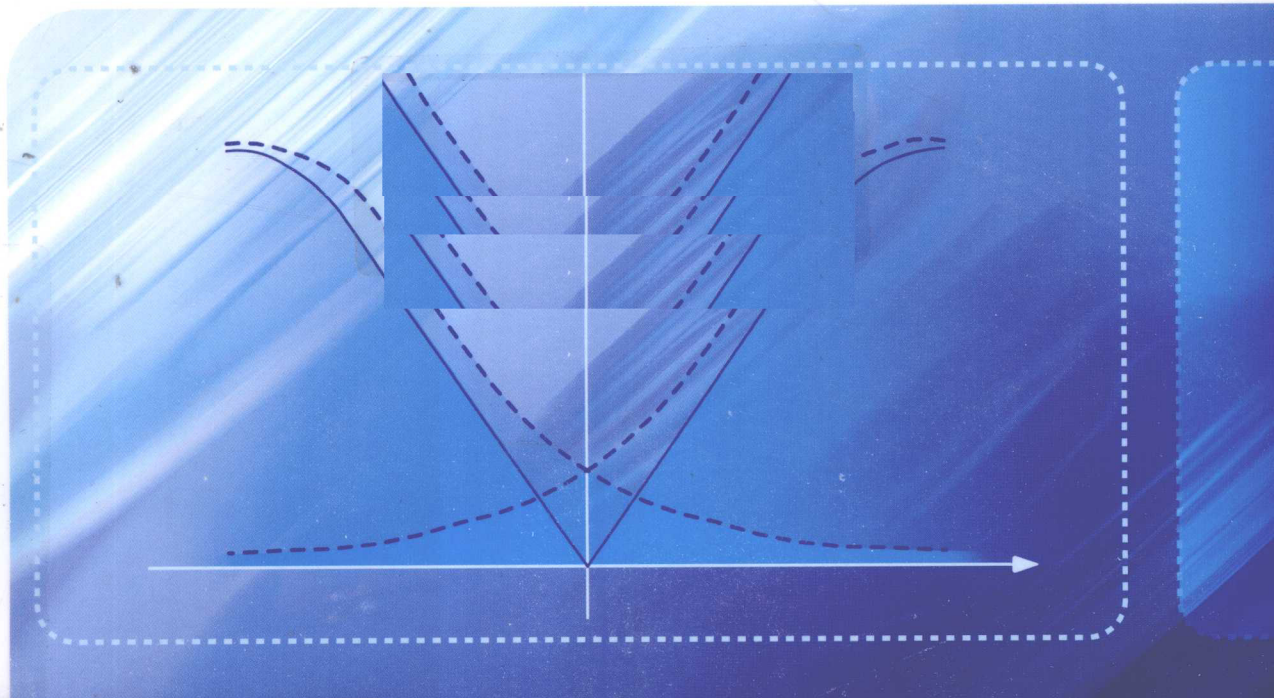


传感器技术 及其应用

杨帆 吴晗平 等编著

CHUANGANQI JISHU JI QI YINGYONG



化学工业出版社



武汉工程大学学术著作出版基金资助出版

传感器技术 及其应用

杨帆 吴晗平 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要针对应用型人才培养及实际工程应用编写,各章节按照工作原理分类。共分为11章,第1章讲述传感器基础知识;第2章讲述传感器的特性;第3~11章分别讲述电位器式、应变式、电容式、压电式、磁电式、半导体式、光电式、化学与生物传感器、智能化网络化传感器技术,各章节主要阐述各类传感器的原理、特性及应用设计。

本书编写从最简单的零阶传感器入手,由浅入深,循序渐进,各章节开头给出知识要点,然后根据要点给出知识框架,让读者对本章内容有一个全面了解,章节结尾给出了总结,便于读者归纳本章内容,最后给出习题,加深理解与掌握。各章节内容安排上侧重基本原理与应用设计,利于读者理解的加深与应用能力的提高。

本书可作为高等学校测控技术与仪器、自动化等相关专业学生的教材和参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及其应用/杨帆,吴晗平等编著. —北京:化学工业出版社,2010.10

ISBN 978-7-122-09566-4

I. 传… II. ①杨…②吴… III. 传感器 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第189854号

责任编辑:唐旭华 郝英华

文字编辑:王 洋

责任校对:宋 夏

装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$ 字数381千字 2010年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

前 言

传感技术作为信息技术的源头，正以传感器为核心逐渐外延，与物理学、测量学、电子学、光学、机械学、材料学、计算机科学等多学科密切相关，并相互渗透、相互结合形成了一门新技术密集型工程技术学科。

本书是作者在多年讲述传感器原理课程与课程设计基础上，与课程组老师共同修改完善而成，虽不可能穷尽所有传感器及传感器技术应用，但传感器选择时力求同类信号检测的传感器不重复。而且目前传感器多以一阶、二阶特性为主，而本书讲解了零阶电位器式传感器，使读者的知识体系更完善，而且遵循由浅入深的学习过程。

本书的章节内容着重讲清原理，并与具体科研应用相结合，让读者对所学传感器原理及应用技术不感到茫然。即将主线“知识结构—传感器原理—例证—应用与设计”贯穿全书。

第1章介绍传感器基础知识，所讲述的主要内容是传感器的基本概念、分类、传感器技术的作用、地位及发展趋势。让初学者对传感器有个概括性的了解。第2章介绍传感器特性，讲解衡量传感器好坏的五个静态指标、动态特性数学模型表示，并进行了频率响应、冲激响应等动态特性分析，讲述了传感器静态特性和动态特性标定的一般方法及标定实例。第3章介绍电位器式传感器技术、零阶电位器式传感器原理、线性电位器及非线性电位器的空载和负载特性，给出了电位器式传感器应用设计实例。第4章介绍应变式传感器技术，讲解电阻应变效应、应变计主要特性、测量电路、电阻应变仪和各类应变式传感器的应用，最后给出了电子秤的应用设计。第5章介绍电容式传感器技术，讲述了可变电容概念、电容式传感器的工作原理、测量电路及应用。第6章介绍压电式传感器技术，讲述压电效应、压电材料、压电传感器测量电路、应用及压电谐振式传感器。第7章介绍热电式传感器技术，讲述热电偶、热电阻传感器、半导体温度传感器，最后讲述数字温度计设计。第8章介绍磁电式传感器技术，讲述了电感式、差动电感式、差动变压器式及电动式变磁组传感器、霍尔磁敏传感器、磁敏二极管和磁敏三极管、巨磁电阻磁传感器、巨磁阻抗磁传感器原理及应用。第9章介绍光电式传感器技术，讲述光电探测器的物理基础、光电探测器、各类光电探测器的性能特点、CCD及其应用系统设计、红外凝视成像系统及应用、紫外探测器件及应用、光纤传感器及其应用。第10章介绍化学与生物传感器技术，讲述了化学与生物两类传感器，概述气体传感器、湿敏传感器原理及应用、生物传感器的组成原理、分类及应用实例。第11章介绍智能化、网络化传感器技术，讲述智能化、网络化传感器分类；智能传感器的构成、功能与特点；传感器智能化方法、传感器网络；无线传感器网络及其节点的应用实例。

本书第1、2、3、4、8章由杨帆编著，第5、6章由赵党军编著，第7章由田斌和杨帆编著，第9、10章由吴晗平编著，第11章由郝毫毫和杨帆编著。全书由杨帆、李国平组织并统稿。

由于编著者水平有限，时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请读者和同仁批评和指正。

编著者
2010年9月

目 录

第 1 章 传感器基础知识	1
1.1 传感器的地位与作用	1
1.2 传感器定义与分类	2
1.2.1 传感器定义	2
1.2.2 传感器分类	3
1.3 传感器与传感技术	3
1.4 传感技术的特点	4
1.5 传感器技术的发展方向	5
1.6 本章小结	6
习题	6
第 2 章 传感器特性	7
2.1 传感器的静态特性	7
2.1.1 线性度	7
2.1.2 灵敏度	11
2.1.3 迟滞差	12
2.1.4 灵敏度界限(阈值)	12
2.1.5 稳定性	12
2.2 传感器的动态特性	12
2.2.1 传感器动态特性的数学模型	13
2.2.2 传感器的传递函数	15
2.2.3 频率响应函数	15
2.2.4 冲激响应函数	16
2.2.5 频率响应分析	17
2.3 传感器的静态特性标定	21
2.3.1 静态标准条件	21
2.3.2 标定仪器设备的精度等级的确定	21
2.3.3 静态特性标定的方法	21
2.4 传感器的动态特性标定	22
2.5 本章小结	24
习题	25
第 3 章 电位器式传感器	26
3.1 线性电位器	26
3.1.1 空载特性	26
3.1.2 阶梯特性、阶梯误差和分辨率	28
3.2 非线性电位器	28
3.2.1 变骨架式非线性电位器	29
3.2.2 变节距式非线性电位器	30
3.2.3 分路(并联)电阻式非线性电位器	31
3.3 负载特性与负载误差	32
3.4 结构与材料	34
3.5 电位器式传感器	35
3.5.1 电位器式位移传感器	35
3.5.2 电位器式压力传感器	35
3.5.3 电位器式加速度传感器	36
3.6 电位器式传感器应用设计	36
3.6.1 电位器式液位传感器设计	36
3.6.2 电位器式角度指示仪设计	37
3.6.3 汽车前轮转向角的简易测量系统设计	37
3.6.4 电位器性能测试系统的设计	39
3.7 本章小结	40
习题	41
第 4 章 应变式传感器	42
4.1 电阻应变计结构及测量原理	42
4.2 电阻应变效应	43
4.3 应变计型号命名规则	44
4.4 应变计主要特性	44
4.4.1 应变计的灵敏度系数	44
4.4.2 横向效应	45
4.4.3 滞后、漂移	46
4.4.4 应变极限、疲劳寿命	46
4.4.5 绝缘电阻、最大工作电流	46
4.4.6 应变片的电阻值	47
4.5 测量电路	47
4.5.1 直流电桥	47
4.5.2 交流电桥	48
4.5.3 应变片的温度误差及其补偿	49
4.6 电阻应变仪	53

4.6.1	电阻应变仪	53	6.2.2	人工陶瓷	84
4.6.2	遥测应变仪实例——汽轮机 长叶片动应力的遥测	54	6.2.3	新型压电材料	85
4.7	应变式传感器	55	6.3	压电传感器的测量电路	86
4.7.1	应变式力传感器	55	6.3.1	等效电路	86
4.7.2	应变式压力传感器	59	6.3.2	电荷放大器	87
4.7.3	应变式加速度传感器	60	6.3.3	电压放大器	88
4.8	新型的微应变式传感器	61	6.4	压电传感器及其应用	90
4.8.1	压阻效应	61	6.4.1	基本应用	90
4.8.2	微型硅应变式传感器	62	6.4.2	加速度传感器	91
4.8.3	X型硅压力传感器	63	6.5	压电谐振式传感器	93
4.8.4	薄膜应变式传感器	64	6.5.1	工作原理	93
4.9	电阻应变式传感器应用设计	64	6.5.2	石英晶体谐振式温度传感器	93
4.9.1	设计任务	64	6.5.3	石英晶体谐振式压力传感器	94
4.9.2	设计目的	64	6.5.4	石英晶体谐振式质量传感器	95
4.9.3	设计要求	64	6.6	本章小结	96
4.9.4	设计提示与分析	65	习题	96	
4.10	本章小结	67	第7章 磁电式传感器	97	
习题	68	7.1	变磁阻式传感器	97	
第5章 电容式传感器	69	7.1.1	电感式传感器	97	
5.1	可变电容器	69	7.1.2	差动电感式传感器	99
5.2	电容式传感器的工作原理	70	7.1.3	差动变压器式传感器	99
5.2.1	变极板间距离式电容传感器	70	7.1.4	电动式传感器	101
5.2.2	变面积式电容传感器	71	7.2	霍尔传感器	102
5.2.3	变介电常数型电容传感器	71	7.2.1	霍尔磁敏传感器	102
5.2.4	差动式电容传感器	72	7.2.2	工作原理	102
5.3	电容式传感器的测量电路	73	7.2.3	结构及其特性分析	103
5.3.1	测量电路的基本问题	73	7.2.4	霍尔元件的驱动电路	104
5.3.2	脉宽调制电路	77	7.2.5	霍尔元件的误差分析及补偿	104
5.4	电容式传感器应用	78	7.2.6	霍尔传感器的应用	105
5.4.1	电容式液位传感器	78	7.3	磁敏二极管和磁敏三极管	106
5.4.2	电容式压力传感器	79	7.3.1	磁敏二极管的工作原理和主要 特性	106
5.4.3	电容式加速度计	79	7.3.2	磁敏三极管的工作原理和主要 特性	108
5.4.4	电容式测厚传感器	80	7.4	巨磁电阻磁传感器	110
5.5	本章小结	80	7.4.1	电子自旋	111
习题	80	7.4.2	常见的磁电阻体系	111	
第6章 压电传感器	81	7.4.3	巨磁电阻传感器的检测电路	112	
6.1	压电效应	81	7.4.4	GMR传感器应用实例	112
6.1.1	石英晶体的压电效应	81	7.5	巨磁阻抗磁传感器	113
6.1.2	压电方程	82	7.5.1	巨磁阻抗效应原理	113
6.2	压电材料	84	7.5.2	巨磁阻抗传感器典型电路	115
6.2.1	石英晶体	84			

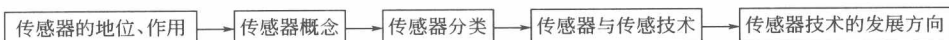
7.5.3 巨磁阻抗传感器的应用	116	9.4.2 光电导探测器的特点	154
7.6 本章小结	116	9.4.3 光伏探测器的特点	155
习题	116	9.4.4 热探测器的特点	155
第8章 热电式传感器	118	9.5 光电成像器件	156
8.1 热电偶温度传感器	118	9.6 电荷耦合器件及其应用系统设计	156
8.1.1 热电偶的基本性质	118	9.6.1 电荷耦合器件工作原理及其 应用特点	156
8.1.2 热电偶的结构	120	9.6.2 CCD 成像器件的特征参量及 其评价	161
8.1.3 热电偶的分度表	120	9.6.3 CCD 的工程技术应用	162
8.1.4 热电偶的冷端温度补偿	121	9.6.4 CCD 图像传感器在微光电视 系统中的应用	168
8.1.5 热电偶测温线路	122	9.7 红外凝视成像系统及应用	169
8.2 热电阻温度传感器	123	9.7.1 红外凝视成像系统的组成和 工作原理	169
8.2.1 常用热电阻	123	9.7.2 凝视成像系统的优点	171
8.2.2 热电阻的测量电路	125	9.7.3 应用	171
8.3 半导体温度传感器	126	9.8 紫外探测器件及应用	171
8.3.1 半导体热敏电阻	126	9.8.1 紫外探测器件	172
8.3.2 PN 结型热敏器件	132	9.8.2 紫外器件的主要应用	174
8.3.3 集成 (IC) 温度传感器	134	9.9 光纤传感器	177
8.3.4 半导体光纤温度传感器	136	9.9.1 光纤传感器的背景	177
8.3.5 非接触型半导体温度传 感器	137	9.9.2 光纤传感器的组成及工作 原理	177
8.4 半导体传感器应用设计实例	140	9.9.3 光纤传感器分类	178
8.4.1 设计任务	140	9.9.4 光纤导光原理	178
8.4.2 设计要求	140	9.9.5 光纤传感器的应用举例	179
8.4.3 设计提示与分析	140	9.9.6 光纤传感器的优点	181
8.5 本章小结	145	9.10 本章小结	182
习题	145	习题	182
第9章 光电传感器	146	第10章 化学与生物传感器	183
9.1 概述	146	10.1 概述	183
9.2 光电探测器的物理基础	146	10.1.1 化学传感器	183
9.2.1 光电探测的物理效应及其特 性表示	146	10.1.2 生物传感器	184
9.2.2 光热效应和光子效应的区别	148	10.2 气体传感器	184
9.2.3 光电探测器的特性表示法	148	10.2.1 气体传感器的分类和工作 原理	184
9.3 光电探测器	149	10.2.2 常见气体传感器的原理与 应用	185
9.3.1 光电管	149	10.2.3 气体传感器的应用实例	190
9.3.2 光电倍增管	151	10.3 湿敏传感器	192
9.3.3 光敏电阻	151	10.3.1 湿度的定义及其表示方法	192
9.3.4 光电二极管和光电三极管	152		
9.3.5 光电池	152		
9.3.6 光电耦合器件	153		
9.4 各类光电探测器的性能特点	154		
9.4.1 光电子发射探测器的特点	154		

10.3.2	湿敏传感器的定义、性能参数及特性	192	11.2.2	智能传感器的功能	211
10.3.3	湿敏传感器的分类	193	11.2.3	智能传感器的特点	212
10.3.4	常用湿敏传感器的基本原理	193	11.3	传感器智能化方法	213
10.3.5	湿敏传感器的测量电路	196	11.3.1	非集成智能传感器的实现方法	213
10.4	生物传感器	198	11.3.2	集成智能传感器的实现方法	213
10.4.1	生物传感器组成及工作原理	199	11.4	传感器网络	214
10.4.2	生物传感器分类	200	11.5	无线传感器网络	216
10.4.3	生物传感器的特点	201	11.5.1	无线传感器网络 (WSN) 的特点	217
10.4.4	主要生物传感器介绍	201	11.5.2	WSN 的网络结构	218
10.4.5	生物传感器应用举例	206	11.5.3	无线传感器节点	218
10.4.6	生物传感器的发展趋势与展望	208	11.5.4	无线通信的几种技术方法	219
10.5	本章小结	209	11.5.5	无线传感器网络标准	222
	习题	209	11.5.6	无线传感器节点的应用介绍	224
第 11 章	智能化网络化传感器技术	210	11.6	本章小结	225
11.1	智能传感器的分类	211		习题	225
11.2	智能传感器的构成、功能与特点	211	参考文献		226
11.2.1	智能传感器的构成	211			

第 1 章 传感器基础知识

【知识要点】 通过本章学习，读者应了解传感器的作用，掌握传感器的基本概念，理解传感器的分类，了解传感技术今后的发展方向。

【本章知识结构】



1.1 传感器的地位与作用

中国仪器仪表学会根据国际发展的潮流和我国的现状，把仪器仪表概括为以下六类。

- ① 工业自动化仪表、控制系统及相关测控技术。
- ② 科学仪器及相关测控技术。
- ③ 医疗仪器及相关测控技术。
- ④ 信息技术电测、计量仪器及相关测控技术。
- ⑤ 各类专用仪器仪表及相关测控技术。
- ⑥ 相关传感器、元器件、制造工艺和材料及其基础科学技术。

分类中的传感器与本书一样是狭义的，若从信息获取的概念出发，信息技术包括信息获取、信息处理、信息传输三部分内容。传感技术作为信息技术的三大支柱，起着源头的的作用。没有传感器获取信息，或信息获取不准确，那么信息的存储、处理、传输都是毫无意义的。因而，信息获取是信息技术的基础，是信息处理、信息传输的源头，也是信息技术中的关键技术。正如俄国著名科学家门捷列夫所说：科学是从测量开始的。英国物理学家开尔文有格言：我们只能测量后才能了解。我国著名科学家钱学森明确指出：发展高新技术，信息技术是关键，信息技术包括测量技术、计算机技术和通讯技术，测量技术是关键的基础。而传感器是测量、信息获取的唯一仪器或装置。若把传感器按照在应用领域中的作用分类可概括如下。

① 在国民经济运行中，传感器有着巨大的辐射作用和影响力。实际上，现代化大工业，如发电、炼油、化工、冶金、飞机和汽车制造等，离开了各种测量装置，就不能正常安全生产，更难创造产值和利润。专家们形象地把传感器比喻为国名经济中的“卡脖子”产业。

② 在科学研究中，传感器是先行官，离开了它，一切科学研究都无法进行。1992年诺贝尔化学奖获得者 R. R. Ernet 说：现代科学的进步越来越依靠尖端仪器的发展。神舟飞船的成功发射，得益于研制过程中有各种传感器对样机进行大量的地面和空中测试，更得益于成百上千个传感器在飞行过程中准确提供的加速度、温度、振动、应变等宝贵的飞行数据。供航天员根据这些数据进行操纵与控制，才能圆满完成飞行中的各种任务。

③ 在军事上，传感器体现出“战斗力”。传感器的测量精度决定了武器系统的打击精度，测试速度、诊断能力决定武器反应能力。1991年海湾战争美国使用的精密炸弹和导弹只占8%，12年后的伊拉克战争中，精密炸弹和导弹占到了90%以上。这些都是靠先进的仪器仪表装备来实现控制功能的。

④ 传感器是当代社会的“物化法官”。产品质量、环境污染、违禁药物、指纹、假钞等

信息的获取，无一不通过传感器。

⑤ 传感器也走进了社会生活，比如汶川大地震中生命探测仪就挽救了无数人的生命。天气预报、疾病诊断、交通指挥、灾情预测等传感器技术在发挥巨大作用。

⑥ 发展现代传感技术已成为国家的一项战略措施。

现代传感器技术的发展水平反映出国家的文明程度，是国家科技水平和综合国力的重要体现。为此，世界发达国家都高度重视和支持仪器仪表的发展，美、日、欧等发达国家和地区早已制定各自的发展战略并锁定目标，有专门的投入，以加速原创性传感器技术的发明、发展、转化和产业化进程。发达国家的传感器技术的研究，已从自发状态转入到有意识、有目标的政府行为上来。

特别是自 20 世纪 80 年代以来，许多国家纷纷投入大量的人力与物力，把发展包括传感器技术在内的高技术列为国家发展战略的重要组成部分。美国提出《战略防御倡议》(SDI)，即星球大战计划；欧洲提出“尤里卡”高技术发展规划；日本提出《振兴科技的政策大纲》；韩国提出《国家长远发展构想》；印度提出《新技术政策声明》；我国也制定并执行《高技术研究发展计划纲要》，即“863 计划”和《国家重点基础研究发展规划》，即“973 计划”等。

目前，传感器的作用日益被人们所认识，从一定意义上说，谁掌握了最先进的传感技术与科学仪器，谁就掌握了科技发展的优先权、人民健康的保障权、商业标准的制定权以及突发事件的主动控制权。加强传感器与科学仪器的发展和自主创新意义重大。

1.2 传感器定义与分类

1.2.1 传感器定义

国家标准 GB 7665—1987 对传感器下的定义是能够感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。这一概念包括以下四方面含义。

① 传感器是测量器件或装置，能完成信号获取任务，例如常见的维持正常交通秩序的电子眼，能准确获取车速、车牌号、是否闯红灯等信息的 CCD 传感器。

② 传感器的输入量是一被测量，可能是物理量、化学量、生物量等。

③ 传感器的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，输出量可以是气、光、电，但主要是电量。

④ 输入输出有对应关系，且应有一定的精确度，比如任意一个化工过程控制系统，如果信号检测误差大，后端控制设备无论怎样先进也无法满足控制指标要求，严重时还会出现安全责任事故。

传感器通常由敏感元件、转换元件和测量电路组成，有的还需辅助电源。组成框图如图 1-1 所示。

敏感元件用于直接感受或响应被测量（输入量）；转换元件和信号调节转换电路将敏感元件感受的或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号，比如柱式压力传感器中钢柱属

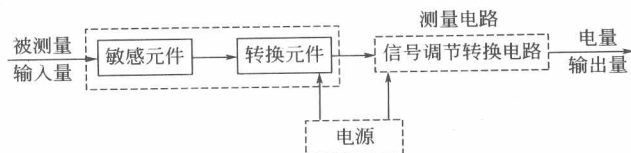


图 1-1 传感器组成框图

于敏感元件,感受压力信号,钢柱上粘贴的应变片属于转换元件,将压力转换成应变电阻,为便于远程传输,需用电桥将应变转换成电信号输出。但有些传感器(压电传感器、热电偶等)没有转换元件,直接将非电量转换成电信号。

还有一种仪器——变送器也是用来获取信号的,那两者之间有何区别呢?一般来说有如下差别。

① 按传统观念,传感器归入检测仪表,变送器则属于自动化仪表。

② 把非电量转换成电量的器件称为传感器。而变送器是从传感器发展起来的,凡能输出标准信号的传感器称为变送器,例如以 $4\sim 20\text{mA}$ 、 $0\sim 10\text{mA}$ 直流电流或 $1\sim 5\text{V}$ 电压等非标准信号作为输出的传感器,必须和特定的仪表或装置配套,才能实现检测和调节功能,例如:传感器+转换器方可输出标准信号。

1.2.2 传感器分类

传感器种类繁多,同一传感器可以测量多种参数,同一参数又可由多种传感器测量。目前,传感器的分类没有统一规定,一般常用的分类方法有如下四种。

(1) 按测量原理分类

这是传感器最常见的分类方法,以传感器将非电量转换成电量时依据的物理、化学、生物等学科的原理、规律和效应作为分类依据,有利于传感器工作原理的阐述。本书就是以此分类方法作为编写体系介绍常见传感器的。

(2) 按输入信号分类

如输入的是压力、温度、流量、速度、加速度、湿度等信号,则相应的传感器就称为压力传感器、温度传感器、流量传感器、速度传感器、加速度传感器、湿度传感器等。这种分类方式直观、清晰地表达了各类传感器的用途,使用者可以根据测量对象选择所需传感器。

(3) 按结构型和物性型分类

通过机械结构的几何形状或尺寸的变化,将被测量转换成相应的电阻、电感、电容等物理量的变化,从而检测出被测量变化的称为结构型传感器。物性型传感器则利用某些材料本身的物理性质的变化实现测量,它是以金属、半导体、合金、陶瓷等作为敏感材料的固体器件。

(4) 按使用材料分类

若传感器由金属、半导体、光纤、陶瓷、复合材料等构成,则称为金属传感器、半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、复合材料传感器等。该分类方式直观明了,方便使用者根据需要挑选传感器。

1.3 传感器与传感技术

传感器简单定义为把非电量(物理量、化学量、生物量等)按照一定规律转化成电量的器件和装置。

随着科技的飞速发展,传感器及与之相关的技术,如传感器设计、材料、制造、应用等得到快速发展,逐渐形成一门新的独立学科——传感器技术。传感器技术的含义比传感器广。传感器技术是研究传感器材料、设计、工艺、性能和应用等的综合技术,以传感器为核心逐渐外延,与测量学、微电子学、物理学、光学、机械学、材料学、计算机科学等多门学科密切相关,是多技术相互渗透形成的一个新技术学科领域。

传感器技术是信息获取技术，是信息技术的三大支柱（传感与控制技术、通信技术和计算机技术）之一。首先，人类通过大自然发出的信息了解物质世界的属性和规律，信息是人类科学活动的基础，在自然科学与工程技术领域，学科的前沿常常止步于难以获取信息的地方。其次，自然界的许多种物质运动变化能够通过不同途径直接或间接引起相应电学量的变化，可以获得所关心的自然信息，有效地拓展了人类可能认知的自然信息范围。再次，自然信息转换为电信号之后，可以与各种信号传输、处理系统衔接，构成具有多种功能的反馈控制系统，使以人为主体的多种操作控制系统发展成为由信息获得装置、信号传输处理系统和执行机构共同组成的各类自动化系统。

传感器技术是实现自动控制、自动调节的关键环节，也是机电一体化系统不可缺少的关键技术之一，其水平高低在很大程度上影响和决定着系统的功能，其水平越高，系统的自动化程度就越高。在一套完整的机电一体化系统中，如果不能利用传感检测技术对被控对象的各项参数进行及时准确地检测，并转换成易于传送和处理的信号，所需要的用于系统控制的信息就无法获得，进而使整个系统就无法正常工作。

1.4 传感技术的特点

(1) 传感技术是边缘学科

① 传感技术机理各异，涉及多门学科与技术，包括测量学、微电子学、物理学、光学、机械学、材料学、计算机科学等。

② 在理论上物理学中的效应、现象，化学中的反应、生物学中的机理作为基础。

③ 涉及电子、机械制造、化学工程、生物工程等学科的技术。

④ 多种高技术的集合产物，传感器在设计、制造和应用过程中技术的多样性、边缘性、综合性和技艺性呈现出技术密集的特性。

(2) 传感器产品、产业分散，涉及面广

自然界中各种信息（如光、声、湿度、温度、气压等）千差万别，传感器品种繁多，被测参数包括热工量、电工量、化学量、物理量、机械量、生物量、状态量等。应用领域广泛，无论是航空航天、现代化军事等高新技术领域，还是传统产业，乃至日常生活，都需要应用大量的传感器。

(3) 传感器性能稳定、测试精确

传感器应具有高稳定性、高可靠性、高重复性、低迟滞、快响应和良好的环境适应性。

(4) 传感器功能、工艺要求复杂

① 传感器具有各种作用，既可代替人类五官感觉的功能，也能检测人类五官不能感觉的信息，称得上是人类五官功能的扩展。

② 应用要求千差万别，有的量大面广，有的专业性很强；有的要求高精度，有的要求高稳定性，有的要求高可靠性；有的要求耐热、耐振动，有的要求防爆、防磁等。

③ 面对复杂的功能要求，设计制造工艺复杂。

(5) 基础、应用两头依附，产品、市场相互促进

① 基础依附是指传感器技术的发展依附于敏感机理、敏感材料、工艺装备和计（量）测（试）技术这四块基石。应用依附是指传感器技术基本上属于应用技术，依赖于检测装置和自动控制系统，并加以应用，才能真正体现出它的高附加效益并形成现实市场。

② 传感器的设计、生产、加工要按照市场需求，不断调整产业结构和产品结构，才能

实现传感器产业的全面、协调、持续发展。

1.5 传感器技术的发展方向

近年来,由于半导体技术(蒸镀技术、扩散技术、光刻技术、精密微细加工技术等)、集成化技术飞速发展,各种制造工艺和材料性能的研究达到相当高的水平。这为传感器技术的发展创造了有利条件。从发展前景看,它具有如下特点。

(1) 传感器的固态化

物性型传感器也称固态传感器,目前发展很快。它包括半导体、电介质、和磁性体三类。其中半导体发展最引人注目,它精度高、响应快、小而轻,易于实现传感器的集成化和多功能化,如目前先进的固态传感器能在一块芯片上同时集成差压、静压、温度三个传感器,使差压传感器具有温度和压力补偿功能。

(2) 传感器的集成化和多功能化

有些特殊场合,如插入人体中的传感器及风洞中测压力分布的传感器等应尽量微型化,必须将传感、放大、温度补偿、信号储存与处理电路集成在同一芯片上。目前传感器多测量一个点的参数,但是在科学技术和工程上需要测量一条线上或一个面上的参数,需要相应研究二维乃至三维的传感器。有些单一的传感器组成传感器阵列可得到一个功能优良的控制单元,如日本研究了一种同时检测 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 离子的传感器,该传感器尺寸为 $2.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$,可直接用导管送到心脏内测量。

(3) 传感器的智能化

把拾取信息功能和微型计算机的信息处理功能结合在一起的传感器不仅具有检测信息的功能,而且具有判断和处理信息的能力及具备学习、推理、感知通信以及管理等功能。

(4) 向高可靠性、宽温度范围发展

传感器的可靠性直接影响电子设备的抗干扰等性能,研制高可靠性、宽温度范围的传感器将是永久性的方向。提高温度范围历来是大课题,大部分传感器的工作范围为 $-20\sim 70^\circ\text{C}$,在军用系统中,要求工作温度范围为 $-40\sim 85^\circ\text{C}$,而汽车、锅炉等场合要求传感器工作在 $-20\sim 120^\circ\text{C}$,在冶炼、焦化等方面,对传感器的温度要求更高,因此发展新兴材料(如陶瓷)的传感器将很有前途。

(5) 多传感器的集成与融合

由于单传感器不可避免地存在不确定或偶然不确定性,缺乏全面性,所以偶然的故障就会导致系统失效。多传感器集成与融合技术正是解决这些问题的良方。多个传感器不仅可以描述同一环境特征的多个冗余的信息,而且可以描述不同的环境特征。它的特点是冗余性、互补性、及时性和低成本性。

(6) 传感器的网络化

无线传感器网络是由大量无处不在的、由具有无线通信与计算能力的微小传感器节点构成的自组织分布式网络系统,是能根据环境自主完成指定任务的智能系统。它是涉及微传感器与微机械、通信、自动控制及人工智能等多学科的综合技术,大量传感器通过网络构成分布式、智能化信息处理系统,以协同的方式工作,能够从多种视角获得丰富的高分辨率的信息,极大增强了传感器的探测能力,是近几年新的发展方向。其应用已从军事领域扩展到反恐、环境监测、医疗保健、民用、建筑、商业、工业等众多领域,应用前景非常广泛。

1.6 本章小结

传感器作为人类认识和感知世界的一种工具,伴随人类文明的进步在飞速发展,传感器在国民经济和人们日常生活中占有举足轻重的地位,目前许多国家把传感器技术列为重点发展的关键技术。本章主要阐述了以下问题。

- ① 传感器的地位与作用。
- ② 传感器概念。
- ③ 传感器分类。
- ④ 传感器与传感技术之间的关系。
- ⑤ 传感器技术的发展方向。

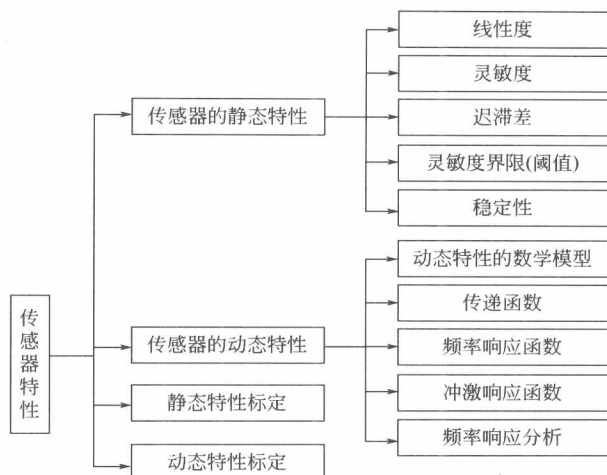
习 题

1. 传感器的基本概念是什么?一般情况下由哪几部分组成?
2. 传感器有几种分类形式,各种分类之间有什么不同?
3. 简述传感器与变送器的区别与联系。
4. 什么叫传感技术?传感技术的特点是什么?
5. 传感器与信息技术有什么关系?
6. 简述传感技术在现代科学技术、国民经济和社会生活中的地位与作用。
7. 现代传感器研发呈现的特点是什么?
8. 我国传感器产业发展现状及与国外的差距是什么?如何发展我国的传感器产业?
9. 简述现代传感技术的发展现状与趋势。
10. 举例说明传感技术的应用。

第 2 章 传感器特性

【知识要点】 通过本章学习，读者应掌握传感器静态特性的有关指标概念，如线性度、灵敏度、迟滞差、灵敏度界限、稳定性，了解静态特性有关指标的求解方法；掌握传感器动态特性的研究意义、其数学模型分析、响应函数的分析；掌握传感器静态特性标定方法，了解传感器动态特性的标定方法。

【本章知识结构】



传感器的输出输入特性是传感器的基本特性。从误差角度去分析输出输入特性是测量技术所要研究的主要内容之一。输出输入特性虽然是传感器的外部特性，但与其内部参数有密切关系。因为传感器不同的内部结构参数决定它具有不同的外部特性，所以测量误差也是与内部结构参数密切相关的。

传感器所要测量的物理量基本上有两种形式，一种是稳态（静态或准静态）的形式，这种信号不随时间变化（或变化很缓慢）；另一种是动态（周期变化或瞬态）的形式，这种信号是随时间变化而变化的。由于输入物理量状态不同，传感器所表现出来的输出输入特性也不同，因此存在所谓的静态特性和动态特性。由于不同传感器有不同的内部参数，它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点，所以对测量结果的影响也各不相同。一个高精度传感器必须有良好的静态特性和动态特性，这样它才能完成信号（或能量）无失真的转换。

2.1 传感器的静态特性

传感器在稳态信号作用下，其输出输入关系称为静态特性。衡量传感器静态特性的重要指标通常是线性度、灵敏度、灵敏度界限（阈值）、迟滞差、稳定性。

2.1.1 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间的线性程度。传感器的理想输出输入特性是线性的，它具有以下优点。

① 可大大简化传感器的理论分析和设计计算。

② 为标定和数据处理带来很大方便,只要知道线性输出输入特性上的两点(一般为零点和满度值),就可以确定其余各点。

③ 可使仪表刻度盘均匀刻度,因而制作、安装、调试容易,提高测量精度。

④ 避免了非线性补偿环节。

实际上许多传感器的输出输入特性是非线性的,如果不考虑迟滞和蠕变效应,一般可用式(2-1)表示输出输入特性。

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (2-1)$$

式中, y 为输出量; x 为输入物理量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器线性灵敏度; a_2, a_3, \dots, a_n 为待定常数。

在研究线性特性时,可不考虑零位输出。式(2-1)的输出特性曲线如图 2-1(d) 所示。下面介绍式(2-1)的三种特殊情况。

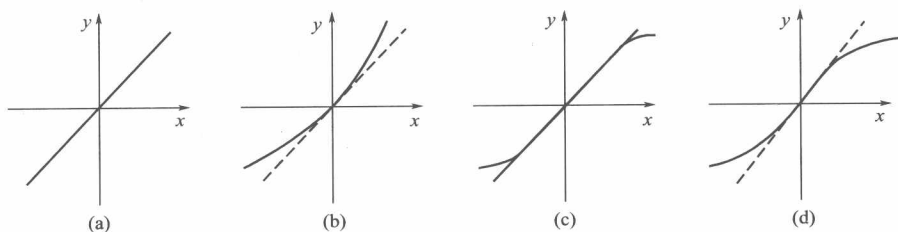


图 2-1 传感器的静态特性

(1) 理想的线性特性

如图 2-1(a) 所示的直线,在这种情况下有

$$a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$$

因此得到

$$y = a_1 x \quad (2-2)$$

因为直线上任何点的斜率都相等,所以传感器的灵敏度为

$$S_n = y/x = a_1 (\text{常数})$$

(2) 仅有偶次非线性项

如图 2-1(b) 所示,其输出输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots \quad (2-3)$$

因为它没有对称性,所以其线性范围较窄。一般传感器设计很少采用这种特性。

(3) 仅有奇次非线性项

如图 2-1(c) 所示,其输出输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots \quad (2-4)$$

具有这种特性的传感器一般在输入量 x 相当大的范围内具有较宽的准线性,这是比较接近于理想直线的非线性特性,它相对坐标原点对称的,即 $y(x) = -y(-x)$,所以它具有相当宽的近似线性范围。

传感器的输出输入特性的线性度除受机械输入(弹性元件)特性影响外,也受电气元件输出特性的影响。使电气元件对称排列,以差动方式工作可以消除电气元件中的偶次分量,显著改善线性范围,例如差动传感器的一边输出为

$$y_1 = a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n$$

另一边反向输出为

$$y_2 = -a_1x + a_2x^2 - a_3x^3 + \dots + (-1)^n a_n x^n$$

总输出为两者之差, 即

$$y = y_1 - y_2 = 2(a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots) \quad (2-5)$$

由式(2-5)可见, 差动传感器消除了偶次项, 使线性得到改善, 同时使灵敏度提高一倍。

在使用非线性特性的传感器时, 如果非线性项的次数不高, 在输入量变化范围不大的条件下, 可以用切线或割线等直线来近似代表实际曲线的一段, 如图 2-1 所示, 这种方法称为传感器非线性特性的线性化。所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差, 如图 2-2 中所示的 Δ 值。取其中最大值与输出满度值之比作为评价非线性误差 (或线性度) 的指标。

$$\delta_1 = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{\text{FS}}} 100\% \quad (2-6)$$

式中, δ_1 为非线性误差 (线性度); Δ_{\max} 为最大非线性绝对误差; y_{FS} 为满量程输出。

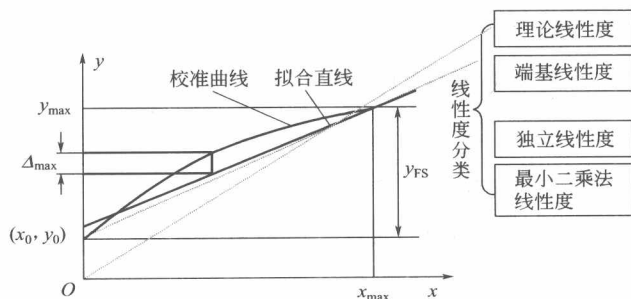


图 2-2 传感器的线性度

测量传感器的线性度也就是一项传感器标定工作。线性度的测量是在静态标准条件下进行的。静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击 (除非这些本身就是被测物理量), 环境温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度小于 85%, 大气压力为 $(101 \pm 8)\text{kPa}$ 的情况。在这种标准工作状态下, 利用一定等级的校准设备对传感器进行往复循环测试, 得到的输出输入数据一般用表列出或画成曲线。而拟合直线的获得有多种标准, 若改变拟合直线, 则可以得到不同的线性度。

① 理论线性度。拟合直线为理论直线, 通常以 0 作为直线起始点, 满量程输出 100% 作为终止点。

② 端基线性度。以校准曲线的零点输出和满量程输出值连成的直线为拟合直线。

③ 独立线性度。做两条与端基直线平行的直线, 使之恰好包围所有的标定点, 以与两直线等距离的直线作为拟合直线。

④ 最小二乘法线性度。以标定曲线的各点偏差平方之和最小 (即最小二乘法原理) 的直线作为拟合直线。这种方法得到的线性度的精度最高。下面是两个线性度求解的例子。

【例 2-1】 已知某传感器静态特性方程为 $y = e^x$, 分别用切线法和端基法, 在 $0 \leq x \leq 1$ 范围内拟合刻度直线方程, 并求出相应的线性度。

解: ① 切线法。在 $x=0$ 处作拟合直线, 设切线法时拟合直线方程为 $y = kx + A$, 则 $x=0$ 时, $y=1$, 代入可得 $A=1$ 。

$(e^x)' = e^x$, $y = e^x$ 在 $x=0$ 处的切线斜率为 $k=1$, 得切线方程为 $y = x + 1$, 当 $x=1$ 时, 最大偏差为