



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

# 自动检测技术

(第3版)

宋文绪 杨 帆 主编



高等教育出版社  
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

# 自动检测技术

(第3版)

宋文绪 杨帆 主编

高等教育出版社

## 内容提要

本书针对高职高专教育特点,从便于学习和使用者对传感器进行比较、选型等实用角度出发,在讲述检测技术的基本概念、传感器的基本特性、传感器的标定和正确选用的基础上,以温度、压力、力、流量、物位、厚度、位移、速度、加速度、磁场、气体成分、湿度、浓度及光电等参数检测为主线,按传感器的用途分章讲述各类传感器的工作原理、结构、技术指标及使用特点,同时对传感器电路的抗干扰技术进行了讲述。本书的编写力求系统性、实用性与先进性相结合,理论与实践相交融,既注重传统知识的讲授,又兼顾新技术、新成果的应用。

本书可作为电气工程及自动化、机械电子工程、电子信息工程、测控技术与仪器、机电一体化等专业的教材,也可供其他专业的学生和有关的专业技术人员参考使用,或作为自学用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术 / 宋文绪, 杨帆主编. — 3 版. — 北京: 高等教育出版社, 2008.4

ISBN 978-7-04-024006-1

I. 自… II. ①宋… ②杨… III. 自动检测—高等学校: 技术学校—教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 036843 号

|      |     |      |     |      |     |      |     |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 策划编辑 | 孙 杰 | 责任编辑 | 唐笑慧 | 封面设计 | 张志奇 | 责任绘图 | 杜晓丹 |
| 版式设计 | 王艳红 | 责任校对 | 张 颖 | 责任印制 | 韩 刚 |      |     |

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京民族印刷厂

购书热线 010-58581118  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 1092 1/16  
印 张 17.5  
字 数 430 000

版 次 2001 年 9 月第 1 版  
2008 年 4 月第 3 版  
印 次 2008 年 4 月第 1 次印刷  
定 价 23.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 24006-00

# 前 言

检测技术作为信息科学的一个重要分支,与计算机技术、自动控制技术和通信技术等一起构成了信息技术的完整科学。在人类进入信息时代的今天,人们的一切社会活动都是以信息获取与信息转换为中心,传感器作为信息获取与信息转换的重要手段,是实现信息化的基础技术之一。“没有传感器就没有现代科学技术”的观点已为全世界所公认。以传感器为核心的检测系统就像神经和感官一样,源源不断地向人类提供宏观与微观世界的种种信息,成为人类认识自然、改造自然的有利工具,广泛地应用于工业、农业、国防和科研等领域,已成为工科院校大部分专业学生必修的专业基础课。

《自动检测技术》第1版于2001年9月出版,第2版于2004年12月出版,至今已被全国许多高职高专院校使用,近些年来社会对技能型人才的需求旺盛,高职高专教育发展速度快,为满足高职高专教育教学改革的需求,我们在多年使用的基础上对《自动检测技术》(第2版)进行了修订。本次修订保持了第2版教材原有的特色,为充分体现高职高专教育的特点,以提高学生分析问题及解决问题能力为基本原则,该书具有以下几个特点:

1. 精选教学内容,内容的选取基本上根据我国当前工业生产及科研应用的实际出发,以信息的传感、转换、处理为核心,从基本物理概念入手,阐述热工量、机械量、几何量等参数的检测原理及方法,重点突出,应用性强,注重新技术、新成果的应用。

2. 本教材采用按用途分章的方法进行讲述,便于使用者对传感器类比、选型,突出了教材的实用性,且检测的参数、方法较多,应用领域广泛。

3. 全书将基础知识、科研新成果及发展新动向相结合,以检测系统的器件集成化、信息数字化和测试智能化为主线组织教学内容。

4. 立足基本理论,面向应用技术,以必需、够用为尺度,以掌握概念、强化应用为重点。加强了理论知识和实际应用的统一。

本书涉及领域广泛,包括许多新技术、新器件在检测技术领域里的应用。全书共分10章:第1章是检测技术的基础知识;第2章~第9章为一些常用参数的检测,包括温度、压力、力、流量、物位、厚度、位移、速度、磁场、气体成分、湿度、浓度、光电等参数;第10章讲述了抗干扰技术。且在每章后都附有一定量的思考题与习题。

本书可作为电气工程及自动化、机械电子工程、电子与信息工程、测控技术与仪器、机电一体化等专业的教材,也可供其他专业学生和有关的专业技术人员参考使用,或作为自学用书。

本书由北华大学的宋文绪和河北工业大学的杨帆主编。其中第1、10章由宋文绪编写,第2、5、6、7章由杨帆编写,第3、4章由北华大学的张秀梅编写,第8、9章由河北工业大学的徐舜华编写。

## II 前 言

本书由北京联合大学自动化学院的蒋蔚教授主审,蒋蔚教授对本书的总体结构和内容细节等进行了全面审阅,提出了许多宝贵而富有价值的意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写和出版过程中,得到了高等教育出版社编辑们的指导和支持,对他们的辛勤劳动和无私奉献表示真挚的谢意。同时,对本书参考文献中的有关作者致以诚挚的感谢。

由于编者水平所限,书中错误、不妥之处在所难免,殷切希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2008 年 2 月

# 目 录

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第1章 检测技术的基础知识 .....                   | 1  |
| 1.1 检测技术的基本概念 .....                   | 1  |
| 1.1.1 检测技术 .....                      | 1  |
| 1.1.2 自动检测系统 .....                    | 1  |
| 1.1.3 传感器 .....                       | 2  |
| 1.2 测量误差 .....                        | 4  |
| 1.2.1 误差的基本概念及表达方式 .....              | 4  |
| 1.2.2 误差的分类与来源 .....                  | 5  |
| 1.2.3 系统误差和随机误差的表达式 .....             | 6  |
| 1.2.4 基本误差和附加误差 .....                 | 6  |
| 1.2.5 系统误差的发现与校正 .....                | 7  |
| 1.3 传感器的基本特性 .....                    | 8  |
| 1.3.1 传感器的静态特性 .....                  | 9  |
| 1.3.2 传感器的动态特性 .....                  | 14 |
| 1.4 传感器的标定 .....                      | 17 |
| 1.4.1 静态标定 .....                      | 18 |
| 1.4.2 动态标定 .....                      | 18 |
| 1.5 传感器的选用 .....                      | 20 |
| 1.5.1 传感器的指标及选择原则 .....               | 20 |
| 1.5.2 选用条件要求 .....                    | 22 |
| 附录1.1 二阶传感器的阶跃响应 .....                | 22 |
| 思考题与习题 .....                          | 24 |
| 第2章 温度检测 .....                        | 25 |
| 2.1 温标及测温方法 .....                     | 25 |
| 2.1.1 温标 .....                        | 25 |
| 2.1.2 温度检测的主要方法及分类 .....              | 26 |
| 2.2 膨胀式温度计 .....                      | 27 |
| 2.2.1 双金属温度计 .....                    | 27 |
| 2.2.2 压力式温度计 .....                    | 28 |
| 2.3 电阻式温度传感器 .....                    | 29 |
| 2.3.1 金属热电阻传感器 .....                  | 29 |
| 2.3.2 半导体热敏电阻传感器 .....                | 31 |
| 2.4 热电偶传感器 .....                      | 35 |
| 2.4.1 热电偶测温原理 .....                   | 35 |
| 2.4.2 热电极材料及常用热电偶 .....               | 39 |
| 2.4.3 热电偶的结构 .....                    | 42 |
| 2.4.4 热电偶冷端温度补偿 .....                 | 43 |
| 2.4.5 常用热电偶测温线路 .....                 | 46 |
| 2.5 辐射式温度传感器 .....                    | 47 |
| 2.5.1 辐射测温的物理基础 .....                 | 47 |
| 2.5.2 辐射测温方法 .....                    | 48 |
| 2.6 光纤传感器 .....                       | 51 |
| 2.6.1 光纤传感原理 .....                    | 51 |
| 2.6.2 光纤温度传感器 .....                   | 52 |
| 2.7 集成数字温度传感器 .....                   | 54 |
| 2.7.1 集成温度传感器的工作原理及分类 .....           | 55 |
| 2.7.2 电压型集成温度传感器 $\mu$ PC616A/C ..... | 55 |
| 2.7.3 电流型集成温度传感器 AD590 .....          | 57 |
| 2.7.4 数字输出型传感器 DS18B20 .....          | 58 |
| 思考题与习题 .....                          | 61 |
| 第3章 压力及力检测 .....                      | 63 |
| 3.1 压力的概念及单位 .....                    | 63 |
| 3.2 应变式压力计 .....                      | 65 |
| 3.2.1 电阻应变效应 .....                    | 65 |
| 3.2.2 电阻应变片 .....                     | 66 |
| 3.2.3 电阻应变片的粘贴及温度补偿 .....             | 68 |
| 3.2.4 转换电路 .....                      | 69 |
| 3.2.5 应变式压力传感器 .....                  | 71 |
| 3.2.6 应变式力传感器 .....                   | 75 |
| 3.3 压电式压力及力传感器 .....                  | 76 |
| 3.3.1 压电效应 .....                      | 76 |
| 3.3.2 压电材料 .....                      | 79 |
| 3.3.3 测量电路 .....                      | 81 |
| 3.3.4 压电式压力及力传感器 .....                | 83 |
| 3.4 压磁式压力传感器 .....                    | 85 |
| 3.4.1 压磁式传感器工作原理 .....                | 85 |
| 3.4.2 压磁元件 .....                      | 86 |
| 3.4.3 压磁式测力传感器应用特点 .....              | 87 |

|                           |     |                          |     |
|---------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 3.5 电容式压力及力传感器 .....      | 87  | 4.3.3 旋转活塞式流量计 .....     | 122 |
| 3.5.1 电容式传感器的工作原理 .....   | 87  | 4.3.4 刮板式流量计 .....       | 123 |
| 3.5.2 差分电容式传感器 .....      | 89  | 4.4 速度式流量计 .....         | 124 |
| 3.5.3 测量电路 .....          | 90  | 4.4.1 叶轮式流量计 .....       | 124 |
| 3.5.4 电容式压力及力传感器 .....    | 94  | 4.4.2 涡轮式流量计 .....       | 125 |
| 3.6 霍尔式压力计 .....          | 96  | 4.5 振动式流量计 .....         | 126 |
| 3.6.1 霍尔效应 .....          | 96  | 4.5.1 漩涡流量计 .....        | 126 |
| 3.6.2 霍尔式压力计的工作原理 .....   | 97  | 4.5.2 旋进式漩涡流量计 .....     | 127 |
| 3.6.3 霍尔式压力计的误差及补偿 .....  | 98  | 4.6 电磁流量计 .....          | 128 |
| 3.6.4 霍尔式压力计 .....        | 101 | 4.6.1 电磁流量计的工作原理 .....   | 128 |
| 3.7 电子秤 .....             | 102 | 4.6.2 电磁流量计的结构 .....     | 128 |
| 3.7.1 电子秤的原理 .....        | 102 | 4.7 质量流量的测量 .....        | 129 |
| 3.7.2 称重传感器原理 .....       | 103 | 4.7.1 推导式质量流量测量 .....    | 129 |
| 3.7.3 电子秤的应用 .....        | 104 | 4.7.2 直接式质量流量测量 .....    | 131 |
| 3.8 差分变压器 .....           | 105 | 思考题与习题 .....             | 132 |
| 3.8.1 差分变压器的工作原理及特性 ..... | 105 | 第5章 物位及厚度检测 .....        | 133 |
| 3.8.2 差分变压器测压力 .....      | 106 | 5.1 浮力式物位检测 .....        | 133 |
| 3.9 数字式压力计 .....          | 106 | 5.1.1 恒浮力式物位检测 .....     | 133 |
| 3.9.1 MPX 压力传感器 .....     | 107 | 5.1.2 变浮力式物位检测 .....     | 135 |
| 3.9.2 测量电路 .....          | 107 | 5.2 静压式物位检测 .....        | 136 |
| 思考题与习题 .....              | 109 | 5.2.1 静压式物位检测原理 .....    | 136 |
| 第4章 流量检测 .....            | 110 | 5.2.2 压力式液位计 .....       | 136 |
| 4.1 流量的检测方法 .....         | 110 | 5.2.3 差压式液位计 .....       | 137 |
| 4.1.1 节流差压法 .....         | 110 | 5.2.4 量程迁移 .....         | 137 |
| 4.1.2 容积法 .....           | 111 | 5.3 电容式物位计 .....         | 139 |
| 4.1.3 速度法 .....           | 111 | 5.3.1 电容式物位计原理 .....     | 139 |
| 4.1.4 流体阻力法 .....         | 111 | 5.3.2 电容式物位传感器 .....     | 140 |
| 4.1.5 流体振动法 .....         | 111 | 5.3.3 电容式物位传感器应用举例 ..... | 141 |
| 4.1.6 质量流量测量 .....        | 112 | 5.4 超声传感器及物位、厚度检测 .....  | 142 |
| 4.2 差压式流量计 .....          | 112 | 5.4.1 超声波检测原理 .....      | 142 |
| 4.2.1 节流装置的工作原理 .....     | 112 | 5.4.2 超声传感器 .....        | 144 |
| 4.2.2 流量方程 .....          | 113 | 5.4.3 超声传感器测物位 .....     | 145 |
| 4.2.3 流量系数的确定 .....       | 114 | 5.4.4 超声传感器测厚度 .....     | 148 |
| 4.2.4 标准节流装置 .....        | 114 | 5.5 核辐射物位与厚度检测 .....     | 150 |
| 4.2.5 取压方式 .....          | 116 | 5.5.1 放射源和探测器 .....      | 150 |
| 4.2.6 差压计 .....           | 117 | 5.5.2 测量电路 .....         | 154 |
| 4.2.7 标准节流装置的安装要求 .....   | 119 | 5.5.3 核辐射厚度计 .....       | 154 |
| 4.2.8 差压式流量计的使用 .....     | 120 | 5.5.4 核辐射液位计 .....       | 155 |
| 4.3 容积式流量计 .....          | 121 | 5.6 电涡流传感器及厚度检测 .....    | 155 |
| 4.3.1 椭圆齿轮流量计 .....       | 121 | 5.6.1 涡流效应 .....         | 156 |
| 4.3.2 腰轮流量计 .....         | 122 | 5.6.2 高频反射式涡流传感器 .....   | 156 |

|                                    |     |                                   |     |
|------------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 5.6.3 低频透射式涡流传感器 .....             | 159 | 7.1.3 磁电式速度传感器 .....              | 195 |
| 思考题与习题 .....                       | 161 | 7.2 光电式转速计 .....                  | 197 |
| <b>第6章 位移检测</b> .....              | 162 | 7.2.1 工作原理 .....                  | 197 |
| 6.1 电感式传感器与位移检测 .....              | 162 | 7.2.2 基本测量电路 .....                | 198 |
| 6.1.1 电感式传感器的工作原理及<br>分类 .....     | 162 | 7.3 测速发电机及电磁脉冲式转速计 .....          | 198 |
| 6.1.2 电感式传感器输出特性 .....             | 164 | 7.3.1 测速发电机 .....                 | 198 |
| 6.1.3 差分电感式传感器原理 .....             | 164 | 7.3.2 电磁脉冲式转速计 .....              | 199 |
| 6.1.4 电感式位移计 .....                 | 166 | 7.4 加速度传感器 .....                  | 200 |
| 6.2 差分变压器位移计 .....                 | 167 | 7.4.1 压电式加速度传感器 .....             | 200 |
| 6.2.1 差分变压器位移计的结构 .....            | 167 | 7.4.2 电阻应变式加速度传感器 .....           | 202 |
| 6.2.2 差分变压器位移计的测量电路 .....          | 168 | 7.4.3 力平衡式加速度传感器 .....            | 203 |
| 6.3 电位器式传感器 .....                  | 170 | 思考题与习题 .....                      | 203 |
| 6.3.1 电位器式传感器的基本工作原理 .....         | 170 | <b>第8章 磁场及气体成分参数<br/>检测</b> ..... | 204 |
| 6.3.2 电位器式传感器的输出特性 .....           | 170 | 8.1 磁敏传感器 .....                   | 204 |
| 6.3.3 电位器式传感器结构 .....              | 171 | 8.1.1 磁敏电阻 .....                  | 204 |
| 6.3.4 电位器式位移传感器 .....              | 171 | 8.1.2 磁敏二极管 .....                 | 207 |
| 6.4 感应同步器 .....                    | 172 | 8.1.3 磁敏三极管 .....                 | 208 |
| 6.4.1 感应同步器的结构 .....               | 172 | 8.2 磁场检测 .....                    | 209 |
| 6.4.2 感应同步器的工作原理 .....             | 175 | 8.2.1 电磁感应法测磁场 .....              | 209 |
| 6.4.3 感应同步器的电气参数 .....             | 176 | 8.2.2 磁通门磁强计测量磁场 .....            | 213 |
| 6.4.4 数字位置测量系统 .....               | 177 | 8.2.3 霍尔效应测量磁场 .....              | 215 |
| 6.5 光栅位移测试 .....                   | 178 | 8.2.4 核磁共振法测量磁场 .....             | 215 |
| 6.5.1 光栅的基本结构 .....                | 178 | 8.3 气体成分检测 .....                  | 216 |
| 6.5.2 光栅传感器的工作原理 .....             | 179 | 8.3.1 热导式气体分析仪 .....              | 216 |
| 6.6 码盘式传感器 .....                   | 182 | 8.3.2 热磁式气体分析仪 .....              | 217 |
| 6.6.1 光电码盘式传感器的工作原理 .....          | 182 | 8.3.3 红外线气体分析仪 .....              | 219 |
| 6.6.2 光电码盘 .....                   | 183 | 8.4 气敏传感器 .....                   | 220 |
| 6.6.3 光电码盘的应用 .....                | 187 | 8.4.1 半导体气敏传感器 .....              | 221 |
| 6.7 电容式位移传感器 .....                 | 187 | 8.4.2 红外吸收式气敏传感器 .....            | 222 |
| 6.7.1 单电极的电容式位移传感器<br>及其应用 .....   | 188 | 8.4.3 气敏传感器应用举例 .....             | 224 |
| 6.7.2 变面积差分式电容位移传感器<br>及其应用 .....  | 188 | 8.5 湿度的检测 .....                   | 226 |
| 6.8 电涡流位移计 .....                   | 190 | 8.5.1 湿敏传感器 .....                 | 226 |
| 思考题与习题 .....                       | 191 | 8.5.2 湿度传感器应用实例 .....             | 229 |
| <b>第7章 速度及加速度检测</b> .....          | 192 | 8.6 液体浓度的检测 .....                 | 231 |
| 7.1 磁电感应式速度传感器 .....               | 192 | 8.6.1 溶液的电导率与浓度的关系 .....          | 231 |
| 7.1.1 磁电感应式传感器的工作原理<br>及测量电路 ..... | 192 | 8.6.2 电导检测器及测量电路 .....            | 231 |
| 7.1.2 磁电感应式传感器的灵敏度 $K$ .....       | 194 | 思考题与习题 .....                      | 232 |
|                                    |     | <b>第9章 光电检测</b> .....             | 233 |
|                                    |     | 9.1 光电效应及光电器件 .....               | 233 |
|                                    |     | 9.1.1 外光电效应及器件 .....              | 233 |

|                          |     |                          |     |
|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 9.1.2 内光电效应及器件 .....     | 235 | 10.2 干扰信号的耦合方式 .....     | 257 |
| 9.1.3 阻挡层光电效应及器件 .....   | 237 | 10.2.1 静电电容耦合 .....      | 257 |
| 9.2 光电耦合器件 .....         | 240 | 10.2.2 电磁耦合 .....        | 257 |
| 9.2.1 光电耦合器件的结构和原理 ..... | 240 | 10.2.3 共阻抗耦合 .....       | 258 |
| 9.2.2 光电耦合器的组合形式 .....   | 241 | 10.2.4 漏电流耦合 .....       | 258 |
| 9.2.3 光电耦合器的特性曲线 .....   | 242 | 10.2.5 电子测量装置的两种干扰 ..... | 259 |
| 9.2.4 光电耦合器的应用 .....     | 242 | 10.2.6 共模干扰抑制比 .....     | 260 |
| 9.3 电荷耦合器件(CCD) .....    | 242 | 10.3 常用的抑制干扰措施 .....     | 261 |
| 9.3.1 CCD 的基本工作原理 .....  | 242 | 10.3.1 屏蔽技术 .....        | 261 |
| 9.3.2 CCD 器件 .....       | 245 | 10.3.2 接地技术 .....        | 262 |
| 9.4 图像传感器及其应用 .....      | 248 | 10.3.3 浮置 .....          | 264 |
| 9.4.1 图像的获取技术 .....      | 248 | 10.4 其他抑制干扰措施 .....      | 264 |
| 9.4.2 图像传感器的应用 .....     | 252 | 10.4.1 隔离 .....          | 264 |
| 思考题与习题 .....             | 253 | 10.4.2 滤波 .....          | 265 |
| 第 10 章 抗干扰技术 .....       | 254 | 10.4.3 平衡电路 .....        | 266 |
| 10.1 干扰的类型及产生 .....      | 254 | 10.4.4 脉冲电路的噪声抑制技术 ..... | 267 |
| 10.1.1 干扰的类型 .....       | 254 | 思考题与习题 .....             | 268 |
| 10.1.2 干扰的产生 .....       | 255 | 参考文献 .....               | 269 |
| 10.1.3 信噪比和干扰叠加 .....    | 256 |                          |     |

# 第 1 章

## 检测技术的基础知识

### 1.1 检测技术的基本概念

#### 1.1.1 检测技术

检测技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换以及信息处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。

广义地讲,检测技术是自动化技术四个支柱之一。从信息科学的角度考察,检测技术任务为:寻找与自然信息具有对应关系的种种表现形式的信号,以及确定两者间的定性、定量关系;从反映某一信息的多种信号表现中挑选出在所处条件下最为合适的表现形式,以及寻求最佳的采集、变换、处理、传输、存储、显示等方法和相应的设备。

信息采集是指从自然界诸多被测量(物理量、化学量、生物量与社会量等)中提取有用的信息。

信息变换是将所提取出的有用信息进行电量形式的幅值、功率等的转换。

信息处理的任务,视输出环节的需要,可将变换后的电信号进行数值运算(求均值、极值等)、模拟量-数字量变换等处理。

信息传输的任务是在排除干扰的情况下,经济地、准确无误地把信息进行远、近距离的传递。

虽然检测技术服务的领域非常广泛,但是从这门课程的研究内容来看,不外乎是传感器技术、误差理论、测试计量技术、抗干扰技术以及电量间互相转换的技术等。提高自动检测系统的检测分辨率、精度、稳定性和可靠性是本门技术的研究课题和方向。

自动检测技术已成为一些发达国家的最重要的热门技术之一,它可以给人们带来巨大的经济效益并促进科学技术飞跃发展,因此在国民经济中占有及其重要的地位和作用。

#### 1.1.2 自动检测系统

自动检测系统是自动测量、自动计量、自动保护、自动诊断、自动信号处理等系统的总称。它的组成如图 1.1.1 所示。在上述诸系统中,都包含有被测量、敏感元件和电子测量电路和输出单元,它们间的区别仅在于输出单元。如果输出单元是显示器或记录器,则该系统是自动测量系统;如果输出单元是计数器或累加器,则该系统是自动计量系统;如果输出单元是报警器,则该系统是自动保护系统或自动诊断系统;如果输出单元是处理电路,则该系统是部分数据分析系统、自动管理系统或自动控制系统。



图 1.1.1 自动检测系统框图

1.1.3 传感器

1. 传感器

传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。

这一概念包含以下四个方面的含义：

- ① 传感器是测量装置,能完成信号获取任务。
- ② 它的输入量是某一被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等。
- ③ 它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,这种量可以是气、光、电量,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。

2. 传感器的组成

传感器的功用是一感二传,即感受被测信息,并传送出去。传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成。如图 1.1.2 所示。

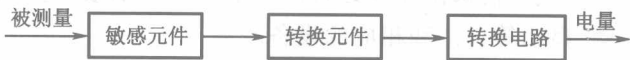


图 1.1.2 传感器组成框图

(1) 敏感元件

它是直接感受被测量,并且输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。

(2) 转换元件

敏感元件的输出就是它的输入,它把输入量转换成电路参数量。

(3) 转换电路

上述电路参数接入转换电路,使可转换成电量输出。

实际上,有些传感器很简单,有些则较复杂,也有些是带反馈的闭环系统。

最简单的传感器由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路,如压电式加速度传感器,其中质量块是敏感元件,压电片是转换元件。有些传感器转换元件不止一个,要经过若干次转换。

由于传感器空间限制等其他原因,转换电路常装入箱柜中。然而,因为不少传感器要通过转换电路之后才能输出电量信号,从而决定了转换电路是传感器的组成部分之一。

3. 传感器的分类

目前传感器主要有四种分类方法:根据传感器工作的原理分类;根据传感器的能量转换情况分类;根据传感器的转换原理分类和按照传感器的使用分类。

表 1.1.1 按传感器转换原理分类,给出了各类型的名称及典型应用。

表 1.1.1 传感器分类表

| 传感器分类表 |      | 转换原理              | 传感器名称             | 典型应用       |
|--------|------|-------------------|-------------------|------------|
| 转换形式   | 中间参量 |                   |                   |            |
| 电参数    | 电阻   | 移动电位器触点改变电阻       | 电位器式传感器           | 位移         |
|        |      | 改变电阻丝或电阻片的尺寸      | 电阻丝应变传感器、半导体应变传感器 | 微应用、力、负荷   |
|        |      | 利用电阻的温度效应(电阻温度系数) | 热丝传感器             | 气流速度、液体流量  |
|        |      |                   | 电阻温度传感器           | 温度、辐射热     |
|        |      |                   | 热敏电阻传感器           | 温度         |
|        |      | 利用电阻的光敏效应         | 光敏电阻传感器           | 光强         |
|        |      | 利用电阻的湿度效应         | 湿敏电阻传感器           | 湿度         |
|        | 电容   | 改变电容的几何尺寸         | 电容传感器             | 力、压力、负荷、位移 |
|        |      | 改变电容的介电常数         |                   | 液位、厚度、含水量  |
|        |      | 改变磁路的几何尺寸、导磁体位置   | 电感传感器             | 位移         |
|        |      | 涡流去磁效应            | 涡流传感器             | 位移、厚度、硬度   |
|        |      | 利用压磁效应            | 压磁传感器             | 力、压力       |
|        | 电感   | 改变互感              | 差分传感器             | 位移         |
|        |      |                   | 自整角机              | 位移         |
|        |      |                   | 旋转变压器             | 位移         |
|        | 频率   | 改变谐振回路中的固有参数      | 振弦式传感器            | 压力、力       |
|        |      |                   | 振筒式传感器            | 气压         |
|        |      |                   | 石英谐振传感器           | 力、温度       |
|        | 计数   | 利用莫尔条纹            | 光栅                | 大角位移、大直线位移 |
|        |      | 改变互感              | 感应同步器             |            |
|        |      | 利用拾磁信号            | 磁栅                |            |
|        | 数字   | 利用数字编码            | 角度编码器             | 大角位移       |
| 电量     | 电动势  | 温差电动势             | 热电偶               | 温度、热流      |
|        |      | 霍尔效应              | 霍尔传感器             | 磁通、电流      |
|        |      | 电磁感应              | 磁电传感器             | 速度、加速度     |
|        |      | 光电效应              | 光电池               | 光强         |
|        | 电荷   | 辐射电离              | 电离室               | 离子计数、放射性强度 |
|        |      | 压电效应              | 压电传感器             | 动态力、加速度    |

## 1.2 测量误差

人们对客观世界的认识总是带有一定的局限性,与客观事物的本来面貌存在差异。测量是在一定的物质基础上进行的。因此,人们在进行各种实际测量时,尽管被测量在理论上存在真值,但由于客观实验条件的限制,被测量的真值实际上是测不到的,因而测量结果只能是真值的近似值,这样就不可避免地存在着测量误差。

### 1.2.1 误差的基本概念及表达方式

#### 1. 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为  $L_0$ , 测量值或示值为  $x$ , 则绝对误差  $\Delta x$  为

$$\Delta x = x - L_0 \quad (1.2.1)$$

由于真值  $L_0$  一般来说是未知的,所以在实际应用时,常用实际真值  $L$  来代表真值  $L_0$ , 并采用高一标准仪器的示值作为实际真值。故通常用

$$\Delta x = x - L \quad (1.2.2)$$

来代表绝对误差。

在实际测量中,还经常用到修正值这个名称,它的绝对值与  $\Delta x$  相等但符号相反,用符号  $c$  表示,即

$$c = -\Delta x = L - x$$

修正值给出的方式不一定是具体的数值,也可以是一条曲线、公式或数表。在某些智能化仪表中,修正值预先被编制成有关程序,存储于仪表中,所得测量结果已自动对误差进行了修正。

#### 2. 相对误差

绝对误差的表示方法有不足之处,因为它不能确切地反映出测量的准确程度。例如测量两个电阻,其中  $R_1 = 10 \Omega$ , 误差  $\Delta R_1 = 0.1 \Omega$ ;  $R_2 = 1000 \Omega$ , 误差  $\Delta R_2 = 1 \Omega$ ; 尽管,  $\Delta R_1 < \Delta R_2$ , 但不能由此得出测量电阻  $R_1$  比测量电阻  $R_2$  准确程度高的结论。因为  $\Delta R_1 = 0.1 \Omega$  相对于  $10 \Omega$  来讲是  $1\%$ , 而  $\Delta R_2 = 1 \Omega$ , 相对于  $1000 \Omega$  来讲是  $0.1\%$ , 所得结论是  $R_2$  的测量比  $R_1$  的测量更准。因此,为反映测量质量的高低,需引出相对误差的概念,由绝对误差与真值或实际值之比表示相对误差  $\delta$ , 即

$$\delta = \frac{\Delta x}{L_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

相对误差通常用于衡量测量的准确程度,相对误差越小,准确程度越高。

#### 3. 引用误差

引用误差是一种实用方便的相对误差,常在多挡和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表测量范围不是一个点,而是一个量程,这时按式(1.2.3)计算,由于分母是变量,随被测量的变化而变化,所以计算很麻烦。为了计算和划分仪表的精度等级的方便,通常采用引用误差,它是从相对误差演变过来的,其分母为常数,取仪器仪表中的量程值,因而引用误差  $\gamma_m$

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

式中,  $A$ ——仪表的量程。

我国电工仪表共分七级: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 及 5.0。例如, 0.1 级表的引用误差的最大值不超过  $\pm 0.1\%$ ; 0.5 级表的引用误差最大值不超过  $\pm 0.5\%$  等。工业自动化仪表的精度等级一般在 0.2 ~ 5.0 级之间。

引用误差从形式上看像相对误差, 但是对某一具体仪表来说, 由于其分母  $A$  是一个常数, 与被测量大小无关, 因此它实质是一个绝对误差的最大值。例如, 量程为 1 V 的毫伏表, 精度等级为 5.0, 即  $\gamma = (\Delta x / A) \times 100\% = 5.0\%$ 。从这个式子可以求出  $\Delta x = 5.0\% \times 1 \text{ V} = 50 \text{ mV}$ , 这说明无论指示在刻度的哪一点, 其最大绝对误差不超过 50 mV, 但各点的相对误差是不同的。在选用仪表时, 一般使其最好能工作在不小于满刻度值  $2/3$  的区域。

### 1.2.2 误差的分类与来源

根据误差出现的规律可分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

#### 1. 系统误差

在相同的条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号保持恒定, 或在条件改变时, 与某一个或几个因素成函数关系的有规律的误差, 称为系统误差。例如仪表的刻度误差和零位误差, 应变片电阻值随温度的变化等都属于系统误差。它产生的主要原因是仪表制造、安装或使用方法不正确, 也可能是测量人员一些不良的读数习惯等。

系统误差是一种有规律的误差, 故可以采用修正值或补偿校正的方法来减小或消除。

#### 2. 随机误差

服从统计规律的误差称随机误差, 简称为随差, 又称偶然误差。只要测试系统的灵敏度足够高, 在相同条件下, 重复测量某一量时, 每次测量的数据或大或小, 或正或负, 不能预知。虽然单次测量的随机误差没有规律, 但多次测量的总体却服从统计规律, 通过对测量数据的统计处理, 能在理论上估计其对测量结果的影响。

随机误差是由很多复杂因素对测量值的综合影响所造成的, 如电磁场的微变, 零件的摩擦、间隙, 热起伏, 空气扰动, 气压及湿度的变化, 测量人员感觉器官的生理变化等。它不能用修正或采取某种技术措施的办法来消除。

应该指出, 在任何一次测量中, 系统误差与随机误差一般都是同时存在的, 而且两者之间并不存在绝对的界限。

#### 3. 粗大误差

粗大误差是一种显然与实际值不符的误差。如测错、读错、记错以及实验条件未达到预定的要求而匆忙实验, 都会引起粗大误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值, 在处理数据时应剔除掉。这样, 测量中要估计的误差就具有系统误差和随机误差两类。

误差的来源是多方面的, 例如测量用的工具不完善(称工具误差); 测试设备和电路的安装、布置、调整不完善(称装置误差); 测量方法本身的理论根据不完善(称方法误差); 测量环境如温度、湿度、气压、电磁场的变化(称环境误差); 甚至测量人员生理上的原因, 如反应速度、分辨能力(称人员误差)等。

### 1.2.3 系统误差和随机误差的表达式

设对某被测量进行了等精度独立的几次测量, 得值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则测定值的算术平均值  $\bar{x}$  为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.5)$$

式中,  $\bar{x}$ ——取样平均值。

当测量次数  $n$  趋于无穷大 ( $n \rightarrow \infty$ ) 时, 取样平均值的极限称为测定值的总体平均值, 用符号  $A$  表示, 即

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.6)$$

测定值的总体平均值  $A$  与测定值真值  $L_0$  之差被定义为系统误差, 用符号  $\varepsilon$  表示

$$\varepsilon = A - L_0 \quad (1.2.7)$$

$n$  次测量中, 各次测定值  $x_i (i = 1 \sim n)$  与其总体平均值  $A$  之差被定义为随机误差, 用符号  $\delta_i$  表示, 即

$$\delta_i = x_i - A \quad (i = 1 \sim n) \quad (1.2.8)$$

将式(1.2.7)和式(1.2.8)等号两边分别相加, 得

$$\varepsilon + \delta_i = (A - L_0) + (x_i - A) = x_i - L_0 = \Delta x_i \quad (1.2.9)$$

式中,  $\Delta x_i$ ——各次测定的绝对误差。

式(1.2.9)表明, 各次测量值的绝对误差等于系统误差  $\varepsilon$  和随机误差  $\delta_i$  的代数和。

### 1.2.4 基本误差和附加误差

按使用条件划分可将误差分为基本误差和附加误差。

#### 1. 基本误差

任何测量仪器和传感器都是在一定的环境条件下使用的。环境条件变化, 测量误差也因环境条件(加温度、气压、湿度、电源电压和频率、振动等)的变化而变化。这样在对传感器和仪器进行检定和刻度时, 应把所有起影响作用的外界因素控制在变化较窄的条件内。此条件由国家标准或企业标准文件明确规定, 称为标准条件。仪器在标准条件下使用所具有的误差称为基本误差, 它属于系统误差。

例如, 仪表是在电源电压  $(220 \pm 5)$  V、电网频率  $(50 \pm 2)$  Hz、环境温度  $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , 大气压  $(1.013 \times 10^5 \pm 1\,000)$  Pa、湿度  $65\% \pm 5\%$  的条件下标定的。如果这台仪表在这个条件下工作, 则仪表所具有的误差就是基本误差。换句话说, 基本误差是测量仪表在额定条件下工作所具有的误差。

测量仪表的精度等级就是由其基本误差决定的。不同等级的传感器和仪表的基本误差在国家和企业标准中都有明确规定。

#### 2. 附加误差

当使用条件偏离标准条件时, 传感器和仪表必然在基本误差的基础上增加了新的系统误差, 称为附加误差。例如, 由于温度超过标准引起的温度附加误差、频率附加误差以及电源电压波动附加误差等。附加误差在使用时应叠加到基本误差上去。

### 1.2.5 系统误差的发现与校正

#### 1. 系统误差的发现与判别

由于系统误差对测量精度影响比较大,因此,必须消除系统误差的影响,才能有效地提高测量精度,下面介绍的是发现系统误差的常用方法。

##### (1) 实验对比法

这种方法是通过改变产生系统误差的条件而进行不同条件的测量,以发现系统误差,这种方法适用于发现不变的系统误差。例如,一台测量仪表本身存在固定的系统误差,即使进行多次测量也不能发现,只有用精度更高一级的测量仪表测量,才能发现这台测量仪表的系统误差。

##### (2) 剩余误差观察法

剩余误差为某测量值与测量平均值之差,即  $p_i = x_i - \bar{x}$ 。根据测量数据的各个剩余误差大小和符号的变化规律,可以直接由误差数据或误差曲线图来判断有无系统误差。这种方法主要适用于发现有规律变化的系统误差,如图 1.2.1 所示,若剩余误差如图 1.2.1(a) 所示,大体上是正负相间,且无显著变化规律,则不存在系统误差;若剩余误差如图 1.2.1(b) 所示,有规律地递增或递减,且在测量开始与结束时误差相反,则存在线性系统误差;若剩余误差如图 1.2.1(c) 所示,符号有规律地逐渐由负变正,再由正变负,且循环交替重复变化,则存在周期性系统误差;若剩余误差按如图 1.2.1(d) 所示的规律变化,则应怀疑同时存在线性系统误差和周期性系统误差。图中  $n$  为测量次数。

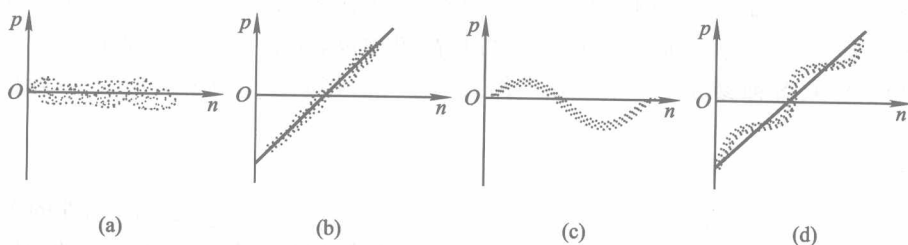


图 1.2.1  $p-n$  示意图

##### (3) 不同公式计算标准误差比较法

对等精度测量,可用不同公式计算标准误差,通过比较可以发现系统误差。使用时常采用贝塞尔公式和佩捷斯公式计算比较,即

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{n-1}}, \quad \sigma_2 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sum_{i=1}^n |P_i|}{\sqrt{n(n-1)}}$$

令

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 + u$$

若

$$|u| \geq \frac{2}{\sqrt{n-1}}$$

则怀疑测量中存在系统误差。

#### (4) 计算数据比较法

对同一量进行测量得到多组数据,通过计算数据比较,判断是否满足随机误差条件,以发现系统误差。例如,对同一量独立测量  $m$  组结果,并计算求得算术平均值和均方根误差为:  $\bar{x}_1, \sigma_1; \bar{x}_2, \sigma_2; \dots; \bar{x}_m, \sigma_m$ 。任意两数据  $(\bar{x}_i, \sigma_i)$  的均方根误差为  $\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$ ,任意两组数据  $\bar{x}_i$  和  $\bar{x}_j$  间不存在系统误差的条件是

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_j| < 2 \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$$

### 2. 系统误差的校正

这里阐述的是当存在系统误差时,如何从电路设计、测量方法和测量数据的处理方面对误差进行修正。

#### (1) 补偿法

在电路和传感器结构设计中,常选用在同一有害干扰变量作用下,能产生误差相等而符号相反的零部件或元器件作为补偿元件。例如,采用负温度系数的热敏电阻补偿正温度系数电阻的温度误差;采用负温度系数的电容补偿正温度系数的电阻引起的时间常数的变化;采用磁分流器补偿磁路气隙中因温度变化引起的磁感应强度的变化等。

#### (2) 差分法

相同的参数变换器(如电阻、电容、电感变换器)具有相同的温度系数,若将它们接入电桥相邻的两个臂时,变换器的参数随输入量作差分变化,即一个臂的参数增加,另一个臂的参数则减小,这时的电桥输出是单个参数变换器输出的两倍。但它们在同一温度场的作用下,由于两臂的参数值相等,温度系数相同,则温度变化引起的参数变化值相等,尽管参数变化了,然而电桥输出却不受影响。利用差分法,既可提高灵敏度,又能有效地抵消有害因素引起的误差。在检测仪器中,各种参数式变换器几乎都采用差分法接成差分电桥的形式,以降低温度和零位引起的误差。

#### (3) 比值补偿法

测量电路中经常采用分压器及放大器,它们的变换系数总是与所用电阻元件的电阻比值有关。为了保证精确的比值,可以要求每一个电阻具有精确的电阻值,然而这并非绝对需要,且代价很高。如果所选用的电阻具有相等的相对误差和相同的电阻温度系数时,温度变化虽使电阻值变化,但它们仍能保证相互比值的精确性,从而可采用低精度的元件实现比值稳定的高精度分压比或放大倍数。

#### (4) 测量数据的修正

测量传感器和仪器经过检定后可以准确知道它的测量误差,当再次测量时,可以将已知的测量误差作为修正值,对测量数据进行修正,从而获得更精确的测量结果。

## 1.3 传感器的基本特性

在讲传感器原理、构造、应用之前,对传感器的基本特性做一些了解是非常必要的,传感器的特性可以通过它的静态和动态特性揭示出来。