

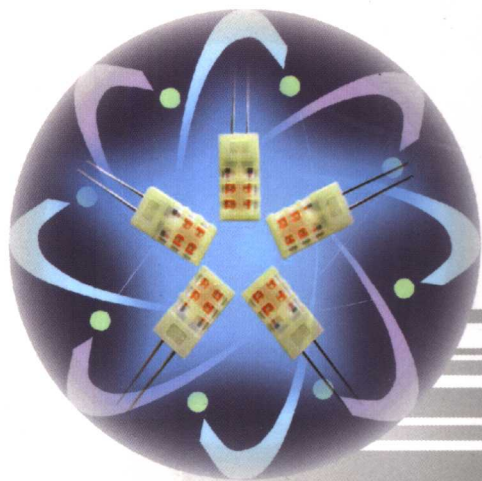


21st CENTURY

十一五规划教材

21世纪全国高等院校

自动化系列 实用规划教材



传感器基础

主 编 赵玉刚 邱 东
副主编 曹昕燕 徐沪萍 崔利娜

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

传感器基础

主 编 赵玉刚 邱 东
副主编 曹昕燕 徐沪萍 崔利娜

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》之一,是针对应用型人才培养而编写的。

全书共分 12 章,第 1 章讲述有关传感器的理论基础;第 2 章~第 11 章分别讲述电阻式、电感式、电容式、压电式、光电式、光纤式、热电式、半导体式、波式和辐射式及智能式传感器,主要阐述各种类型传感器的原理、特性、测量电路及其应用;第 12 章讲述传感器的补偿和抗干扰技术。本书编写力求理论浅显、易懂,应用实例广泛、实用,既注重传统知识,又兼顾新技术的应用。

本书可作为自动化、电子信息、测控技术及仪器、电气工程及计算机等专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

传感器基础/赵玉刚,邱东主编. —北京:中国林业出版社;北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4402-7

I. 传… II. ①赵… ②邱… III. 传感器—高等学校—教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 084742 号

书 名: 传感器基础

著作责任者: 赵玉刚 邱 东 主编

策划编辑: 李 虎

责任编辑: 李娉婷 曹 岚 何 蕊

标准书号: ISBN 7-5038-4402-7

出 版 者: 中国林业出版社(地址:北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号 邮编: 100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 总编室 66180373 营销中心: 66187711

北京大学出版社(地址:北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 365 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 23.00 元

《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

联合编写学校名单 (按拼音顺序排名)

- | | |
|---------------|-------------|
| 1 安徽建筑工业学院 | 30 南昌工程学院 |
| 2 安徽科技学院 | 31 平顶山工学院 |
| 3 北华大学 | 32 平顶山学院 |
| 4 北京工商大学 | 33 青岛科技大学 |
| 5 北京建筑工程学院 | 34 山东建筑工程学院 |
| 6 长春大学 | 35 山东科技大学 |
| 7 长春工程学院 | 36 陕西科技大学 |
| 8 长春工业大学 | 37 陕西理工学院 |
| 9 长春理工大学 | 38 沈阳大学 |
| 10 成都理工大学 | 39 沈阳工程学院 |
| 11 东北电力学院 | 40 沈阳工业大学 |
| 12 福州大学 | 41 沈阳化工学院 |
| 13 广东工业大学 | 42 四川理工学院 |
| 14 桂林工学院 | 43 太原科技大学 |
| 15 合肥工业大学 | 44 潍坊学院 |
| 16 河南工业大学 | 45 武汉大学 |
| 17 河南科技学院 | 46 武汉理工大学 |
| 18 河南农业大学 | 47 西安工程科技学院 |
| 19 华东交通大学 | 48 西安建筑科技大学 |
| 20 黄石理工学院 | 49 西安科技大学 |
| 21 吉林工程技术师范学院 | 50 西安理工大学 |
| 22 吉林化工学院 | 51 西安石油大学 |
| 23 吉林建筑工程学院 | 52 西安外事学院 |
| 24 江南大学 | 53 西安邮电学院 |
| 25 焦作工学院 | 54 西南大学 |
| 26 兰州理工大学 | 55 西南科技大学 |
| 27 辽宁大学 | 56 中北大学 |
| 28 聊城大学 | 57 中北大学分校 |
| 29 内蒙古大学 | |

《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

专家编审委员会

主任委员 张德江

副主任委员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈 静 丁坚勇 侯媛彬

纪志成 任庆昌 吴 斌

秘书长 于微波

委 员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈志新 戴文进 段晨旭 樊立萍

范立南 公茂法 关根志 嵇启春

蒋 中 雷 霞 刘德辉 刘永信

刘 原 马永翔 孟祥萍 孟彦京

聂诗良 王忠庆 吴旭云 燕庆明

杨新华 尤 文 张桂青 张井岗

总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用,深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面,是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中,工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标,党和国家提出走新型工业化道路的战略决策,这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化,就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中,自动化科学与技术起着不可替代的重要作用,高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%,其中自动化类的学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天,人才培养模式多样化已成为必然的趋势,其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养,发挥院校之间相互合作的优势,北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者,由此确定了教材的使用范围,也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点:

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型,对这一大类人才的培养要注重面向工程实践,培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发,本系列教材注重实用性,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容,跟进时代,加入一些新的先进实用的知识,同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的成果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会,来自各院校的教师比较充分地交流了情况,在相互借鉴、取长补短的基础上,形成了编写大纲,确定了编写原则。因此,这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和作法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程,到目前为止,列入计划的已有 30 多门,教材门数多,参与的院校多,参加编写人员多。

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用，将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性，在审纲会上强调了“质量第一，明确责任，统筹兼顾，严格把关”的原则，要求各位主编加强协调，认真负责，努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责，密切合作，努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此，由于院校之间、编者之间的差异性，教材中还是难免会出现一些问题和不足，欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006年1月

前 言

现代化生产与自动控制系统是以计算机为核心,以传感器为基础组成的。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节,没有好的传感器,就没有精确可靠的自动检测和控制系统。近年来,随着科学技术的发展,各种类型的传感器已广泛应用到工业生产与控制的各个领域。

要及时准确地获取各种信息,解决工程、生产及科研中遇到的各种具体的检测问题,就必须了解和熟悉传感器,同时也要学会合理选择和应用各种传感器及传感技术。本书是自动化系列教材之一,书中内容丰富、全面,原理描述由浅入深、浅显易懂,应用实例广泛、实用。全书以传统的典型传感器为主,同时增加了新型的传感器,主要介绍传感器的原理、结构特点、测量电路以及传感器在工业生产、日常生活中的实际应用。

本书共分12章,包括三个单元:第一单元介绍传感器的基础知识;第二单元介绍各种传感器的原理、结构及应用;第三单元介绍传感器的补偿和抗干扰技术。书中每章内容具有独立性,使用本教材时,可根据不同专业的要求和特点,有选择性地教学。

本书由北华大学赵玉刚、长春工业大学邱东任主编,长春大学曹昕燕、武汉理工大学徐沪萍、长春工业大学崔利娜任副主编。赵玉刚编写第4章、第5章和第10章,邱东编写第1章、第2章和第11章,曹昕燕编写第6章和第7章,徐沪萍编写第3章和第9章,崔利娜编写第8章和第12章。该书在编写过程中,得到了许多同行的支持和帮助,他们提出了许多宝贵意见,同时也得到了北京大学出版社第六事业部和中国林业出版社编辑的指导和支持,对他们的悉心指导和帮助表示真挚的谢意。对本书参考文献中的有关作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正,提出宝贵意见。

编 者
2006年6月

目 录

第1章 传感器理论基础.....1	思考题与习题61
1.1 传感器基础1	第3章 电感式传感器63
1.1.1 传感器的概念.....1	3.1 自感式传感器63
1.1.2 传感器的组成和分类.....2	3.1.1 工作原理63
1.1.3 传感器的基本特性.....4	3.1.2 电感计算及输出特性分析65
1.1.4 传感器的命名、代号和图形 符号.....10	3.1.3 测量电路67
1.1.5 传感器的发展趋势.....12	3.2 差动变压器式传感器70
1.2 检测技术理论基础15	3.2.1 工作原理及特性70
1.2.1 检测技术.....15	3.2.2 测量电路73
1.2.2 测量方法.....15	3.2.3 零点残余电压及消除方法74
1.2.3 检测系统.....17	3.3 电涡流式传感器76
1.2.4 测量误差及数据处理.....19	3.3.1 工作原理76
本章小结30	3.3.2 测量电路79
思考题与习题30	3.4 电感式传感器的应用81
第2章 电阻式传感器32	3.4.1 自感式传感器的应用81
2.1 电位器式电阻传感器32	3.4.2 差动变压器式传感器的应用 ...83
2.1.1 工作原理.....32	3.4.3 电涡流式传感器的应用85
2.1.2 结构与材料.....37	本章小结87
2.2 应变式电阻传感器39	思考题与习题88
2.2.1 应变效应和工作原理.....39	第4章 电容式传感器89
2.2.2 电阻应变片的种类、材料 及粘贴.....41	4.1 工作原理和结构类型89
2.2.3 电阻应变片的主要特性.....44	4.1.1 工作原理89
2.2.4 电阻应变片的温度误差 及补偿.....47	4.1.2 结构类型89
2.2.5 测量电路.....49	4.2 转换电路93
2.3 压阻式传感器53	4.2.1 等效电路93
2.3.1 工作原理.....53	4.2.2 测量电路93
2.3.2 影响压阻系数的因素.....54	4.3 电容式传感器的主要性能、特点98
2.3.3 压阻式传感器的材料.....55	4.3.1 主要性能98
2.4 电阻式传感器的应用57	4.3.2 特点100
本章小结61	4.4 电容式传感器的应用100
	4.4.1 电容式压力传感器100
	4.4.2 电容式加速度传感器102

4.4.3 电容式测厚传感器.....	103	6.5.1 CCD 图像传感器.....	134
4.4.4 电容式液位传感器.....	103	6.5.2 图像传感器的应用.....	137
4.4.5 电容式温度传感器.....	104	本章小结.....	138
本章小结.....	105	思考题与习题.....	138
思考题与习题.....	105		
第 5 章 压电式传感器	107	第 7 章 光纤传感器	140
5.1 工作原理.....	107	7.1 光导纤维.....	140
5.1.1 压电效应及压电材料.....	107	7.1.1 光纤的结构.....	140
5.1.2 压电式传感器.....	111	7.1.2 光纤的分类.....	140
5.2 等效电路和测量电路.....	112	7.1.3 光纤的传光原理.....	141
5.2.1 等效电路.....	112	7.2 光纤传感器概述.....	143
5.2.2 测量电路.....	113	7.2.1 光纤传感器的组成.....	143
5.3 压电式传感器的应用.....	115	7.2.2 光纤传感器的性能特点.....	143
5.3.1 压电式测力传感器.....	115	7.2.3 光纤传感器的分类.....	143
5.3.2 压电式加速度传感器.....	115	7.2.4 光纤传感器的工作原理.....	144
5.3.3 压电式报警器.....	116	7.3 光纤传感器的应用.....	146
5.3.4 压电式测量均匀压力		7.3.1 光纤加速度传感器.....	146
传感器.....	117	7.3.2 光纤速度传感器.....	146
本章小结.....	117	7.3.3 光纤压力传感器.....	147
思考题与习题.....	118	7.3.4 光纤温度传感器.....	148
		7.3.5 光纤声传感器.....	148
第 6 章 光电式传感器	119	7.3.6 光纤光电传感器.....	149
6.1 光电效应.....	119	7.3.7 光纤图像传感器.....	150
6.1.1 外光电效应.....	119	本章小结.....	150
6.1.2 内光电效应.....	119	思考题与习题.....	150
6.2 外光电效应器件.....	121		
6.2.1 光电管.....	121	第 8 章 热电式传感器	151
6.2.2 光电倍增管.....	122	8.1 热电偶温度传感器.....	151
6.2.3 外光电效应器件的应用.....	123	8.1.1 工作原理.....	151
6.3 光电导器件.....	125	8.1.2 基本定律.....	154
6.3.1 光敏电阻.....	125	8.1.3 热电偶的材料、结构及常用	
6.3.2 光电导器件的应用.....	126	热电偶.....	155
6.4 光生伏特器件.....	129	8.1.4 热电偶冷端温度补偿.....	158
6.4.1 光敏二极管.....	129	8.2 热电阻温度传感器.....	160
6.4.2 光敏三极管.....	130	8.2.1 热电阻测温原理及类型.....	160
6.4.3 光电池.....	131	8.2.2 热电阻的结构.....	161
6.4.4 光生伏特器件的应用.....	132	8.2.3 测量电路.....	161
6.5 图像传感器.....	134	8.3 热敏电阻温度传感器.....	162
		8.3.1 热敏电阻测温原理.....	162

8.3.2 结构与材料和特性.....	162	10.3.1 红外传感器	208
8.3.3 热敏电阻的应用.....	165	10.3.2 核辐射式传感器	209
8.4 集成温度传感器	166	10.3.3 辐射式传感器的应用	213
8.4.1 工作原理.....	166	本章小结	214
8.4.2 集成温度传感器的应用.....	167	思考题与习题	215
本章小结	169	第 11 章 智能传感器.....	216
思考题与习题	170	11.1 智能传感器概述	216
第 9 章 半导体式传感器.....	171	11.1.1 智能传感器的概念	216
9.1 半导体气敏传感器	171	11.1.2 智能传感器的功能	217
9.1.1 半导体气敏传感器的分类.....	171	11.1.3 智能传感器的特点	217
9.1.2 电阻型半导体气敏传感器.....	172	11.2 智能传感器的实现途径	218
9.1.3 气敏传感器的应用.....	174	11.2.1 非集成化实现	218
9.2 半导体湿敏传感器	176	11.2.2 集成化实现	219
9.2.1 概述.....	176	11.2.3 混合实现	221
9.2.2 湿敏电阻的类型及原理.....	178	11.3 集成化智能传感器	222
9.2.3 湿敏传感器的应用.....	181	11.3.1 集成化智能传感器的几种 形式	222
9.3 半导体磁敏传感器	182	11.3.2 集成智能传感器实例	223
9.3.1 磁敏电阻器.....	182	11.4 智能传感器的发展方向	225
9.3.2 霍耳式传感器.....	186	本章小结	228
9.4 离子敏传感器	192	思考题与习题	229
9.4.1 ISFET 传感器的结构和工作 原理.....	192	第 12 章 传感器的补偿和抗干扰技术.....	230
9.4.2 ISFET 传感器的应用	195	12.1 传感器的补偿技术	230
本章小结	197	12.1.1 非线性误差及补偿	230
思考题与习题	198	12.1.2 温度误差及补偿	232
第 10 章 波式和辐射式传感器.....	199	12.2 传感器的标定	233
10.1 超声波传感器	199	12.3 抗干扰技术	235
10.1.1 超声波的测量原理.....	199	12.3.1 干扰的产生	235
10.1.2 超声波传感器的应用.....	201	12.3.2 干扰的类型	236
10.2 微波传感器	204	12.3.3 干扰信号的耦合方式	236
10.2.1 微波传感器的原理.....	204	12.3.4 常用的抑制干扰的措施	239
10.2.2 微波传感器的组成和分类.....	205	本章小结	241
10.2.3 微波传感器的应用.....	206	思考题与习题	241
10.3 辐射式传感器	208	参考文献	242

第1章 传感器理论基础

在系统学习各类传感器之前,首先应该掌握传感器的基本理论及检测技术的相关知识,主要包括传感器的概念、分类和基本特性,检测系统的组成与功能,基本测量方法,测量误差及数据处理等内容,为后续知识的学习打下基础。

1.1 传感器基础

在当今的信息时代,人们越来越迫切地希望能准确地掌握自然界和生产领域更多的各类信息,而传感器则是人们获取这些信息的主要途径和手段,因此传感器与人们的关系越来越密切。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节,它对于提高生产的自动化程度、促进现代科学技术的发展具有极其重要的作用。

1.1.1 传感器的概念

关于传感器的概念,我国国家标准 GB 7665—1987 规定:“传感器(sensor)是能感受规定的测量量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”。也就是说,传感器是一种按一定的精度把被测量转换为与之有确定关系的、便于应用的某种物理量的测量器件或装置,用于满足系统信息传输、存储、显示、记录及控制等要求。

① 传感器首先是一种测量器件或装置,它的作用体现在测量上。例如我们常见的发电机,它是一种可以将机械能转变成电能的转换装置,从能量转换的角度看,它是一种发电设备,不能称之为传感器;但从另一个角度看,人们可以通过发电机发电量的大小来测量调速系统的机械转速,这时,发电机就可看成是一种用于测量转速的测量装置,是一种速度传感器,通常称之为测速发电机。应用传感器的目的就是为了获得被测量的准确信息,这也是本课程的学习目的。

② 传感器定义中所谓“可用输出信号”是指便于传输、转换及处理的信号,主要包括气、光和电等信号,现在一般就是指电信号(如电压、电流、电势及各种电参数等),而“规定的测量量”一般是指非电量信号,主要包括各种物理量、化学量和生物量等,在工程中常需要测量的非电量信号有力、压力、温度、流量、位移、速度、加速度、转速、浓度等。正是由于这类非电量信号不能像电信号那样可由电工仪表和电子仪器直接测量,所以就需要利用传感器技术实现由非电量到电量的转换。

③ 传感器的输入和输出信号应该具有明确的对应关系,并且应保证一定的精度。

④ 关于“传感器”这个词,目前国外还有许多提法,如变换器(transducer)、转换器(converter)、检测器(detector)和变送器(transmitter)等,而根据我们国家的规定,传感器定名为 sensor;当传感器的输出信号为标准信号(1V~5V、4mA~20mA)时,称为变送器(transmitter),注意二者不要混淆。

1.1.2 传感器的组成和分类

1. 传感器的组成

传感器的种类繁多,其工作原理、性能特点和应用领域各不相同,所以结构、组成差异很大。但总的来说,传感器通常由敏感元件、转换元件及测量电路组成,有时还加上辅助电源,如图 1.1 所示。

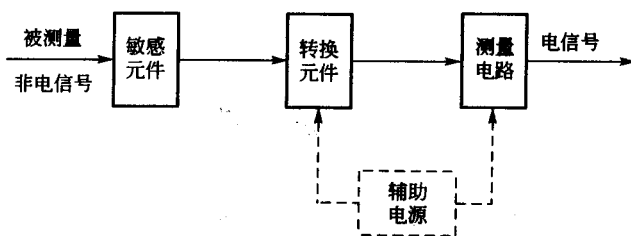


图 1.1 传感器组成框图

1) 敏感元件(sensing element)

敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的变化,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。敏感元件是传感器的核心,也是研究、设计和制作传感器的关键。如图 1.2 所示是一气体压力传感器的示意图。膜盒 2 的下半部与壳体 1 固定,上半部通过连杆与磁芯 4 相连,磁芯 4 置于两个电感线圈 3 中,后者接入测量电路 5。这里的膜盒就是敏感元件,其外部与大气压力 p_a 相通,内部感受被测压力 p 。当 p 变化时,引起膜盒上半部移动,即输出相应的位移量。

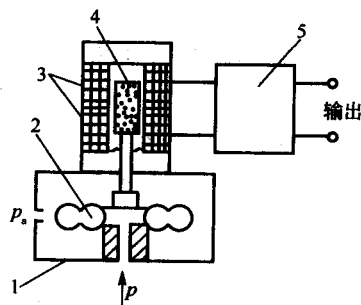


图 1.2 气体压力传感器

1—壳体; 2—膜盒; 3—电感线圈; 4—磁芯; 5—测量电路

2) 转换元件(transduction element)

转换元件是指传感器中能将敏感元件输出的物理量转换成适于传输或测量的电信号的部分。在图 1.2 中,转换元件是可变电感线圈 3,它把输入的位移量转换成电感的变化。

需要指出的是,并不是所有的传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件两部分,有的传感器转换元件不止一个,需要经过若干次的转换;有的则是二者合二为一。

3) 测量电路(measuring circuit)

测量电路又称转换电路或信号调理电路,它的作用是将转换元件输出的电信号进行进

一步的转换和处理,如放大、滤波、线性化、补偿等,以获得更好的品质特性,便于后续电路实现显示、记录、处理及控制等功能。测量电路的类型视传感器的工作原理和转换元件的类型而定,一般有电桥电路、阻抗变换电路、振荡电路等。

2. 传感器的分类

通常,一种传感器可以检测多种参数,一种参数又可以用多种传感器测量,所以传感器的分类方法也很多,至今尚无统一规定,归纳起来一般有以下几种。

1) 按工作原理分类

这是传感器最常见的分类方法,这种分类方法将物理、化学、生物等学科的原理、规律和效应作为分类的依据,有利于对传感器工作原理的阐述和对传感器的深入研究与分析,本书主要就是按这一分类方法作为编写体系介绍各种类型的传感器。

按照传感器工作原理的不同,传感器可分为电参数式传感器(包括电阻式、电感式和电容式传感器)、压电式传感器、光电式传感器(包括一般光电式、光纤式、激光式和红外式传感器等)、热电式传感器、半导体式传感器、波式和辐射式传感器等。这些类型的传感器大部分是分别基于其各自的物理效应原理命名的。

2) 按被测量分类

按被测量的性质进行分类,有利于准确表达传感器的用途,对人们系统地使用传感器很有帮助。为更加直观、清晰地表述各类传感器的用途,将种类繁多的被测量分为基本被测量和派生被测量,见表 1-1。对于各派生被测量的测量亦可通过对基本被测量的测量来实现。

表 1-1 基本被测量和派生被测量

基本被测量		派生被测量
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、平面度
	角位移	旋转角、偏转角、角振动
速度	线速度	振动、流量
	角速度	转速、角振动
加速度	线加速度	振动、冲击、质量
	角加速度	角振动、转矩、转动惯量
力	压力	质量、应力、力矩
时间	频率	周期、计数
光		光通量与密度、光谱
温度		热容
湿度		水汽、含水量、露点
浓度		气(液)体成分、黏度

3) 按结构分类

按传感器的结构构成可分为结构型、物性型和复合型传感器。

结构型传感器是依靠传感器结构参数(如形状、尺寸等)的变化,利用某些物理规律,

实现信号的变换,从而检测出被测量,它是目前应用最多、最普遍的传感器。这类传感器的特点是其性能以传感器中元件相对结构(位置)的变化为基础,而与其材料特性关系不大。

物性型传感器则是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应将被测量直接转换成电量的传感器。例如,热电偶传感器就是利用金属导体材料的温差电动势效应和不同金属导体间的接触电动势效应实现对温度的测量的;而利用压电晶体制成的压力传感器则是利用压电材料本身所具有的压电效应实现对压力的测量。这类传感器的“敏感元件”就是材料本身,无所谓“结构变化”,因此,通常具有响应速度快的特点,而且易于实现小型化、集成化和智能化。

复合型传感器则是结构型和物性型传感器的组合,同时兼有二者的特征。

4) 按能量转换关系分类

按照传感器的能量转换情况,传感器可分为能量控制型和能量转换型传感器两大类。

所谓能量控制型传感器是指其变换的能量是由外部电源供给的,而外界的变化(即传感器输入量的变化)只起到控制的作用。如电阻、电感、电容等电参数传感器、霍尔传感器等都属于这一类传感器。

能量转换型传感器,主要由能量变换元件构成,它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电效应等的传感器都属于此类传感器。

此外,根据被测量的性质,可以将传感器分成物理型、化学型和生物型传感器三大类;根据传感器的使用材料,也可以将传感器分为半导体传感器、陶瓷传感器、金属材料传感器、复合材料传感器、高分子材料传感器等;根据应用领域的不同,还可分为工业用、农用、民用、医用及军用等不同类型;根据具体的使用目的,又可分为测量用、监视用、检查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

1.1.3 传感器的基本特性

为了更好地掌握和使用传感器,必须充分地了解传感器的基本特性。传感器的基本特性是指系统的输出输入关系特性,即系统输出信号 $y(t)$ 与输入信号(被测量) $x(t)$ 之间的关系,如图 1.3 所示。

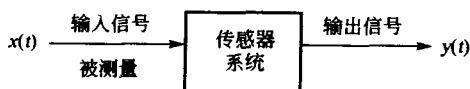


图 1.3 传感器系统

根据传感器输入信号 $x(t)$ 是否随时间变化,其基本特性分为静态特性和动态特性,它们是系统对外呈现出的外部特性,但与其内部参数密切相关。不同的传感器内部参数不同,因此其基本特性也表现出不同的特点。一个高精度传感器,必须具有良好的静态特性和动态特性,才能保证信号无失真地按规律转换。

1. 静态特性

当传感器的输入信号是常量,不随时间变化(或变化极缓慢)时,其输出输入关系特性称为静态特性。传感器的静态特性主要由下列几种性能来描述。

1) 测量范围(measuring range)

传感器所能测量到的最小输入量 $x_{\min}$ 与最大输入量 $x_{\max}$ 之间的范围称为传感器的测量范围。

2) 量程(span)

传感器测量范围的上限值 $x_{\max}$ 与下限值 $x_{\min}$ 的代数差 $x_{\max} - x_{\min}$ ，称为量程。

3) 精度(accuracy)

传感器的精度是指测量结果的可靠程度，是测量中各类误差的综合反映，测量误差越小，传感器的精度越高。

传感器的精度用其量程范围内的最大基本误差与满量程输出之比的百分数表示，其基本误差是传感器在规定的正常工作条件下所具有的测量误差，由系统误差和随机误差两部分组成，如用 S 表示传感器的精度，则

$$S = \frac{\Delta}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 Δ —— 测量范围内允许的最大基本误差；

y_{FS} —— 满量程输出(FS 是英文 Full Scale(满量程)的缩写)。

工程技术中为简化传感器精度的表示方法，引用了精度等级的概念。精度等级以一系列标准百分比数值分档表示，代表传感器测量的最大允许误差。

如果传感器的工作条件偏离正常工作条件，还会带来附加误差，温度附加误差就是最主要的附加误差。

4) 线性度(linearity)

所谓传感器的线性度是指其输出量与输入量之间的关系曲线偏离理想直线的程度，又称为非线性误差。如不考虑迟滞、蠕变等因素，一般传感器的输出输入特性关系可用 n 次多项式表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-2)$$

式中， x 为输入量； y 为输出量； a_0 为零输入时的输出，也叫零位输出； a_1 为传感器线性项系数，也称为线性灵敏度； $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性项系数。在不考虑零位输出的情况下，传感器的线性度可分为以下几种情况。

(1) 理想线性特性

当式(1-2)中 a_1 为常数，而 $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$ 时，即

$$y = a_1x \quad (1-3)$$

称为理想线性特性，如图 1.4(a)所示，这时传感器的线性最好，也是我们最希望传感器所具有的特性。具有该特性的传感器的灵敏度为直线 $y = a_1x$ 的斜率，即

$$k = \frac{y}{x} = a_1 = \text{常数} \quad (1-4)$$

(2) 仅有偶次非线性项

传感器的输出输入特性为

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots + a_{2n}x^{2n}, \quad n = 0, 1, 2, \cdots \quad (1-5)$$

由于没有对称性，此特性线性范围较窄，线性度较差，如图 1.4(b)所示，一般传感器设计很少采用这种特性。

(3) 仅有奇次非线性项

传感器的输出输入特性为

$$y = a_1 + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots + a_{2n+1} x^{2n+1}, \quad n = 0, 1, 2, \cdots \quad (1-6)$$

此传感器特性相对于坐标原点对称, 其线性范围较宽, 线性度较好, 如图 1.4(c) 所示, 是比较接近于理想直线的非线性特性。

(4) 普遍情况

一般情况下, 传感器的输出输入特性为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \quad (1-7)$$

如图 1.4(d) 所示。

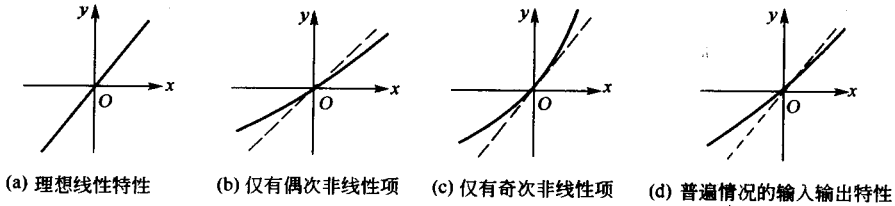


图 1.4 传感器的非线性

在实际使用非线性传感器时, 如果非线性项的次数不高, 则在输入量变化范围不大的情况下, 可采用直线近似地代替实际输入输出特性曲线的某一段, 使传感器的非线性特性得到线性化处理, 这里所采用的直线称为拟合直线。实际输入输出特性曲线与拟合直线的最大相对误差, 就是非线性误差, 用 γ_L 来表示, 即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 $\Delta L_{\max}$ —— 非线性最大误差;

y_{FS} —— 满量程输出值。

目前常用的拟合方法有: 理论拟合、过零旋转拟合、端点拟合、端点平移拟合及最小二乘拟合等。

在图 1.5(a) 中, 拟合直线为传感器的理论特性, 与实际测试值无关, 这种方法称为理论拟合, 应用十分简便, 但一般说来 $\Delta L_{\max}$ 很大。

图 1.5(b) 为过零旋转拟合, 常用于校正特性曲线过零的传感器。拟合时, 使 $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_{\max}$, 这种方法也比较简单, 非线性误差比前一种小很多。

图 1.5(c) 所示的端点拟合, 是把实际特性曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便, 但 $\Delta L_{\max}$ 较大。

图 1.5(d) 是在图 1.5(c) 的基础上使直线平移, 移动距离为图 1.5(c) 的 $\Delta L_{\max}$ 的 1/2。这条特性曲线分布于拟合直线的两侧, $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_3 = \Delta L_{\max}$, 与图 1.5(c) 相比, 非线性误差减小了 1/2, 提高了精度。

最小二乘拟合是选取在量程范围内与特性曲线上各点的偏差平方和最小的直线作为拟合直线, 这种拟合方法有严格的数学依据, 尽管计算过程复杂, 但得到的拟合直线精度高, 误差小。