



全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

电子·教育

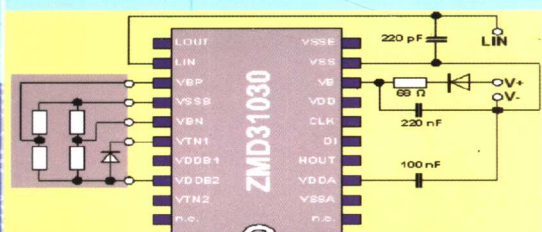
# 自动检测与转换技术

苏家健 主 编

常慧玲 顾 阳 贾朱植 副主编

周政新 主 审

<http://www.phel.com.cn>



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

# 自动检测与转换技术

苏家健 主 编

常慧玲 顾阳 贾朱植 副主编

周政新 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书主要介绍了常用传感器的工作原理、基本结构及相应的测量电路,并介绍了大量的应用实例。在取材上,注意理论性、实用性和先进性的有机结合,突出基本技能的培养,加强了实验的内容。

本书主要介绍了:检测技术的一般概念和测量方法、误差分析;电阻式、变磁阻式、电容式、热电偶、霍尔、光电式及压电式等常用传感器;新型的光纤传感器;工业生产中使用的各种用途的流量传感器;检测装置的信号处理技术,包括信号的放大、隔离、A/D转换及与单片机的接口技术,并介绍了线性化处理的技术;集中列举了检测技术在工业生产中应用的实例;最后还安排了传感器的实验内容。在各章中都列举了大量的应用实例,以帮助读者对传感器知识的理解。

本书可作为高职高专生产过程自动化技术、电气自动化、应用电子技术、机电一体化技术、计算机控制及相近专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动检测与转换技术/苏家健主编. —北京:电子工业出版社, 2006.8

(全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材)

ISBN 7-121-02951-0

I. 自… II. 苏… III. ①自动检测—高等学校:技术学校—教材②传感器—高等学校:技术学校—教材  
IV. ①TP274②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 095919 号

责任编辑:赵江晨

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂  
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:397千字

印 次:2006年8月第1次印刷

印 数:5000册 定价:21.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010) 68279077;邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

## 出版说明

党的十六大提出,走我国新型工业化发展的道路,必须坚持“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”,而且要达到“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”等5个具体目标,这表明我国要基本实现工业化,不仅要采用机械化和电气化,而且要充分利用自动化和信息化。因此,以自动化技术为代表的先进生产技术,将在我国产业结构调整、推动传统产业现代化、实现经济及社会持续协调发展中,发挥极其重要的作用。

目前,作为我国高等教育一翼的高等职业教育,已经在招生规模方面取得了巨大的突破,但在教学改革方面与西方发达的职业教育相比,还相对落后。高职教育的培养目标是培养企业真正需要的具有实践动手能力的技术工人,这是当前高职教育改革的重点,也是一线教师所真正关心的话题。而工业生产自动化技术是高职教育中的一个重要领域,承担着为工业生产领域培养一线技术工人的重要作用,而且,无论是社会用人需求还是就业前景,这一领域目前都被广泛看好。

与此相适应,电子工业出版社在广泛调查研究的基础上,于2006年3月组织全国数十所高等职业院校的一线教师和企业技术专家,在上海召开了“全国高等职业教育工业生产自动化技术规划教材研讨会”,就相关的课程教学和高职培养目标进行了深入的探讨,确定了相关的主干教材10余种。与会代表多是所在学校的领导和业务骨干,具有丰富的教学经验、实践经验和编写教材的经验。

本套教材体现了高等职业教育改革的方向,以培养岗位技术人员的综合能力为中心,淡化理论、强化应用,突出职业教育的教育特色,并且根据教育部制定的“高职高专教育课程教学基本要求”,将传统课程重新组合,缩短教学课时,力求突出应用性、针对性、岗位性和专业性等特点。

本套教材在内容编排上以能力为单位模块,强调实用原则;书中实例完整,注重原理和方法的应用,以提高对高职学生技能的培养。本套教材将学历课程与资格应试结合,满足目前大多数高等职业院校学生毕业时对毕业证与资格证或上岗证的要求。本套教材力求内容新颖性,紧跟国内外工业生产自动化技术的最新进展,同时兼顾国内高职院校相关专业的最新教学内容。本套教材均配套教学参考资料,为高职师生的教与学提供方便和帮助。

本套教材的出版对于高等职业教育的改革和高等职业专门人才的培养将起到积极的推动作用。对于教材中所存在的一些不尽如人意之处,将通过今后的教学实践不断修订、完善和充实,以便我们更好地服务于高等职业教育。

本套教材适用于生产过程自动化技术、计算机控制技术、工业网络技术、液压与气动技术、检测技术及应用等专业,也适用于机电类专业。

电子工业出版社  
高职高专教育教材事业部  
2006年7月

# 前 言

高等职业教育是我国高等教育的重要组成部分,其根本任务是培养和造就适应生产、建设、管理、服务第一线需要的高级技术人才。为适应高等职业教育模式、教育方法改革的需要,由电子工业出版社组织编写了工业生产自动化技术系列规划教材。

针对高职高专学生理论基础相对薄弱的特点,本教材在编写过程中贯彻理论知识适度够用、重在实际应用和技能培养的原则,精选内容,在每章中都列举了大量的应用实例,以帮助学生理解传感器知识的应用。此外,还专列一章实验以加强对学生动手能力的培养。

自动检测与转换技术在现代生产中的重要性越来越被人们所认识。随着信息时代的到来,国内外将传感器列为优先发展的科学技术领域之一。近年来,检测技术的发展使传感器的种类越来越多。在本书的编写中,我们精选了部分传统和新型的传感器进行介绍。全书共分13章:第1章简述检测技术的一般概念和测量方法、误差分析;第2~8章主要介绍电阻式、变磁阻式、电容式、热电偶、霍尔、压电式及光电式等常用传感器;第9章简述光纤传感器的工作原理、分类及应用;第10章介绍工业生产中各种用途的流量传感器;第11章介绍检测装置的信号处理和单片机的接口技术;第12章列举了传感器在检测中的综合应用实例;第13章为实验内容。

本教材的参考学时为54~72学时。在使用本教材时,可考虑以下几个环节:

- (1) 在讲清楚各种传感器的基础上注重应用实例的介绍;
- (2) 注意各章的归纳与小结;
- (3) 通过第11章、第12章的学习,可以指导学生对检测系统进行课程设计;
- (4) 结合教材内容进行必要的实验。

本教材由上海第二工业大学苏家健担任主编,山西工程职业技术学院常慧玲、上海第二工业大学顾阳和鞍山科技大学高等职业技术学院贾朱植担任副主编,鞍山科技大学电子与信息学院祝洪宇参编。苏家健老师编写第5章、第7章、第11章及第9章的9.1~9.4节;常慧玲老师编写第1章、第10章、第12章;顾阳老师编写第2章、第3章、第4章及第9章的9.5、9.6节;贾朱植老师编写第6章和第13章;祝洪宇老师编写第8章。全书由苏家健统稿,并由上海第二工业大学周政新教授主审。

本教材可作为高职高专生产过程自动化技术、电气自动化、应用电子技术、机电一体化、计算机过程控制及相近专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

在本书的编写过程中,得到了电子工业出版社的大力支持,同时参考了参考文献所列资料的有关内容,在此一并表示感谢。

由于编者的水平有限,在编写过程中难免存在错误和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者  
2006年7月

# 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 第1章 检测技术的基础知识 .....           | (1)  |
| 1.1 测量的基本概念 .....             | (1)  |
| 1.1.1 测量 .....                | (1)  |
| 1.1.2 测量方法 .....              | (1)  |
| 1.2 测量误差及其分类 .....            | (2)  |
| 1.2.1 测量误差及其表示方法 .....        | (2)  |
| 1.2.2 测量误差的分类 .....           | (4)  |
| 1.3 测量误差的分析与处理 .....          | (5)  |
| 1.3.1 随机误差的统计特性 .....         | (5)  |
| 1.3.2 系统误差的发现与处理 .....        | (7)  |
| 1.3.3 粗大误差的判别和测量结果的数据处理 ..... | (9)  |
| 1.4 传感器及其基本特性 .....           | (11) |
| 1.4.1 传感器的定义及组成 .....         | (11) |
| 1.4.2 传感器的分类 .....            | (12) |
| 1.4.3 传感器的基本特性 .....          | (13) |
| 1.4.4 传感器技术的发展趋势 .....        | (18) |
| 小 结 .....                     | (19) |
| 思考与练习 .....                   | (20) |
| 第2章 电阻式传感器 .....              | (21) |
| 2.1 弹性敏感元件 .....              | (21) |
| 2.1.1 弹性敏感材料的弹性特性 .....       | (21) |
| 2.1.2 弹性敏感元件的材料及其基本要求 .....   | (22) |
| 2.1.3 弹性敏感元件的变换原理 .....       | (22) |
| 2.2 电位式传感器 .....              | (26) |
| 2.2.1 线性电位器 .....             | (27) |
| 2.2.2 非线性电位器 .....            | (29) |
| 2.2.3 电位器式传感器应用 .....         | (30) |
| 2.3 电阻应变式传感器 .....            | (30) |
| 2.3.1 电阻应变片的种类与结构 .....       | (31) |
| 2.3.2 电阻的应变效应 .....           | (32) |
| 2.3.3 应变片测试原理 .....           | (33) |
| 2.3.4 测量电路 .....              | (34) |
| 2.4 电阻应变式传感器的应用 .....         | (37) |
| 2.5 压阻式传感器 .....              | (40) |
| 2.5.1 压阻效应与压阻系数 .....         | (40) |

|                          |                 |      |
|--------------------------|-----------------|------|
| 2.5.2                    | 测量原理 .....      | (40) |
| 2.5.3                    | 温度补偿 .....      | (41) |
| 2.5.4                    | 压阻式传感器的应用 ..... | (41) |
| 小 结                      | .....           | (42) |
| 思考与练习                    | .....           | (42) |
| <b>第3章 变磁阻式传感器</b>       | .....           | (44) |
| 3.1 自感式传感器 .....         | (44)            |      |
| 3.1.1 基本自感式传感器 .....     | (44)            |      |
| 3.1.2 差动变间隙式传感器 .....    | (45)            |      |
| 3.1.3 螺管型电感式传感器 .....    | (46)            |      |
| 3.1.4 测量电路 .....         | (46)            |      |
| 3.2 变压器式传感器 .....        | (49)            |      |
| 3.2.1 螺线管式差动变压器 .....    | (49)            |      |
| 3.2.2 变间隙式差动变压器传感器 ..... | (50)            |      |
| 3.2.3 测量电路 .....         | (51)            |      |
| 3.3 电涡流传感器 .....         | (53)            |      |
| 3.3.1 电涡流传感器的工作原理 .....  | (53)            |      |
| 3.3.2 电涡流传感器种类 .....     | (54)            |      |
| 3.3.3 测量电路 .....         | (55)            |      |
| 3.4 变磁阻式传感器的应用 .....     | (57)            |      |
| 3.4.1 自感式传感器的应用 .....    | (57)            |      |
| 3.4.2 变压器式传感器的应用 .....   | (58)            |      |
| 3.4.3 电涡流式传感器的应用 .....   | (59)            |      |
| 小 结                      | .....           | (60) |
| 思考与练习                    | .....           | (60) |
| <b>第4章 电容式传感器</b>        | .....           | (62) |
| 4.1 电容式传感器工作原理 .....     | (62)            |      |
| 4.1.1 变面积式电容传感器 .....    | (62)            |      |
| 4.1.2 变间隙式电容传感器 .....    | (64)            |      |
| 4.1.3 变介电常数式电容传感器 .....  | (65)            |      |
| 4.2 测量电路 .....           | (67)            |      |
| 4.2.1 调幅型电路 .....        | (67)            |      |
| 4.2.2 差动脉冲宽度调制电路 .....   | (68)            |      |
| 4.2.3 调频电路 .....         | (70)            |      |
| 4.3 实际中存在的问题及其解决办法 ..... | (70)            |      |
| 4.4 电容式传感器的应用 .....      | (71)            |      |
| 小 结                      | .....           | (73) |
| 思考与练习                    | .....           | (73) |

|                      |       |
|----------------------|-------|
| <b>第5章 热电偶传感器</b>    | (75)  |
| 5.1 热电偶工作原理          | (75)  |
| 5.1.1 热电偶工作原理        | (75)  |
| 5.1.2 热电偶的基本规律       | (76)  |
| 5.2 热电偶的材料、结构及种类     | (78)  |
| 5.2.1 热电偶材料          | (78)  |
| 5.2.2 热电偶结构          | (78)  |
| 5.2.3 热电偶种类及分度表      | (80)  |
| 5.3 热电偶的冷端补偿         | (83)  |
| 5.4 热电偶测温线路          | (85)  |
| 5.5 热电阻              | (87)  |
| 5.5.1 金属热电阻          | (87)  |
| 5.5.2 半导体热敏电阻        | (90)  |
| 5.5.3 集成温度传感器        | (91)  |
| 小  结                 | (96)  |
| 思考与练习                | (96)  |
| <b>第6章 光电式传感器</b>    | (98)  |
| 6.1 光电效应及光电器件        | (98)  |
| 6.1.1 光电效应           | (98)  |
| 6.1.2 光电管            | (98)  |
| 6.1.3 光敏电阻           | (99)  |
| 6.1.4 光敏晶体管          | (101) |
| 6.1.5 光电池            | (103) |
| 6.2 红外传感器            | (105) |
| 6.2.1 红外辐射           | (105) |
| 6.2.2 红外探测器          | (106) |
| 6.3 光电式传感器应用举例       | (107) |
| 6.3.1 光敏电阻传感器的应用     | (107) |
| 6.3.2 光敏晶体管的应用       | (108) |
| 6.3.3 光电池的应用         | (110) |
| 6.3.4 红外测温仪          | (111) |
| 6.4 光电开关和光电断续器       | (112) |
| 6.4.1 光电开关           | (112) |
| 6.4.2 光电断续器          | (113) |
| 小  结                 | (114) |
| 思考与练习                | (114) |
| <b>第7章 霍尔传感器</b>     | (115) |
| 7.1 霍尔元件工作原理         | (115) |
| 7.2 霍尔元件的基本结构和主要特性参数 | (116) |

|            |                     |              |
|------------|---------------------|--------------|
| 7.2.1      | 基本结构 .....          | (116)        |
| 7.2.2      | 主要特性参数 .....        | (117)        |
| 7.3        | 霍尔元件的测量电路及补偿 .....  | (118)        |
| 7.3.1      | 基本测量电路 .....        | (118)        |
| 7.3.2      | 温度误差的补偿 .....       | (118)        |
| 7.3.3      | 不等位电势的补偿 .....      | (120)        |
| 7.4        | 霍尔集成电路 .....        | (121)        |
| 7.5        | 霍尔传感器的应用 .....      | (123)        |
| 小 结        | .....               | (125)        |
| 思考与练习      | .....               | (125)        |
| <b>第8章</b> | <b>压电式传感器 .....</b> | <b>(127)</b> |
| 8.1        | 压电效应 .....          | (127)        |
| 8.1.1      | 石英晶体的压电效应 .....     | (127)        |
| 8.1.2      | 压电陶瓷的压电效应 .....     | (128)        |
| 8.2        | 压电材料 .....          | (129)        |
| 8.2.1      | 石英晶体 .....          | (129)        |
| 8.2.2      | 压电陶瓷 .....          | (129)        |
| 8.3        | 压电式传感器测量电路 .....    | (130)        |
| 8.3.1      | 压电器件的串联与并联 .....    | (130)        |
| 8.3.2      | 压电式传感器的等效电路 .....   | (130)        |
| 8.3.3      | 压电式传感器的测量电路 .....   | (131)        |
| 8.4        | 压电式传感器应用举例 .....    | (133)        |
| 小 结        | .....               | (136)        |
| 思考与练习      | .....               | (137)        |
| <b>第9章</b> | <b>光纤传感器 .....</b>  | <b>(138)</b> |
| 9.1        | 光纤传感器的原理结构及种类 ..... | (138)        |
| 9.1.1      | 光纤传感器的原理 .....      | (138)        |
| 9.1.2      | 光纤的结构 .....         | (139)        |
| 9.1.3      | 光纤的种类 .....         | (139)        |
| 9.2        | 光的传输原理 .....        | (140)        |
| 9.2.1      | 光的全反射定律 .....       | (140)        |
| 9.2.2      | 光纤的传光原理 .....       | (141)        |
| 9.3        | 光导纤维传感器的类型 .....    | (141)        |
| 9.3.1      | 光纤传感器的分类 .....      | (141)        |
| 9.3.2      | 功能型和非功能型光纤传感器 ..... | (142)        |
| 9.3.3      | 光纤传感器的主要部件 .....    | (143)        |
| 9.4        | 功能型光纤传感器 .....      | (144)        |
| 9.4.1      | 相位调制型光纤传感器 .....    | (144)        |

|        |                           |       |
|--------|---------------------------|-------|
| 9.4.2  | 光强调制型光纤传感器 .....          | (145) |
| 9.5    | 非功能型光纤传感器 .....           | (147) |
| 9.5.1  | 遮断光路的光强调制型光纤传感器 .....     | (147) |
| 9.5.2  | 改变光纤相对位置的光强调制型光纤传感器 ..... | (148) |
| 9.6    | 光纤传感器的应用 .....            | (149) |
| 9.6.1  | 光纤微位移测量传感器 .....          | (149) |
| 9.6.2  | 光纤流量传感器 .....             | (150) |
| 9.6.3  | 光纤图像传感器 .....             | (150) |
| 小    结 | .....                     | (152) |
| 思考与练习  | .....                     | (152) |
| 第 10 章 | 流量传感器及其应用 .....           | (153) |
| 10.1   | 概述 .....                  | (153) |
| 10.1.1 | 基本概念 .....                | (153) |
| 10.1.2 | 流量测量方法 .....              | (154) |
| 10.2   | 容积式流量传感器 .....            | (156) |
| 10.2.1 | 椭圆齿轮流量传感器 .....           | (156) |
| 10.2.2 | 腰轮流量传感器 .....             | (156) |
| 10.2.3 | 刮板式流量传感器 .....            | (157) |
| 10.3   | 差压式流量传感器 .....            | (157) |
| 10.3.1 | 测量原理与流量方程 .....           | (158) |
| 10.3.2 | 标准节流装置 .....              | (159) |
| 10.3.3 | 差压计 .....                 | (163) |
| 10.3.4 | 差压式流量传感器的安装 .....         | (164) |
| 10.4   | 速度式流量传感器 .....            | (167) |
| 10.4.1 | 电磁流量传感器 .....             | (167) |
| 10.4.2 | 涡轮流量传感器 .....             | (170) |
| 10.4.3 | 超声波流量传感器 .....            | (172) |
| 10.5   | 流体阻力式流量传感器 .....          | (174) |
| 10.5.1 | 转子流量传感器 .....             | (174) |
| 10.5.2 | 靶式流量传感器 .....             | (177) |
| 10.6   | 流体振动式流量传感器 .....          | (178) |
| 10.6.1 | 涡街流量传感器 .....             | (178) |
| 10.6.2 | 旋进式旋涡流量传感器 .....          | (180) |
| 10.7   | 质量流量传感器 .....             | (181) |
| 10.7.1 | 直接式质量流量传感器 .....          | (181) |
| 10.7.2 | 间接式质量流量传感器 .....          | (183) |
| 10.7.3 | 温度、压力补偿式质量流量传感器 .....     | (184) |
| 10.8   | 其他流量传感器 .....             | (184) |
| 10.8.1 | 冲量式流量传感器 .....            | (184) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 10.8.2 插入式流量传感器 .....                 | (185) |
| 小    结 .....                          | (186) |
| 思考与练习 .....                           | (186) |
| <b>第 11 章 检测装置的信号处理及接口技术</b> .....    | (188) |
| 11.1 信号的放大与隔离技术 .....                 | (188) |
| 11.1.1 运算放大器 .....                    | (188) |
| 11.1.2 测量放大器 .....                    | (189) |
| 11.1.3 隔离放大器 .....                    | (190) |
| 11.1.4 程控测量放大器 PGA .....              | (192) |
| 11.2 信号变换技术 .....                     | (193) |
| 11.2.1 0~10mA 的电压/电流变换 (V/I 变换) ..... | (194) |
| 11.2.2 4~20mA 的电压/电流变换 (V/I 变换) ..... | (194) |
| 11.3 过程输入通道 .....                     | (195) |
| 11.3.1 模拟量输入通道 .....                  | (195) |
| 11.3.2 A/D 转换器及其与单片机的接口 .....         | (195) |
| 11.4 信号的非线性补偿技术 .....                 | (199) |
| 11.4.1 线性化处理办法 .....                  | (199) |
| 11.4.2 利用微机进行非线性化处理 .....             | (203) |
| 小    结 .....                          | (204) |
| 思考与练习 .....                           | (205) |
| <b>第 12 章 自动检测技术的综合应用</b> .....       | (206) |
| 12.1 传感器的选用原则 .....                   | (206) |
| 12.2 综合应用举例 .....                     | (207) |
| 12.2.1 高炉炼铁自动检测与控制 .....              | (207) |
| 12.2.2 蒸馏塔自动检测与控制 .....               | (211) |
| 12.2.3 传感器在汽车中的应用 .....               | (212) |
| 12.2.4 传感器在空气污染监测中的应用 .....           | (215) |
| 12.2.5 IC 卡智能水表的应用 .....              | (217) |
| 12.2.6 传感器在全自动洗衣机中的应用 .....           | (218) |
| 小    结 .....                          | (219) |
| 思考与练习 .....                           | (219) |
| <b>第 13 章 实    验</b> .....            | (220) |
| 13.1 检测与转换技术实验须知 .....                | (220) |
| 13.2 检测与转换技术实验报告书写要点 .....            | (221) |
| 13.3 实验 .....                         | (222) |
| 实验一 金属箔式应变片——全桥性能实验 .....             | (222) |
| 实验二 直流全桥的应用——电子秤实验 .....              | (223) |
| 实验三 湿敏传感器实验 .....                     | (224) |

|      |                            |       |
|------|----------------------------|-------|
| 实验四  | 差动变压器的应用——振动测量实验 .....     | (225) |
| 实验五  | 电涡流传感器的位移特性实验 .....        | (227) |
| 实验六  | 电容式传感器的位移特性实验 .....        | (228) |
| 实验七  | 霍尔传感器的应用 .....             | (229) |
| 实验八  | 压电式传感器振动实验 .....           | (231) |
| 实验九  | 光纤传感器的测速实验 .....           | (232) |
| 实验十  | 光电式传感器转速测量实验 .....         | (232) |
| 13.4 | THSRZ-1 型传感器系统综合实验装置 ..... | (233) |
| 参考文献 | .....                      | (235) |

## 检测技术的基础知识

在信息社会的一切活动领域中,检测是科学地认识各种现象的基础性方法和手段。现代化的检测手段在很大程度上决定了生产、科学技术的发展水平,而科学技术的发展又为检测技术提供了新的理论基础和制造工艺,同时对检测技术提出了更高的要求。检测技术是所有科学技术的基础,是自动化技术的支柱之一。

自动检测与转换技术是一门以研究检测系统中信息提取、转换及处理的理论和技术为主要内容的应用技术学科,本章是自动检测与转换技术的理论基础。

### 1.1 测量的基本概念

#### 1.1.1 测量

测量是人们借助专门的技术和设备,通过实验的方法,把被测量与作为单位的标准量进行比较,以确定出被测量是标准量的多少倍数的过程,所得的倍数就是测量值。测量结果包括数值大小和测量单位两部分,数值大小可以用数字、曲线或图形表示。测量的目的是为了精确获取表征被测量对象特征的某些参数的定量信息。

检测是意义更为广泛的测量。在自动化领域中,检测的任务不仅是对成品或半成品的检验和测量,而且为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象并使之处于给定的最佳状态,需要随时检查和测量各种参量的大小和变化等情况。在不强调它们之间细微差别的一般工程技术应用领域中,测量和检测可以相互替代。

#### 1.1.2 测量方法

为了获得精确可靠的数据,选择合理的测量方法非常重要。测量方法多种多样,从不同的角度有不同的分类方法。

##### 1. 电测法和非电测法

在现代测量中,人们广泛采用电测方法测量非电量。电测方法是指在检测回路中含有测量信息的电信号转换环节,可以将被测的非电量转换为电信号输出。例如,电容式传感器中的交流电桥,将被测参数所引起的电容变化量转换为电压信号输出。电测法可以获得很高的灵敏度和精确度,输出信号可实现远距离传输,便于实现测量过程的自动化、数字化和智能化。显然,除电测法以外的测量方法都属于非电测法,如丈量土地,用体温计测体温,用弹簧管压力表测压等。

## 2. 直接测量和间接测量

直接测量就是用预先标定好的测量仪表直接读取被测量的测量结果。例如，用万用表测量电压、电流、电阻等，简单而迅速。间接测量需利用被测量与某中间量的函数关系，先测出中间量，再通过相应的函数关系计算出被测量的数值，过程较为复杂。例如，用伏安法测量电阻值，以及通过测量导线电阻、直径及长度求电阻率等，都属于间接测量。

## 3. 静态测量和动态测量

根据被测量是否随时间变化，可分为静态测量和动态测量。静态测量是测量那些不随时间变化或变化很缓慢的物理量；动态测量则是测量那些随时间而变化的物理量。例如，用光导纤维陀螺仪测量火箭的飞行速度和方向就属于动态测量，而超市中物品的称重则属于静态测量。应当注意的是，静态与动态是相对的，可以把静态测量看作是动态测量的一种特殊方式。

## 4. 接触式测量和非接触式测量

根据测量时是否与被测对象相互接触而划分为接触式测量和非接触式测量。例如，利用辐射式温度传感器进行温度的测量就属于非接触式测量。这种方法不会影响被测对象的运行工况，检测速度快。

## 5. 模拟式测量和数字式测量

根据测量结果的显示方式，可分为模拟式测量和数字式测量。模拟式测量是指测量结果可根据仪表指针在标尺上的定位进行连续读取的方法；数字式测量是指测量结果以数字的形式直接给出的方法。一般要求精密测量时多采用数字式测量。

此外，测量结果还可以用计算机屏幕画面的方式显示。例如，连续变化的曲线、数据表格、工艺流程图及各种动态数据等，可通过屏幕画面提供信息，实现对整个生产过程的监视与控制。

在选择测量方法时，应综合考虑被测量本身的特点，所要求的精确度、灵敏度，以及测量的环境要求，力求测量科学、简单可靠。

# 1.2 测量误差及其分类

## 1.2.1 测量误差及其表示方法

在一定条件下被测物理量客观存在的实际值，称为真值。真值是一个理想的概念。在实际测量时，由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响以及人们辨识能力所限等因素，使得测量值与其真值之间不可避免地存在着差异。测量值与真值之间的差值称为测量误差。

测量误差可用绝对误差表示，也可用相对误差和引用误差表示。

### 1. 绝对误差

绝对误差  $\Delta x$  是指测量值  $x$  与真值  $L_0$  之间的差值，即

$$\Delta x = x - L_0 \quad (1.1)$$

由于真值  $L_0$  的不可知性，在实际应用时，常用实际真值  $L$  代替，即用被测量多次测量的

平均值或上一级标准仪器测得的示值作为实际真值  $L$ ，故有

$$\Delta x = x - L \tag{1.2}$$

绝对误差是一个有符号、大小、量纲的物理量，它只表示测量值与真值之间的偏离程度和方向，而不能说明测量质量的好坏。

在实际测量中，还经常用到修正值  $c$ 。所谓“修正值”是指与绝对误差数值相等但符号相反的数值，即  $c = -\Delta x = L - x$ 。修正值给出的方式可能是具体的数值、一条曲线、公式或数表。显然将测量值与修正值相加就可以得到实际真值。

2. 相对误差

相对误差常用百分比的形式来表示，一般多取正值。相对误差可分为实际相对误差、示值（标称）相对误差和最大引用（相对）误差等。

（1）实际相对误差  $\gamma$ ：是用测量值的绝对误差  $\Delta x$  与其实实际真值  $L$  的百分比来表示的相对误差，即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% \tag{1.3}$$

（2）示值（标称）相对误差  $\gamma_x$ ：是用测量值的绝对误差  $\Delta x$  与测量值  $x$  的百分比来表示的相对误差，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \tag{1.4}$$

在检测技术中，由于相对误差能够反映出测量技术水平的高低，因此更具有实用性。例如，测量两地距离为 1 000km 的路程时，若测量结果为 1 001km，则测量结果的绝对误差是 1km，示值相对误差为 1‰；如果把 100m 长的一匹布量成 101m，尽管绝对误差只有 1m，与前者 1km 相比较小很多，但 1% 的示值相对误差却比前者 1‰ 大得多，这说明后者测量水平较低。

（3）引用（相对）误差：是指测量值的绝对误差  $\Delta x$  与仪器的量程  $A_m$  的百分比。引用误差的最大值叫做最大引用（相对）误差  $\gamma_m$ ，即

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% \tag{1.5}$$

由于式（1.5）中的分子、分母都由仪表本身所决定，所以在测量仪表中，人们经常使用最大引用误差评价仪表的性能。最大引用误差又称为满度（引用）相对误差，是仪表基本误差的主要形式，故也常称之为仪表的基本误差，它是仪表的主要质量指标。基本误差去掉百分号（%）后的数值定义为仪表的精度等级。精度等级规定取一系列标准值，通常用阿拉伯数字标在仪表的刻度盘上，等级数字外有一圆圈。我国目前规定的精度等级有：0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0 等级别。精度等级数值越小，测量的精确度越高，仪表的价格越贵。

由于仪表都有一定的精度等级，因此其刻度盘的分格值不应小于仪表的允许误差（绝对误差）值，小于允许误差的分度是没有意义的。

在正常工作条件下使用时，工业上常用的各等级仪表的基本误差不超过表 1.1 所规定的值。

表 1.1 仪表的精度等级和基本误差

| 精度等级 | 0.1   | 0.2   | 0.5   | 1.0   | 1.5   | 2.5   | 4.0   | 5.0   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 基本误差 | ±0.1% | ±0.2% | ±0.5% | ±1.0% | ±1.5% | ±2.5% | ±4.0% | ±5.0% |

【例 1.1】 某温度计的量程范围为 0~500℃，校验时该表的最大绝对误差为 6℃，试确定该仪表的精度等级。

解：根据题意知  $|\Delta x|_m = 6^\circ\text{C}$ ， $A_m = 500^\circ\text{C}$ ，代入式 (1.5) 中

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% = \frac{6}{500} \times 100\% = 1.2\%$$

从表 1.1 中可知，该温度计的基本误差介于 1.0%~1.5%，因此该表的精度等级应定为 1.5 级。

【例 1.2】 现有 0.5 级的 0~300℃ 和 1.0 级的 0~100℃ 的两个温度计，欲测量 80℃ 的温度，试问选用哪一个温度计好？为什么？

解：0.5 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80℃ 可能出现的最大示值相对误差分别为

$$|\Delta x|_{m1} = \gamma_{m1} \cdot A_{m1} = 0.5\% \times (300 - 0) = 1.5$$
$$\gamma_{x1} = \frac{|\Delta x|_{m1}}{x} \times 100\% = \frac{1.5}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

1.0 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80℃ 时可能出现的最大示值相对误差分别为

$$|\Delta x|_{m2} = \gamma_{m2} \cdot A_{m2} = 1.0\% \times (100 - 0) = 1$$
$$\gamma_{x2} = \frac{|\Delta x|_{m2}}{x} \times 100\% = \frac{1}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果  $\gamma_{x1} > \gamma_{x2}$ ，显然用 1.0 级温度计比 0.5 级温度计测量时，示值相对误差反而小。因此在选用仪表时，不能单纯追求高精度，而是应兼顾精度等级和量程，最好使测量值落在仪表满度值的 2/3 以上区域内。

## 1.2.2 测量误差的分类

在测量过程中，由于被测量千差万别，影响测量工作的因素非常多，使得测量误差的表现形式也多种多样，因此测量误差有不同的分类方法。

### 1. 按误差表现的规律划分

(1) 系统误差。对同一被测量进行多次重复测量时，若误差固定不变或者按照一定规律变化，这种误差称为系统误差。

系统误差主要是由于测量系统本身不完备或者环境条件的变迁造成的。例如，所使用仪器仪表的误差、测量方法的不完善、各种环境因素的波动，以及测量者个体差异等原因。

系统误差反映了测量值偏离真值的程度，可用“正确度”一词表征。

系统误差是有规律性的。按其表现的特点可分为固定不变的恒值系差和遵循一定规律变化的变值系差。系统误差一般可通过实验或分析的方法，查明其变化的规律及产生的原因，因此它是可以预测的，也是可以消除的。

(2) 随机误差。对同一被测量进行多次重复测量时，若误差的大小随机变化、不可预知，这种误差称为随机误差。

随机误差是由很多复杂因素的微小变化引起的，尽管这些不可控微小因素中的一项对测量值的影响甚微，但这些因素的综合作用造成了各次测量值的差异。

随机误差反映了测量结果的“精密度”，即各个测量值之间相互接近的程度。

对随机误差的某个单值来说，是没有规律、不可预料的，但从多次测量的总体上看，随机误差又服从一定的统计规律，大多数服从正态分布规律。因此可以用概率论和数理统计的方法，从理论上估计其对测量结果的影响。

应该指出，在任何一次测量中，系统误差和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。测量结果明显地偏离其实际值所对应的误差，称为粗大误差或疏忽误差，又叫过失误差。含有粗大误差的测量值称为坏值。

产生粗大误差的原因有操作者的失误、使用有缺陷的仪器、实验条件的突变等。

正确的测量结果中不应包含粗大误差。实际测量时必须根据一定的准则判断测量结果中是否包含有坏值，并在数据记录中将所有的坏值都予以剔除。同时还可采取提高操作人员的工作责任心，以及对测量仪器进行经常性检查、维护、校验和修理等方法，减少或消除粗大误差。

(4) 缓变误差。数值随时间而缓慢变化的误差称为缓变误差。

缓变误差产生的原因主要是测量仪表零件的老化、失效、变形等原因造成的。这种误差在短时间内不易察觉，但在较长的时间后会显露出来。

通常可以采用定期校验的方法及时修正缓变误差。

## 2. 按被测量与时间关系划分

(1) 静态误差。被测量稳定不变时所产生的测量误差称为静态误差。

(2) 动态误差。被测量随时间迅速变化时，系统的输出量在时间上却跟不上输入的变化，这时所产生的误差称为动态误差。例如，用水银温度计插入 100℃ 沸水中，水银柱不可能立即上升到 100℃，此时读数必然产生动态误差。

此外，按测量仪表的使用条件分类，可将误差分为基本误差和附加误差；按测量技能和手段分类，误差又可分为工具误差和方法误差。

## 1.3 测量误差的分析与处理

### 1.3.1 随机误差的统计特性

#### 1. 随机误差的特征

随机误差就单次测量而言是无规律的，其大小、方向均不可预知，既不能用实验的方法消除，也不能修正，但当测量次数无限增加时，该测量列中的各个测量误差出现的概率密度分布服从正态分布，即

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.6)$$

式中， $\Delta x = x - L$  为测量值的绝对误差； $\sigma$  为分布函数的标准误差。图 1.1 示出了相应的正态分布曲线。

测量结果符合正态分布曲线的例子非常多，例如，某校男生身高的分布，交流电源电压的波动等。由式 (1.6) 和图 1.1 不难看出，具有正态分布的随机误差具有以下 4 个特征。