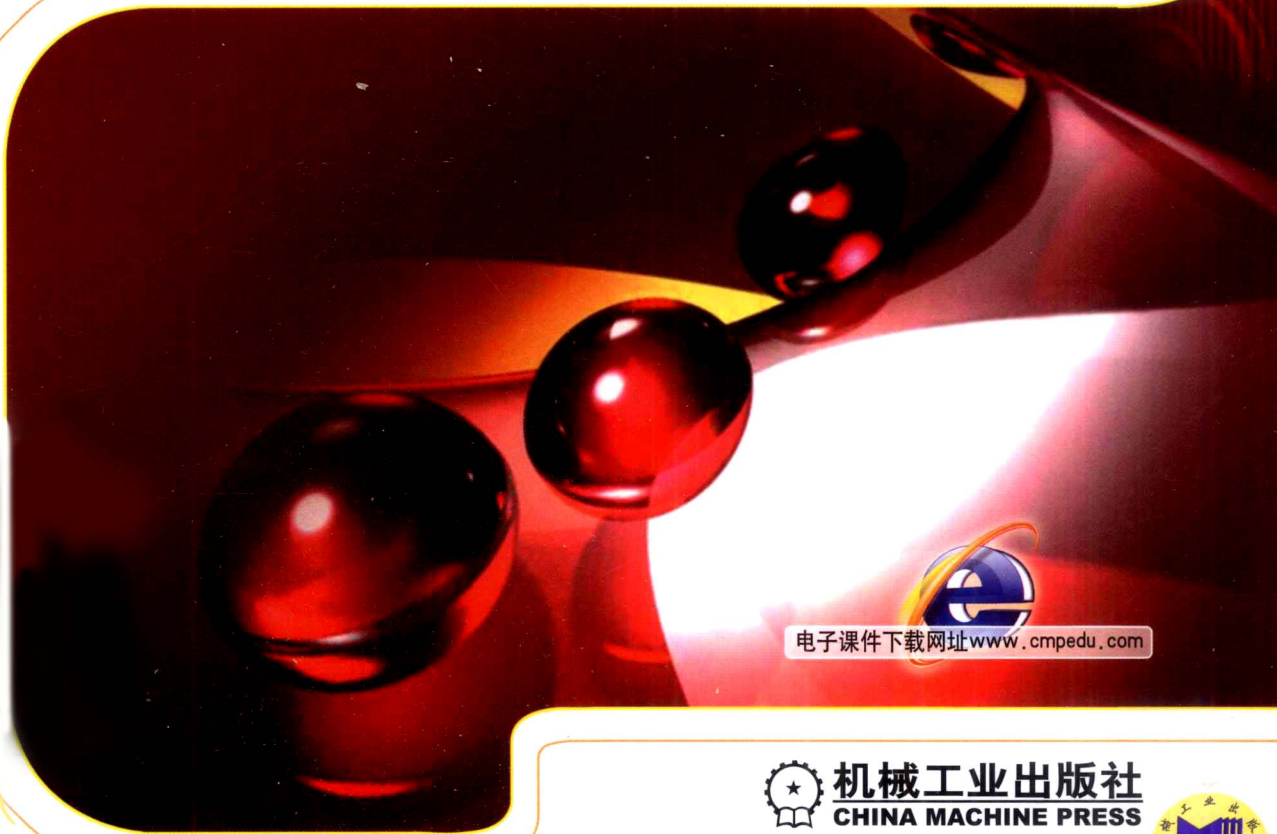




全国高等职业教育规划教材

# 传感器技术及其 工程应用

金发庆 主编



电子课件下载网址 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



全国高等职业教育规划教材

# 传感器技术及其工程应用

金发庆 主编  
李瑜芳 审



机械工业出版社

本书主要讲述传感器原理、结构、性能和应用。书中介绍了传感器的分类、数学模型、材料及特性,并介绍了温度、力、光、图像、磁、位移、湿度、气体、生物、微波、超声波、机器人、指纹传感器,以及智能传感器、模糊传感器、微机电系统(MEMS)、传感器网络、无线传感器网络的构建,列举了各种传感器和传感器网络在工农业生产、科学研究、医疗卫生、家用电器等方面的工程应用实例。本书共12章,每章最后附有习题,第2~12章附有实训课题。

本书可作为大学专科和高等职业院校的应用电子技术、自动控制、仪器仪表、测量、机电技术、计算机应用等专业的教学用书,也可用作有关工程技术人员的技术参考书和自学用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及其工程应用/金发庆主编. —北京:机械工业出版社, 2010. 6  
全国高等职业教育规划教材  
ISBN 978-7-111-30269-8

I. ①传… II. ①金… III. ①传感器—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 057088 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王 颖 版式设计:霍永明

责任校对:姜 婷 责任印制:乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 15 25 印张 · 374 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-30269-8

定价: 25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者服务部: (010)68993821

封面无防伪标均为盗版

# 全国高等职业教育规划教材电子技术专业 编委会成员名单

主 任 曹建林

副主任 张中洲 张福强 祖 炬 董维佳  
俞 宁 蒋蒙安 吕何新 伍湘彬  
任德齐 华永平 吴元凯

委 员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 马 彪 | 邓 红 | 王树忠 | 王新新 | 尹立贤 |
| 白直灿 | 包中婷 | 冯满顺 | 华天京 | 吉雪峰 |
| 刘美玲 | 刘 涛 | 孙吉云 | 孙津平 | 朱晓红 |
| 李菊芳 | 邢树忠 | 陈子聪 | 杨元挺 | 张立群 |
| 张锡平 | 苟爱梅 | 姚建永 | 曹 毅 | 崔金辉 |
| 黄永定 | 章大钧 | 彭文敏 | 曾日波 | 谭克清 |

秘书长 胡毓坚

副秘书长 戴红霞

# 出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国近 60 所高等职业院校的骨干教师对在 2001 年出版的“面向 21 世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补,并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师,针对相关专业的课程设置,融合教学中的实践经验,同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的,具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价,并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中,除了保持原有特色外,针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中,核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时,根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来,本系列教材具有以下特点:

- (1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- (2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度,强调专业技术应用能力的训练,适当增加实训环节。
- (3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁,多用图表来表达信息;增加相关技术在生产中的应用实例,引导学生主动学习。
- (4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新,及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念,并积极支持新专业的教材建设。
- (5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合,提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快,加之我们的水平和经验有限,因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息,以利于我们今后不断提高教材的出版质量,为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

## 前 言

今天,人类已经进入了科学技术迅猛发展的信息社会,计算机、互联网、机器人、自动控制以及单片机嵌入系统的迅速发展,迫切需要形形色色的传感器。作为“感觉器官”,传感器用于各种各样信息的感知、获取和检测,并将其转换为工作系统能进行处理的信息。显而易见,传感器在现代科学技术领域中占有极其重要的地位,了解和掌握传感器及其工程应用,成了相关专业技术人员的必需。有关传感器及其工程应用技术的课程成为应用电子技术、自动控制技术、仪器仪表技术、自动信号技术、测量技术、机器人技术及计算机应用等专业的必修课。

本书力求内容新颖,叙述简练,实例面广。其参考学时为60学时。本书以传感器原理、结构、性能和工程应用为主线,介绍了传感器的分类、数学模型、特性、材料和技术标定,介绍了温度、力、光、图像、磁、位移、湿度、气体、生物、微波、超声波、机器人、指纹传感器及其工程应用,并介绍了传感器信号处理电路,以及智能传感器和传感器网络的构建、性能和实例。各章最后附有习题,第2~12章后面附有实训课题。

通过实训,既可以培养学生查阅各种传感器手册和资料的能力,又可以使学生通过动手制作一些传感器应用电路,增强动手能力。在讲授和学习本书时,可根据实际情况和具体条件,选择完成一部分实训课题或全部实训课题,也可以将部分实训课题安排在课余时间进行。

本书第1、5、11、12章由金发庆编写,第2、3章由孙卫星编写,第4、8、9章由李晴编写,第6、7、10章由张天伟编写。全书由金发庆统稿,李瑜芳审稿。

在本书编写过程中,得到许多同志热情关心和帮助,并提出了许多宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

为了配合教学,本书提供了电子教案,读者可在机械工业出版社网站 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载。

编 者

# 目 录

## 出版说明

## 前言

## 第1章 传感器技术基础..... 1

### 1.1 自动测控系统与传感器 ..... 1

#### 1.1.1 自动测控系统 ..... 1

#### 1.1.2 传感器 ..... 2

### 1.2 传感器的分类 ..... 3

#### 1.2.1 按被测物理量分类 ..... 3

#### 1.2.2 按传感器工作原理分类 ..... 3

### 1.3 传感器的数学模型 ..... 5

#### 1.3.1 传感器的静态数学模型 ..... 5

#### 1.3.2 传感器的动态数学模型 ..... 6

### 1.4 传感器的特性与技术指标 ..... 7

#### 1.4.1 静态特性 ..... 7

#### 1.4.2 动态特性 ..... 9

### 1.5 传感器的材料与制造 ..... 11

#### 1.5.1 传感器的材料 ..... 11

#### 1.5.2 传感器制造技术 ..... 13

### 1.6 提高传感器性能的方法 ..... 14

#### 1.6.1 传感器性能指标 ..... 14

#### 1.6.2 提高性能指标的方法 ..... 15

### 1.7 传感器的标定与校准 ..... 16

#### 1.7.1 标定与校准的方法 ..... 16

#### 1.7.2 静态标定 ..... 16

#### 1.7.3 动态标定 ..... 17

### 1.8 习题 ..... 17

## 第2章 温度传感器 ..... 18

### 2.1 温度测量概述 ..... 18

### 2.2 热电偶传感器 ..... 18

#### 2.2.1 热电偶测温原理 ..... 19

#### 2.2.2 热电偶的结构形式和

#### 标准化热电偶 ..... 21

#### 2.2.3 热电偶测温及参考端温度补偿 ... 24

### 2.3 金属热电阻传感器 ..... 26

#### 2.3.1 热电阻的温度特性 ..... 26

#### 2.3.2 热电阻传感器的结构 ..... 27

### 2.4 集成温度传感器 ..... 27

#### 2.4.1 集成温度传感器基本工作原理 ... 28

#### 2.4.2 电压输出型集成温度传感器 ..... 28

#### 2.4.3 电流输出型集成温度传感器 ..... 28

### 2.5 半导体热敏电阻 ..... 29

#### 2.5.1 热敏电阻的( $R_t-t$ )特性 ..... 29

#### 2.5.2 热敏电阻温度测量非线性修正 ... 29

### 2.6 负温度系数热敏电阻 ..... 30

#### 2.6.1 负温度系数热敏电阻性能 ..... 30

#### 2.6.2 负温度系数热敏电阻温度方程 ... 31

#### 2.6.3 负温度系数热敏电阻主要特性 ... 31

### 2.7 温度传感器应用实例 ..... 32

#### 2.7.1 双金属温度传感器的应用 ..... 32

#### 2.7.2 热敏电阻温度传感器的应用 ..... 34

#### 2.7.3 晶体管温度传感器的应用 ..... 35

#### 2.7.4 集成温度传感器应用举例 ..... 36

#### 2.7.5 家用空调专用温度传感器 ..... 37

#### 2.7.6 冰箱、冰柜专用温度传感器 ..... 38

#### 2.7.7 热水器专用温度传感器 ..... 39

#### 2.7.8 汽车发动机控制系统专

#### 用温度传感器 ..... 40

### 2.8 实训 ..... 40

### 2.9 习题 ..... 41

## 第3章 力传感器 ..... 42

### 3.1 弹性敏感元件 ..... 42

#### 3.1.1 弹性敏感元件的特性 ..... 42

#### 3.1.2 弹性敏感元件的分类 ..... 43

|                                    |    |                                    |     |
|------------------------------------|----|------------------------------------|-----|
| 3.2 电阻应变片传感器 .....                 | 46 | 4.2.1 光电管和光电倍增管 .....              | 72  |
| 3.2.1 电阻应变片的工作原理 .....             | 46 | 4.2.2 光敏电阻 .....                   | 73  |
| 3.2.2 电阻应变片的分类 .....               | 46 | 4.2.3 光敏二极管和光敏晶体管 .....            | 74  |
| 3.2.3 电阻应变片的测量电路 .....             | 48 | 4.2.4 光电池 .....                    | 75  |
| 3.3 压电传感器 .....                    | 49 | 4.2.5 光电元件的特性 .....                | 75  |
| 3.3.1 石英晶体的压电效应 .....              | 49 | 4.2.6 光耦合器件 .....                  | 79  |
| 3.3.2 压电陶瓷的压电效应 .....              | 50 | 4.3 红外线传感器 .....                   | 81  |
| 3.3.3 压电式传感器的测量电路 .....            | 51 | 4.3.1 概述 .....                     | 81  |
| 3.3.4 压电式传感器的结构 .....              | 54 | 4.3.2 热释电型红外传感器 .....              | 82  |
| 3.3.5 单片集成硅压力传感器 .....             | 54 | 4.4 色彩传感器 .....                    | 84  |
| 3.4 电容式传感器 .....                   | 55 | 4.5 CZG-GD-500 系列紫外<br>火焰传感器 ..... | 86  |
| 3.4.1 变极距式电容传感器 .....              | 56 | 4.6 光纤传感器 .....                    | 87  |
| 3.4.2 变面积式电容传感器 .....              | 57 | 4.6.1 光纤传感元件 .....                 | 87  |
| 3.4.3 变介电常数式电容传感器 .....            | 58 | 4.6.2 常用光纤传感器 .....                | 89  |
| 3.4.4 电容式传感器测量电路 .....             | 59 | 4.7 光传感器应用实例 .....                 | 90  |
| 3.5 电感式传感器 .....                   | 61 | 4.7.1 自动照明灯 .....                  | 90  |
| 3.5.1 自感式传感器 .....                 | 61 | 4.7.2 光电式数字转速表 .....               | 90  |
| 3.5.2 测量电路 .....                   | 62 | 4.7.3 物体长度及运动速度的检测 .....           | 91  |
| 3.5.3 互感式传感器 .....                 | 63 | 4.7.4 红外自动干手器 .....                | 93  |
| 3.5.4 差动变压器式传感器测量电路 .....          | 65 | 4.7.5 手指光反射测量心率方法 .....            | 93  |
| 3.6 力传感器应用实例 .....                 | 66 | 4.7.6 条形码扫描笔 .....                 | 94  |
| 3.6.1 煤气灶电子点火器 .....               | 66 | 4.7.7 插卡式电源开关 .....                | 95  |
| 3.6.2 压电式玻璃破碎报警器 .....             | 66 | 4.8 实训 .....                       | 95  |
| 3.6.3 2S5M 压力传感器应用<br>电路举例 .....   | 67 | 4.9 习题 .....                       | 96  |
| 3.6.4 指套式电子血压计 .....               | 67 | <b>第5章 图像传感器</b> .....             | 98  |
| 3.6.5 CL-YZ-320 型力敏传感<br>器介绍 ..... | 68 | 5.1 CCD 图像传感器 .....                | 98  |
| 3.7 实训 .....                       | 69 | 5.1.1 CCD 电荷耦合器件 .....             | 98  |
| 3.8 习题 .....                       | 70 | 5.1.2 CCD 图像传感器 .....              | 100 |
| <b>第4章 光电式传感器</b> .....            | 71 | 5.1.3 CCD 图像传感器的应用 .....           | 101 |
| 4.1 光电效应 .....                     | 71 | 5.2 CMOS 图像传感器 .....               | 102 |
| 4.1.1 外光电效应 .....                  | 71 | 5.2.1 CMOS 型光电转换器件 .....           | 102 |
| 4.1.2 内光电效应 .....                  | 71 | 5.2.2 CMOS 图像传感器 .....             | 103 |
| 4.1.3 光生伏打效应 .....                 | 72 | 5.2.3 CMOS 图像传感器的应用 .....          | 104 |
| 4.2 光电器件 .....                     | 72 | 5.3 CCD 和 CMOS 图像传感器<br>应用实例 ..... | 104 |

|                         |            |                           |            |
|-------------------------|------------|---------------------------|------------|
| 5.3.1 月票自动发售机 .....     | 104        | 工作原理 .....                | 125        |
| 5.3.2 数字摄像机 .....       | 105        | 7.2.3 光栅位移传感器的应用 .....    | 125        |
| 5.3.3 数码相机 .....        | 105        | 7.3 磁栅位移传感器 .....         | 125        |
| 5.3.4 彩信手机 .....        | 106        | 7.4 接近传感器 .....           | 126        |
| 5.3.5 计算机摄像头 .....      | 107        | 7.4.1 电容式接近传感器 .....      | 127        |
| 5.3.6 光纤内窥镜 .....       | 107        | 7.4.2 电感式接近传感器 .....      | 127        |
| 5.4 实训 .....            | 108        | 7.4.3 热释电红外传感器接近电路 ...    | 127        |
| 5.5 习题 .....            | 108        | 7.5 转速传感器 .....           | 128        |
| <b>第6章 霍尔传感器及其他磁</b>    |            | 7.5.1 磁电式转速传感器 .....      | 128        |
| <b>传感器 .....</b>        | <b>109</b> | 7.5.2 光电式转速传感器 .....      | 129        |
| 6.1 霍尔传感器工作原理 .....     | 109        | 7.6 多普勒传感器 .....          | 130        |
| 6.1.1 霍尔效应 .....        | 109        | 7.6.1 多普勒效应 .....         | 130        |
| 6.1.2 霍尔元件的主要技术参数 ..... | 111        | 7.6.2 多普勒雷达测速 .....       | 131        |
| 6.2 霍尔传感器 .....         | 112        | 7.7 液位传感器 .....           | 131        |
| 6.2.1 霍尔开关集成传感器 .....   | 112        | 7.7.1 导电式水位传感器 .....      | 131        |
| 6.2.2 霍尔线性集成传感器 .....   | 113        | 7.7.2 压差式液位传感器 .....      | 132        |
| 6.3 其他磁传感器 .....        | 113        | 7.8 流量及流速传感器 .....        | 133        |
| 6.3.1 磁阻元件 .....        | 113        | 7.8.1 电磁式流量传感器 .....      | 134        |
| 6.3.2 磁敏二极管 .....       | 114        | 7.8.2 涡轮式流速传感器 .....      | 135        |
| 6.3.3 磁敏晶体管 .....       | 115        | 7.9 实训 .....              | 136        |
| 6.4 霍尔传感器及其他磁           |            | 7.10 习题 .....             | 137        |
| 传感器应用实例 .....           | 116        | <b>第8章 气体和湿度传感器 .....</b> | <b>138</b> |
| 6.4.1 霍尔汽车无触点点火器 .....  | 116        | 8.1 气体传感器 .....           | 138        |
| 6.4.2 霍尔无刷直流电动机 .....   | 117        | 8.1.1 半导体气体传感器 .....      | 139        |
| 6.4.3 自动供水装置 .....      | 117        | 8.1.2 固体电解质式气体传感器 .....   | 140        |
| 6.5 实训 .....            | 119        | 8.1.3 接触燃烧式气体传感器 .....    | 140        |
| 6.6 习题 .....            | 119        | 8.1.4 电化学式气体传感器 .....     | 141        |
| <b>第7章 位移传感器 .....</b>  | <b>121</b> | 8.1.5 集成型气体传感器 .....      | 141        |
| 7.1 机械位移传感器 .....       | 121        | 8.1.6 气体传感器的应用 .....      | 142        |
| 7.1.1 电位器式位移传感器 .....   | 121        | 8.1.7 烟雾传感器 .....         | 143        |
| 7.1.2 电容式位移传感器 .....    | 122        | 8.2 湿度传感器 .....           | 143        |
| 7.1.3 螺线管式电感位移传感器 ..... | 123        | 8.2.1 概述 .....            | 143        |
| 7.1.4 差动变压器 .....       | 123        | 8.2.2 陶瓷型湿度传感器 .....      | 145        |
| 7.2 光栅位移传感器 .....       | 124        | 8.2.3 有机高分子湿度传感器 .....    | 146        |
| 7.2.1 莫尔条纹 .....        | 124        | 8.2.4 半导体型湿度传感器 .....     | 147        |
| 7.2.2 光栅位移传感器的结构及       |            | 8.2.5 含水量检测 .....         | 148        |

|                         |     |                         |     |
|-------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 8.3 气体和湿度传感器的应用 .....   | 149 | 9.6 实训 .....            | 178 |
| 8.3.1 气体报警器 .....       | 149 | 9.7 习题 .....            | 178 |
| 8.3.2 自动空气净化换气扇 .....   | 149 | 第10章 传感器接口电路 .....      | 180 |
| 8.3.3 自动去湿装置 .....      | 149 | 10.1 传感器输出信号的           |     |
| 8.3.4 录像机结露报警控制电路 ..... | 150 | 处理方法 .....              | 180 |
| 8.3.5 气体报警器与控制器电路 ..... | 150 | 10.1.1 输出信号的特点 .....    | 180 |
| 8.4 实训 .....            | 151 | 10.1.2 输出信号的处理方法 .....  | 181 |
| 8.5 习题 .....            | 152 | 10.2 传感器信号检测电路 .....    | 181 |
| 第9章 生物、波、机器人、指纹         |     | 10.2.1 检测电路的形式 .....    | 181 |
| 传感器 .....               | 153 | 10.2.2 常用电路 .....       | 182 |
| 9.1 生物传感器 .....         | 153 | 10.3 传感器和微型             |     |
| 9.1.1 概述 .....          | 153 | 计算机的连接 .....            | 187 |
| 9.1.2 生物传感器的工作          |     | 10.3.1 检测信号在输入微型        |     |
| 原理及结构 .....             | 154 | 计算机前的处理 .....           | 187 |
| 9.2 微波传感器 .....         | 158 | 10.3.2 模—数转换电路 .....    | 188 |
| 9.2.1 概述 .....          | 158 | 10.3.3 电压—频率转换电路 .....  | 190 |
| 9.2.2 微波传感器及其分类 .....   | 159 | 10.4 传感器接口电路应用实例 .....  | 191 |
| 9.2.3 微波传感器的优点及         |     | 10.5 实训 .....           | 192 |
| 存在的问题 .....             | 159 | 10.6 习题 .....           | 193 |
| 9.2.4 微波传感器的应用——微波温度    |     | 第11章 智能传感器 .....        | 194 |
| 传感器 .....               | 159 | 11.1 智能传感器概述 .....      | 194 |
| 9.3 超声波传感器 .....        | 160 | 11.1.1 智能传感器的功能 .....   | 194 |
| 9.3.1 超声波传感器的物理基础 ..... | 160 | 11.1.2 智能传感器的层次结构 ..... | 195 |
| 9.3.2 超声波换能器及耦合技术 ..... | 162 | 11.1.3 智能传感器的实现 .....   | 196 |
| 9.3.3 超声波传感器的应用 .....   | 164 | 11.2 计算型智能传感器 .....     | 197 |
| 9.4 机器人传感器 .....        | 167 | 11.2.1 计算型智能传感器的        |     |
| 9.4.1 机器人与传感器 .....     | 167 | 构成方式 .....              | 197 |
| 9.4.2 机器人传感器的分类 .....   | 167 | 11.2.2 计算型智能传感器的        |     |
| 9.4.3 触觉传感器 .....       | 168 | 基本结构 .....              | 197 |
| 9.4.4 接近觉传感器 .....      | 170 | 11.3 特殊材料型智能传感器 .....   | 200 |
| 9.4.5 视觉传感器 .....       | 171 | 11.4 几何结构型智能传感器 .....   | 200 |
| 9.4.6 听觉、嗅觉、味觉及         |     | 11.5 智能传感器实例 .....      | 201 |
| 其他传感器 .....             | 173 | 11.5.1 智能压力传感器 .....    | 201 |
| 9.5 指纹传感器 .....         | 175 | 11.5.2 气象参数测试仪 .....    | 201 |
| 9.5.1 指纹识别技术 .....      | 175 | 11.5.3 汽车制动性能检测仪 .....  | 202 |
| 9.5.2 指纹传感器 .....       | 176 | 11.5.4 轮速智能传感器 .....    | 203 |

|                                 |     |                                  |     |
|---------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 11.5.5 车载信息系统 .....             | 204 | 12.1 传感器网络概述 .....               | 215 |
| 11.6 多传感器融合系统 .....             | 205 | 12.1.1 传感器网络的作用 .....            | 215 |
| 11.6.1 多传感器融合 .....             | 205 | 12.1.2 传感器网络的结构 .....            | 216 |
| 11.6.2 数据融合 .....               | 206 | 12.2 传感器网络信息交换体系 .....           | 217 |
| 11.6.3 多传感器融合系统的应用 .....        | 206 | 12.3 OSI 开放系统互连参考模型 .....        | 218 |
| 11.7 模糊传感器 .....                | 207 | 12.3.1 OSI 参考模型的层次结构 .....       | 218 |
| 11.7.1 模糊语言和模糊传感器 .....         | 207 | 12.3.2 OSI 参考模型各层<br>规范的功能 ..... | 219 |
| 11.7.2 模糊传感器的结构及<br>实现方法 .....  | 207 | 12.4 传感器网络通信协议 .....             | 220 |
| 11.7.3 模糊传感器的应用 .....           | 208 | 12.4.1 汽车协议及其应用 .....            | 221 |
| 11.8 微机电系统 .....                | 209 | 12.4.2 工业网络协议 .....              | 223 |
| 11.8.1 微机电系统的特点 .....           | 209 | 12.4.3 办公室与楼宇自动化<br>网络协议 .....   | 224 |
| 11.8.2 声表面波叉指换能器 .....          | 210 | 12.4.4 家庭自动化网络协议 .....           | 225 |
| 11.8.3 叉指换能器振荡器式<br>微传感器 .....  | 210 | 12.5 无线传感器网络 .....               | 226 |
| 11.8.4 反射波阵列式微加<br>速度传感器 .....  | 211 | 12.5.1 无线传感器网络的结构 .....          | 226 |
| 11.8.5 微加速度传感器和微陀<br>螺仪组合 ..... | 212 | 12.5.2 传感器节点的设计 .....            | 228 |
| 11.9 实训 .....                   | 213 | 12.5.3 无线传感器网络的应用 .....          | 229 |
| 11.10 习题 .....                  | 213 | 12.6 实训 .....                    | 230 |
| 第12章 传感器网络 .....                | 215 | 12.7 习题 .....                    | 230 |
|                                 |     | 参考文献 .....                       | 232 |

# 第 1 章 传感器技术基础

## 本章要点

- 传感器可以按被测物理量进行分类，也可以按工作原理进行分类；
- 传感器有线性度、灵敏度、重复性及滞迟现象等技术指标；
- 传感器最常用的材料和传感器制造技术。

世界是由物质组成的，各种事物都是物质的不同形态。表征物质特性或运动形式的参数很多，根据物质的电特性，可分为电量和非电量两类。电量一般是指物理学中的电学量，例如电压、电流、电阻、电容及电感等；非电量则是指除电量之外的一些参数，例如压力、流量、尺寸、位移量、重量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度及酸碱度等。人类为了认识物质及事物的本质，需要对物质的特性进行测量，其中大多数是对非电量的测量。

非电量的测量不能直接使用一般的电工仪表和电子仪器测量，因为一般的电工仪表和电子仪器只能测量电量，要求输入的信号为电信号。非电量需要转换成与非电量有一定关系的电量，再进行测量。实现这种转换技术的器件被称为传感器。采用传感器技术的非电量电测方法，就是目前应用最广泛的测量技术。随着科学技术的发展，现在也出现了光通量、化学量等作为可测量的传感器。

随着电子计算机技术的飞速发展，自动检测、自动控制技术显露出非凡的能力，而大多数设备只能处理电信号，也就需要把被测、被控非电量的信息通过传感器转换成电信号。可见，传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。没有传感器对原始信息进行精确可靠的捕获和转换，就没有现代化的自动检测和自动控制系统；没有传感器就没有现代科学技术的迅速发展。

## 1.1 自动测控系统与传感器

### 1.1.1 自动测控系统

自动检测和自动控制技术是人们对事物的规律进行定性了解和定量分析预期效果所从事的一系列的技术措施。自动测控系统是完成这一系列技术措施的装置之一，它是检测控制器与研究对象的总和。自动测控系统通常可分为开环与闭环两种，如图 1-1 和图 1-2 所示。

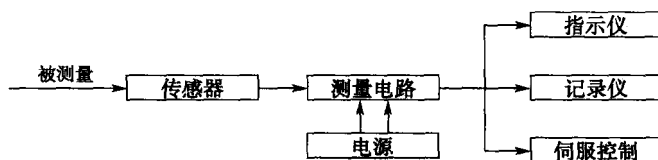


图 1-1 开环自动测控系统框图

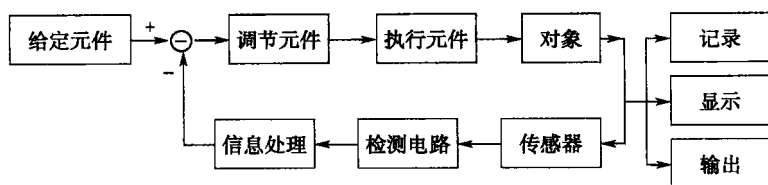


图 1-2 闭环自动测控系统框图

由图 1-1 和图 1-2 可以看出，一个完整的自动测控系统，一般由传感器、测量电路、显示记录装置或调节执行装置以及电源四部分组成。

### 1.1.2 传感器

传感器的作用是将被测非电物理量转换成与其有一定关系的电信号，它获得的信息正确与否，直接关系到整个系统的精度。依据中华人民共和国国家标准 (GB/T 7665—1987 传感器通用术语) 的规定，传感器的定义是：能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，通常由敏感元件和转换元件组成。其中敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件是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。传感器的组成如图 1-3 所示。

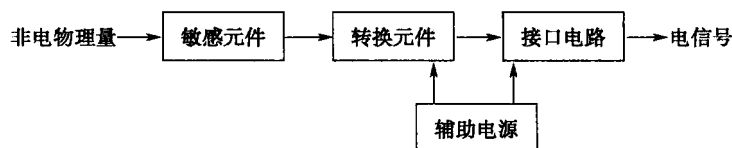


图 1-3 传感器组成框图

应该指出的是，并不是所有的传感器必需包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量，它就同时兼为转换元件；如果转换元件能直接感受被测量而输出与之成一定关系的电量，此时传感器就无敏感元件。例如压电晶体、热电偶、热敏电阻及光电器件等。敏感元件与转换元件两者合二为一的传感器是很多的。

图 1-3 中接口电路的作用是把转换元件输出的电信号变换为便于处理、显示、记录 and 控制的可用电信号。其电路的类型视转换元件的不同而定，经常采用的有电桥电路和其他特殊电路，例如高阻抗输入电路、脉冲电路、振荡电路等。辅助电源供给转换能量，有的传感器需要外加电源才能工作，例如应变片组成的电桥、差动变压器等；有的传感器则不需要外加电源便能工作，例如压电晶体等。

传感器转换能量的理论基础都是利用物理学、化学、生物学现象和效应来进行能量形式的变换。图 1-4 给出了传感器各种能量之间的转换关系，可见，被测量和它们之间的能量的相互转换是各种各样的。传感器技术就是掌握和完善这些转换的

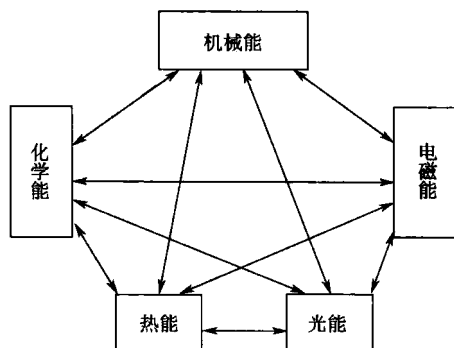


图 1-4 传感器的能量转换关系

方法和手段，它涉及传感器能量转换原理、材料选取与制造、器件设计、开发和应用等多项综合技术。

1.2 传感器的分类

根据某种原理设计的传感器有的可以同时测量多种非电物理量，而有时一种非电物理量又可以用几种不同传感器测量。因此传感器有许多分类方法，但常用的分类方法有两种，一种是按被测输入量来分；另一种是按传感器的工作原理来分。

1.2.1 按被测物理量分类

这一种方法是根据被测量的性质进行分类，如温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、流量传感器、液位传感器、力传感器、加速度传感器及转矩传感器等。

这种分类方法把种类繁多的被测量分为基本被测量和派生被测量两类。例如力可视为基本被测量，从力可派生出压力、重量、应力和力矩等派生被测量。当需要测量这些被测量时，只要采用力传感器就可以了。了解基本被测量和派生被测量的关系，对于系统使用何种传感器是很有帮助的。

常见的非电基本被测量和派生被测量如表 1-1 所示。这种分类方法的优点是比较明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据其用途选用。其缺点是没有区分每种传感器在转换机理上有何共性和差异，不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

表 1-1 基本被测量和派生被测量

| 基本被测量 |      | 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 | 力     | 压力 | 重量、应力、力矩    |
|       | 角位移  | 旋转角、偏转角、角振动        | 时间    | 频率 | 周期、计数、统计分布  |
| 速度    | 线速度  | 速度、振动、流量、动量        | 温度    |    | 热容、气体速度、涡流  |
|       | 角速度  | 转速、角振动             | 光     |    | 光通量与密度、光谱分布 |
| 加速度   | 线加速度 | 振动、冲击、质量           | 湿度    |    | 水气、水分、露点    |
|       | 角加速度 | 角振动、转矩、转动惯量        |       |    |             |

1.2.2 按传感器工作原理分类

这一种分类方法是以工作原理划分的，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。这种分类法的优点是对传感器的工作原理表达比较清楚，而且类别少，有利于传感器专业工作者对传感器进行深入研究分析。其缺点是不便于使用者根据用途选用。具体划分为：

1. 电学式传感器

电学式传感器是应用范围较广的一种传感器，常用的有电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器及电涡流式传感器等。

电阻式传感器是利用变阻器将被测非电量转换为电阻信号的原理制成。电阻式传感器一

般有电位器式、触点变阻式、电阻应变片式及压阻式等。电阻式传感器主要用于位移、压力、力、应变、力矩、气体流速、液位和液体流量等参数的测量。

电容式传感器是利用改变电容的几何尺寸或改变介质的性质和含量，从而使电容量发生变化的原理制成的。电容式传感器主要用于压力、位移、液位、厚度及水分含量等参数的测量。

电感式传感器是利用改变磁路几何尺寸、磁体位置来改变电感或互感的电感量或压磁效应原理制成的。电感式传感器主要用于位移、压力、力、振动及加速度等参数的测量。

磁电式传感器是利用电磁感应原理，把被测非电量转换成电量而制成。主要用于流量、转速和位移等参数的测量。

电涡流式传感器是利用金属在磁场中运动切割磁力线，在金属内形成涡流的原理而制成。电涡流式传感器主要用于位移及厚度等参数的测量。

## **2. 磁学式传感器**

磁学式传感器是利用铁磁物质的一些物理效应制成的。磁学式传感器主要用于位移、转矩等参数的测量。

## **3. 光电式传感器**

光电式传感器在非电量电测及自动控制技术中占有重要的地位。它是利用光电器件的光电效应和光学原理制成的。光电式传感器主要用于光强、光通量、位移、浓度等参数的测量。

## **4. 电势型传感器**

电势型传感器是利用热电效应、光电效应及霍尔效应等原理制成的。电势型传感器主要用于温度、磁通量、电流、速度、光通量及热辐射等参数的测量。

## **5. 电荷型传感器**

电荷型传感器是利用压电效应原理制成的，主要用于力及加速度的测量。

## **6. 半导体型传感器**

半导体型传感器是利用半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应及半导体与气体接触产生物质变化等原理制成的。半导体型传感器主要用于温度、湿度、压力、加速度、磁场和有害气体的测量。

## **7. 谐振式传感器**

谐振式传感器是利用改变电或机械的固有参数来改变谐振频率的原理而制成的，主要用来测量压力。

## **8. 电化学式传感器**

电化学式传感器是以离子导电原理为基础制成的。根据其电特性的形成不同，电化学传

感器可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、极谱(极化)式传感器和电解式传感器等。电化学式传感器主要用于分析气体成分、液体成分、溶于液体的固体成分、液体的酸碱度、电导率及氧化还原电位等参数的测量。

除了上述两种分类方法外,还有按能量的关系分类,将传感器分为有源传感器和无源传感器;按输出信号的性质分类,将传感器分为模拟式传感器和数字式传感器。数字式传感器输出数字量,便于与计算机联用,且抗干扰性较强,例如盘式角度数字传感器,光栅传感器等。

本书的传感器主要是按被测量分类编写的,适当加以工作原理的分析,重点讲述了各种传感器的工程应用,使读者学会应用传感器,进一步去开发新型传感器。

## 1.3 传感器的数学模型

传感器作为感受被测量信息的器件,总是希望它能按照一定的规律输出有用信号,因此,需要研究其输入-输出之间的关系及特性,以使用理论指导其设计、制造、校准与使用。理论和技术上表征输入-输出之间的关系通常是以建立数学模型来体现,这也是研究科学问题的基本出发点。

传感器可能用来检测静态量(不随时间变化的量)、准静态量、动态量(随时间变化的量),输入信号的状态不同,传感器表现出来的输出特性也不相同。为了简化,传感器的静态特性可以分开来研究,从静态输入-输出关系和动态输入-输出关系两方面建立数学模型。

### 1.3.1 传感器的静态数学模型

静态数学模型是指在静态信号作用下,传感器输出与输入量间的一种函数关系。如果不考虑迟滞特性和蠕动效应,传感器的静态数学模型一般可以用 $n$ 次多项式来表示为

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

式(1-1)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线性灵敏度,常用 $K$ 或 $S$ 表示; $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性项系数,其数值由具体传感器的非线性特性决定。传感器静态数学模型有3种有用的特殊形式:

1) 理想的线性特性。其线性度最好,通常是所希望的传感器应具有的特性,只有具备这样的特性才能正确无误地反映被测的真值。其数学模型为

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

具有该特性的传感器的灵敏度为直线 $y = a_1x$ 的斜率,其中 $a_1$ 为常数。

2) 仅有偶次非线性项。其线性范围较窄,线性度较差,灵敏度为相应曲线的斜率,一般传感器设计很少采用这种特性。其数学模型为

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots + a_{2n}x^{2n}, \quad n = 1, 2, \cdots \quad (1-3)$$

3) 仅有奇次非线性项。其线性范围较宽,且相对坐标原点对称的,线性度较好,灵敏度为该曲线的斜率。其数学模型为

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots + a_{2n+1}x^{2n+1}, \quad n = 0, 1, 2, \cdots \quad (1-4)$$

这种特性传感器使用时应采取线性补偿措施。

### 1.3.2 传感器的动态数学模型

在实际测量中,大量的被测量是随时间变化的动态信号。传感器的动态数学模型是指在随时间变化的动态信号作用下,传感器输出-输入量间的函数关系,它通常称为响应特性。动态数学模型一般采用微分方程和传递函数描述。

#### 1. 微分方程

绝大多数传感器都属于模拟(连续变化信号)系统,描述模拟系统的一般方法是采用微分方程。在忽略了一些影响不大的非线性和随机变量等复杂因素后,可将传感器作为线性定常数系统来考虑,因而其动态数学模型可以用线性常系数微分方程来表示,其通式为

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-5)$$

式(1-5)中,  $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0; b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$  分别为与传感器的结构有关的常数。

对于复杂的系统,其微分方程的建立和求解都是很困难的。但是一旦求解出微分方程的解就能分清其暂态响应和稳态响应。数学上采用拉普拉斯变换将实数域的微分方程变换成复数域( $S$ 域)的代数方程,求解就容易一些了。另外,也可采用传递函数的方法研究传感器动态特性。

#### 2. 传递函数

由数学理论知,如果当  $t \leq 0$  时,  $y(t) = 0$ , 则  $y(t)$  的拉普拉斯变换可定义为

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1-6)$$

式中,  $s = \sigma + j\omega$ ,  $\sigma > 0$ 。

对式(1-5)两边取拉普拉斯变换,则得

$$Y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0) = X(s)(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0)$$

输出  $y(t)$  的拉普拉斯变换  $Y(s)$  和输入  $x(t)$  的拉普拉斯变换  $X(s)$  的比为该系统的传递函数  $H(s)$

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (1-7)$$

式(1-7)第二个等号右边是一个与输入无关的表达式,只与系统结构参数有关,可见传递函数  $H(s)$  是描述传感器本身传递信息的特性,条件是  $t \leq 0$ ,  $y(t) = 0$ , 即传感器被激励之前所有储能元件如质量块、弹性元件、电气元件均没有积存能量。这样不必了解复杂系统的具体结构内容,只要给出一个激励  $x(t)$ , 得到系统对  $x(t)$  的响应  $y(t)$ , 由它们的拉普拉斯变换就可以确定系统的传递函数  $H(s)$ 。对于多环节串联或并联组成的传感器或检测系统,如果各环节阻抗匹配适当,可略去相互之间的影响,总的传递函数可由各环节传递函数相乘或相加求得。当传感器比较复杂或传感器的基本参数未知时,可以通过实验求得传递函数。