



高职高专“十一五”规划教材

JIANC E YU
ZHUANHUANJISHU

郑 骊 主编
霍 平 主审

检测与转换技术



化学工业出版社

... 检测与转换技术 ... 郑骊 主编 ... 霍平 主审 ...

高职高专“十一五”规划教材

检测与转换技术

郑 骊 主 编
霍 平 主 审

ISBN 978-7-122-06182-1

本书共分 6 章，主要介绍了检测技术的基本概念、检测系统的组成、检测误差的分析、检测系统的校准、检测系统的维护、检测系统的故障排除等。本书可作为高职高专院校相关专业教材，也可供从事检测工作的工程技术人员参考。

（自 2007 年 12 月出版以来，深受广大读者好评）

化学工业出版社 地址：北京市东城区黄城根北街 25 号 邮编：100029
电话：(010) 63996802 传真：(010) 63996803 网址：www.cip.com.cn

本书在编写过程中，参考了国内外有关文献，并得到了许多同行的帮助，在此表示衷心的感谢。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。

化学工业出版社 地址：北京市东城区黄城根北街 25 号 邮编：100029
电话：(010) 63996802 传真：(010) 63996803 网址：www.cip.com.cn

本书作为高职院校的工科类专业教材,为了符合高职教育体系的教学需求,贯彻理论以够用为度,注重工程应用的编写原则。编写时将传统的“传感器原理与应用”、“检测与转换”、“电工测量仪表”等课程内容进行了改革与整合。

全书共12章,分别介绍了检测与转换技术的理论基础、电测量指示仪表、热电偶型传感器、电阻式传感器、压电式传感器、变磁阻式传感器、电容式传感器、霍尔传感器、光电式传感器、数字式传感器以及其他传感器等,最后将现在流行的虚拟仪器检测系统做了简单介绍。

本书可以作为高职高专院校电气自动化技术、仪器仪表、检测技术等专业的教材,也可以供给成人高等教育类的职工大学、夜大和函授大学教学使用,还可以提供给相关工程技术人员和业余爱好者学习参考。

检测与转换技术

主编 郑 骊
副主编 廉 静

图书在版编目(CIP)数据

检测与转换技术/郑骊主编. —北京:化学工业出版社, 2009.2

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-04219-4

I. 检… II. 郑… III. ①自动检测-高等学校:技术学院-教材②传感器-高等学校:技术学院-教材 IV. TP274 TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第192102号

责任编辑:廉 静 张建茹

责任校对:吴 静

装帧设计:周 遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 字数370千字 2009年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:26.00元

版权所有 违者必究

前 言

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,担负着培养高素质技术应用型人才的重任,在实施科教兴国战略和人才强国战略中具有特殊的重要地位。“以就业为导向”是21世纪高职高专教育改革的重要思路,这要求高职高专教材必须理论联系实际,适应社会发展需要,坚持“手脑并用、做学合一”的教学原则,将职业能力的培养贯穿始终。

本书根据高职高专教育“淡化理论,够用为度,培养技能,重在应用”的原则,充分考虑传感器技术、检测技术的实际应用和发展情况,按照高职高专教育改革的要求,将“传感器原理与应用”、“检测与转换”、“电工测量仪表”等课程内容进行整合,结合当前流行的先进技术及产品,突出应用型知识理论的学习,注重工程实际应用能力和创新精神的培养。本书在编写过程中增加了应用实例、产品介绍,力求实现针对性、实用性的特色。

本书第1章介绍检测与转换技术的理论基础;第2章介绍电测量仪表;第3章~第10章介绍热电偶型传感器、电阻式传感器、压电式传感器、电感式传感器、电涡流式传感器、电容式传感器、霍尔传感器、光电式传感器、角度-数字编码器、光栅传感器;第11章介绍红外传感器、光纤传感器等新型传感器;第12章简单介绍了虚拟仪器检测系统。

为了加强读者理论联系实际的能力,提高工程实践水平,本书每章配有传感器的常用型号、应用实例与思考与练习题,在附录中配备了国际单位制(SI)基本单位和具有专门名称的导出单位、常用电测量指示仪表及其相关符号、几种常用传感器性能比较以及热电阻、热电偶的分度表等相关资料。

本书可作为高职高专院校电气自动化技术、仪器仪表、检测技术等专业的教材,也可以供给成人高等教育类的职工大学、夜大和函授大学教学使用,还可以提供给相关工程技术人员和业余爱好者学习参考。

本书由郑骊主编,耿玉茹为副主编,第1、2章由耿玉茹编写,第3、4、5章由蔡琴编写,第6、7、8章由李俊杰编写,第9、10、11章由郑骊编写,第12章由吴睿编写,耿玉茹、蔡琴、李俊杰、郑骊编写了附录。郑骊负责全书的组织、修改和定稿工作,霍平高级工程师百忙中审阅了书稿,提出了很多宝贵意见。

本书在编写过程中,参阅了多种同类教材和专著,在此向其编、著者致谢。同时得到了化学工业出版社有关同志的大力支持,在此也深表谢意。传感器与检测技术涉及的学科众多,编者学识有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。对于选用本教材的教师,我们免费提供电子版教案,如有需要请发邮件至 Lianjing_2003@126.com。

编者

2008年8月

目 录

第 1 章 检测与转换技术的理论基础	1
1.1 检测与转换技术的基本概念	1
1.2 检测的基本方法	3
1.3 测量误差的概念和分类	4
1.4 测量误差的估计和处理	9
1.5 传感器及其特性	14
本章小结	19
思考与练习题	20
第 2 章 电测量指示仪表	21
2.1 电测量指示仪表的基本知识	21
2.2 磁电系仪表	24
2.3 电磁系仪表	28
2.4 电动系仪表	32
2.5 感应系仪表	35
2.6 数字仪表示例	38
本章小结	43
思考与练习题	43
第 3 章 热电偶型传感器	44
3.1 温度	44
3.2 热电偶	45
3.3 热电偶的测量线路与温度补偿	51
3.4 热电偶型传感器的常用型号	53
3.5 热电偶型传感器的应用	54
本章小结	57
思考与练习题	57
第 4 章 电阻式传感器	59
4.1 电阻应变式传感器	59
4.2 扩散型压阻式传感器	72
4.3 热电阻传感器	79
4.4 热敏电阻	83

目 录

本章小结	88
思考与练习题	89
第 5 章 压电式传感器	90
5.1 压电效应与压电材料	90
5.2 压电式传感器的测量电路	93
5.3 压电式传感器的常用型号	97
5.4 压电式传感器的应用	98
本章小结	100
思考与练习题	101
第 6 章 变磁阻式传感器	102
6.1 电感式传感器	102
6.2 电涡流式传感器	114
本章小结	121
思考与练习题	122
第 7 章 电容式传感器	123
7.1 电容式传感器的结构与工作原理	123
7.2 电容式传感器的测量转换电路	126
7.3 电容式传感器的特点	128
7.4 电容式接近开关	129
7.5 电容式传感器的常用型号	131
7.6 电容式传感器的应用	132
本章小结	135
思考与练习题	135
第 8 章 霍尔传感器	136
8.1 霍尔元件	136
8.2 霍尔元件的使用	138
8.3 霍尔传感器的常见型号	142
8.4 霍尔传感器的应用	143
本章小结	146
思考与练习题	147
第 9 章 光电式传感器	148
9.1 光电效应	148
9.2 光电式传感器器件	149
9.3 光电式传感器的常用型号	158

9.4 光电式传感器的应用	161
本章小结	164
思考与练习题	165
第 10 章 数字式传感器	167
10.1 角度-数字编码器	167
10.2 光栅传感器	173
本章小结	178
思考与练习题	178
第 11 章 其他传感器	180
11.1 红外传感器	180
11.2 光纤传感器	185
11.3 超声波传感器	190
11.4 其他新型传感器简介	195
本章小结	207
思考与练习题	208
第 12 章 虚拟仪器系统	209
12.1 概述	209
12.2 虚拟仪器的组成结构	211
12.3 图形化编程语言——LabVIEW 简介	212
12.4 基于 LabVIEW 虚拟仪器在检测技术中的应用实例	218
本章小结	225
思考与练习题	225
附录	226
附录 A 国际单位制 (SI) 基本单位和具有专门名称的导出单位	226
附录 B 常用电测量指示仪表及其相关符号	227
附录 C 几种常用传感器性能比较	228
附录 D 热电阻分度表	229
附录 E 热电偶分度表	229
参考文献	231

第 1 章 检测与转换技术的理论基础

1.1 检测与转换技术的基本概念

检测与转换技术是自动检测技术和自动转换技术的总称，它是以研究自动检测系统中的信息获取、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。信息获取是指用组成的测试系统，从自然界诸多的被检查与测量量（物理量、化学量、生物量与社会量）中提取出有用的信息（一般都是电信号）。信息转换是将所提取的有用信息，根据下一单元需要，在幅值、功率及精度等方面进行处理和转换。信息处理是测试的真正目的，是指把已经获得的信息进行加工、运算、分析和综合。

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，是信息科学最前端的一个阵地，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，成为人们认识自然、改造自然的有利工具。

1.1.1 检测系统的组成

由于检测与控制对象常常为非电量，这就需要通过传感器转换为电量，然后经过一系列的处理，将非电量参数显示出来，其原理框图如图 1-1 所示。

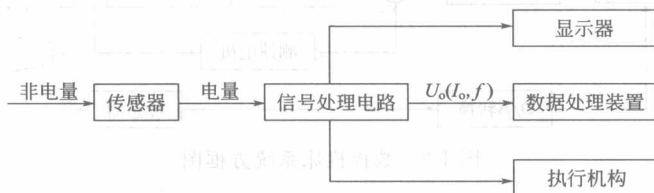


图 1-1 自动检测系统原理框图

(1) 传感器

传感器是把被测非电量转换成为与之有确定对应关系，且便于应用的某些物理量（通常为电量）的测量装置。

传感器已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程、甚至文物保护等极其广泛的领域。从茫茫的太空到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。传感器获得信息的正确与否，关系到整个检测与转换系统的精度。如果传感器的误差很大，后面的信号处理电路、显示器、执行机构、数据处理装置等设备的精度再高也将难以提高整个检测系统的精

度。因此，传感器是检测与转换系统的首要环节。

(2) 信号处理电路

信号处理电路的作用是把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的电压、电流或频率信号等，以推动后级的显示器、数据处理装置及执行机构。

(3) 显示器

为了记录检测的过程与结果，常常需要将信号处理电路传送过来的电信号以比较直观的形式显示出来，以供观测和分析，这就需要有显示器。目前常用的显示器有四类：模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。

(4) 数据处理装置

数据处理装置用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断、线性变换，对动态测试结果作频谱分析（幅值谱分析、功率谱分析）、相关分析等。数据处理结果通常送给显示器和执行机构，以显示运算处理的各种数据或控制被控对象。在不带数据处理装置的自动检测系统中，显示器和执行机构由信号处理电路直接驱动。

(5) 执行机构

所谓执行机构通常是指各种继电器、电磁阀门等在电路中起通断、控制、调节、保护等作用的电气设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号，作为自动控制系统的控制信号，去驱动这些执行机构。

当代检测系统越来越多地使用计算机或微处理器来控制执行机构的工作。检测技术、计算机技术与执行机构等综合配合就能构成某些工业控制系统。如图 1-2 所示的数控机床系统就是一个典型的例子。根据对工件 P 的加工要求，事先编制出控制程序，作为系统的输入量送入计算机。与工具架连接在一起的传感器，将刀具的位置信息变换为电压信号，再经过 D/A 转换器变为数字信号，并作为反馈信号送入计算机。计算机将输入信号与反馈信号比较，得到偏差信号，随后经 A/D 转换器将数字信号转变为模拟电压信号，经功率放大后驱动电动机，带动刀具按期望的规律运动。

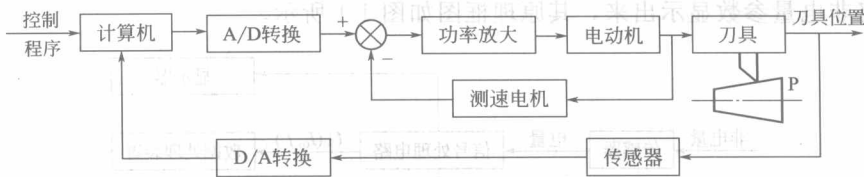


图 1-2 数控机床系统方框图

1.1.2 检测技术的发展趋势

近年来，随着半导体、计算机技术的发展，新型或具有特殊功能的传感器不断涌现出来，检测装置也向小型化、固体化及智能化方向发展，应用领域也越加广泛。当前，检测技术的发展主要表现在以下几个方面。

(1) 提高检测系统的检测分辨率、精度、稳定性和可靠性

随着科学技术的不断发展，对检测系统测量精度的要求也相应地在提高。近年来，人们研制出许多高精度的检测仪器以满足各种需要。例如，用直线光栅测量直线位移时，测量范围可达二三十米，而分辨率可达微米级。从 20 世纪 60 年代开始，人们对传感器的可靠性和故障率的数学模型进行了大量的研究，使得检测系统的可靠性及寿命大幅度地提高。现在许

多检测系统可以在极其恶劣的环境下连续工作数十万小时。目前人们正在不断努力进一步提高检测系统的各项性能指标。

(2) 开展基础研究,寻找新原理、新材料、新工艺

传感器的工作机理是基于各种效应和定律,由此启发人们进一步探索具有新效应的敏感功能材料,并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器件,这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。

(3) 发展集成化、多功能化的传感器

把多个功能不同的传感元件集成在一起,除可同时进行多种参数的测量外,还可对这些参数的测量结果进行综合处理和评价,反映出被测系统的整体状态。为同时测量几种不同被测参数,还可将几种不同的传感器元件复合在一起,作成集成块。例如一种温、气、湿三功能陶瓷传感器已经研制成功。

(4) 发展智能化的传感器

智能传感器是传感器技术与大规模集成电路技术相结合的产物,它的实现取决于传感技术与半导体集成化工艺水平的提高与发展。随着微电子技术的发展,现在已可以将十分复杂的信号处理和电路集成到单块芯片中去。传感器的输出不再是模拟量,而是符合某种协议格式(如可即插即用)的数字信号。从而可以通过企业内部网络,也可以通过 Internet 网,实现多个系统之间的数据交换和共享,从而构成网络化的检测系统。还可以远在千里之外,随时随地浏览现场工况,实现远程调试、远程故障诊断、远程数据采集和实时操作。这类传感器具有多功能、高性能、体积小、适宜大批量生产和使用方便等优点,是传感器重要的发展方向之一。

1.2 检测的基本方法

一个物理量的检测可以通过不同的方法实现。检测方法选择得正确与否,直接关系到检测结果的可靠程度,也关系到检测与控制系统的经济性和可行性。

1.2.1 检测方法的分类

检测方法的分类形式有多种,从不同的角度出发有不同的分类方法。下面介绍几种常见的分类方法。

(1) 按测量手续分类

按测量手续分有直接测量、间接测量、组合测量。

① 直接测量 将被测量与标准量直接比较,或用预先经标准量标定好的测量仪器或仪表进行测量,从而直接测得被测量的数值。例如,用弹簧管式压力表测量流体压力。直接测量的缺点是测量精度不很高,优点是测量过程简单、迅速,在工程上广泛采用该方法。

② 间接测量 被测量本身不易直接测量,但可以通过与被测量有一定函数关系的其他量(一个或几个)的测量结果求出(如用函数解析式的计算、查函数曲线或表格)被测量数值,这就是间接测量。

③ 组合测量 如果被测量有多个,而且被测量又与某些可以通过直接或间接测量得到结果的其他量存在着一定的函数关系,则可先测量这几个量,再求解函数关系组成的联立方程组,从而得到多个被测量的数值。显然,它是一种兼用直接测量和间接测量的方式。

(2) 按被测量的性质分类

按被测量的性质分类有时域测量、频域测量、数据域测量和随机测量。

① 时域测量 也叫做瞬态测量,主要测量被测量随时间的变化规律。典型的例子是用示波器观察脉冲信号的上升沿、下降沿以及动态电路的暂态过程等。

② 频域测量 也称为稳态测量,主要目的是获取被测量与频率之间的关系。如用频谱分析仪分析信号的频谱,测量放大器的幅频特性、相频特性等。

③ 数据域测量 也称为逻辑量测量,主要是用逻辑分析仪等设备对数字量或电路的逻辑状态进行测量。数据域测量可以同时观察多条数据通道上的逻辑状态,或者显示某条数据线上的时序波形,还可以借助计算机分析大规模集成电路芯片的逻辑功能等。随着微电子技术发展的需要,数据域测量及其测量的智能化、自动化越来越显得重要。

④ 随机测量 随机测量也叫统计测量,主要是对各类噪声信号进行动态测量和统计分析。

除了上述几种常见的分类方法外,还有其他一些分类方法,如根据被测量是否随时间变化可分为静态测量和动态测量;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;根据测量时是否与被测对象接触,可分为接触式测量和非接触式测量。

1.2.2 检测方法的选择原则

选择测量方法时,要综合考虑下列几个主要方面。

① 从被测量本身的特点来考虑。例如,按照被测量的性质可以分为时域测量、频域测量、数据域测量和随机测量四种。被测量的性质不同,采用的测量仪器和测量方法当然不同。又如,对被测对象的情况要了解清楚,被测参数是否线性、数量级如何、对波形和频率有何要求、对测量过程的稳定性有无要求、有无抗干扰要求以及其他要求等。

② 从测量所得的精确度和灵敏度来考虑。工程测量和精密测量对这两者的要求有所不同,要注意选仪器、仪表的准确度等级,还要选择测量误差满足要求的测量技术。如果属于精密测量,还要按照误差理论的要求进行比较严格的数据处理。

③ 考虑测量环境是否符合测量设备和测量技术状况要求,尽量减少仪器、仪表对被测电路状态的影响。

④ 测量方法简单可靠,测量原理科学,尽量减少原理性误差。

在测量之前,必须先综合考虑以上诸方面的情况,恰当选择测量仪器、仪表及设备,采用合适的测量方法和测量技术,才能较好地完成测量任务。

1.3 测量误差的概念和分类

其工程实践和科学实验提出,自动检测系统的任务是正确及时地掌握各种信息,大多数情况下是要获取被测对象信息的大小,即被测量的大小。这样,信息采集的主要含义就是测量及取得测量数据。

1.3.1 测量技术中的部分名词

(1) 等精度测量

在同一条件下所进行的一系列重复测量称为等精度测量。

(2) 非等精度测量

在多次测量中，如对测量结果精确度有影响的一切条件不能完全维持不变称为非等精度测量。

(3) 真值

被测量本身所具有的真正值称为真值。被测量的真值是一个理想的概念，一般是不知道的。但在某些特定情况下，真值又是可知的，如一个整圆周角为 360° 。

(4) 实际值

误差理论指出，在排除系统误差的前提下，对于精密测量，当测量次数无限多时，测量结果的算术平均值极接近于真值，因而可将它视为被测量的真值。但是测量次数是有限的，故按有限测量次数得到的算术平均值只是统计平均值的近似值。而且由于系统误差不可能完全被排除，故通常只能把精度更高一级的标准器具所测得的值作为“真值”。为了强调它并非真正的“真值”，故把它称为实际值。

(5) 标称值

测量器具上所标出来的数值。

(6) 示值

由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

(7) 测量误差

用器具进行测量时，所测量出来的数值与被测量的实际值之间的差值。

任何测试系统的测量结果都有一定的误差，即所谓精度。一般来说，不存在没有误差的测量结果，也不存在没有精度要求的测试系统。精度（误差）是一项重要的技术指标。

1.3.2 误差的分类

1.3.2.1 按表示方法分类

(1) 绝对误差

绝对误差是示值 A_x 与被测量真值 A_0 之间的差值。则绝对误差为

$$\Delta x = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

由于一般无法求得真值 A_0 ，在实际应用时常用精度高一级的标准器具的示值（作为实际值） A 代替真值 A_0 。必须指出 A 并不等于 A_0 ，一般来说 A 总比 A_x 更接近于 A_0 。

A_x 与 A 之差常称为器具的示值误差，记为

$$\Delta x = A_x - A \quad (1-2)$$

通常以此值来代表绝对误差，绝对误差一般只适用于标准器具的校准。

与绝对误差的绝对值 Δx 大小相等，但符号相反的值，称为修正值，常用 C 表示，如

$$C = -\Delta x = A - A_x \quad (1-3)$$

通过检定，可以由上一级标准给出测试系统的修正值。利用修正值便可求出测试系统的实际值

$$A = A_x - C \quad (1-4)$$

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。在某些测试系统中，为了提高测量精度，修正值可以预先编制成有关程序存储于仪器中，所得测量结果自动对误差进行修正。

(2) 相对误差

相对误差是绝对误差 Δx 与被测量的约定值之比, 它较绝对误差更能确切地说明测量精度。在实际中, 相对误差有下列表示形式

① 实际相对误差 实际相对误差 γ_A 是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的百分比值来表示的相对误差, 记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

② 示值相对误差 示值相对误差 γ_x 是用绝对值误差 Δx 与器具的示值 A_x 的百分比值来表示的相对误差, 记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{A_x} \times 100\% \quad (1-6)$$

③ 满度(引用)相对误差 测量下限为零的仪表的满度相对误差 γ_m 是用绝对误差 Δx 与仪表满度值 A_m 的百分比来表示的, 记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{A_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

上述相对误差在多数情况下均取正值。对测量下限不为零的仪表而言, 在式(1-7)中, 可用量程 $(A_{\max} - A_{\min})$ 来代替分母中的 A_m 。上式中, 当 Δx 取最大值 ΔX_m 时, 满度相对误差常被用来确定仪表的准确度等级 S , 即

$$S = \left| \frac{\Delta X_m}{A_m} \right| \times 100 \quad (1-8)$$

根据准确度等级 S 及量程范围, 可以推算出该仪表可能出现的最大绝对误差 ΔX_m 。准确度等级 S 规定取一系列标准值。我国模拟仪表有下列 7 种等级: 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0, 它们分别表示对应仪表的满度相对误差所不应超过的百分比。从仪表面板上的标志可以判断出仪表的等级。仪表在正常工作条件下使用时, 各等级仪表的基本误差不超过表 1-1 所规定的值。等级的数值越小, 仪表的价格就越贵。

表 1-1 仪表的准确等级和基本误差

等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 5.0\%$

仪表的准确度习惯上又称为精度, 准确度等级习惯上称为精度等级。根据仪表的等级可以确定测量的满度相对误差和最大绝对误差。例如, 在正常情况下, 用 0.5 级、量程为 100°C 温度表来测量温度时, 可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta X_m = (\pm 0.5\%) \times A_m = \pm 0.5^\circ\text{C}$$

【例 1-1】 测量 25V 电压, 选用准确度 0.5 级、量程 150V 的电压表和选用准确度 1.5 级、量程 30V 的电压表, 请问选择哪只表更适宜一些?

解: 测量 25V 电压, 选用准确度 0.5 级、量程 150V 的电压表, 测量结果中可能出现的最大绝对误差由公式可得

$$\Delta X_{m1} = \pm 0.5\% \times 150 = \pm 0.75\text{V}$$

测量 25V 时的最大相对误差为

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta X_{m1}}{U} \times 100\% = \frac{\pm 0.75}{25} \times 100\% = \pm 3\%$$

如果选用准确度 1.5 级、量程 30V 的电压表，测量结果中可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta X_{m2} = \pm 1.5\% \times 30 = \pm 0.45\text{V}$$

测量 25V 时的最大相对误差为

$$\gamma_{x2} = \frac{\Delta X_{m2}}{U} \times 100\% = \frac{\pm 0.45}{25} \times 100\% = \pm 1.8\%$$

计算结果表明 0.5 级、量程 150V 的电压表比 1.5 级、量程 30V 的电压表的示值相对误差反而小，所以更合适。

由上例可知，测量结果的精确度，不仅与仪表的准确度等级有关，而且与它的量程也有关系。因此，选择仪表量程时应尽可能使示值在满刻度的三分之二以上。

1.3.2.2 按误差出现的规律分类

任何测量都存在一定的测量误差。由于产生误差的来源有多种，根据测量误差的性质，可把测量误差分为随机误差、系统误差、粗大误差三类。各类误差具有不同的特性，因此应采用不同的发现误差、减弱或消除误差的方法，把测量误差控制在能够满足需要的范围，并且采用正确的数据处理方法对测量数据进行分析和处理。

(1) 随机误差

在同一测量条件下（指在测量环境、测量人员、测量技术和测量仪器都相同的条件下），多次重复测量同一量值时（等精度测量），每次测量误差的绝对值和符号都以不可预知的方式变化的误差，称为随机误差或偶然误差，简称随差。随机误差主要由对测量值影响微小但却互不相关的大量因素共同造成。这些因素主要是噪声干扰、电磁场微变、零件的摩擦和配合间隙、热起伏、空气扰动、大地微震、测量人员感官的无规律变化等。

(2) 系统误差

在同一测量条件下，多次重复测量同一量时，测量误差的绝对值和符号都保持不变，或在测量条件改变时按一定规律变化的误差，称为系统误差，简称系差。前者为不变的系差，后者为变化的系差。例如零位误差属于不变的系差，测量值随温度的变化而增加或减少产生的误差属于变化的系差。

(3) 粗大误差

粗大误差是一种明显与实际值不符的误差，简称粗差，又称疏失误差。产生粗差的原因如下。

- ① 测量操作疏忽和失误，如测错、读错、记错以及实验条件未达到预定的要求等。
- ② 测量方法不当或错误，如用普通万用表电压挡直接测高内阻电源的开路电压；普通万用表交流电压挡测量高频交流信号的幅值等。
- ③ 测量环境条件的突然变化，如电源电压突然增高或降低，雷电干扰、机械冲击等引起测量仪器示值的剧烈变化等。这类变化虽然也带有随机性，但由于它造成的示值明显偏离实际值，因此将其列入粗差范畴。

含有粗差的测量值称为坏值或异常值，在数据处理时，应剔除掉。

1.3.2.3 按误差来源分类

(1) 仪器误差

仪器误差是由于测量仪器及其附件的设计、制造、检定等环节不完善，以及仪器使用过程中老化、磨损、疲劳等因素而使仪器带有的误差。例如，仪器仪表的零点漂移、刻度的不

准确和非线性，以及数字仪器的量化误差等都属于仪器误差。为减小仪器误差的影响，应根据测量任务，正确选择测量方法，合理使用测量仪器，控制测量环境条件等。

(2) 影响误差

影响误差是指由于各种环境因素（温度、湿度、振动、电源电压、电磁场等）与测量要求的条件不一致而引起的误差。影响误差常用影响量来表征。所谓影响量，是指除了被测量以外，凡是对测量结果有影响的量，即测量系统输入信号中的非被测量值信息的参量。测量中的影响量较多而且复杂，可以是来自系统外部环境（如环境温度、湿度、电源电压等）的外界影响量，也可以是来自仪器系统内部（如噪声、漂移等）的内部影响量，不过这里讨论的影响误差通常是指来自外部环境因素的外部影响量。

(3) 理论误差和方法误差

由于测量原理带来的（如数字化测量的量化误差），或者由于测量计算公式的近似，致使测量结果出现的误差称为理论误差。由于测量方法不合理，而造成的误差称为方法误差，如用低输入阻抗的电压表去测量高阻抗电路上的电压。

理论误差和方法误差通常以系统误差的形式出现，在掌握了具体原因及有关量值后，通过理论分析与计算，或者改变测量方法，这类误差是可以消除或修正的。

(4) 人身误差

人身误差是由于测量人员感官的分辨能力、反应速度、视觉疲劳、固有习惯、缺乏责任所造成的。

1.3.2.4 按照被测量随时间变化的速度分类

(1) 静态误差

静态误差是指在测量过程中，被测量随时间变化很缓慢或基本不变时的测量误差。

(2) 动态误差

动态误差是指在被测量随时间变化很快的过程中，测量所产生的附加误差。动态误差是由于有惯性、有纯滞后，因而不能让输入信号的所有成分全部通过，或者输入信号中不同频率成分通过时受到不同程度衰减时引起的。该误差是在动态测量时产生的。

1.3.3 测量结果的表征

在误差理论中，一般用准确度来表示系统误差的大小。系统误差表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度。系统误差越小，则准确度越高，即测量值与实际值符合的程度越高。

随机误差具有单峰性和对称性，在多次测量时，它的测量值虽呈现分散而不确定，但总是分布在平均值附近。测量值的分散程度表明了测量的精确程度，表明了测量的重现性能。因此在误差理论中用精密度来表示随机误差的影响。精密度越高，表示随机误差越小。

精确度用来反映系统误差和随机误差的综合影响。精确度越高，表示准确度和精密度都高，意味着系统误差和随机误差都小。

精密度、准确度与精确度的概念也可用图 1-3 所示的射击打靶的实例来说明。子弹靶点有三种情况。图 (a) 的弹着点很分散，为系统误差小，随机误差大，即准确度高，精密度低；图 (b) 的弹着点集中但偏向一方，为系统误差大，随机误差小，即准确度低，精密度高；图 (c) 的弹着点集中靶心，为系统误差和随机误差都小，即精确度高。



图 1-3 射击误差示意图

1.4 测量误差的估计和处理

随机误差、系统误差和粗大误差三类测量误差的特性各不相同，处理方法也不一样。下面将分别讨论这三类误差的特性和判别方法，以及减少或消除它们的方法。

1.4.1 随机误差的特性和处理方法

虽然一次测量的随机误差的产生没有规律，但是通过大量的测量发现，在多次重复测量的总体上，随机误差却服从一定的统计规律，最常见的就是正态分布规律。

现进行如下实验，对一个工件的某一部位用同一方法进行 150 次重复测量。所得的一系列测得值常称为测量列。将测得的尺寸进行分组，从 7.131mm 到 7.141mm 每隔 0.001mm 为 1 组，共分 11 组，其每一组的尺寸范围如表 1-2 中第 1 列所示，每组中工件尺寸的次数为 n_i ，列于表中第 3 列。若总的测量次数用 N 表示，则可算出各组的相对出现次数 n_i/N ，列于表中第 4 列。用横坐标表示测得值 x ，纵坐标表示相对出现次数 n_i/N ，则得图 1-4(a) 所示的图形称为概率直方图。连接每个小方框上部的中点，得一折线，称为实际分布曲线。若将上述测量次数 N 无限增大，而分细间隔取值很小， Δx 就趋近于零，且用测量的绝对误差代替测得的尺寸，则得图 1-4(b) 所示的光滑曲线，即随机误差的正态分布曲线。

表 1-2 频率计算示例

测量值范围	测量中值	出现次数 n_i	相对出现次数的频 n_i/N
7.1305~7.1315	$x_1 = 7.131$	$n_1 = 1$	0.007
7.1315~7.1325	$x_2 = 7.132$	$n_2 = 3$	0.02
7.1325~7.1335	$x_3 = 7.133$	$n_3 = 8$	0.054
7.1335~7.1345	$x_4 = 7.134$	$n_4 = 18$	0.12
7.1345~7.1355	$x_5 = 7.135$	$n_5 = 28$	0.187
7.1355~7.1365	$x_6 = 7.136$	$n_6 = 34$	0.227
7.1365~7.1375	$x_7 = 7.137$	$n_7 = 29$	0.193
7.1375~7.1385	$x_8 = 7.138$	$n_8 = 17$	0.113
7.1385~7.1395	$x_9 = 7.149$	$n_9 = 9$	0.06
7.1395~7.1305	$x_{10} = 7.140$	$n_{10} = 2$	0.013
7.1405~7.1415	$x_{11} = 7.141$	$n_{11} = 1$	0.07

根据概率论，正态分布密度曲线公式可用下式表示

$$y = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\delta^2}} \quad (1-9)$$

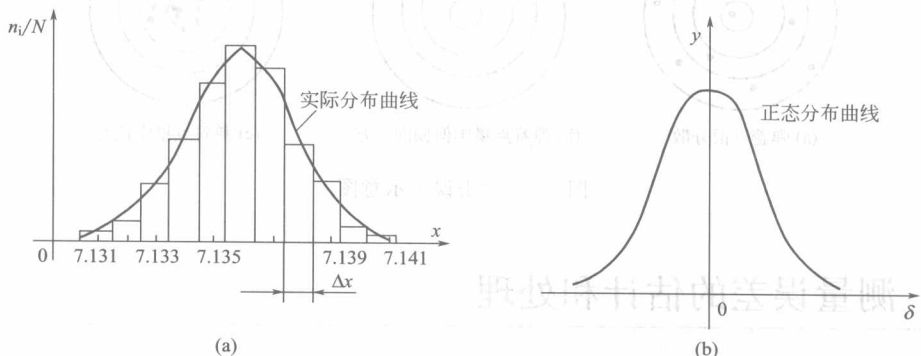


图 1-4 概率直方图和正态分布曲线

(1) 随机误差的正态分布有以下基本性质

- ① 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会要多，即单峰性；
- ② 测量次数很多时，绝对值相等的正负误差出现的机会相等，即对称性。由此推理，随着测量次数趋于无穷大，随机误差的算术平均值将趋于零，即抵偿性；
- ③ 在一定条件下，误差的绝对值不会超过一定的限度，即有界性。

随机误差的分布多数属于正态分布。正态分布随机误差的评定指标有两类：一类表示分布中心的位置，其数字特征为算术平均值；另一类表示分散的程度，其数字特征为标准偏差（又称均方根偏差）。

(2) 算术平均值

对某量进行 n 次等精度的、无系统误差的测量，测得值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-10)$$

当测量次数无限大时，被测量的算术平均值即为真值。但实际上进行无限多次测量是不可能的，真值也就难以得到。而作为有限次测量，算术平均值则最接近真值，因此以算术平均值作为测量结果是可靠而合理的。

(3) 标准偏差（又称均方根偏差）

标准偏差 σ 是代表测量数据和测量误差分布离散程度的特征数。上述的算术平均值是反映随机误差的分布中心，而标准偏差则反映随机误差的分布范围。标准偏差越小，则曲线形状越尖锐，说明数据越集中，测量精度高；标准偏差越大，则曲线形状越平坦，说明数据越分散，则精度也低。图 1-5 表示了三种不同标准偏差的正态分布曲线。

由上述可知，测量的精密度可用标准偏差 σ 来表示。单次测量的标准偏差可以表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} \quad (1-11)$$

由于 $\delta = x - x_0$ ，而 x_0 为真值，不容易得到。实际上常采用残余误差 v_i 来计算标准偏差的估计值。残余误差为测量值与算术平均值之差，即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-12)$$