



普通高等学校机械制造及其自动化专业十二五规划教材
顾 问 杨叔子 李培根 李元元

工程测试技术基础

张春华 肖体兵 李迪 © 主编

何岭松 © 主审



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



普通高等学校机械制造及其自动化专业十二五规划教材
顾 问 杨叔子 李培根 李元元

工程测试技术基础

主 编 张春华 肖体兵 李迪
主 审 何岭松



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书主要介绍与工程测试技术相关的知识,全书共分6章,主要内容包括:测试技术基础知识、信号的描述与分析、测试系统的基本特性、常用传感器和敏感元件、模拟信号的调理与转换、机械工程领域常见物理量的测量。书中每章末都附有习题,部分章节还配有 Matlab 应用实例,便于读者更好地理解和应用书中的理论知识。

本书可作为高等院校机械工程、测控、自动控制、车辆工程等专业的教材,也可供工程技术人员自学与参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程测试技术基础/张春华 肖体兵 李 迪 主编.—武汉:华中科技大学出版社,2011.3
ISBN 978-7-5609-6878-0

I.工… II.①张… ②肖… ③李… III.工程测量-高等学校-教材 IV.TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 004880 号

工程测试技术基础

张春华 肖体兵 李 迪 主编

责任编辑:刘 飞

封面设计:潘 群

责任校对:刘 竣

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:15.25 插页:2

字 数:292千字

版 次:2011年3月第1版第1次印刷

定 价:28.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



前言

测试技术几乎深入到了工程、医疗、生活及军事等各个领域。测试技术是工业领域中一项重要的基础技术。随着现代科学技术的发展,对测试技术提出了更高的要求,对各种测试技术人才的需求也变得更加迫切。大部分工科院校将其作为本科生必修的一门专业基础课,测试技术的教学也获得了更多的重视。

测试技术是多学科知识的综合运用,课程涉及内容广泛,授课难度大。因此,书中在着重介绍测试技术基础理论知识的同时,为便于读者加深对知识的理解和提高工程应用能力,各知识点都配有例题,每章都附有习题,部分章节还提供了 Matlab 在测试中的应用实例。

本书的先修课程有“工程数学”、“电工电子技术”、“控制工程基础”。

全书由华南理工大学张春华、广东工业大学肖体兵和华南理工大学李迪主编。张春华编写第 2、3 章;肖体兵编写第 1、4、6 章,李迪编写第 5 章和负责全书的统稿。研究生陈开容、本科生陈福梁同学在本书的编写过程中做了大量的文档编辑和画图工作。

本书由华中科技大学何岭松教授主审,他对全书做了仔细的审阅,提出许多宝贵意见,在此表示最诚挚的谢意。

本书在编写与出版过程中,得到了华中科技大学出版社领导和编辑的指导与帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写的过程中,参考了大量的国内外参考资料,受益匪浅,在此对参考资料的作者表示感谢。

限于编者水平,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2011 年 3 月



目录

绪论	(1)
第 1 章 测试技术基础知识	(5)
1.1 量的基本概念	(5)
1.2 测量方法和测量器具	(9)
1.3 测量误差	(11)
1.4 测量结果的表达方式	(16)
习题	(21)
第 2 章 信号的描述与分析	(22)
2.1 概述	(22)
2.2 信号的时域统计分析	(30)
2.3 信号的相关分析	(32)
2.4 信号的频谱	(38)
2.5 模拟信号的数字化分析	(57)
2.6 Matlab 在信号描述与分析中的应用	(62)
习题	(69)
第 3 章 测试系统的基本特性	(71)
3.1 概述	(71)
3.2 测试系统的静态特性和静态标定	(72)
3.3 测试系统的动态特性	(74)
3.4 测试系统不失真传递信号的条件	(92)
3.5 Matlab 在测试系统分析中的应用	(94)
习题	(99)
第 4 章 常用传感器和敏感元件	(101)
4.1 概述	(101)
4.2 机械式传感器	(103)
4.3 电阻式传感器	(104)
4.4 电感式传感器	(111)



4.5	电容式传感器	(118)
4.6	压电式传感器	(123)
4.7	磁电感应式传感器	(130)
4.8	光电式传感器	(133)
4.9	其他传感器和敏感元件	(141)
4.10	传感器的选用	(154)
	习题	(156)
第5章	模拟信号的调理与转换	(158)
5.1	电桥	(158)
5.2	模拟滤波器	(163)
5.3	调制与解调	(172)
5.4	模/数转换	(180)
5.5	Matlab 在信号调理与转换中的应用	(184)
	习题	(187)
第6章	机械工程领域常见物理量的测量	(190)
6.1	机械振动的测量	(190)
6.2	表面粗糙度和形位误差的测量	(199)
6.3	温度的测量	(209)
6.4	流体参量的测量	(219)
6.5	声音的测量	(230)
	习题	(236)
附录	书中的数学符号	(237)
参考文献	(239)

绪 论

测试是指人们从客观事物中提取所需信息,借以认识客观事物,并掌握其客观规律的一种科学手段。测试技术包含了测量和试验两方面的含义,是指具有试验性质的测量,或测量与试验的综合。

测试工作的基本任务是借助专门的仪器和设备,获得研究对象有关信息的客观、准确的描述,使人们对其有一个恰当的、全面的认识,并达到进一步改造和控制研究对象的目的。

从广义的角度讲,测试工作涉及试验设计、模型试验、传感器、信号分析与处理、误差理论、控制工程、系统辨识等内容。从狭义的角度讲,测试工作是指在选定被测对象激励方式下所进行的被测量(信号)的检测、变换、处理、显示、记录及分析等工作。本书从狭义的角度讨论测试技术的基础知识。

1. 测试技术的重要性

测试技术的应用非常广泛,几乎在每个行业中都有应用。例如,工业炼钢炉中的温度测量,机床运行状态的检测,医疗行业中的 B 超检查,汽车行驶速度的测量,航天领域的遥感技术等。对于很多应用,测量使用的传感器也是非常之多。例如:一辆小汽车因档次不同,采用的传感器从几十个到上千个,用以检测车速、力矩、方向、油量、温度等;一架飞机需要几千个传感器,用以检测飞机的状态参数和环境参数。在工程技术领域,有关工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能实验等都离不开测试技术。由此可见,测试技术是国民经济和科学技术的重要基础技术,是一个国家科学技术现代化的重要标志之一。

测试技术是多学科知识的综合运用。科学上很多领域的新发现和突破都离不开测试技术;反之,其他领域的技术发展和进步又成为推动测试技术发展的力量。现代测试技术几乎应用了所有近代的新技术和新理论,如计算机技术、半导体技术、激光技术、遥感技术等。测试技术正不断向智能化、高精度、多功能、自动化、实时性方向发展。

2. 测试系统的组成与测试过程

图 0.1 是测试系统的组成框图。

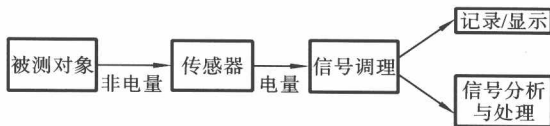


图 0.1 测试系统的组成框图

被测对象的信息蕴含在物理量中,这些物理量就是被测量,它们往往是一些非电量。

传感器是指能感受被测量,并按一定的规律将被测量转换成可用输出信号的器件或装置。例如:弹簧秤中的弹簧就是一个传感器(或敏感元件),它将物体受到的作用力转换为弹簧的变形量,即位移量。

信号调理环节对传感器输出的信号进行调理或转换,以便于后续的传输、显示和分析等处理。例如,信号的幅值调制将低频的测试信号转换为易于在传输通道中传输的高频信号。

记录/显示环节以观察者易于认识的形式来显示测量结果,或将测量结果存储。要从测量结果中获得有用的信息,还需要信号分析与处理环节,例如相关分析、频谱分析等。

3. 测试工作涉及的知识

工程师对物理量进行测试面临着三个任务:①了解被测信号的特性;②选择测试系统;③评价和分析测试系统的输出(信号)。完成这三个任务会涉及以下的知识。

1) 信号分析

信息蕴含在物理量中,这些物理量就是信号,信号是信息的载体。信号分析是测试系统中非常重要的环节。工程领域的物理量往往是随时间变化的动态信号,选择这类信号的测量系统,不仅要考虑被测信号的限值,还要了解被测信号的变化频率,以作为选择测试装置工作频率的依据。了解被测信号的频率信息经常采用频谱分析方法。对于通过测试装置获得的输出信号,根据测试的目的和要求不同,往往也需要对其进行分析,例如,相关分析、频谱分析和统计分析。关于信号的分析方法在本书中的第 2 章进行介绍。

2) 测试系统的特性分析

测试系统的任务是感受输入的被测信号,并将其转换为可以理解或可以量

化的输出形式。不同的测试系统对不同的输入有不同的响应(输出)。输出在多大程度上真实反映了被测输入信号,取决于测试系统在传递信号的过程中对信号进行了怎样的“加工”。

实际上,一般的测试系统都可以用一个模型来描述,这个模型往往是微分方程或传递函数、频率特性函数、脉冲响应函数等,它们之间可以相互转换。通过对系统模型的分析,可以知晓测试系统对于输入的被测信号所进行的“加工”。本书中的第3章对于测试系统的分析,从动力学的角度讨论了测试系统与其输入、输出之间的关系。

3) 传感器与信号调理环节

测试工作离不开具体的工具——测试装置(系统),例如传感器、信号的调理与转换装置。

工程领域的被测信号一般是非电量,如速度、加速度、温度、力和流量等,需要将其转换为电量。传感器能将被测非电量转换为电量,具体介绍见本书第4章。另外,对于机械工程领域的工程师,还需要了解本领域常见物理量的测量方法和测量装置,相关知识见本书第6章。

为了便于后续的传输与分析处理,往往需要对传感器输出的电信号进行调理与转换。例如,滤波器可滤除干扰噪声,调制环节可将低频的测试信号转换成易于在信道中传输的高频调制信号,模/数转换器可将模拟的电信号转换为数字信号,便于信号的数字分析等。这部分知识介绍见本书第5章。

4. 本书概述

本书共分6章,各章节的内容如下。

第1章,测试技术基础知识。介绍测试领域中的基本概念、术语,以及误差理论。

第2章,信号的描述与分析。包括时域的统计分析、相关分析,频域的频谱分析。重点介绍信号的频谱分析方法。本章提供了相关知识的 Matlab 应用实例。

第3章,测试系统的基本特性。测试系统的基本特性包括静态特性和动态特性。重点介绍测试系统动态特性的描述、分析方法,以及动态特性的标定。本章提供了相关知识的 Matlab 应用实例。

第4章,常用传感器和敏感元件。根据传感器的分类,分别对机械式、电阻式、电感式、电容式、磁电感应式和光电式等常用传感器的传感原理进行介绍。

第5章,模拟信号的调理与转换。从传感器输出的电信号往往需要经过转换与调理,以便后续的传输、显示与记录、分析和处理等。转换与调理的环节包

括电桥、滤波、调制与解调、数/模和模/数转换等。本章提供了相关知识的 Matlab 应用实例。

第 6 章, 机械工程领域常见物理量的测量。包括振动测量、表面粗糙度和形位误差测量、温度测量、流体参量测量和声测量。

测试技术是一门实践性很强的课程, 在课程理论学习的同时, 也要加强学生的试验环节。本书中的很多章节都配有相关知识的 Matlab 实例介绍, 以加强学生对理论知识的理解和提高解决实际工程问题的能力。

第 1 章 测试技术基础知识

1.1 量的基本概念

1.1.1 量和量纲

1. 量

量是指现象、物体或物质可定性区别和定量确定的一种属性。如黑板的宽度和质量,室内的温度,运动物体的运动位移、速度、时间等。

量的种类是非常多的。根据量之间的关系,可以将量分为基本量和导出量。基本量是相互独立的量,而导出量则可以由基本量按一定的函数关系来定义。例如运动物体的位移和时间属于基本量,而运动速度是位移与时间的比值,属于导出量。基本量和导出量的这种特定组合称为量制。不同的量制选用的基本量和导出量是不同的。在国际单位制中,选择长度、质量、时间、热力学温度、电流、物质的量和发光强度这七个量为基本量。

2. 量纲

量是根据其量纲来定性区别的,量纲不同的量不属于同一种量。因此,量纲可以理解为量的一种属性,用于定性区别量的种类。在国际单位制中,七个基本量的量纲分别为 L 、 M 、 T 、 H 、 I 、 N 、 J 。位移和时间之所以不是同种量,是因为它们的量纲不同。只有具有相同量纲的量,才能比较大小。导出量的量纲可用基本量量纲的幂的乘积表达式来表示。

任意量 Q 的量纲表达式为

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} H^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta} \quad (1-1)$$

例如,速度的量纲为 LT^{-1} ,力的量纲为 LMT^{-2} 。量纲表达式中的幂都为零的量,称为无量纲量,例如应变。

3. 量值

量的大小可以用量值来定量确定,量值是用数值和计量单位来表示的。例如,黑板的宽度是 1.72 m、质量是 35 kg,室内的温度是 25 °C 等。对量值来说,数值和计量单位缺一不可。没有计量单位、只有数值的量值是没有意义的。计量单位是对量进行数值化的基础。对同一个量,当计量单位不同时,得到的量值数值也不同。不同的单位制,采用的计算单位是不一样的。例如,在国际单位制中长度量的基本计量单位为米,而在英制单位中长度量的基本计量单位为英尺(ft)。

1.1.2 国际单位制

国际单位制(SI制)主要由 SI 单位(包括 SI 基本单位、SI 辅助单位、SI 导出单位)、SI 词条和 SI 单位的倍数单位和分数单位组成。我国的法定单位就是以国际单位为基础并选用少数其他单位制的计量单位组成的。

1. SI 基本单位

1) 米

米是国际单位制中长度的基本单位,其符号为 m。1 m 是光在真空中,在 1/299 792 458 秒(s)的时间间隔内所经路程的长度。

2) 千克(公斤)

千克是国际单位制中质量的基本单位,其符号为 kg,公斤是千克的同义词。1 kg 等于国际千克原器的质量。国际千克原器是用铂铱合金制造的,目前保存在巴黎的国际计量局内。

3) 秒

秒是国际单位制中时间的基本单位,其符号为 s。1 s 是与铯-133 原子基态的两个超精细能级间跃迁相对应的辐射的 9 192 631 770 个周期所持续的时间。

4) 安[培]

安培是国际单位制中电流的基本单位,其符号为 A。在真空中,两根相距 1 m、长度无限、圆截面可忽略的平行直导线内通恒定电流时,若两导线之间产生的相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} 牛顿(N),则每根导线中的电流为 1 A。

5) 开[尔文]

开尔文是国际单位制中热力学温度的基本单位,简称开,其符号为 K。1 K



等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

6) 摩[尔]

摩尔是国际单位制中物质的量的基本单位,其符号为 mol。1 mol 等于 $0.012 \text{ kg}^{12}\text{C}$ 所含的原子数目。

7) 坎[德拉]

坎德拉是国际单位制中发光强度的基本单位,其符号为 cd。对于一个频率为 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 的单色辐射光源,如果在某个方向上的辐射强度为 $1/683$ 瓦特每球面(W/sr),则该光源在此方向上的发光强度为 1 cd。

2. SI 辅助单位

1) 弧度

弧度是国际单位制中平面角的单位,其符号为 rad。1 rad 等于圆内半径长的圆弧所对应的平面圆心角。

2) 球面角

球面角是国际单位制中立体角的单位,其符号为 sr。立体角单位球面角的定义是:球面角是一立体角,其顶点位于球心,而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形的面积。

3. 导出单位

按物理量之间的关系,由基本单位和辅助单位通过相乘或相除而构成的单位称为导出单位。如面积的单位为平方米,符号为 m^2 ;速度的单位为米每秒,符号为 m/s 。

4. SI 词头与倍数单位和分数单位

对某种量来说,只采用 SI 单位明显是不够的,因为有时候会导致量的数值偏大或偏小,使用不方便。因此,在国际单位制中,利用 SI 词头与 SI 单位进行组合,得到量的倍数单位和分数单位。国际单位制中规定的词头有 16 个,其中比较常用的有兆(符号 M,因数 10^6)、千(符号 k,因数 10^3)、分(符号 d,因数 10^{-1})、厘(符号 c,因数 10^{-2})、毫(符号 m,因数 10^{-3})等。

SI 词头和 SI 单位构成一个新单位,应将其视为一个整体。如果新单位比原 SI 单位大整数倍,称新单位为倍数单位;如果原 SI 单位比新单位大整数倍,称新单位为分数单位。以长度量的单位为例,米(m)是 SI 单位,千米(km)是米的倍数单位, $1 \text{ km} = 1 \times 10^3 \text{ m}$;而毫米(mm)是米的分数单位, $1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

1.1.3 基准、标准和量值的传递

1. 测量、计量和测试

测量(measurement)是指以确定被测对象的量值为目的而进行的一组操作。计量是指为了实现单位统一和量值准确可靠的测量,是计量部门进行的测量。测试(measurement and test)是指具有试验性质的测量,包括测量和试验。

2. 基准

为了确保量值的统一和准确,除了对计量单位作出严格的定义外,还必须具有保存、复现和传递计量单位的一整套制度和设备。

基准是用来保存、复现计量单位,具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具。按其用途和准确度不同,可以分为国家基准、副基准和工作基准三种等级。

国家基准是在特定计量领域内,用来保存和复现计量单位并具有最高计量特性,经国家鉴定、批准作为统一全国量值最高依据的计量器具。

副基准是指通过与国家基准比对或校准来确定其量值,并经国家鉴定、批准的计量器具。副基准在国家计量检定系统中的位置仅次于国家基准。

工作基准是指通过与国家基准或副基准比对或校准来确定其量值,用以检定计量标准的计量器具。工作基准在国家计量检定系统中的位置仅在国家基准和副基准之下。设立工作基准的目的主要是为了避免频繁使用国家基准和副基准,使它们保持应有的计量特性。

3. 标准

按国家计量检定系统表规定的准确度等级,用于检定较低等级计量标准或工作计量器具的计量器具称为计量标准。计量标准在国家计量检定系统中的位置在工作基准之下、工作计量器具之上。

工作计量器具是指用于现场测量而不用于检定工作的计量器具。

4. 量值的传递

通过对计量器具进行检定或校准,将国家基准所复现的计量单位量值逐级地传递到测量用的工作计量器具上,以保证被测对象量值的准确和一致。这个过程就称为量值的传递。

计量器具检定是指为评定计量器具的计量特性,确定其是否符合法定要求所进行的全部工作。检定计量器具必须根据检定规程进行。检定规程是检定计量器具时所必须遵守的法定程序。

1.2 测量方法和测量器具

1.2.1 测量方法

测量实际上是将被测量与标准量进行比较。测量方法是指在测量过程中所涉及的一套理论运用和实际操作方法。

采用不同的分类原则,得到的测量方法是不一样的。

1. 直接测量和间接测量

按是否直接测定被测量的原则,可将测量方法分为直接测量法和间接测量法。

直接测量法是指用测量器具直接测得被测量的值,而不必测量与被测量有函数关系的其他量的测量方法。例如,用量筒测量流体的体积、用等臂天平测量物体的质量、用卷尺测量物体的长度等都属于直接测量。

间接测量法是指先通过测量与被测量有函数关系的其他量,然后通过函数运算才得到被测量值的测量方法。例如,通过测量长、宽、高确定长方体的体积,通过测量电流强度、电压来确定电功率等的测量方法都是间接测量。

2. 直接比较测量和间接比较测量

按被测量是否直接和已知的同种量进行比较的原则,可将测量方法分为直接比较测量法和间接比较测量法。

直接比较测量法是将被测量直接和已知的同种量进行比较,从而得到被测量值的方法。例如,用等臂天平测量物体的质量、用卷尺测量物体的长度等都属于直接比较测量。间接比较测量法是利用仪器把原始形态的被测量转换成与之保持已知函数关系的另一种量的测量方法,例如用水银温度计测量温度。大部分传感器的测量属于间接比较测量。

3. 接触测量和非接触测量

按测量器具的测头是否和被测物体产生机械接触的原则,可将测量方法分为接触测量法和非接触测量法。

采用接触测量法时,测量器具的测头与被测物体间的接触可靠,对工件表

面的灰尘、油污及切削液等不敏感,但易引起工件的变形和传感器的磨损及负载效应,从而影响测量精度。非接触测量法因为测量器具的测头与被测物体没有机械接触,既可避免传感器对被测物体的机械作用及影响,又可避免传感器受到磨损。

4. 等精度测量和不等精度测量

按决定测量精度的全部或部分因素的改变与否分类,可将测量方法分为等精度测量法和不等精度测量法。

等精度测量是指在测量过程中,决定测量精度的全部因素或条件不变的测量。例如,由一个人用同一台仪器,用同一种测量方法,在同样条件下进行的测量。生产上大多采用此种测量。不等精度测量是指在测量过程中,决定测量精度的因素或条件变化或部分变化的测量。不等精度测量常在科研工作中使用。

1.2.2 测量器具及有关术语

测量器具是指为了确定被测量值所必需的器具和辅助设备。为了更好地掌握本课程的内容,有必要介绍与测量器具有关的一些术语。

1. 测量器具的分类

(1) 传感器 能感受规定的被测量,并按一定的规律将被测量转换成可用输出信号的器具。

(2) 测量变换器 能提供与输入量给定关系的输出量的测量器具。当测量变换器的输入量为被测量时,该测量变换器就是传感器。因此,传感器属于测量变换器,是测量系统中第一级的测量变换器。当传感器的输出量为规定的标准信号时,它就被称为变送器。

(3) 检测器 用于指示某种特定量的存在而不必提供量值的器具。化学试纸(如 pH 试纸)就是一种检测器。

2. 与测量器具有关的术语

与测量器具有关的术语有很多,这里主要介绍如下几个。

(1) 示值 测量器具指示的被测量的量值。

(2) 示值误差 测量器具的示值与真值之差。一般来说,示值误差越小,计量器具的精确度就越高。

(3) 标称范围 也称示值范围,是测量器具能显示或指示的最低值到最高值的范围。例如,温度计的标尺的起点示值为 -34°C ,终点示值为 $+44^{\circ}\text{C}$,则其标称范围为 $-34\sim+44^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 量程 标称范围的上下限之差的模。标称范围为 $-34\sim+44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度计的量程就是 $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 测量范围 在测量器具的误差处于允许极限内的情况下,测量器具所能测量的被测量值的范围。一般来说,测量范围比标称范围要小。

(6) 准确度等级 用来表示测量器具测量准确度的等级或级别。

1.3 测量误差

1.3.1 测量误差的定义

在测量过程中,由于测量器具和测量条件等多方面的限制,测量误差是不可避免的。测量误差自始至终存在于一切测量活动中。

测量误差是指测量结果 x 与被测量的真值 x_0 之间的差,也称为绝对误差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-2)$$

测量结果是指测量所得到的被测量的量值。而真值 x_0 是指测量时被测量所具有的真实值。

从测量的角度看,真值是不可能确切获知的,它是一个理想值。但是,计算测量误差又需要真值。因此,在实际的测量过程中,采用约定真值来代替真值使用。约定真值是指充分接近真值并可以代替真值使用的量值。实际测量中,被测量的实际值、修正过的测量结果的算术平均值,均可作为约定真值使用。被测量的实际值一般是指采用准确度高一级的测量器具所测得的量值,或指满足规定准确度要求、可用来代替真值使用的测量值。

1.3.2 测量误差的分类

1. 根据误差的统计特征分类

测量误差按其统计特征不同,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差 在对同一被测量进行多次测量时,如果测量误差按一定的规律变化或保持为一个常数,这种误差称为系统误差。例如,30 m 钢卷尺本身的实际长度和它名义长度之差称为尺长误差,用带有尺长误差的钢尺去测量