻的气体质量流量 传感器	63	思考题与习题	103
思考题与习题	64	第6章 硅压阻式传感器	105
第4章 电位器式传感器	66	6.1 硅压阻式变换原理	105
4.1 基本结构与功能	66	6.1.1 半导体材料的压阻效应	105
4.2 线绕式电位器的特性	67	6.1.2 单晶硅的晶向、晶面的表示	106
4.2.1 灵敏度	67	6.1.3 压阻系数	107
4.2.2 阶梯特性和阶梯误差	67	6.2 硅压阻式传感器的典型实例	110
4.2.3 分辨率	67	6.2.1 硅压阻式压力传感器	110
4.3 非线性电位器	68	6.2.2 硅压阻式加速度传感器	115
4.3.1 功用	68	6.3 硅压阻式传感器温度漂移的补偿	118
4.3.2 实现途径	68	思考题与习题	119
4.4 电位器的负载特性及负载误差	69	第7章 电容式传感器	121
4.4.1 负载特性	69	7.1 电容式敏感元件及特性	121
4.4.2 负载误差	70	7.1.1 电容式敏感元件	121
4.4.3 减小负载误差的措施	71	7.1.2 变间隙电容式敏感元件	121
4.5 电位器的结构与材料	73	7.1.3 变面积电容式敏感元件	122
4.5.1 电阻丝	73	7.1.4 变介电常数电容式敏感元件	123
4.5.2 电刷	73	7.1.5 电容式敏感元件的等效电路	123
4.5.3 骨架	74	7.2 电容式变换元件的信号转换电路	124
4.6 电位器式传感器的典型实例	74	7.2.1 运算放大器式电路	124
4.6.1 电位器式压力传感器	74	7.2.2 交流不平衡电桥电路	124
4.6.2 电位器式加速度传感器	75	7.2.3 变压器式电桥电路	124
思考题与习题	76	7.2.4 二极管电路	125
第5章 应变式传感器	78	7.2.5 差动脉冲调宽电路	126
5.1 电阻应变片	78	7.3 电容式传感器的典型实例	127
5.1.1 应变式变换原理	78	7.3.1 电容式位移传感器	127
5.1.2 应变片结构及应变效应	79	7.3.2 电容式压力传感器	130
5.1.3 电阻应变片的种类	80	7.3.3 电容式加速度传感器	131
5.1.4 应变片的主要参数	81	7.4 电容式传感器的抗干扰问题	131
5.2 应变片的温度误差及其补偿	81	7.4.1 温度变化对结构稳定性的影响	131
5.2.1 温度误差产生的原因	81	7.4.2 温度变化对介质介电常数的 影响	132
5.2.2 温度误差的补偿方法	82	7.4.3 绝缘问题	132
5.3 电桥电路原理	84	7.4.4 寄生电容的干扰与防止	132
5.3.1 电桥电路的平衡	84	思考题与习题	133
5.3.2 电桥电路的不平衡输出	85	第8章 变磁路式传感器	135
5.3.3 电桥电路的非线性误差	85	8.1 电感式变换原理及其元件	135
5.3.4 四臂受感差动电桥电路的 温度补偿	87	8.1.1 简单电感式变换元件	135
5.4 应变式传感器的典型实例	88	8.1.2 差动电感式变换元件	137
		8.1.3 差动变压器式变换元件	138

8.2 磁电感应式变换原理	140	10.2 闭环自激系统的实现	172
8.3 电涡流式变换原理	141	10.2.1 基本结构	172
8.3.1 电涡流效应	141	10.2.2 闭环系统的实现条件	172
8.3.2 等效电路分析	141	10.3 测量原理及特点	173
8.3.3 信号转换电路	142	10.3.1 测量原理	173
8.4 霍尔效应及元件	143	10.3.2 谐振式传感器的特点	174
8.4.1 霍尔效应	143	10.4 谐振式传感器的典型实例	174
8.4.2 霍尔元件	144	10.4.1 谐振弦式压力传感器	174
8.5 变磁路式传感器的典型实例	145	10.4.2 谐振筒式压力传感器	175
8.5.1 差动变压器式加速度传感器	145	10.4.3 谐振膜式压力传感器	179
8.5.2 电磁式振动速度传感器	145	10.4.4 石英谐振梁式压力传感器	180
8.5.3 霍尔式振动位移传感器	146	10.4.5 谐振式科里奥利直接质量流量 传感器	181
8.5.4 差动电感式压力传感器	147	10.4.6 声表面波谐振式加速度 传感器	185
8.5.5 磁电式涡轮流量传感器	148	思考题与习题	186
8.5.6 基于电涡流式振动位移传感器的 振动场测量	149	第 11 章 光纤传感器	188
思考题与习题	149	11.1 光纤及有关特性	188
第 9 章 压电式传感器	151	11.1.1 光纤的结构与种类	188
9.1 主要压电材料及其特性	151	11.1.2 传光原理	189
9.1.1 石英晶体	151	11.1.3 光纤的集光能力	191
9.1.2 压电陶瓷	155	11.1.4 光纤的传输损耗	192
9.1.3 聚偏二氟乙烯	156	11.2 光纤传感器的典型实例	194
9.1.4 压电元件的等效电路	157	11.2.1 基于位移测量的反射式光纤压力 传感器	194
9.2 压电元件的信号转换电路	157	11.2.2 相位调制光纤压力传感器	196
9.2.1 电荷放大器与电压放大器	157	11.2.3 基于萨格纳克干涉仪的光纤角 速度传感器	197
9.2.2 压电元件的并联与串联	158	11.2.4 频率调制光纤血流速度 传感器	199
9.3 压电式传感器的抗干扰问题	159	思考题与习题	200
9.3.1 环境温度的影响	159	第 12 章 微机械传感器	202
9.3.2 环境湿度的影响	160	12.1 概述	202
9.3.3 横向灵敏度	160	12.1.1 微机械传感器的发展	202
9.3.4 基座应变的影响	161	12.1.2 微传感器中应用的材料	203
9.3.5 声噪声的影响	161	12.1.3 微传感器中应用的加工工艺	203
9.3.6 电缆噪声的影响	161	12.1.4 微传感器中敏感结构的模型 问题	204
9.3.7 接地回路噪声的影响	162	12.1.5 微传感器中微弱信号的处理 问题	204
9.4 压电式传感器的典型实例	162	12.2 硅微结构谐振式压力传感器	205
9.4.1 压电式加速度传感器	162	12.2.1 热激励硅微结构谐振式压力 传感器	205
9.4.2 压电式压力传感器	164	12.2.2 差动输出的硅微结构谐振式压力	
9.4.3 压电式超声波流量传感器	165		
9.4.4 压电式温度传感器	166		
思考题与习题	167		
第 10 章 谐振式传感器	169		
10.1 谐振状态及其评估	169		
10.1.1 谐振现象	169		
10.1.2 谐振子的机械品质因数 Q 值	171		

传感器	209	13.1.2 基本传感器	218
12.3 其他硅传感器的典型实例	210	13.1.3 智能化传感器中的软件	219
12.3.1 硅电容式集成压力传感器	210	13.2 智能化传感器的典型实例	220
12.3.2 硅电容式微机械加速度	211	13.2.1 智能化差压传感器	220
传感器	211	13.2.2 机载智能化结构传感器系统	220
12.3.3 硅微机械陀螺	212	13.2.3 全向空速智能化传感器	222
12.3.4 硅微机械科里奥利质量流量	213	13.2.4 嵌入式智能化大气数据传感器	223
传感器	213	系统	223
思考题与习题	215	13.2.5 智能化流量传感器系统	224
第 13 章 智能化传感器及其发展	216	13.3 发展前景	224
13.1 概述	216	思考题与习题	225
13.1.1 传感器技术的智能化	216	参考文献	227

灵敏度发生变化,从而谐振频率的固有频率随被测
压力的变化而变化。通过检测谐振频率固有频率的

第 1 章

绪 论

主要知识点:

- 传感器在信息技术中的重要作用
- 传感器的组成与基本结构
- 敏感元件在传感器中的重要作用
- 传感器的分类方式
- 传感器技术的应用特点及其发展趋势
- 微机械加工工艺在传感器中的应用
- 多传感器融合与传感器网络
- 无线传感器网络与物联网的发展

1.1 传感器的作用实例分析

什么是传感器?其作用是什么?下面以四个典型的压力传感器作为实例进行说明。

实例 1: 电位器式真空膜盒压力传感器 (Potentiometer Pressure Transducer) 的结构如图 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。气体压力变化使膜盒产生位移变化,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。若想知道传感器输出电压信号与被测气体压力的定量关系,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。

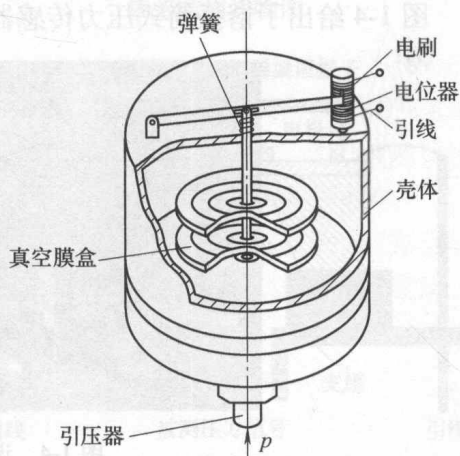


图 1-1 电位器式真空膜盒压力传感器的结构图

图 1-2 给出了电位器式真空膜盒压力传感器的实物图。

实例 2: 谐振筒式压力传感器 (Resonant Cylinder Pressure Transducer) 的结构如图 1-3 所示。该传感器的核心部件是谐振筒,由它直接感受被测压力。气体压力变化引起谐振筒的

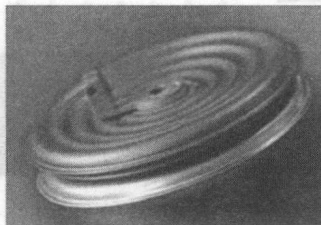
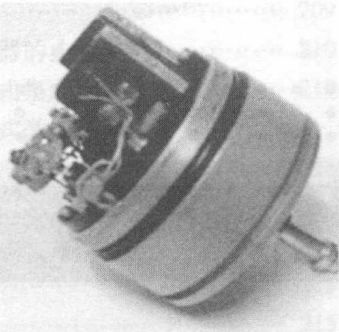


图 1-2 电位器式真空膜盒压力传感器的实物图

应力变化，导致其等效刚度变化；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。若想知道传感器输出频率信号与被测气体压力的定量关系，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式压力传感器达到较理想的工作状态。

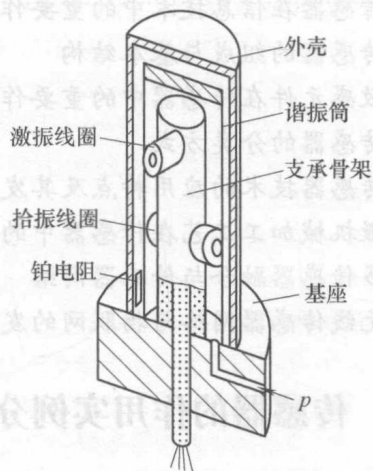


图 1-3 谐振筒式压力传感器的结构图

图 1-4 给出了谐振筒式压力传感器的实物图。

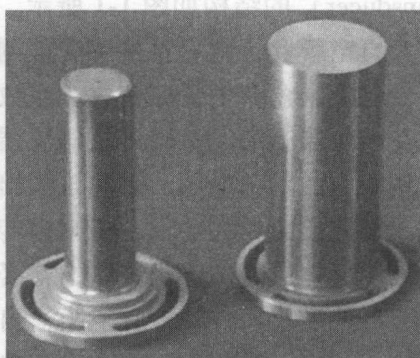
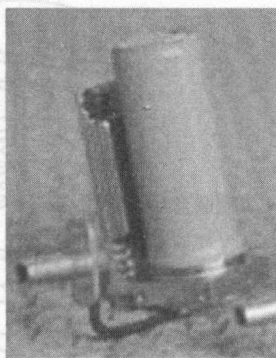


图 1-4 谐振筒式压力传感器的实物图

实例 3：热激励硅微结构谐振式压力传感器

图 1-5 所示为一种典型的热激励硅微结构谐振式压力传感器的敏感结构，它由方形平膜片、梁谐振子和边界隔离部分构成。方形平膜片作为一次敏感元件，直接感受被测压力，将被测压力转化为膜片的应变与应力；在膜片的上表面制作浅槽和梁谐振子，以梁谐振子作为二次敏感元件，感受膜片上的应力，即间接感受被测压力。外部压力的作用使梁谐振子的等

效刚度发生变化，从而梁谐振子的固有频率随被测压力的变化而变化。通过检测梁谐振子固有频率的变化，即可间接测出外部压力的变化。若想知道传感器输出频率信号与被测气体压力的定量关系，就必须深入研究、分析传感器的敏感元件，即方形平膜片在压力作用下，梁谐振子固有振动特性的有关规律；还要研究方形平膜片、梁谐振子的几何结构参数和材料参数，梁谐振子在方形平膜片上的位置对这种定量关系的影响规律。在此基础上，合理设计、选择方形平膜片、梁谐振子的有关参数，以便使所实现的硅微结构谐振式压力传感器达到较理想的工作状态。

图 1-6 给出了硅微结构谐振式压力传感器敏感结构部分的实物图。

实例 4：石墨烯谐振式压力传感器

图 1-7 所示为一种新型的石墨烯谐振式压力传感器原型示意图，采用单晶硅制作方形平膜片为一次敏感元件直接感受被测压力；设置于方形平膜片上的双端固定石墨烯梁谐振子（Double Ended clamped Graphene Beam resonator, DEGB）作为二次谐振敏感元件间接感受被测压力。若想知道传感器输出频率信号与被测压力的定量关系，就必须深入研究、分析传感器的敏感元件，即方形平膜片在压力作用下，梁谐振子固有振动特性的有关规律；还要研究方形平膜片、梁谐振子的几何结构参数和材料参数，梁谐振子在方形平膜片上的位置对这种定量关系的影响规律。在此基础上，合理设计、选择方形平膜片、梁谐振子的有关参数，以便使所实现的硅微结构谐振式压力传感器达到较理想的工作状态。图 1-8 给出了 A、B 两类典型的复合敏感差动检测结构原理示意图，其中 A 类的两个 DEGB，一个设置于压力最敏感区域，另一个设置于压力弱敏感区域；B 类的两个 DEGB，一个设置于压力的正向最敏感区域，另一个设置于压力的负向最敏感区域。由于敏感结构极其微小，两个 DEGB 所处的温度场相同，温度对这两个 DEGB 谐振频率的影响规律也是相同的，因此通过差动检测方案可显著减小温度对测量结果的影响，实现高性能测量。

这四个实例充分说明，传感器直接的作用与功能就是测量。利用传感器，可以获得对被

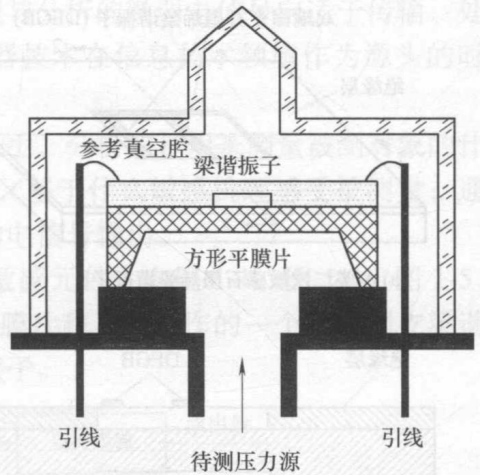


图 1-5 热激励硅微结构谐振式压力传感器的敏感结构示意图

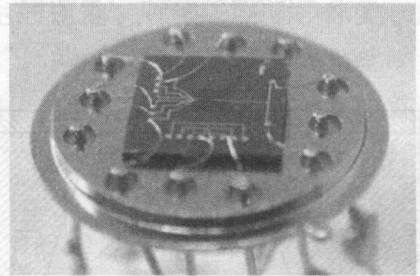


图 1-6 硅微结构谐振式压力传感器敏感结构实物图

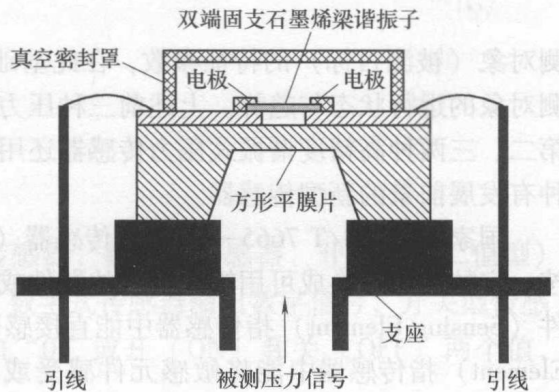


图 1-7 新型石墨烯谐振式压力传感器原型示意图

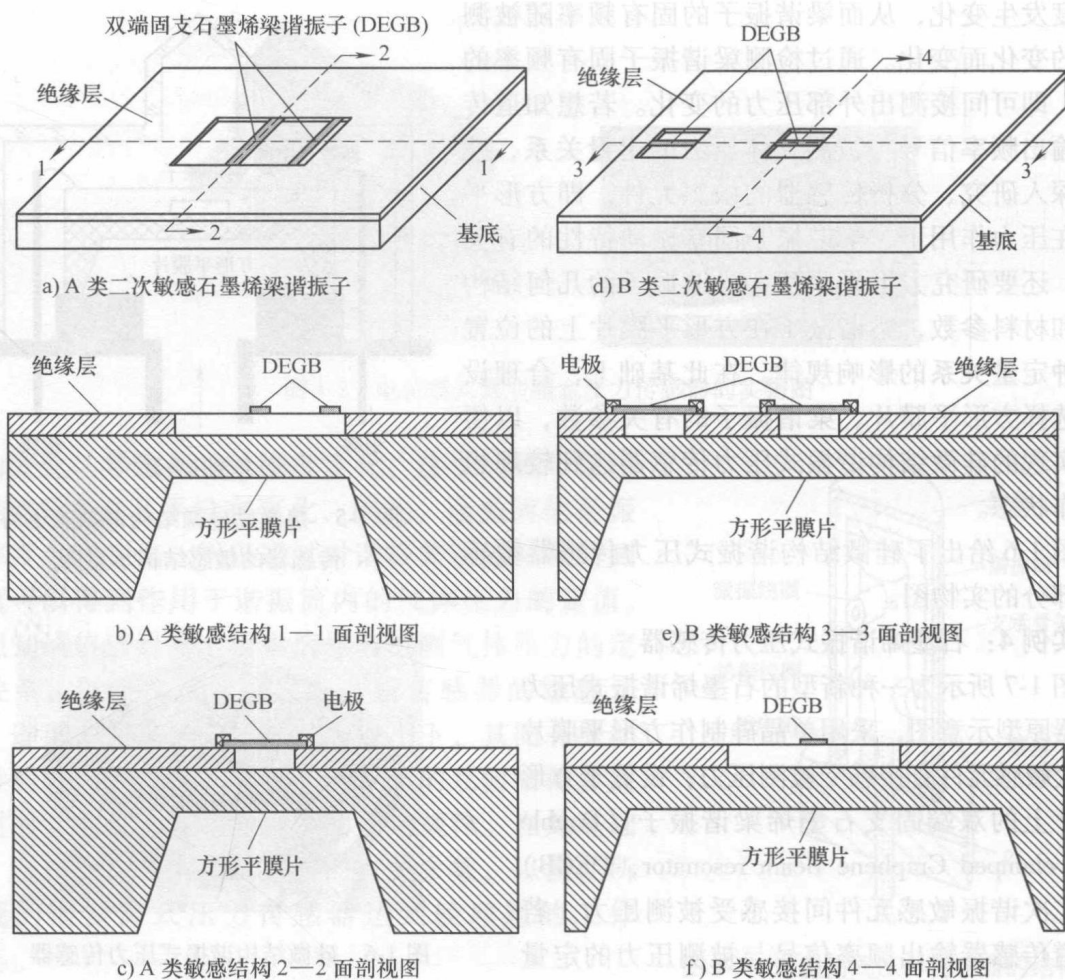


图 1-8 复合敏感差动检测结构原理示意图

测对象（被测目标）的特征参数，在此基础上进行处理、分析、反馈（监控），从而掌握被测对象的运行状态与趋势。上述前三种压力传感器成功应用于航空机载、工业自动化领域，第二、三两种高精度谐振式压力传感器还用于计量；第四种传感器目前还处于研究中，是一种有发展前景的新型传感器。

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。

根据国家标准的定义和传感器的内涵，传感器应当从以下三个方面来理解与把握：

- 1) 传感器的作用——体现在测量上。获取被测量，即被测对象的特征量，根据传感器输入-输出特性，利用传感器的输出电信号解算出被测量。
- 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、处理与分析的电信号上。输出信号