



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

信息与通信工程

Principles and Applications of Semiconductor Sensors

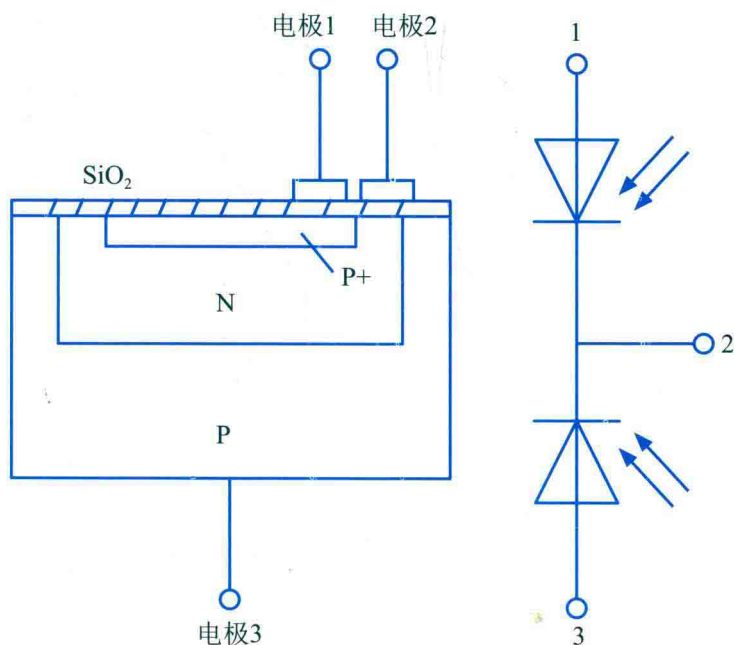
半导体传感器原理与应用

李新 魏广芬 吕品 编著

Li Xin

Wei Guangfen

Lü Pin



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Principles and Applications of Semiconductor Sensors

半导体传感器原理与应用

李新 魏广芬 吕品 编著

Li Xin

Wei Guangfen

Lü Pin

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍了气敏、湿敏、热敏、磁敏、力敏、光敏和离子敏等半导体敏感元件与传感器的工作原理、制作工艺、特性参数及其应用举例,并介绍了半导体传感器技术的新发展。全书内容丰富,特色鲜明,各章后配有习题。

本书适合作高等学校电子科学与技术、电子信息科学与技术、微电子学等专业相关课程的教材,也可供从事半导体传感器技术、微电子技术研究的工程人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

半导体传感器原理与应用/李新,魏广芬,吕品编著. —北京:清华大学出版社,2018

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-50304-0

I. ①半… II. ①李… ②魏… ③吕… 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(2018)第 112245 号

责任编辑:曾 珊

封面设计:李召霞

责任校对:梁 毅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.5

字 数:496 千字

版 次:2018 年 10 月第 1 版

印 次:2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

产品编号:076825-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科技大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科技大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	火箭军工程大学
	吴 璞	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中国科学院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团股份有限公司
	蒋晓瑜	陆军装甲兵学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋 峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳 伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高[2012]4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

随着科学技术的不断进步,传感器逐渐向集成化、多功能化和智能化方向发展。半导体传感器是利用半导体材料的各种物理、化学和生物学特性制成的传感器,具有体积小、响应快和灵敏度高优点,便于实现集成化、多功能化和智能化。因此,半导体敏感元件与传感器受到人们的普遍重视。目前,传感器相关教材很多,但全面、深入地介绍半导体敏感元件与传感器的教材较少,不能满足高等学校电子科学与技术、电子信息科学与技术、微电子学等专业教学的需要。为此,编者编写了本书,以满足大家学习半导体传感器技术的愿望。

全书共分为9章。第1章介绍传感器的基础知识,第2章介绍半导体传感器常用的敏感材料及典型工艺,第3~9章依次系统阐述气敏、湿敏、热敏、磁敏、力敏、光敏和离子敏等半导体敏感元件与传感器的工作原理、制作工艺及应用。

本书第1、2、5、7、9章由李新编写,第3、4章由魏广芬编写,第6、8章由吕品编写,全书由李新统稿。

本书在编写和出版过程中,得到了清华大学出版社的支持,在此表示真挚的感谢。同时,对本书参考的文献资料的作者致以诚挚的谢意。由于编者水平有限,书中难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2018年3月

教学建议

TEACHING ADVICE

本书定位

本书适合用作高等学校电子科学与技术、电子信息科学与技术、微电子学等专业相关课程的教材,也可供其他相关专业本科生、研究生和从事半导体传感器研究的工程技术人员参考。

建议授课学时

如果将本书作为教材使用,建议课程分为课堂讲授和实验两部分。课堂讲授建议 40 学时。实验学时根据学校实验条件制定。

教学内容、重点和难点提示,课时分配

序号	教 学 内 容	教 学 重 点	教 学 难 点	课时分配
第 1 章	传感器的基础知识	介绍传感器的组成及分类、静态特性和动态特性、参数标定、提高传感器性能的方法	传感器动态特性	4 学时
第 2 章	半导体传感器敏感材料及典型工艺	介绍半导体传感器敏感材料及其常用加工技术	常用加工技术	2 学时
第 3 章	半导体气敏元件与传感器	介绍金属氧化物的半导体化、半导体气敏元件与传感器的原理、工艺及应用	半导体气敏元件与传感器的原理	4 学时
第 4 章	半导体湿敏元件与传感器	介绍湿度的表示方法、湿敏元件的特性参数、半导体湿敏元件感湿机理、特性参数、制造工艺、湿敏元件的标定方法、线性化	半导体湿敏元件感湿机理、制造工艺	4 学时
第 5 章	半导体热敏元件与温度传感器	介绍热电阻、热敏二极管、热敏晶体管、集成温度传感器、热电偶的测温原理、制作及应用	集成温度传感器、热电偶的测温原理	6 学时
第 6 章	半导体磁敏元件与传感器	介绍霍尔效应与磁阻效应、霍尔元件和磁阻元件、磁敏二极管与磁敏三极管、磁敏集成传感器原理与工艺	磁敏集成传感器原理与工艺	6 学时
第 7 章	半导体力敏元件与传感器	介绍电阻应变片、压阻式、电容式和压电式力敏元件和传感器原理、结构设计、制造工艺、测量电路和温漂补偿技术等	压阻式传感器的设计与测量电路、电容式传感器测量电路、压电效应原理及测试电路	8 学时
第 8 章	半导体光敏元件与传感器	介绍半导体的光吸收理论、光电效应理论、光电管、光敏电阻器、光电二极管、光电池、电荷耦合器件、光电位置敏感器件、光控晶闸管与光耦合器件等相关内容	半导体的光吸收、光电二极管原理	4 学时
第 9 章	半导体离子敏传感器与生物传感器	半导体离子敏传感器与生物传感器的原理及工艺	离子敏传感器选择性系数	2 学时

目录

CONTENTS

第 1 章 传感器的基础知识	1
1.1 传感器的基本概念	1
1.2 传感器的一般特性	2
1.2.1 传感器的静态特性	3
1.2.2 传感器的动态特性	6
1.3 传感器的标定	12
1.3.1 传感器的静态标定	12
1.3.2 传感器的动态标定	13
1.4 提高传感器性能的方法	15
小结	16
习题	16
第 2 章 半导体传感器敏感材料及典型工艺	18
2.1 半导体材料	18
2.1.1 硅材料特性	18
2.1.2 主要的硅化合物	19
2.2 电子陶瓷	20
2.2.1 电子陶瓷的特性	20
2.2.2 电子陶瓷的制备工艺	20
2.2.3 电子陶瓷的应用	21
2.3 有机敏感材料	22
2.4 金属敏感材料	23
2.5 常用加工技术	23
2.5.1 光刻工艺	23
2.5.2 腐蚀工艺	27
2.5.3 键合技术	30
2.5.4 微机械加工技术	32
2.5.5 LIGA 技术	34
小结	36
习题	36
第 3 章 半导体气敏元件与传感器	38
3.1 金属氧化物的半导体化	39

3.2	表面电阻控制型气敏元件	41
3.2.1	烧结型 SnO_2 气敏元件的结构	41
3.2.2	厚膜型和薄膜型 SnO_2 气敏元件的结构	43
3.2.3	SnO_2 表面电阻控制型气敏元件的工作原理	44
3.2.4	气敏元件的特性参数	45
3.2.5	SnO_2 气敏元件的主要特性	47
3.2.6	烧结型 SnO_2 气敏元件的制备工艺	47
3.3	氧化锌(ZnO)表面电阻控制型气敏元件	50
3.4	体电阻控制型气敏元件	52
3.4.1	氧化铁(Fe_2O_3)系传感器	52
3.4.2	半导体氧敏元件	57
3.5	ZrO_2 浓差电池型氧传感器	60
3.6	电压控制型气敏传感器	62
3.6.1	肖特基二极管气敏元件	62
3.6.2	气敏开关元件	63
3.6.3	MOS 二极管气敏元件	64
3.7	催化金属栅场效应气敏传感器	64
3.7.1	MOSFET 的工作原理	65
3.7.2	Pd-MOSFET 氢敏元件	65
3.7.3	集成 Pd-MOSFET 氢敏元件	68
3.7.4	H_2S 气敏 Pd 栅 MOS 管	69
3.8	微热板基气体传感器	70
3.9	气敏传感器特性参数的测试条件与装置	71
3.10	气敏传感器的应用	72
	小结	73
	习题	73
第 4 章	半导体湿敏元件与传感器	75
4.1	湿度表示方法	75
4.2	湿敏元件与传感器分类	77
4.3	特性参数	78
4.4	半导体陶瓷湿敏元件	80
4.4.1	半导体陶瓷材料的感湿机理	80
4.4.2	烧结型半导体陶瓷湿敏元件	82
4.4.3	$\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 系厚膜陶瓷湿敏元件	86
4.4.4	涂覆膜型 Fe_3O_4 湿敏元件	88
4.4.5	多孔 Al_2O_3 薄膜型湿敏元件	91
4.5	元素半导体湿敏元件	95
4.6	半导体结型和 MOS 型湿敏元件	96
4.7	电解质系湿敏传感器	99
4.7.1	无机电解质湿敏元件	99
4.7.2	高分子材料湿敏元件	101

4.8 湿敏元件的应用	104
4.8.1 湿敏元件的标定	104
4.8.2 湿敏元件的线性化	106
小结	109
习题	110
第5章 半导体热敏元件与温度传感器	111
5.1 热电阻	111
5.1.1 金属热电阻	111
5.1.2 半导体热敏电阻	114
5.1.3 硅温度传感器	115
5.2 半导体热敏二极管	117
5.2.1 热敏二极管工作原理	117
5.2.2 热敏二极管的基本特性	118
5.3 半导体热敏晶体管	118
5.4 集成温度传感器	119
5.4.1 电流型集成温度传感器	119
5.4.2 电压型集成温度传感器	124
5.4.3 集成温控开关	126
5.4.4 数字型集成温度传感器	127
5.5 热电偶传感器	132
5.5.1 热电偶的测温原理	132
5.5.2 热电偶基本定律	134
5.5.3 热电偶的结构	135
5.5.4 热电偶冷端温度补偿	136
5.5.5 热电堆	138
小结	139
习题	139
第6章 半导体磁敏元件与传感器	142
6.1 半导体的磁敏效应	142
6.2 霍尔元件	144
6.2.1 霍尔元件的结构	144
6.2.2 基本测试电路	145
6.2.3 电磁特性	146
6.2.4 霍尔元件的制备工艺	146
6.2.5 霍尔元件的特性参数	147
6.2.6 霍尔元件的补偿技术	149
6.2.7 基本电路	152
6.2.8 霍尔元件的应用	153
6.3 磁阻元件	156
6.3.1 几何磁阻效应	157
6.3.2 长方形磁阻元件	158

6.3.3	栅格结构型磁阻元件和科比诺磁阻元件	159
6.3.4	磁阻元件的特性参数	160
6.3.5	磁阻元件的制备工艺	160
6.3.6	磁阻元件的应用举例	161
6.3.7	巨磁阻传感器	162
6.4	磁敏二极管	163
6.4.1	磁敏二极管的结构和工作原理	163
6.4.2	磁敏二极管的特性参数	165
6.4.3	磁敏二极管的温度补偿	169
6.5	磁敏三极管	170
6.5.1	磁敏三极管的结构	170
6.5.2	磁敏三极管的工作原理	171
6.5.3	磁敏三极管的特性参数	171
6.5.4	磁敏三极管的温度补偿技术	174
6.6	磁敏集成电路	175
6.6.1	双极型霍尔开关集成传感器	175
6.6.2	双极型霍尔线性集成传感器	179
6.7	微型磁通门	180
6.7.1	磁通门工作原理	180
6.7.2	磁通门制作工艺	181
小结		181
习题		182
第7章	半导体力敏元件与传感器	184
7.1	力学的基本概念	184
7.2	电阻应变片	186
7.3	扩散硅压阻式压力传感器	194
7.3.1	半导体的压阻系数	194
7.3.2	压阻式压力传感器的结构设计	200
7.3.3	压阻式压力传感器的制备工艺	207
7.3.4	硅压阻式传感器的测量电路	209
7.3.5	压阻式压力传感器的温漂补偿技术	211
7.3.6	差压传感器结构	213
7.3.7	压阻式加速度传感器	214
7.3.8	集成压力传感器	215
7.3.9	表面微机械压阻式压力传感器	217
7.4	电容式压力传感器	218
7.4.1	工作原理及类型	218
7.4.2	电容式传感器主要性能	220
7.4.3	硅电容压力传感器	221
7.4.4	电容式传感器典型测量电路	222
7.5	压电式力学量传感器	225

7.5.1 压电效应	225
7.5.2 石英晶体的压电效应	226
7.5.3 压电陶瓷的压电效应	229
7.5.4 压电元件的等效电路和结构形式	230
7.5.5 压电传感器的测量电路	231
7.5.6 压电传感器的结构与应用	235
7.5.7 压电式力学量传感器的主要性能	236
7.6 典型的声波质量传感器	238
小结	240
习题	240
第8章 半导体光敏元件与传感器	243
8.1 半导体的光吸收	243
8.1.1 本征吸收	243
8.1.2 直接跃迁和间接跃迁	244
8.1.3 其他光吸收过程	246
8.2 半导体的光电效应	247
8.2.1 外光电效应	248
8.2.2 内光电效应	248
8.3 外光电效应器件	249
8.3.1 光电管	249
8.3.2 光电倍增管	251
8.4 光电导效应器件——光敏电阻器	252
8.4.1 光电导管的工作原理	252
8.4.2 定态光电导及其弛豫过程	253
8.4.3 光敏电阻的结构	255
8.4.4 光敏电阻的种类	255
8.4.5 光敏电阻的特性和参数	255
8.5 光生伏特效应器件	259
8.5.1 光电二极管	259
8.5.2 高速 PIN 硅光电二极管	263
8.5.3 雪崩型光电二极管	264
8.5.4 硅光电晶体三极管	264
8.5.5 光电池	267
8.6 电荷耦合器件	271
8.6.1 CCD 的基本工作原理	271
8.6.2 CCD 图像传感器	275
8.7 光电位置敏感器件	277
8.8 光控晶闸管	280
8.9 光电耦合器件	281
小结	284
习题	284

第 9 章 半导体离子敏传感器与生物传感器	287
9.1 离子敏感元件的基本知识	287
9.2 ISFET	288
9.2.1 ISFET 的结构	289
9.2.2 ISFET 的工作原理	290
9.2.3 ISFET 的特性参数	291
9.2.4 ISFET 的应用	294
9.3 半导体生物传感器	295
9.3.1 酶 FET	295
9.3.2 免疫 FET	298
9.3.3 基于 MEMS 的生物传感器	299
小结	300
习题	301
附录 A Pt100 铂电阻分度表	302
附录 B K 型热电偶分度号表	305
参考文献	309

信息技术已经成为当今全球性的战略技术,由信息采集、信息传输和信息处理三部分组成。信息采集主要是利用传感技术将非电量(例如,压力、力矩、位移、速度、加速度、温度、湿度、磁场、光照等)的信息转变为电信号进行采集;信息的传输主要采用通信技术,这犹如人的神经系统;信息处理主要利用计算机技术对信息进行加工处理,计算机被比作人的大脑。传感技术已经成为现代科学技术各个领域,特别是自动检测、自动控制系统中不可缺少的部分,传感技术是衡量一个国家信息化程度的重要标志。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始信息进行精确可靠的捕捉和转换,那么一切的测量和控制都不可能实现。人们往往把传感器比作人的“五官”和“四肢”,直接感受外部世界的信息。显然,没有传感器也就没有现代化的测量和控制系统,没有传感器也就没有现代科学技术的迅速发展。

1.1 传感器的基本概念

依据《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005),传感器是指能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。传感器有时也被称为变送器、换能器或探测器。传感器一般是由敏感元件、转换元件、信号调理电路及辅助电路组成的,如图 1-1 所示。

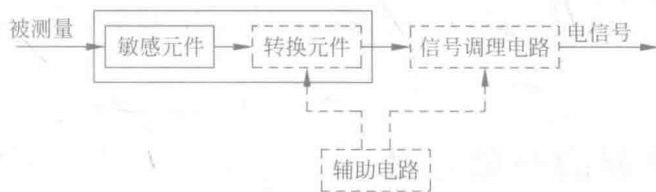


图 1-1 传感器的组成

敏感元件是可以直接感受被测非电量的“探头”,并把这种非电量按照一定的规律转换成与之有确定关系且易于变换成电量的其他量(通常情况仍为非电量)。转换元件将敏感元件感受的非电量转换成适合传输和测量的电量。例如,应变式压力传感器由弹性膜片和电阻应变片构成,其中弹性膜片就是敏感元件,它能将压力转换成弹性膜片的应变;弹性膜片的应变施加在电阻应变片上,电阻应变片再将其应变量转换成电阻的变化量,电阻应变片就是转换元件。但并不是所有的传感器都明显区分为敏感元件和转换元件两部分,有的是二

者合为一体。例如,热电偶、热敏电阻和压电晶体等,它们一般都是将感受到的被测量直接转换为电信号,没有中间环节。敏感元件与转换元件合二为一的传感器很多。

信号调理电路把转换元件输出的电信号转换为便于测量、显示、记录、处理和控制的有用信号。传感器的种类不同,采用的信号调理电路也不同。常用的信号调理电路有振荡器、电桥、放大器和变换器等。辅助电路通常指电源电路。在测量仪器中,有时把敏感元件部分称为一次仪表,而测量电路和输出部分称为二次仪表。

传感器技术包括传感器材料的研究、敏感元件的设计、制造工艺、传感器的性能测试及传感器的开发和应用等多项综合技术,涉及物理学、数学、化学、材料学、工艺学、统计学以及多种现代科学技术。

早期出现的传感器,多是利用构件的移动、伸缩等位置或几何尺寸的变化测量物理量。例如,利用毛发、肠衣的伸缩来感知湿度的变化,进一步用以移动衔铁改变电感而获得电磁信号,这类传感器被称为结构型传感器。随着半导体材料及有机高分子功能材料的不断开发,传感器技术也有了变化,这些功能材料可以直接感知某些非电的物理量、化学量或生物量,并将其转换为电信号。这些材料的敏感特性并不是通过其结构改变,而是通过某种物性的变化来实现。这类传感器常称为物性型传感器,目前这类传感器发展势头方兴未艾,前景广阔。

随着半导体集成电路技术的发展,可以把敏感元件、转换元件与信号调理电路集成到一块芯片上,构成集成化的传感器。如果把微处理器也集成到同一个芯片上,就成为智能型传感器。传感器的种类很多,原理各异,检测对象门类繁多,一般可按以下几种方法分类:

(1) 按传感器的工作机理及转换形式分类,分为结构型、物性型、数字(频率)型、量子型、信息型和智能型等。

(2) 按敏感材料分类,分为半导体型、功能陶瓷型和功能高聚物型等。

(3) 按测量对象的参数分类,分为光传感器、湿度传感器、气体传感器、温度传感器、磁传感器、压力(压强)传感器、振动传感器和超声波传感器等。

(4) 按应用领域分类,分为机器人传感器、汽车传感器、医用(生物)传感器、环保传感器以及各种过程检测传感器等。

本书按照第三种分类方法论述各种传感器的工作原理、制造工艺、信号处理电路及典型应用。

1.2 传感器的一般特性

传感器的特性主要是指传感器的输入量与输出量间的对应关系。传感器所测量的非电量一般有两种形式:一种稳定,即不随时间变化或变化很缓慢的量,称为静态信号;另一种是随时间变化而变化的量,称为动态信号。依据输入量的状态不同,传感器的特性通常分为静态特性和动态特性。传感器的静态特性是指其输入信号不随时间变化,即输入量各个值处于不同稳定状态的情况下,传感器输出量与输入量之间的关系。传感器的动态特性是指传感器在随时间变化而变化的输入量作用下,输出量与输入量之间的关系。

1.2.1 传感器的静态特性

人们总是希望传感器的输出与输入具有确定的对应关系,最好是线性关系。但实际上,一般情况下,输出与输入不会是线性关系。同时存在着迟滞、蠕变、摩擦和松动等因素的影响,以及受到外界各种因素(冲振、温度、电磁场和温度等)的影响,使得传感器的输出与输入关系的唯一确定性不能保证。传感器输出—输入特性关系如图 1-2 所示。外界因素的影响可以通过传感器自身或其他一些措施加以抑制。

描述传感器静态特性的参数主要有线性度、灵敏度、重复性和迟滞特性等。

1. 线性度

传感器如果没有迟滞和蠕变效应,其静态特性可用多项式代数方程来表示如下:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \tag{1-1}$$

式中, x 为输入量(被测量); y 为输出量; $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ 为常数; a_0 为零位输出(零偏); a_1 为传感器的灵敏度,常用 k 来表示; $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性待定常数。

在实际应用中,如果非线性项的方次不高,则在输入量变化不大的范围内,可以用切线或割线来代替实际曲线的某一段,使传感器的输出—输入特性近似于线性关系。对于一个传感器来说,输入量 x 总是有高次项存在,所以 y 与 x 一般是非线性关系。为了表示这种非线性关系,习惯上用线性度来表征,又称非线性误差。传感器的线性度是指传感器的输出量与输入量之间的关系曲线偏离某一规定直线的程度,通常用其实际特性曲线与规定的拟合直线之间最大偏差与传感器的满量程输出之比的百分数来表示,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1-2}$$

式中, $\Delta L_{\max}$ 为传感器实际曲线与拟合直线之间的最大偏差; y_{FS} 为传感器输出满量程值。

由此可见,非线性误差大小以一定的拟合直线为基准计算出来。因此,拟合直线的选择不同,所得到的线性度也不一样。一般并不要求拟合直线必须通过所有检测点,而只要求找到一条能反映校准数据趋势的直线。下面介绍两种常用的拟合直线方法。

1) 端点线性度

把传感器校准数据的零点输出平均值 a_0 和满量程输出平均值 b_0 连成的直线 a_0b_0 作为传感器特性拟合直线,端点线性度拟合直线如图 1-3 所示。

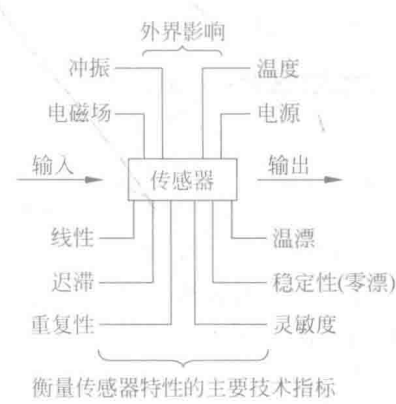


图 1-2 传感器输出—输入特性关系

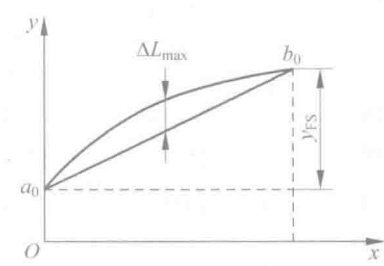


图 1-3 端点线性度拟合直线(纵坐标: y, a_0, b_0, y_{FS})