



普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

# 传感与检测技术

◎ 刘传玺 毕训银 袁照平 主编

CHUANGAN YU JIANCE JISHU



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

# 传感与检测技术

|     |     |     |         |
|-----|-----|-----|---------|
| 主 编 | 刘传玺 | 毕训银 | 袁照平     |
| 副主编 | 朱 蕾 | 王以忠 | 娄 伟     |
| 参 编 | 姜海燕 | 刘秀杰 | 纪兆毅 李莉娜 |
| 主 审 | 王进野 |     |         |



机械工业出版社

本书系统地介绍了传感与检测技术的基础知识、传感器原理及应用、信号的转换与调理、抗干扰技术、自动检测系统的设计及应用,并对现代检测技术的发展趋势作了简要介绍。

本书体系结构完整,内容丰富,叙述简明,注重理论联系实际,突出应用;编写力求做到系统性、先进性、实用性有机结合,以生产现场典型应用实例为基础,把新技术、新成果融入传统知识中。本书可作为自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器等专业本科生的教材,也可作为其他相关专业学生的教材或参考书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 <http://www.cmpedu.com> 注册下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

传感与检测技术/刘传玺等主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 8

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 34269 - 4

I. ①传… II. ①刘… 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 (2011) 第 131223 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: 于苏华 责任编辑: 于苏华 王小东

版式设计: 霍永明 责任校对: 胡艳萍

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

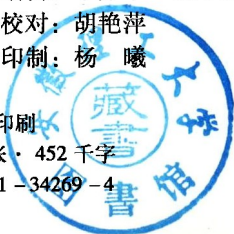
北京京丰印刷厂印刷

2011 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·452 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 34269 - 4

定价: 36.00 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

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着我国经济的飞速发展和教育改革的不断深化,我国高等教育已迅速进入大众化教育阶段。人才培养模式多样化已成为必然趋势,而其中,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。为促进自动化领域应用型人才的培养,我们组织部分院校从事一线教学的老师编写了本书。

“传感与检测技术”是一门理论与实践结合十分密切的专业技术课程,在整个学科系统中占有非常重要的地位。传感技术是科学实验和工业生产等活动中对信息进行获取的一种重要技术,而检测技术则是搭建对信息进行获取、传输、处理的检测系统的一系列技术的总称。本课程的重点是培养学生综合运用传感器技术、检测技术,分析解决生产现场工程实际问题的能力。

全书共分八章,第一章是传感器与检测技术的基础知识,包括传感器与检测系统的基本概念、特性,误差分析及数据处理;第二章是传统传感器原理及应用,包括电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、热电式传感器及常用流量计;第三章是新型传感器原理及应用,包括气敏传感器、湿敏传感器、感应同步器、磁栅式传感器、光栅式传感器、光电式传感器、光纤传感器、超声波传感器、红外辐射探测器、图像传感器,以及传感器的智能化与微型化;第四章是检测系统中信号的转换与调理,包括信号的放大与隔离、调制与解调、采样与滤波、信号的转换及线性化处理等;第五章是检测系统中的抗干扰技术;第六章是自动检测系统应用举例;第七章是自动检测系统的设计,包括设计原则、设计方法步骤及设计举例;第八章是现代检测技术的发展,包括现场总线技术及虚拟仪器简介。每章后面均附有习题与思考题。本教材参考学时为 60~80 学时。

本书由刘传玺、毕训银、袁照平任主编,朱蕾、王以忠、娄伟任副主编,姜海燕、刘秀杰、纪兆毅、李莉娜参加了编写。其中刘传玺编写了第二章,毕训银编写了第四章,袁照平编写了第七、八章,朱蕾编写了第六章,王以忠编写了第一章,娄伟编写了第五章,姜海燕编写了第三章中的第一、二、三节,刘秀杰编写了第三章中的第四、五、六节,纪兆毅编写了第三章中的第七、八节,李莉娜编写了第三章中的第九、十、十一节。全书由刘传玺统稿,王进野主审,袁照平参与了校对,由袁照平、朱蕾负责配套电子课件的制作。

本书在编写过程中,参考了一些相关教材和文献资料,在此向所有参考文献的作者表示衷心的感谢。同时,本书的编写还受到山东科技大学、淮海工学院、山东农业大学、菏泽学院等院校及有关部门领导和同志们的大力支持与帮助,在此一并表示感谢。

本书编写过程中,力求做到结构完整,内容充实,叙述简明,融系统性、先进性、实用性于一体。本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器等专业本科生的教材,也可作为相关专业学生的教材或参考书。

由于编者水平所限,错误和不妥之处在所难免,恳请广大专家和读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第一章 传感器与检测技术基础 ..... 1

### 第一节 传感器 ..... 1

一、传感器的定义与组成 ..... 1

二、传感器的分类 ..... 2

三、传感器的选用原则 ..... 2

四、传感技术的现状和发展 ..... 4

### 第二节 检测技术 ..... 5

一、检测技术的含义、地位和作用 ..... 5

二、工业检测技术的内容 ..... 6

三、检测系统的基本结构和类型 ..... 6

四、检测技术的现状和发展 ..... 9

### 第三节 传感器与检测系统的

基本特性 ..... 10

一、检测系统的静态特性 ..... 10

二、检测系统的动态特性 ..... 12

### 第四节 测量误差及处理方法 ..... 19

一、测量误差的概念 ..... 19

二、误差的表示方法 ..... 19

三、误差的分类 ..... 20

四、误差处理 ..... 22

### 习题与思考题 ..... 29

## 第二章 传统传感器原理及应用 ..... 30

### 第一节 电阻式传感器 ..... 30

一、电位器式传感器 ..... 30

二、电阻应变式传感器 ..... 34

### 第二节 电容式传感器 ..... 46

一、电容式传感器的结构及原理 ..... 46

二、电容式传感器的测量电路 ..... 49

三、电容式传感器的应用 ..... 52

### 第三节 电感式传感器 ..... 55

一、自感式传感器 ..... 56

二、互感式传感器 ..... 59

三、电涡流式传感器 ..... 63

四、电感式传感器的应用 ..... 65

### 第四节 磁电式传感器 ..... 70

一、磁电感应式传感器 ..... 70

二、霍尔元件 ..... 72

三、半导体磁敏器件 ..... 76

四、压磁式传感器 ..... 79

五、磁电式传感器的应用 ..... 82

### 第五节 压电式传感器 ..... 84

一、压电效应与压电材料 ..... 84

二、压电式传感器的等效电路 ..... 87

三、压电式传感器的测量电路 ..... 89

四、压电式传感器的应用 ..... 91

### 第六节 热电式传感器 ..... 94

一、热电偶 ..... 94

二、金属热电阻（热电阻） ..... 100

三、半导体热敏电阻 ..... 102

四、集成温度传感器 ..... 102

五、热电式传感器的应用 ..... 104

### 第七节 常用流量计 ..... 107

一、节流式流量计 ..... 107

二、涡轮流量计 ..... 112

三、电磁流量计 ..... 114

四、涡街流量计 ..... 116

### 习题与思考题 ..... 119

## 第三章 新型传感器原理及应用 ..... 122

### 第一节 气敏传感器 ..... 122

一、电阻型半导体气敏传感器的  
结构 ..... 122

二、电阻型半导体气敏传感器的  
工作原理 ..... 123

三、气敏传感器的应用 ..... 124

### 第二节 湿敏传感器 ..... 126

一、陶瓷电阻式湿度传感器 ..... 126

二、陶瓷电容式湿度传感器 ..... 127

三、湿敏传感器的应用 ..... 128

### 第三节 感应同步器 ..... 129

一、感应同步器的种类与结构 ..... 129

二、感应同步器的工作原理 ..... 130

|                               |     |                                   |     |
|-------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 三、输出信号的鉴别方式 .....             | 131 | 二、隔离放大器 .....                     | 183 |
| 四、感应同步器的应用 .....              | 133 | 三、程控增益放大器 .....                   | 185 |
| 第四节 磁栅式传感器 .....              | 133 | 第二节 调制与解调 .....                   | 187 |
| 一、磁栅 .....                    | 133 | 一、调幅与解调 .....                     | 187 |
| 二、磁栅位移传感器的结构和工作<br>原理 .....   | 134 | 二、调频与解调 .....                     | 189 |
| 三、信号处理方式 .....                | 135 | 第三节 信号调理电路 .....                  | 191 |
| 四、磁栅式传感器的应用 .....             | 136 | 一、采样—保持器 .....                    | 191 |
| 第五节 光栅传感器 .....               | 137 | 二、滤波器 .....                       | 192 |
| 一、光栅传感器的基本工作原理 .....          | 137 | 第四节 信号转换电路 .....                  | 195 |
| 二、莫尔条纹及其特点 .....              | 138 | 一、电压—电流变换器 .....                  | 195 |
| 三、辨向原理和细分技术 .....             | 139 | 二、电流—电压变换器 .....                  | 196 |
| 四、光栅传感器的应用 .....              | 141 | 三、 $V/F$ 转换器 .....                | 196 |
| 第六节 光电式传感器 .....              | 142 | 四、 $F/V$ 转换器 .....                | 199 |
| 一、光电效应 .....                  | 142 | 五、 $A/D$ 转换器 .....                | 200 |
| 二、光电器件 .....                  | 143 | 六、 $D/A$ 转换电路 .....               | 202 |
| 三、光电式传感器的应用 .....             | 146 | 第五节 线性化处理 .....                   | 203 |
| 第七节 光纤传感器 .....               | 148 | 一、非线性校正方法 .....                   | 203 |
| 一、光纤的结构和传光原理 .....            | 149 | 二、非线性校正电路 .....                   | 204 |
| 二、光纤传感器的结构原理与分类 .....         | 150 | 三、非线性特性的软件线性化处理 .....             | 205 |
| 三、光纤传感器的应用 .....              | 152 | 习题与思考题 .....                      | 206 |
| 第八节 超声波传感器 .....              | 154 | 第五章 抗干扰技术 .....                   | 208 |
| 一、超声波传感器的工作原理 .....           | 154 | 第一节 检测系统中的干扰 .....                | 208 |
| 二、压电式超声波传感器的类型 .....          | 155 | 一、干扰的种类、噪声源及防护<br>办法 .....        | 208 |
| 三、超声波传感器的应用 .....             | 157 | 二、噪声耦合方式 .....                    | 210 |
| 第九节 红外传感器 .....               | 160 | 三、放大器共模与差模干扰 .....                | 211 |
| 一、红外辐射 .....                  | 160 | 第二节 常用抗干扰技术 .....                 | 213 |
| 二、红外探测器 (传感器) .....           | 161 | 一、屏蔽技术 .....                      | 213 |
| 三、红外传感器的应用 .....              | 163 | 二、接地技术 .....                      | 214 |
| 第十节 图像传感器 .....               | 166 | 三、隔离技术 .....                      | 216 |
| 一、CCD 电荷耦合器件的基本工作<br>原理 ..... | 166 | 四、滤波器 .....                       | 217 |
| 二、CCD 图像传感器 .....             | 168 | 五、软件抗干扰措施 .....                   | 218 |
| 三、图像传感器的应用 .....              | 169 | 习题与思考题 .....                      | 219 |
| 第十一节 传感器的智能化与<br>微型化 .....    | 171 | 第六章 自动检测系统应用举例 .....              | 220 |
| 一、智能传感器 .....                 | 171 | 第一节 煤矿顶板安全监测系统 .....              | 220 |
| 二、微型传感器 .....                 | 176 | 一、系统的结构与组成 .....                  | 220 |
| 习题与思考题 .....                  | 179 | 二、系统实现功能 .....                    | 223 |
| 第四章 信号的转换与调理 .....            | 180 | 三、KJ216 煤矿顶板动态 (矿压)<br>监测系统 ..... | 224 |
| 第一节 信号的放大与隔离 .....            | 180 | 第二节 胶带输送机集散控制<br>系统 .....         | 229 |
| 一、测量放大器 .....                 | 180 |                                   |     |

|                       |     |                       |     |
|-----------------------|-----|-----------------------|-----|
| 一、系统简介 .....          | 229 | 第三节 加热炉温度测控系统         |     |
| 二、数据采集部分 .....        | 230 | 设计 .....              | 247 |
| 三、电源部分 .....          | 231 | 一、温度测控系统的设计要求         |     |
| 四、主机部分 .....          | 232 | 与组成 .....             | 247 |
| 五、通信部分 .....          | 232 | 二、温度测控系统的硬件电路 .....   | 248 |
| 六、软件部分 .....          | 233 | 三、温度测控系统的软件设计 .....   | 253 |
| 第三节 高速公路车辆自动计数        |     | 习题与思考题 .....          | 256 |
| 装置 .....              | 235 | 第八章 现代检测技术的发展 .....   | 257 |
| 一、信号探测 .....          | 236 | 第一节 现场总线技术 .....      | 257 |
| 二、信号处理 .....          | 236 | 一、现场总线技术发展的背景 .....   | 257 |
| 三、计数显示 .....          | 237 | 二、现场总线的定义 .....       | 258 |
| 四、电源电路 .....          | 238 | 三、现场总线的特性 .....       | 258 |
| 习题与思考题 .....          | 238 | 四、现场总线的通信标准 .....     | 259 |
| 第七章 自动检测系统的设计 .....   | 239 | 第二节 虚拟仪器技术 .....      | 262 |
| 第一节 自动检测系统及设计         |     | 一、虚拟仪器的发展与特点 .....    | 262 |
| 原则 .....              | 239 | 二、虚拟仪器的结构组成 .....     | 263 |
| 一、开环检测系统 .....        | 239 | 三、虚拟仪器软件开发环境——        |     |
| 二、闭环检测系统 .....        | 240 | LabVIEW 简介 .....      | 265 |
| 三、自动检测系统设计原则 .....    | 241 | 四、虚拟电子秤系统设计应用举例 ..... | 268 |
| 第二节 自动检测系统的设计         |     | 习题与思考题 .....          | 271 |
| 步骤 .....              | 242 | 附录 .....              | 272 |
| 一、自动检测系统的分析 .....     | 243 | 附录 A 传感器分类表 .....     | 272 |
| 二、自动检测系统总体方案的设计 ..... | 243 | 附录 B 标准化热电阻分度表 .....  | 275 |
| 三、自动检测系统硬件的设计 .....   | 244 | 附录 C 标准热电偶分度表 .....   | 277 |
| 四、自动检测系统软件的设计 .....   | 246 | 参考文献 .....            | 286 |
| 五、系统集成 .....          | 247 |                       |     |

# 第一章 传感器与检测技术基础

## 第一节 传 感 器

### 一、传感器的定义与组成

传感器是一种能把特定的被测信号按一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置，以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。这里“可用信号”是指便于处理、传输的信号，一般为电参数，如电压、电流、电阻、电容、频率等。在每个人的生活里，处处都在使用着各种各样的传感器。例如，空调遥控器等所使用的是红外线传感器；电冰箱、微波炉、空调机温控所使用的是温度传感器；家庭使用的煤气灶、燃气热水器报警所使用的是气体传感器；家用摄像机、数码照相机、上网聊天摄像头所使用的是光电传感器；轿车所使用的传感器就更多，如速度、压力、油量、爆震传感器，角度线性位移传感器等。这些传感器的共同特点是利用各种物理、化学、生物效应等实现对被测信号的测量。由此可见，在传感器中包含两个不同的概念：一是检测信号；二是能把检测的信号转换成一种与之有对应函数关系的、便于传输和处理的物理量。

国家标准 GB/T 7665—2005《传感器通用术语》中，对传感器的定义作了这样的规定：“传感器是指能感受（或响应）规定的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”。

广义上说，传感器是指在测量装置和控制系统输入部分中起信号检测作用的器件。

狭义上把传感器定义为能把外界非电信息转换成电信号输出的器件或装置。人们通常把传感器、敏感元件、换能器、转换器、变送器、发送器、探测器的概念等同起来。

传感器一般由敏感元件、转换元件和测量电路三部分组成，其组成框图如图 1-1 所示。

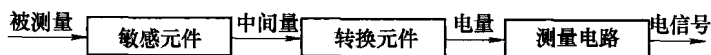


图 1-1 传感器的组成框图

敏感元件能直接感受被测量（如温度、压力等），并将之按一定的对应关系转换为电信号，如应变式压力传感器的弹性元件、电感式压力传感器的膜盒等都是敏感元件。转换元件的作用是将敏感元件输出的非电量信号直接转换为电信号，或直接将被测非电量信号转换为电信号，如应变式压力传感器中的应变片，作为转换元件将弹性元件的输出应变转换为电阻。测量电路的作用是将转换元件输出的电信号进行调理，使之便于显示、处理和传输。常用的测量电路有电桥、放大器滤波和调制解调电路等。

不同类型的传感器组成也不同。有的传感器只由一个转换元件组成，它直接将测量转换为输出电量，如热电偶、光电池等。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有测量电

路。还有一些传感器由敏感元件、转换元件和测量电路组成，如电阻应变式压力传感器、电感式传感器和电容式传感器等。

二、传感器的分类

传感器的分类方法很多。同一原理的传感器可以测量多种物理量，如电阻式传感器可以测量位移、温度、压力、加速度等；而同一种物理量又可以采用不同类型的传感器进行测量，如压力可用电容式、电阻式、光纤式等传感器来进行测量。目前，传感器的主要分类方法见表 1-1。

表 1-1 传感器的主要分类方法

| 分类法    | 类型             | 说明                                          |
|--------|----------------|---------------------------------------------|
| 按基本效应分 | 物理型、化学型、生物型    | 分别以转换中物理效应、化学效应等分类                          |
| 按构成原理分 | 结构型<br>物性型     | 以其转换元件结构参数变化实现信号转换<br>以其转换元件物理特性变化实现信号转换    |
| 按能量关系分 | 能量转换型<br>能量控制型 | 传感器的输出量直接由被测量能量转换而得<br>传感器的输出量由外源供给,但受被测量控制 |
| 按工作原理分 | 电容式、应变式等       | 以传感器对信号的转换原理命名                              |
| 按输入量分  | 位移、温度、压力式等     | 以被测量命名                                      |
| 按输出量分  | 模拟式<br>数字式     | 输出量为模拟信号<br>输出量为数字信号                        |

三、传感器的选用原则

如何根据具体的测量目的、测量对象以及测量环境合理地选用传感器，是在进行某个量的测量时首先要解决的问题。当传感器确定之后，与之相配套的测量方法和测量设备也就随之确定了。测量结果的成败，在很大程度上取决于传感器的选用是否合理。选用传感器时应考虑的因素很多，但选用时不一定能满足所有要求，应根据被测参数的变化范围、传感器的性能指标、环境等要求选用，侧重点有所不同。通常选用传感器应从以下几个方面考虑：

- 1) 测试条件：主要包括测量目的、被测试物理量特性、测量范围、输入信号最大值和频带宽度、测量精度要求、测量所需时间要求等。
- 2) 传感器性能：主要包括精度、稳定性、响应速度、输出量（模拟量还是数字量）、对被测物体产生的负载效应、校正周期、输入端保护等。
- 3) 使用条件：主要包括设置场地的环境条件（温度、湿度、振动等）、测量时间、所需功率容量、与其他设备的连接、备件与维修服务等。

具体来讲，可以从以下几个方面考虑：

- (1) 根据测量对象与环境确定传感器的类型。要进行一次具体的测量工作，首先要考虑采用何种原理的传感器，这需要分析多方面的因素之后才能确定。因为，即使是测量同一物理量，也有多种原理的传感器可供选用，究竟哪一种原理的传感器更为合适，则需要根据被测量的特点和传感器的使用条件考虑以下一些具体问题：量程的大小；被测位置对传感器

体积的要求；测量方式为接触式还是非接触式；信号的引出方法，有线或非接触测量；传感器的来源，国产还是进口，还是自行研制；价格能否承受。在考虑上述问题之后就能确定选用何种类型的传感器，然后再考虑传感器的具体性能指标。

(2) 灵敏度的选择。通常，在传感器的线性范围内，希望传感器的灵敏度越高越好。因为只有灵敏度高时，与被测量变化对应的输出信号的值才比较大，有利于信号处理。但要注意的是，传感器的灵敏度高，与被测量无关的外界噪声也容易混入，也会被系统放大，影响测量精度。因此，要求传感器本身应具有较高的信噪比，尽量减少从外界引入干扰信号。

传感器的灵敏度是有方向性的。当被测量是单向量，而且对其方向性要求较高时，则应选择其他方向灵敏度小的传感器；如果被测量是多维向量，则要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

(3) 频率响应特性。传感器的频率响应特性决定了被测量的频率范围，必须在允许频率范围内保持不失真的测量条件，实际上传感器的响应总有一定延迟，希望延迟时间越短越好。

传感器的频率响应越高，可测的信号频率范围就越宽，而由于受到结构特性的影响，机械系统的惯性较大，因此频率低的传感器可测信号的频率较低。

在动态测量中，应根据信号的特点（稳态、瞬态、随机等）、响应特性来选择传感器，以免产生过大的误差。

(4) 线性范围。传感器的线性范围是指输出与输入成直线关系的范围。从理论上讲，在此范围内，灵敏度保持定值。传感器的线性范围越宽，其量程越大，并且能保证一定的测量精度。在选择传感器时，在传感器的种类确定以后首先要看其量程是否满足要求。

但实际上，任何传感器都不能保证绝对的线性，其线性度也是相对的。当所要求测量精度比较低时，在一定的范围内，可将非线性误差较小的传感器近似看做是线性的，这会给测量带来极大的方便。

(5) 稳定性。传感器使用一段时间后，其性能保持不变的能力称为稳定性。影响传感器长期稳定性的因素除传感器本身的结构外，主要是传感器的使用环境。因此，要使传感器具有良好的稳定性，传感器必须具有较强的环境适应能力。

在选择传感器之前，应对其使用环境进行调查，并根据具体的使用环境选择合适的传感器，或采取适当的措施，减小环境的影响。

传感器的稳定性有定量指标，超过使用期限后，在使用前应重新进行标定，以确定传感器的性能是否发生变化。

在某些要求传感器能长期使用而不能轻易更换或标定的场合，所选用的传感器稳定性要求更严格，要能够经受住长时间的考验。

(6) 精度。精度是传感器的一个重要的性能指标，它是关系到整个检测系统测量精度的一个重要环节。传感器的精度越高，其价格越昂贵。因此，传感器的精度只要满足整个检测系统的精度要求即可，不必选得过高。这样就可以在满足同一测量目的的诸多传感器中选择比较便宜和简单的传感器。

如果测量的目的是定性分析，则选用重复精度高的传感器即可，不宜选用绝对量值精度高的；如果是为了定量分析，必须获得精确的测量值，就需选用精度等级能满足要求的传感器。

为了提高测量精度,平时正常显示值要在满刻度的 50% 左右来选定测量范围(或刻度范围)。总之,应从传感器的基本工作原理出发,注意被测对象可能产生的负载效应,所选择的传感器,应既能适应被测物理量,又能满足量程、测量结果的精度要求,同时还要具有可靠性高、通用性强,有尽可能高的静态性能和动态性能以及较强的适应环境的能力,又具有较高的性价比和良好的经济性。

#### 四、传感技术的现状和发展

人类社会的进步和科学技术的发展与传感器技术是相互促进又相互制约的。传感技术作为现代信息技术四大核心技术之一,早在 20 世纪就获得了高速发展。近几十年来,我国传感技术取得了较快发展,有力地带动了我国测试与控制等多学科领域的进步。传感技术发展趋势及重点研究开发的有以下几个方面。

##### 1. 新型敏感材料

敏感元件材料是传感器技术的重要基础,大多数传感器是利用某些材料的物理效应、化学效应和生物功能等达到测量目的,因此研究具有新功能、新效应的新材料,用以制成敏感元件和转换元件有着非常重要的意义。重点开发的新型敏感材料主要有以硅材料为主的半导体材料、化合物半导体材料、石英晶体和石英玻璃(非晶态的  $\text{SiO}_2$ ) 精密陶瓷材料、氧化锌( $\text{ZnO}$ ) 薄膜、铁电聚合物、传感型合金材料及复合材料等。

##### 2. 微细加工技术

微细加工技术即微米加工技术,是开发新型微型传感器的工艺技术,目前大体上分为三类:

1) 硅微机械加工技术,如硅集成电路工艺技术、刻蚀技术、薄膜技术及固相键合工艺技术。

2) 以激光精密加工为主体的超精密机械加工技术。

3) X 射线深层光刻电铸成形技术,这种技术不但可用于加工各种金属、陶瓷和塑料材料的三维结构,而且可实现重复精度很高的大批量生产。

##### 3. 传感器开发

(1) 新型传感器:用于汽车电喷系统、空调排污和自动驾驶系统的车载传感器;用于水质检测、大气污染和工业排污的测控传感器;用于检测食品卫生和诊断各种疾病的生物、化学传感器;用于航天系统的小型化、低功耗、高精度、高可靠性航天传感器;用于机器人的具有视觉、听觉、嗅觉、触觉功能的仿生传感器。

(2) 智能化传感器:微电子技术、光电子技术获得了迅猛的发展,加工工艺逐步成熟,新型敏感材料不断被开发出来。在高新技术的渗透下,尤其是计算机硬件和软件技术的渗入,使微处理器和传感器得以结合,产生了具有一定数据处理能力,并能自检、自校、自补偿的新一代传感器——智能传感器。智能传感器的出现是传感技术的一次革命,对传感器的发展产生了深远的影响。随着科学技术的发展,未来的智能传感器将利用信息融合技术、模糊理论等更高级信息处理技术,使传感器具有分析、判断、自适应、自学习的功能,可以完成特征检测、图像识别、多维检测等复杂任务。

(3) 网络传感器:网络通信技术逐步走向成熟并渗透到各行各业,各种高可靠、低功耗、低成本、微体积的网络接口芯片被开发出来,微电子机械加工技术将网络接口芯片与智

能传感器集成起来并使通信协议固化到智能传感器的 ROM 中时,就产生了网络传感器。为解决现场总线的多样性问题,IEEE1451.2 工作组建立了智能传感器接口模块(Smart Transducer Interface Module, STIM)标准,该标准描述了传感器网络适配器或微处理器之间的硬件和软件接口,是 IEEE1451 网络传感器标准的重要组成部分,为传感器与各种网络连接提供了条件和方便。

## 第二节 检测技术

### 一、检测技术的含义、地位和作用

随着人类社会进入信息时代,以信息的获取、转换、显示和处理为主要内容的检测技术已经发展成为一门完整的学科,在促进生产发展和科技进步的广阔领域内发挥着重要作用。其主要应用领域如下:

(1) 检测技术是产品检测和质量控制的重要手段。借助于检测工具对产品进行质量评价是人们十分熟悉的,这是检测技术重要的应用领域。但传统的检测方法只能将产品区分为合格品和废品,起到产品验收和废品剔除的作用。这种被动检测方法,对废品的出现并没有预先防止的能力。在传统检测技术基础上发展起来的主动检测技术或称之为在线检测技术使检测和生产加工同时进行,及时地用检测结果对生产过程主动地进行控制,使之适应生产条件的变化或自动地调整到最佳状态。这样,检测的作用已经不只是单纯检查产品的最终结果,而且要掌握和干预造成这些结果的原因,从而进入质量控制的领域。

(2) 检测技术在大型设备安全经济运行监测中应用广泛。电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备通常在高温、高压、高速和大功率状态下运行,保证这些设备安全运行在国民经济中具有重大意义。为此,通常设置故障监测系统以对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态监测,以便及时发现异常情况,加强故障预防,达到早期诊断的目的。这样做可以避免严重的突发事件,保证设备和人员安全,提高经济效益。即使设备发生故障也可以从监测系统提供的数据中找出故障原因,缩短检修周期,提高检修质量。另外,在日常运行中,这种连续监测可以及时发现设备故障前兆,采取预防性检修。随着计算机技术的发展,这类监测系统已经发展到故障自诊断系统,可以采用计算机来处理检测信息,从而进行分析、判断,及时诊断出设备故障并自动报警或采取相应的对策。

(3) 检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分。任何生产过程都可以看做是由“物流”和“信息流”组合而成,反映物流的数量、状态和趋向的信息流则是人们管理和控制物流的依据。人们为了有目的地进行控制,首先必须通过检测获取有关信息,然后才能进行分析判断以便实现自动控制。所谓自动化,就是用各种技术工具与方法代替人来完成检测、分析、判断和控制工作。一个自动化系统通常由多个环节组成,分别完成信息获取、信息转换、信息处理、信息传送及信息执行等功能。在实现自动化的过程中,信息的获取与转换是极其重要的组成环节,只有精确、及时地将被控对象的各项参数检测出来并转换成易于传送和处理的信号,整个系统才能正常地工作。因此,自动检测与转换是自动化技术中不可缺少的组成部分。

(4) 检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步。人们在自然科学各个领域内

从事的研究工作，一般是利用已知的规律对观测、试验的结果进行概括、推理，从而对所研究的对象取得定量的概念并发现它的规律性，然后上升到理论。因此，现代化检测手段所达到的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平愈高，提供的信息愈丰富、愈可靠，科学研究取得突破性进展的可能性就愈大。此外，理论研究的一些成果，也需通过实验或观测来加以验证，这同样离不开必要的检测手段。从另一方面看，现代化生产和科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求，从而成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术，也有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系，使它成为一门十分活跃的技术学科，几乎渗透到人类的一切活动领域，发挥着愈来愈大的作用。

二、工业检测技术的内容

工业检测涉及的内容广泛，常见的工业检测见表 1-2。

表 1-2 常见的工业检测

| 被测量类型 | 被测量                                           | 被测量类型     | 被测量                                              |
|-------|-----------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------|
| 热工量   | 温度、热量、比热容、热流、热分布、压力(压强)、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面 | 物体的性质和成分量 | (气体、液体、固体的)化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色        |
| 机械量   | 直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量(重量)      | 状态量       | 工作机械的运动状态(起、停等)、生产设备的异常状态(超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等) |
| 几何量   | 长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、表面粗糙度、硬度、材料缺陷       | 电工量       | 电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性能   |

显然，在实际工业生产中，需要检测的量远不止表 1-2 所列的项目。而且，随着自动化、现代化的发展，工业生产将对检测技术提出越来越多的新要求。本教材只介绍基本非电量的检测技术。

三、检测系统的基本结构和类型

检测系统规模的大小及其复杂程度与被测量的多少、被测量的性质以及被测对象的特性有非常密切的关系。一个完整的检测过程一般包括信息的提取、转换、存储、传输、显示和分析处理等。图 1-2 所示为涵盖各种功能模块的检测系统的组成框图，包括传感器、模拟信号调理电路、底层显示和信号分析与处理部分，以及将处理信号传送给控制器、数据显示、其他检测系统或上位机系统的通信接口和总线部分等，但并不是所有的检测任务都包括了以上几个部分。

传感器的作用和地位如前所述，传感器的输出信号必须经过适当的调整，使之与后续测试环节相适应，因为大多数传感器输出的电信号很微弱，需要进一步地放大，有的还要进行

阻抗变换。而且,有些传感器输出的是电参量,需要转换为电量。传感器输出信号中混杂有干扰噪声,需要去掉噪声,提高信噪比;如果检测仪对部分频段的信号感兴趣,则有必要从输出信号中分离出所需要的频率成分;当采用数字式仪器、仪表和计算机时,模拟输出信号还要转换为数字信号等。常见的信号调整环节有电桥、放大器、滤波器、调制解调器等。

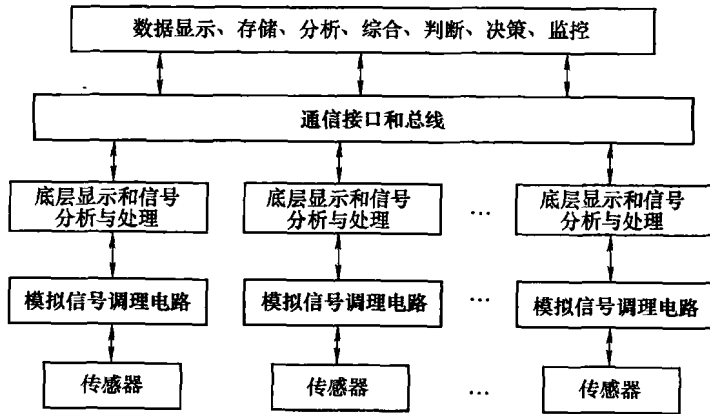


图 1-2 检测系统的一般组成框图

信号分析与处理是现代检测系统中不断被注入新内容的部分,已逐渐成为检测系统的研究重点。常见的检测只是将传感器获得的信号进行放大和变换,以进行显示和传输,而分析与处理往往需要人工完成。以计算机为基础的信息处理技术,使得现代检测系统能解决过去常规检测无法解决的问题,使得复杂系统的实时控制得以实现,真正实现了检测的自动化和智能化。

一个大型检测系统是由许多测量子系统或测量节点组成的,通信接口和总线能实现子系统与上位机之间以及子系统与子系统之间的信息交换。总线的意义,更多的是指一种规范、一种结构形式,而接口多指完成通信的硬件系统。

现代检测系统大致可分为三类,即基本型、标准接口型和闭环控制型。基本型检测系统主要完成对被测参量的测量任务,对测量准确度要求较高;标准接口型检测系统集多种功能于一体,是计算机技术与仪器技术高度发展深层次结合的必然产物,并产生虚拟仪器的概念,使得设计高度自动化和智能化的现代检测系统成为现实。

#### (一) 基本型

以计算机为终端的基本型现代检测系统如图 1-3 所示。现场被测信号经模拟传感器和数字传感器接收并变换成模拟信号、数字信号或开关信号输出,再经相应的调理电路送入计算机,借助计算机丰富的软、硬件资源对被测信号进行实时处理,实现智能化自动检测的目的。这种检测系统在非电量电测技术中已获得广泛应用。

#### (二) 标准接口型

检测系统由各个功能模块组合在一起,模块之间的信号传输形式有专门接口和标准接口两种类型。专门接口型的接口由于其电气参数、接口形式和通信协议等不统一,各个模块之间的信息传输互连问题十分麻烦,系统设计缺乏灵活性,故一般只用在特殊场合或专用检测系统中,应用范围比较窄。标准接口型系统由模块(台式仪器或插件板)组合而成,所有模块的对外接口都按规定标准设计。组成系统时,若模块是台式仪器,用标准的无源电缆将

各模块接插连接起来，若为插件板，只要各插件板插入标准机箱即可，非常方便灵活。

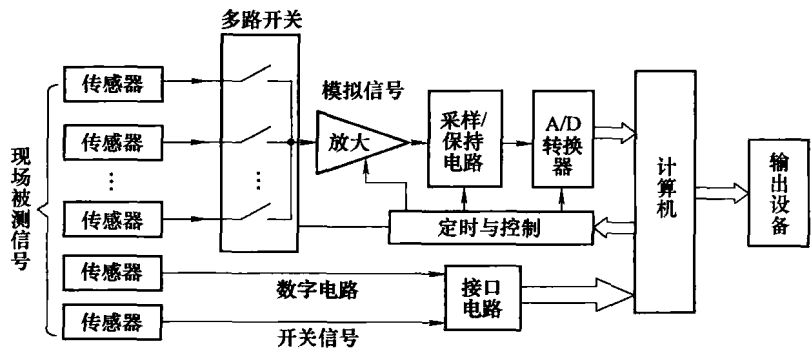


图 1-3 基本型现代检测系统

1) GPIB 总线系统: GPIB(General Purpose Interface Bus) 由一台 PC、一块 GPIB 接口卡和若干台 GPIB 仪器子系统构成。每个仪器子系统就是一台带 GPIB 接口的单台仪器。该接口在功能、电气和机械上都按国际标准设计, 内含 16 条信号线, 每条线都有特定的意义, 即使不同厂商的产品也相互兼容, 具有互换性, 组建系统方便, 拆散后各仪器子系统可单独使用。一块 GPIB 接口卡可带 14 台仪器。

2) VXI 总线系统: VXI(VMEbus Extensions for Instrumentation), 意为 VME 总线在仪器领域的扩展。其中, VME 总线是一种结合 GPIB 仪器和数据采集板 (Data Acquisition, DAQ) 的最先进技术发展起来的高速、多厂商、开放式工业总线标准。VXI 是机箱式结构, 一个插件相当于一台仪器或特定功能的器件, 多个模块共存于一个机箱, 组成一个测试系统, 即插即用, 结构紧凑, 小巧轻便, 集多功能于一体。系统组建者可像插放或更换书架上的书籍一样, 灵活方便地插放或更换模块, 随时构成所需的各种测试系统。

3) PXI 总线系统: PXI(PCIextensions for Instrumentation), 它是 Compact PCI 在仪器领域的扩展。PXI 采用了不少现存工业标准, 以较低价格获取大量可用的元件。最重要的是, 通过保持与工业标准 PC 软件的兼容性, PXI 允许工业用户使用他们所熟悉的软件工具和环境。基于 PXI 的检测系统将成为主流测试平台之一。

4) 串口仪器: 它是基于串行数据传输的标准接口型仪器, 如基于 RS232C、RS485 和 USB 接口的仪器。

(三) 闭环控制型

生产过程的自动控制是人们长期探索的生产方式, 可通过对关键参数实时在线检测并控制这些参数按预定的规律变化, 来达到维持生产的正常进行和高产优质的目的。闭环控制型的现代检测系统是指应用在闭环控制系统中的检测系统。图 1-4 所示为典型的生产过程控制系统中的检测系统结构框图。图中, 现代检测系统的主要任务是获取参数变换的定量数值, 为控制器及时提供反馈信息, 使控制器按照一定的控制规律输出控制信号给执行器, 这样才

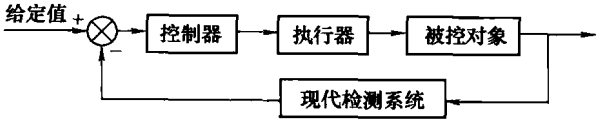


图 1-4 典型的在生产过程控制系统中的检测系统结构框图

能保证被控制的参数保持在希望的设定值或按预定的规律变化。

生产过程的自动控制大体上可归纳为实时数据采集、实时判断决策和实时控制。闭环控制系统中的现代检测系统可完成实时数据采集和实时判断决策这两种功能。基于现场总线的智能仪表和设备是现代检测系统应用于大规模、现代化生产的主要形式。

#### 四、检测技术的现状和发展

科学技术的快速发展为检测技术的发展创造了非常好的条件，同时也向检测技术提出了更新更高的要求，尤其是计算机技术、微电子技术和信息处理技术的巨大进步，使检测技术得到了空前的发展。小型化、数字化、智能化、网络化以及软件多功能化成为仪器仪表研发的主导方向，智能传感器和虚拟化仪器正逐渐替代传统的仪器仪表，应用于各行各业。随着现代科学技术的进步，检测技术的发展主要表现在以下几个方面：

1) 传感器水平的提高。利用新材料、新工艺和新发现的生物、物理、化学效应开发出的新型传感器，提高了传感器的性能和适应性，实现了传感器的微型化和集成化。传感器与微型计算机结合，产生了智能传感器，它能自动选择量程和增益，自动校准与实时校准，进行非线性校正、漂移等误差补偿和复杂的计算处理，完成自动故障监控和过载保护等。

2) 检测方法的推进。光电、超声波、微波、射线技术促进了非接触式检测技术的发展，光纤、光放大器和滤波器等光元件的发展使信号的传输和处理不再局限于电信号，而是可以采用光的检测方法。随着检测技术的发展，人们对检测系统的要求不再满足于对单一参数的测量，而是希望对系统中的多个参数进行融合测量，即采用多传感器融合技术，对系统中的多个参数进行单次测量，然后通过一定的算法对数据进行处理，分别得到各个参数。多传感器信息融合技术因其立体化的多参数测量性能而广泛地应用在军事、地质科学、机器人、智能交通、医学等领域。

在生产过程中，为了确保生产的安全环保，往往需要实时检测和优化控制系统的稳定性指标、产品质量指标以及排放物的性质和量值，但由于技术和经济方面的原因，这些指标和参数大多数难以通过传感器或仪器仪表进行直接测量。软测量技术是一种能够满足上述生产过程检测和优化控制需要的新方法。软测量技术是选择一种与被测变量（无法直接测量）相关的一组可测变量，建立一种以可测变量为输入量、被测变量为输出量的数学模型，通过计算机求解该数学模型，从而得到被测变量的估计量。所开发的软测量数学模型和相应的计算机软件一般称为软测量估计器和软测量仪表。软测量技术为生产的优化过程提供了新的有用信息，由于生产过程的复杂性，软测量技术并不能替代新型的传感器，往往需要二者的相互结合，才能不断发展。

3) 检测仪器与计算机技术集成。检测的基本任务是获得有用信息，传统方法是借助专门的仪器仪表及测量装置，通过适当的方法和必要的信息分析处理技术，对传感器输出的信号进行处理，然后求取与被测对象有关的信息。计算机技术和人工智能技术的发展，以及与检测技术的深层次结合，导致了新一代仪器仪表和检测系统，即虚拟仪器、现场总线仪表和智能检测系统的出现。可以说，现代检测系统是以计算机为信息处理核心，加上各种检测装置和辅助应用设备、并/串通信接口以及相应的智能化软件，组成的用于检验、测试、测量、计量、探测和用于闭环控制的检测环节等用途的专用设备。

### 第三节 传感器与检测系统的基本特性

检测系统既可指图 1-2 所示的由多个环节组成的对被测量进行检测、调理、变换、显示或记录的系统,也可指组成完整检测系统中的某个环节,如传感器、放大器、调理系统或数据采集器等。传感器作为检测系统的重要组成部分,与检测系统一样,基本特性包括静态特性和动态特性。传感器的静态特性是指在稳态信号作用下,传感器输出量与输入量之间的关系特性;衡量传感器静态特性的主要指标是灵敏度、线性度、迟滞性、重复性和稳定性等。传感器的动态特性反映传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。在静态测试中,由于传感器输入量不随时间变化,因而测量和记录传感器的输出、输入量不受时间限制;在实际工作中,大量的被测信号是随时间变化的动态信号,此时不但要测量传感器输入、输出信号幅值的变化,而且要测量和记录动态信号变化过程的波形参数,这就要求传感器具有较好的动态响应特性。

由于传感器与检测系统的基本特性很相似,所以本节主要讨论检测系统的基本特性,即检测系统的静态特性和动态特性。

#### 一、检测系统的静态特性

对于一个检测系统,必须在使用前进行标定和定期校验,即在规定的标准工作条件下,由高精度输入发生器给出一系列数值已知、准确、不随时间变化的输入量  $x_i (i=1,2,\dots,n)$ ,用高精度测量仪器测定被校验的检测系统对应输出量  $y_i (i=1,2,\dots,n)$ ,从而可以获得由  $x_i, y_i$  数值列出的数表、绘制的曲线或求得数学表达式来表征的被校验检测系统的输出与输入的关系,这种关系称为检测系统的静态特性。简而言之,检测系统的静态特性是指在稳态信号作用下,传感器输出量与输入量之间的关系特性,又称为“刻度特性”、“标准特性”或“校准特性”。各个标定点输出量的数值为  $y_i$ ,又称为刻度值、校准值或标定值。

衡量检测系统静态特性的主要指标是灵敏度、线性度、迟滞性、重复性和稳定性等。

##### (一) 灵敏度和灵敏阈

灵敏度是指检测系统在稳态下输出增量与输入增量之比值,如图 1-5 所示,对于线性检测系统,其灵敏度是拟合直线的斜率,即

$$K_A = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-1)$$

对于线性检测系统灵敏度是一个常数。

对于非线性检测系统,其灵敏度不是常数,即

$$K_d = \frac{dy}{dx} \quad (1-2)$$

如果检测系统输入量和输出量的量纲相同,则灵敏度量纲为一,常用放大倍数来代替绝对灵敏度。

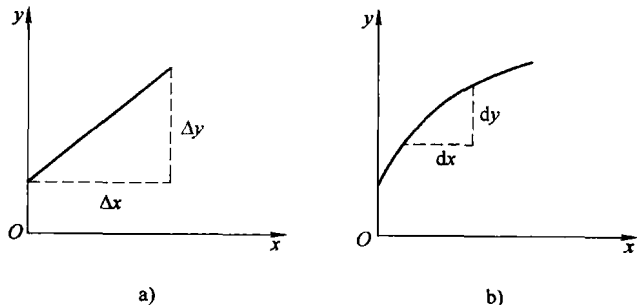


图 1-5 检测系统灵敏度