

传感器 与 检测技术

CHUANGANQI YU JIANCE JISHU

主编 ● 齐晓华 魏冠义 戴明宏



传感器与检测技术

主编 齐晓华 魏冠义 戴明宏

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

传感器与检测技术 / 齐晓华, 魏冠义, 戴明宏主编.

—成都: 西南交通大学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5643-6010-8

I. ①传… II. ①齐… ②魏… ③戴… III. ①传感器
- 检测 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 003214 号

传感器与检测技术

主编 齐晓华 魏冠义 戴明宏

责任编辑 王旻 孟苏成

封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

官网 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 16.5

字数 430 千

版次 2018 年 1 月第 1 版

印次 2018 年 1 月第 1 次

定价 39.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-6010-8

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书根据教育部关于进一步加强高职高专教育教学质量的通知精神,紧跟行业发展步伐,在与生产实践紧密联系的基础上编写。在本书编写过程中,力图体现现代教育所要求的先进性、科学性和教育教学适用性,避开过深的理论分析和公式推导,崇尚课程内容的简洁、生动,突出传感器在生产生活中的应用。本书重点体现教材的趣味性及学生自主学习的条理性,图文并茂,并引入较多的应用实例,各模块均设置了有趣的课前导读,以增强学生的阅读兴趣。

本书着重介绍工业、科研、生活中常用传感器的工作原理、结构类型、测量转换电路及传感器的典型应用。全书共 13 个模块,包括传感检测技术基础知识、电阻传感器、电容传感器、电感传感器、电涡流传感器、热电偶传感器、压电传感器、光电传感器、霍尔传感器、超声波传感器、数字式位置传感器、其他传感器、现代检测技术及综合应用等内容。本书理论知识比较全面,在内容设置上符合高职教育的理论够用但不繁多的原则,传感器的应用实例贴近实际,可提高学生的学习兴趣。本书可作为高等职业教育机电类、电气类及相近专业的教材,也可作为生产管理人员及其他工程技术人员的参考用书,比较适合安排 48~54 学时的传感检测技术类课程选用。

本书由郑州铁路职业技术学院的齐晓华、魏冠义、戴明宏任主编,齐晓华负责全书的统稿。其中模块一由李春亚编写;模块二、模块十由齐晓华编写;模块三、模块四及模块五的单元一由张君霞编写;模块五的单元二、三、四由杨辰飞编写;模块六、模块七及模块九由刘海娥编写;模块八由戴明宏编写;绪论及模块十一由张勇编写;模块十二、模块十三及附录一、二由魏冠义编写。本书在编写过程中,得到了许多专家和同行的大力支持,也参阅了许多国内外公开出版的著作及文献,在此一并表示感谢。由于传感检测技术发展迅速,应用领域日益广泛,作者水平所限,本书难免存在疏漏或不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2018 年 1 月

目 录

绪 论	001
模块一 传感检测技术基础知识	007
课前导读	007
单元一 检测技术概述	007
单元二 传感器基础知识	011
课后思考与练习	017
模块二 电阻传感器	019
课前导读	019
单元一 电位器式传感器	019
单元二 电阻应变式传感器	024
单元三 测温热电阻传感器	038
单元四 气敏传感器及湿敏传感器	043
课后思考与练习	048
模块三 电容传感器	050
课前导读	050
单元一 电容传感器的工作原理及类型	050
单元二 电容传感器的测量转换电路	055
单元三 电容传感器的应用	060
课后思考与练习	066
模块四 电感传感器	070
课前导读	070
单元一 自感式电感传感器	071
单元二 差动变压器式传感器	076
单元三 电感传感器的应用	081
课后思考与练习	085
模块五 电涡流传感器	086
课前导读	086
单元一 电涡流传感器的工作原理及结构特性	086

单元二 电涡流传感器的测量转换电路	091
单元三 电涡流传感器的应用	092
单元四 接近开关简介	095
课后思考与练习	098
模块六 热电偶传感器	100
课前导读	100
单元一 热电偶传感器的工作原理	100
单元二 热电偶的材料、类型及结构	103
单元三 热电偶的冷端延长及冷端温度补偿	107
单元四 热电偶传感器的应用	110
课后思考与练习	113
模块七 压电传感器	116
课前导读	116
单元一 压电传感器的工作原理及结构	116
单元二 压电传感器的测量转换电路	119
单元三 压电传感器的应用	121
课后思考与练习	126
模块八 光电传感器	128
课前导读	128
单元一 光电效应及光电元件	128
单元二 光电元件的基本应用电路	140
单元三 光电传感器的应用	143
单元四 光导纤维传感器	150
课后思考与练习	159
模块九 霍尔传感器	162
课前导读	162
单元一 霍尔元件的工作原理及特性	162
单元二 霍尔集成电路	165
单元三 霍尔传感器的应用	167
课后思考与练习	172
模块十 超声波传感器	174
课前导读	174
单元一 超声波特性简介	174
单元二 超声波换能器及耦合技术	177
单元三 超声波传感器的应用	181
单元四 超声波无损探伤	187
课后思考与练习	192

模块十一 数字式位置传感器	194
课前导读	194
单元一 角编码器	194
单元二 光栅传感器	201
单元三 磁栅传感器概述	208
单元四 容栅传感器概述	210
课后思考与练习	212
模块十二 其他传感器	215
课前导读	215
单元一 红外传感器	215
单元二 激光传感器	223
课后思考与练习	233
模块十三 现代检测技术及综合应用	234
课前导读	234
单元一 现代检测技术概述	234
单元二 传感器在机器人中的应用	237
单元三 传感器在现代汽车中的应用	241
单元四 传感器在数控机床中的应用	246
课后思考与练习	252
附录一 工业热电阻分度表	253
附录二 镍铬-镍硅(镍铝)K型热电偶分度表(冷端温度为0℃)	254
参考文献	255

绪 论

在现代信息社会的一切活动领域中，无论日常生活、工业生产还是科学实验，处处都离不开传感器与检测技术。检测（Detection）是利用各种物理、化学效应，选择合适的方法与装置，将生活、生产、科研等各方面的有关信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。

一、传感器技术

传感检测技术涵盖了多种技术，关键的是传感器技术和检测技术。随着新技术革命的到来，世界开始进入了信息时代。传感器是构成现代信息技术的三大支柱之一，人们在利用信息的过程中，首先要获取信息，而传感器是获取信息的主要手段和途径。现代信息技术的三大支柱，传感器技术负责信息采集相当于人的“感官”，通信技术负责信息传输，相当于人的“神经”，而计算机技术负责信息处理，相当于人的“大脑”。

目前传感器涉及的领域包括现代大工业生产、基础科学研究、宇宙开发、海洋探测、军事国防、环境保护、资源调查、医学诊断、智能建筑、汽车、家用电器、生物工程、商检质检、公共安全甚至文物保护等极其广泛的领域。

现代大工业生产质量涉及质量监控、自动检测、过程控制的四大参量（流量、压力、温度、液位），基础科学研究涉及超高温、超高压、超低温、超高真空、超强磁场检测，航空航天领域研究涉及宇宙飞船的飞行速度、加速度、位置、姿态、温度、气压、磁场、振动测量等。“阿波罗 10”飞船对 3 295 个参数进行检测，其中涉及温度传感器 559 个、压力传感器 140 个、信号传感器 501 个、遥控传感器 142 个，可以说整个宇宙飞船就是多种高性能传感器的集合体。

智能建筑包括三大基本要素（3A）包含楼宇自动化系统 BAS（Building Automating System）、通信自动化系统 CAS（Communication Automating System）及办公自动化系统 OAS（Office Automating System）。其中楼宇自动化系统是智能建筑的重要组成部分，计算机通过中继器、路由器、网络、显示、网关控制管理各种机电设备；智能建筑还包括空调制冷、给水排水、变配电系统、照明系统、电梯等，实现以上功能的传感器涉及温度、湿度、液位、流量、压差、空气压力等检测。在安全防护方面包括防盗、防火、防燃气泄露、CCD 监视器、烟雾传感器、气体传感器、红外传感器、玻璃破碎传感器、门禁管理系统、感应式 IC 卡识别、指纹识别等，还有水、电、气、热量通过传感器实现远程抄收与管理系统。

现代家用电器大家都非常熟悉，包含的传感器有电视机、空调、风扇的红外遥控器，傻瓜照相机、数码相机中的自动曝光装置，电饭煲、电冰箱使用的温度传感器，抽油烟机上的气敏传感器，全自动洗衣机中水位、浊度传感器等。

随着传感器技术的发展，未来世界还会有智能房屋（自动识别主人，太阳能提供能源）、智能衣服（自动调节温度）、智能公路（自动显示、记录公路的压力、温度、车流量）、智能汽车（无人驾驶、卫星定位）等。

二、检测技术

检测技术是现代化领域中很有发展前途的技术，它在国民经济中起着极其重要的作用。

（一）检测技术是保证产品质量检验和质量控制顺利进行的有效手段

对工业产品进行质量评价，首先要借助于多种适合不同产品质量检测特性的检测工具来进行定量衡量，然后再根据相关质量监测标准对产品品质进行定性评价。

传统的检测技术是在产品加工之后，主要用以定量判断产品合格与否。但随着检测技术的发展，现代检测技术可以进行在线系统检测，即检测和生产加工同时进行。通过检测可以及时掌握生产加工过程中生产条件的变化对产品品质的影响，并对产生这种影响的因素进行实时分析控制，从而达到提高产品质量，改善、改进制造工艺的目的，从根本上保证了产品质量检验和质量控制的有效进行。

（二）检测技术是现代企业实施生产过程动态管理的重要保障

为满足大型设备负载安全以及经济运行的需要，在生产的重要环节关键部位，安装传感器等检测分析装置，对运行中的设备状况、生产工艺流程实施动态检测，从而达到对生产过程动态管理的目的。

例如电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备，通常都在高温、高压、高速和大功率状态下运行，保证这些关键设备的正常运行具有十分重要的意义。为此，通常设置故障检测系统对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态检测，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，保证设备和人员的安全，提高经济效益。

随着计算机网络技术的发展，这类检测系统已经发展成故障自诊断系统。采用计算机网络来对检测到的信息进行实时分析、判断，针对可能的故障开展早期诊断，并给以及时的自动报警或自动采取相应的对策措施来消除产生故障的因素，保证生产过程顺利进行。

（三）检测技术是自动化控制系统中不可缺少的重要技术之一

任何生产过程都可以看作是由物流和信息流组合而成的反映物流的数量、状态和趋向的信息流，是管理和控制物流的依据。为了有目的地对生产过程进行控制，首先必须通过检测手段获取物流在生产过程中的有关信息，然后对检测到的信息进行分析判断和利用，继而实现生产过程的自动控制。因此，自动检测技术是自动化系统中实现物流向信息流转换的不可缺少的重要技术基础。

（四）检测技术是一门内容丰富、技术手段多样的现代综合技术

工业检测涉及的内容见表 0-1。从表中可以看出，为了达到对各种量的有效测量，需要研制各种传感器与检测设备，这不仅涉及物理、化学、数学等基础理论研究与应用，而且在对这些测量结果进行有效分析、判断、处理等过程中，更涵盖了机械、电子、信息、自动控制等技术领域的理论更新与应用技术的推广、普及与提高。

（五）检测技术的发展和完善推动着现代科学技术的进步

科学研究工作，一般是利用已知的规律对实验的结果进行概括、推理，从而对新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，现代检测手段所能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越高，提供的信息越丰富、

越可靠，科学研究取得突破性进展的可能性就越大。

表 0-1 工业检测涉及的内容

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(启停等)、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、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

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和课题，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中，也有力促进了检测技术自身的现代化。

总之，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，并对社会劳动生产率的提高和科技进步起着越来越重要的作用。

三、传感检测系统的基本组成

一个完整的检测系统通常由传感器、信号处理电路、数据处理装置、执行机构和显示器等几部分组成，分别完成信息获取、转换、处理和显示等功能，当然还包括电源和传输通道等不可缺少的部分。图 0-1 为人体信息测控工程原理框图，图 0-2 为传感检测系统基本组成框图，传感器工作原理类似人的感官。

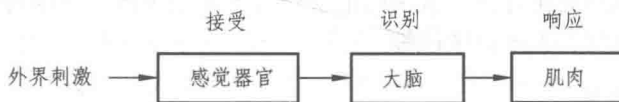


图 0-1 人体信息测控工程原理框图

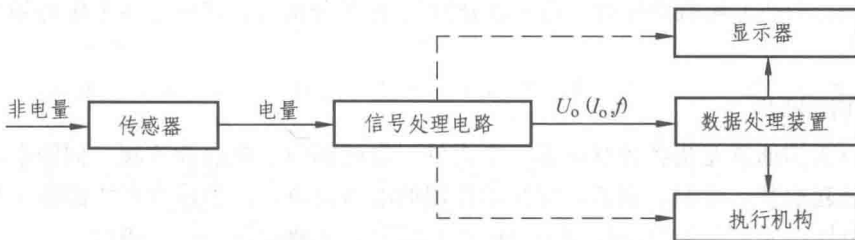


图 0-2 传感检测系统基本组成框图

(一) 系统框图

系统框图是将系统中的主要功能或电路的名称画在方框内，按信号的流程，将几个方框用

箭头联系起来，有时还可以在箭头上方标出信号的名称。在产品说明书、科技论文中，利用框图可以较简明、清晰地说明系统的构成及工作原理。

对具体的检测系统或传感器而言，必须将框图中的各项内容赋以具体的内容。

（二）传感器（Transducer）

广义来讲，传感器是一种能把特定的信息（物理、化学、生物）按一定规律转换成某种可用信号输出的器件和装置。狭义来讲，传感器是能把外界非电信息转换成电信号输出的器件。

我国国家标准（GB/T 7665—2005）对传感器（Sensor/Transducer）的定义是“能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件和装置”。

传感器的含义：它是由敏感元件和转换元件构成的一种检测装置，能按一定规律将被测量转换成电信号输出，传感器的输出与输入之间存在确定的关系。

（三）信号处理电路

信号调理电路包括放大（或衰减）电路、滤波电路、隔离电路等。其中放大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工作。

（四）显示器

目前常用的显示器有4类：模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。模拟量是指连续变化量，模拟显示是利用指针对标尺的相对位置来表示读数的，常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等。

数字显示目前多采用发光二极管（LED）和液晶屏（LCD）等，以数字的形式来显示读数。前者亮度高、耐震动，可适应较宽的温度范围；后者耗电省、集成度高。目前还研制出了带背光板的LCD，便于在夜间观看LCD的内容。图像显示是用CRT或点阵LCD来显示读数或通过被测参数的变化曲线、图表或彩色图等形式来反映整个生产线上的多组数据。记录仪主要用来记录被检测对象的动态变化过程，常用的记录仪有笔式记录仪、高速打印机、绘图仪、数字存储示波器、磁带记录仪、无纸记录仪等。

（五）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，完成这些工作必须采用计算机技术。

（六）执行机构

所谓执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等，它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电器设备。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。

四、传感检测技术的发展趋势

21世纪人类全面进入信息电子化的时代，随着人类探知领域和空间的拓展，使得人们需要

获得的电子信息知识日益增加,这要求加快信息传递的速度和增强信息处理的能力,因而要求与此相对应的信息技术中的三大核心技术——传感器技术、通信技术和计算机技术必须跟上人类信息化飞速发展的需要。传感器领域的主要技术将在现有基础上予以延伸和提高,并加速新一代传感器的开发和产业化。

微电子机械系统技术(MEMS)的出现是传统机械加工技术的巨大变革,具有划时代的意义。微电子机械系统技术已成为21世纪传感器领域中带有革命性变化的高新技术。采用MEMS制作的微传感器与微系统,具有微小体积、低成本、高可靠性等独特的优点,预计由微传感器、微执行器以及信号和数据处理装置集成的微系统将很快进入商业市场。

新型敏感材料将加速开发,纳米材料与技术的发展,微电子、光电子、生物化学、信息处理等各学科、各种新技术的相互渗透和综合利用,有望研制出一批新颖、先进的传感器,如新一代光纤传感器、生物传感器、诊断传感器、超导传感器、焦平面阵列红外探测器、智能传感器以及模糊传感器等。敏感技术发展的总趋势是小型化、集成化、多功能化、智能化和系统化。

传感器将从具有单纯判断功能发展到具有学习功能,最终发展到具有创造能力。其表现如下:

(一) 传感器的多功能化

传感器的多功能化经历了以下几个阶段:最初是孤立的传感器件,只能检测单一的量;后来把多个不同功能的传感器集成在一起,可以检测多种量;目前传感器的多功能化进展处于把电子线路与传感器集成在一起,能够实现信号处理,加上机械结构使之具有执行功能,甚至把能源也集成在一起,实现有源、智能、多功能传感器系统的阶段。

(二) 向模糊识别方向发展

从传感器的模式看,微观信息由人工智能完成,感觉信息由神经元完成,宏观信息由模糊识别完成。以往传感器的局限性在于它只见树木不见森林,只见微观不见宏观,未来的神经元加模糊识别传感器将既见树木又见森林。

(三) 传感器由经典型向量子型转化

以往的传感器由于尺寸大,可以用经典物理很好地描述。随着传感器尺寸的微小型化,量子效应将越来越起支配作用。从波动理论来看,当尺寸大的时候是光波发挥作用,在量子效应起支配作用的范围内,电子波将发挥作用。在将来,把两种波统一在一起的统一波(Union wave)将用来揭示传感器的工作规律。

(四) 由数字传感器向模拟传感器发展

目前,传感器是以数字方式工作的。数字方式的含义并不是说检测量与输出量是数字编码形式,而是指它的检测方式是检测时间轴上的一点(瞬间),空间轴上的一点(零维),是单一检测量。未来的传感器将在时间上实现广延,空间上实现扩张(三维),检测量实现多元,检测方式实现模糊识别。从这个意义上讲,传感器的识别方式将由数字方式向模拟方式发展。

五、本课程的任务和学习方法

本书的学习任务是:理解传感检测技术的基本知识,在阐明传感器测量原理的基础上,逐一了解各种传感器如何将非电量转换为电量,掌握相应的测量转换、信号处理电路和应用。结

合实际应用介绍传感器在各类检测系统中的应用，培养学生使用各类传感器的技巧和能力，使学生掌握常用传感器的工程测量方法和实验研究方法，了解传感器技术的发展动向。通过本课程的学习，读者能够获得正确分析使用常用传感器的基本知识、基本理论及基本技能，初步具备对简单检测系统的传感元件选型和调试能力，为学习相关专业课程及参与技术改造奠定必要的基础。

本书涉及的学科面广，需要有较广泛的专业知识和适当的理论知识。学好这门课程的关键在于理论联系实际，要举一反三，富于联想，善于借鉴，关心和观察周围的各种机械、电气、仪表等设备，重视实践，活学活用。本课程涉及的传感器种类比较全面，知识点多、信息量大，图文并茂，引入了较多的应用实例，在章节安排上采用比较生动的语言来衔接，按模块与单元进行设置，每个模块设置了比较有趣的课前导读，增强学生自主学习的兴趣。本书在理论知识上确保够用但不烦琐，给读者展现出专业课程的简洁、生动、易懂，尽量达到“专业趋向平民化”的效果，课后思考与练习实用性强，能够让学生活学活用传感器知识。

传感检测技术的应用涉及各行各业，技术发展日新月异，因此读者在学习过程中，除了学习各模块的知识外，还要掌握上网查阅资料的技巧，通过搜集网络有关资料练习撰写学术小论文和调研报告，这种学习方法有利于读者掌握最新的技术发展和学科动态。

模块一 传感检测技术基础知识



典型应用

传感检测技术是新技术革命和信息社会的重要技术基础，是现代科技的开路先锋，也是当代科学技术发展的一个重要标志，它与通信技术、计算机技术构成信息产业的三大支柱。如果说计算机是人类大脑的扩展，那么传感器就是人类五官的延伸，当集成电路、计算机技术飞速发展时，人们才逐步认识信息摄取装置——传感器。传感器没有跟上信息技术的发展而被比喻成“大脑发达、五官不灵”。从20世纪80年代起，逐步在世界范围内掀起了一股“传感器热”。

单元一 检测技术概述

所谓检测就是人们借助于仪器、设备，利用各种物理效应，采用一定的方法，将客观世界的有关信息通过检查与测量获取定性或定量信息的认识过程。这些仪器和设备的核心部件就是传感器，传感器是感知被测量（多为非电量），并把它转化为电量的一种器件或装置。检测包含检查与测量两个方面，检查往往是获取定性信息，而测量则是获取定量信息。

一、测量的基本概念及方法

测量（Measurement）就是借助专门的仪器设备，采用一定方法取得某一客观事物定量数据的认识过程。

对于测量方法，从不同的角度出发，有不同的分类方法。

（一）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。例如用激光测距仪测量两栋大楼间的距离，用电子秤称量重物就属于静态测量；而用光导纤维陀螺仪测量火箭的飞行速度，用压电式振动传感器监测设备的振动状态就属于动态测量。

（二）直接测量和间接测量

根据测量的手段不同，可分为直接测量和间接测量。用标定的仪表直接读取被测量的测量结果，该方法称为直接测量。例如，用磁电式仪表测量电流、电压，用离子敏场效应晶体管测量pH值和甜度等。间接测量的过程比较复杂，首先要对与被测量有确定函数关系的量进行直

接测量，将测量值代入函数关系式，经过计算求得被测量。

(三) 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。要求精密测量时，绝大多数测量均采用数字式测量。

(四) 接触式测量和非接触式测量

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。例如用多普勒超声测速仪测量汽车超速与否就属于非接触式测量，用汽车衡测量汽车的载重量就属于接触式测量。非接触式测量不影响被测对象的运行工况，是目前发展的趋势。

(五) 在线测量和离线测量

为了监视生产过程或在生产流水线上监测产品质量的测量称为在线测量，反之则称为离线测量。例如，现代自动化机床采用边加工、边测量的方式就属于在线测量，它能保证产品质量的一致性。离线测量虽然能测量出产品的合格与否，但无法实时监控生产质量。

二、测量误差及分类

测量的目的是希望得到被测事物的真实测量值——真值。但是，在实际测量中并不能绝对精确地测得被测量的真值，即总会出现误差。出现误差的原因有很多，如测量系统及标准量具本身精度有限；实验手段不完善，有些方法在理论上就是近似的；测量者的知识和技术水平有限；多数被测量值不可能用一个有限数字表示出来；被测量是随时间变化的；外界噪声的干扰等。因此，测量的目的仅在于根据实际需要得到被测量真值的逼近值。测量值与真值的差异程度称为误差，实际计算中用相对真值代替真值。对某一被测量用精度高一级的仪表测得的值，可视为精度低一级仪表的相对真值。

(一) 绝对误差和相对误差

1. 绝对误差

绝对误差定义为示值与被测量真值之差，即

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

式中， Δx 为绝对误差； A_x 为示值，具体应用中可以用测量结果的测量值、标准量具的标称值代替； A_0 为被测量的真值。真值 A_0 一般很难得到，所以通常用实际值 A 代替被测量的真值 A_0 ，因而绝对误差更有实际意义的定义是

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

2. 相对误差

相对误差用来说明测量精度的高低，又可分为如下几种：

(1) 实际相对误差 实际相对误差定义为绝对误差 Δx 与实际值 A 的百分比，即

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-3)$$

(2) 示值相对误差 示值相对误差定义为绝对误差 Δx 与示值的百分比，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{A_x} \times 100\% \quad (1-4)$$

(3) 满度相对误差 满度相对误差定义为仪器量程内最大绝对误差 Δx_m 与测量仪器满度值 A_m 的百分比, 即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

满度相对误差也叫满度误差或引用误差, 满度误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值, 即

$$\Delta x_m = \gamma_m \times A_m \quad (1-6)$$

我国电工仪表的准确度等级 S 就是按满度相对误差 γ_m 分级的, 依次划分成 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级。例如, 某电压表 $S = 0.5$, 即表明它的准确度等级为 0.5 级, 也就是它的满度误差不超过 0.5%, 即 $|\gamma_m| \leq 0.5\%$, 或习惯上写成 $\gamma_m = \pm 0.5\%$ 。

一般而言, 测量仪器在同一量程不同示值处的绝对误差实际上未必处处相等, 但对使用者来讲, 在没有修正值可利用的情况下, 只能按最坏的情况处理, 即认为仪器在同一量程各处的绝对误差为常数且等于 Δx_m , 人们把这种处理叫做误差的整量化。由示值相对误差和满度相对误差表达式可以看出, 为了减小测量中的示值误差, 在进行量程选择时应尽可能使示值接近满度值, 一般以示值不小于满度值的 $2/3$ 为宜。

由式 (1-4) 和式 (1-5) 得出的为减小示值误差而使示值尽可能接近满度值的结论, 只适合于正向刻度的一般电压表、电流表等类型的仪表, 而对于测量电阻的普通型欧姆表, 上述结论并不成立, 因为欧姆表是反向刻度, 且刻度是非线性的。可以证明此种情况下示值与刻度的中值接近时, 测量结果的准确度最高。

在实际测量操作时, 一般应先在大量程下测得被测量的大致数值, 而后选择合适的量程再进行测量, 以尽可能减小相对误差。

例 1-1 某压力表精度为 2.5 级, 量程为 0~1.5 MPa, 测量结果显示为 0.70 MPa, 试求: 1) 可能出现的最大满度相对误差 γ_m ; 2) 可能出现的最大绝对误差 Δx_m 为多少 kPa? 3) 可能出现的最大示值相对误差 γ_x 。

解 1) 可能出现的最大满度相对误差可以从精度等级直接得到, 即 $\gamma_m = 2.5\%$ 。

2) $\Delta x_m = \gamma_m \times A_m = 2.5\% \times 1.5 \text{ MPa} = 0.0375 \text{ MPa} = 37.5 \text{ kPa}$

3) $\gamma_x = \frac{\Delta x_m}{A_x} \times 100\% = \frac{0.0375}{0.7} \times 100\% = 5.36\%$

由上例可知, γ_x 总是大于 (满度时等于) γ_m 。

例 1-2 现有 0.5 级的 0~300 °C 的和 1.0 级的 0~100 °C 的两个温度计, 要测量 80 °C 的温度, 试问采用哪一个温度计好?

解 用 0.5 级表测量时, 可能出现的最大示值相对误差为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x_m}{A_x} \times 100\% = \frac{300 \times 0.5\%}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

若用 1.0 级表测量时, 可能出现的最大示值相对误差为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x_{ml}}{A_x} \times 100\% = \frac{100 \times 1.0\%}{80} 100\% = 1.25\%$$

计算结果表明，用 1.0 级表比用 0.5 级表的示值相对误差反而小，所以更合适。由上例可知，在选用仪表时应兼顾精度等级和量程，通常希望示值落在仪表满度值的 2/3 以上。

(二) 粗大误差、系统误差和随机误差

1. 粗大误差

明显偏离真值的误差称为粗大误差，也叫过失误差。粗大误差主要是由于测量人员的粗心大意及电子测量仪器受到突然且强大的干扰所引起的。如测错、读错、记错、外界过电压尖峰干扰等造成的误差。就数值大小而言，粗大误差明显超过正常条件下的误差。当发现粗大误差时，应予以剔除。

2. 系统误差

在相同测量条件下多次测量同一物理量，其误差大小和符号保持恒定或按某一确定规律变化，此类误差称为系统误差。系统误差是有规律的，可以通过实验的方法或引入修正的方法计算修正，也可以重新调整测量仪表的有关部件予以消除。

3. 随机误差

在同一条件下，多次测量同一被测量，会发现测量值时大时小，误差的绝对值及正、负以不可预见的方式变化，该误差称为随机误差，也称偶然误差，它反映了测量值离散性的。随机误差是测量过程中许多独立的、微小的、偶然的因素引起的综合结果。

存在随机误差的测量结果中，虽然单个测量值误差的出现是随机的，既不能用实验的方法消除，也不能修正，但是就误差的整体而言，服从一定的统计规律。因此通过增加测量次数，利用概率论的一些理论和统计学的一些方法，可以掌握看似毫无规律的随机误差的分布特性，并进行测量结果的数据统计处理。在许多场合可以发现，由于存在随机误差，所以对同一被测量进行多次等精度测量，其结果每次均不同。

如果测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，则无限多的直方图的顶点中线的连线就形成一条光滑的连续曲线，称为高斯误差分布曲线或正态分布曲线。

对正态分布曲线进行分析，可以发现如下规律：

(1) 有界性：在一定的条件下，随机误差的测量结果 x_i 有一定的分布范围，超过这个范围的可能性非常小。当某一次测量结果的误差超过一定的界限后，即可认为该误差属于粗大误差，应予以剔除。

(2) 对称性： x_i 对称地分布于图中的 \bar{x} 两侧，当测量次数增多后， \bar{x} 两侧的误差相互抵消。

(3) 集中性：绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的次数多，因此测量值集中分布于算术平均值 \bar{x} 附近。人们常将剔除粗大误差后的 \bar{x} 看成测量值的最近似值。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} \quad (1-7)$$