

高等职业院校教材

机械工程 测试技术基础

周生国 张迎新 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书主要介绍机械工程测试技术的基本知识和测试方法,全书内容可分为两大部分。第一部分是测试技术的基础知识,包括第一、二、三章,介绍测量误差的基本知识,测量系统的静、动态特性和传感器的工作原理等。第二部分是主要参数的测试方法和测试数据采集方法,包括第四、五、六、七、八章,介绍压力、力、应力、振动、温度等主要参数的测试方法,以及测试数据的现代采集系统有关问题等。

本书可作为机械工程类大专或高职学生的测试技术课程教材,也可供从事测试技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试技术基础 / 周生国, 张迎新编著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 8
ISBN 7-118-04616-7

I. 机... II. ①周...②张... III. 机械工程—测试技术 IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 072485 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 18 字数 322 千字

2006 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

目前有关测试技术的书籍(专著或教材)种类繁多,有专门论述动态参数测试的,有偏重热工参数测试的,有侧重于传感技术方面的,这些著作绝大部分都是针对大学某些专业本科生或研究生当做教材使用,或者为某些从事测试技术的人员提供参考资料。如果大专或高职生选用这些书籍作为教材,最多也只能选取其中某些章节,这会形成浪费。因此,考虑到专科生高职院校学生的特点编写而成。

全书内容可分为两大部分。第一部分是测试技术的基础知识,包括第一、二、三章,介绍测量误差的基本知识,测量系统的静、动态特性和传感器的工作原理等。第二部分是主要参数的测试方法和测试数据采集方法,包括第四、五、六、七、八章,介绍压力、力、应力、振动、温度等主要参数的测试方法,以及测试数据的现代采集系统有关问题等。

测试技术是一门实践性很强的课程,尤其对大专和高职生的培养,他们将来是在科研、生产第一线工作,更要重视技能的培养,在学习本课程时要联系实际,多安排一些与课程内容有关的实验项目,多操作多动手,也可以到生产现场参观实习,增加感性认识。

本书由周生国编写绪论和第一、二、三、五、七章,并负责全书的统编工作。张迎新负责编写第四、六、八章。

编者对本书所列参考文献的编著者及原书所涉及的参考文献编著者表示衷心感谢。由于编者水平和实践经验有限,书中缺点和不足之处在所难免,敬请读者批评指正并提出宝贵意见。

编著者

2006年5月

目 录

绪论	1	1.5.4 测量不确定度与测量 误差的区别	25
第一章 测量误差与数据处理	5	1.6 测量数据处理方法	26
1.1 测量误差的基本概念	5	1.6.1 表格法	26
1.2 随机误差理论	8	1.6.2 图示法	26
1.2.1 统计直方图	8	1.6.3 经验公式法	27
1.2.2 随机误差的特性	9	1.7 一元线性与非线性回归 ..	29
1.2.3 标准偏差与概率 积分	10	1.7.1 直线拟合——一元线 性回归	29
1.3 标准偏差的估算方法	11	1.7.2 曲线拟合——一元非 线性回归	35
1.3.1 标准偏差的基本估算方 法——贝塞尔 (Bessel) 公式	11	习题	37
1.3.2 标准偏差的其他估算 方法	13	第二章 测量系统的基本特性	39
1.4 间接测量不确定度评定 ..	15	2.1 概述	39
1.4.1 误差传递的一般表 达式	15	2.2 测量系统的静态特性	40
1.4.2 用不确定度表示的传 递公式	16	2.3 测量系统的动态特性	42
1.5 测量不确定度的术语及 评定	19	2.3.1 传递函数	42
1.5.1 测量不确定度术语 ..	19	2.3.2 动态特性	43
1.5.2 测量不确定度的 评定	20	习题	52
1.5.3 举例	23	第三章 传感器原理与测量电路 ..	54
		3.1 传感器的分类	54
		3.1.1 按被测参量分类	54
		3.1.2 按传感器工作原理 分类	54
		3.2 电位器式传感器	55

3.2.1	构造与原理	55	3.7	压阻式传感器	103
3.2.2	阶梯特性与阶梯 误差	56	3.7.1	工作原理	103
3.2.3	负载特性与负载 误差	56	3.7.2	晶面及晶向表示法	104
3.2.4	特点与应用	58	3.7.3	传感器结构	105
3.3	电阻应变式传感器	59	3.7.4	测量电路	107
3.3.1	电阻应变片	59	3.7.5	压阻式传感器的 特点	108
3.3.2	应变片胶粘剂	64	3.8	传感器静态校准与不确 定度计算	109
3.3.3	电阻应变式传感器	65	3.8.1	静态校准与特性指 标计算	109
3.3.4	应变式传感器测量 电路	67	3.8.2	传感器不确定度 计算	111
3.3.5	应变式传感器的 特点	76	习题		115
3.4	电感式传感器	76	第四章 压力测量		116
3.4.1	简单自感式与差动式 自感传感器	76	4.1	概述	116
3.4.2	差动变压器式传 感器	81	4.1.1	压力的基本概念	116
3.4.3	电涡流式传感器	84	4.1.2	压力量值的传递 标准	118
3.4.4	电感式传感器的 特点	86	4.2	常用压力传感器	118
3.5	电容式传感器	86	4.2.1	电阻应变式压力传 感器	118
3.5.1	工作原理及特性	86	4.2.2	压电式压力传 感器	120
3.5.2	测量电路	91	4.2.3	压阻式压力传 感器	121
3.5.3	电容式传感器的 特点	94	4.3	动态压力测量应注意的 问题	122
3.6	压电式传感器	95	4.4	压力传感器的校准	123
3.6.1	压电效应	95	4.4.1	压力传感器的静态 校准	123
3.6.2	压电材料	97	4.4.2	压力传感器的动态 校准	125
3.6.3	等效电路与测量 电路	98			
3.6.4	压电式传感器的 特点	102			

习题	128	6.2.2 相对式测振传感器的 工作原理	177
第五章 力和应力测量	130	6.2.3 测振传感器实例	179
5.1 力值传递标准	130	6.3 测振传感器的校准	182
5.1.1 概述	130	6.3.1 拾振器校准的基本 内容	182
5.1.2 基准测力机	131	6.3.2 常用校准方法	183
5.1.3 标准测力机	134	6.4 振动测量	186
5.1.4 标准测力计	137	6.4.1 测振传感器选择	186
5.2 单向力测量	140	6.4.2 测振放大器选择	187
5.2.1 概述	140	6.4.3 测振系统的校准	188
5.2.2 电阻应变式力传 感器	140	6.4.4 振动测量点的选择和 测振传感器的安装	189
5.2.3 压电式力传感器	153	6.4.5 振动测量及结果 分析	191
5.2.4 双量程测力传感器 ..	154	习题	192
5.3 多向力测量	156	第七章 温度测量	194
5.3.1 切削力测量	157	7.1 概述	194
5.3.2 火箭发动机推力矢 量测量	157	7.1.1 温度的概念	194
5.4 应力与应变测量	162	7.1.2 温度计的种类和 特点	194
5.4.1 单向应力状态	162	7.1.3 温标	196
5.4.2 平面应力状态(主应 力方向已知)	163	7.2 热电偶测温	199
5.4.3 平面应力状态(主应 力方向未知)	164	7.2.1 热电偶测温的工作 原理	199
习题	167	7.2.2 热电偶的基本定律 ..	202
第六章 振动测量	168	7.2.3 热电偶种类和特性 ..	204
6.1 振动基本理论知识	168	7.2.4 热电偶结构	208
6.1.1 振动的分类	168	7.2.5 热电偶冷端处理的 方法	210
6.1.2 各类振动特点及变 化规律	170	7.2.6 热电偶测温的连接 方式	212
6.2 测振传感器	173		
6.2.1 绝对式测振传感器 的工作原理	174		

7.2.7	热电偶测温的显示 仪表·····	214	件设计·····	248	
7.2.8	热电偶的检定·····	216	8.2.4	信号的分析与处理···	249
7.2.9	热电偶测量固体表 面温度·····	217	8.3	数据采集系统举例·····	249
7.2.10	热电偶测温误差···	221	8.3.1	标准总线测量控制 系统·····	249
7.3	电阻温度计·····	224	8.3.2	专用数据采集系统···	254
7.3.1	概述·····	224	习题	·····	254
7.3.2	铂电阻温度计·····	224	附录	·····	256
7.3.3	铜电阻温度计·····	226	附录 1	铂铑 10 - 铂热电偶 分度表·····	256
7.4	辐射式温度计·····	228	附录 2	铂铑 30 - 铂铑 6 热电 偶分度表·····	260
7.4.1	全辐射高温计·····	229	附录 3	镍铬 - 镍硅(镍铬 - 镍 铝)热电偶分度表·····	264
7.4.2	比色高温计·····	231	附录 4	铜 - 康铜热电偶分 度表·····	268
7.4.3	红外辐射测温仪·····	233	附录 5	铂铑 13 - 铂热电偶分 度简表·····	270
习题	·····	238	附录 6	铁 - 康铜热电偶分度 简表·····	270
第八章	现代数据采集系统 ·····	239	附录 7	铂热电阻分度表 ($R_0 = 46\Omega$)·····	271
8.1	概述·····	239	附录 8	铂热电阻分度表 ($R_0 = 100\Omega$)·····	273
8.1.1	现代数据采集系统的 功能·····	239	附录 9	铜热电阻分度表 ($R_0 = 50\Omega$)·····	276
8.1.2	数据采集系统的 特点·····	240	附录 10	铜热电阻分度表 ($R_0 = 100\Omega$)·····	277
8.1.3	现代测量采集系统 分类·····	242	参考文献	·····	278
8.1.4	数据采集/控制系统 的基本构成·····	243			
8.1.5	系统总线概述·····	244			
8.2	数据采集系统的设计·····	245			
8.2.1	选择传感器·····	245			
8.2.2	信号调节与处理·····	247			
8.2.3	计算机系统硬件和软 件设计·····	248			

绪 论

一、测试技术的重要性

科学技术和生产的发展都离不开测试,任何科学理论的建立都要通过大量的试验与测量,对获取的数据进行分析来验证理论的正确性和可靠性。生产向机械化、自动化发展,必须在生产过程中通过各种参数的测量、分析,进行控制和监视,才能保证产品的质量和生产的效率。

测试技术的发展和不断创新促进了科学技术水平的不断提高,推动了生产的自动化进程。而科学技术水平的提高又为测试技术的创新、完善和发展创造了条件。

现代测试技术在现代工业、农业、国防、交通以及教育、医疗、体育等各行各业的建设和发展中得到了广泛的应用。

在机械工业自动化生产过程中,要实时测量机床刀具切削力的大小和变化情况、刀具的磨损情况、被加工零件尺寸和表面质量情况等,以便更好地控制机床正常工作,保证产品质量。

在大型农业机械化生产中,要随时监测各种农业机械的耕作、土壤、播种、生长、施肥情况以及气象变化对农作物的影响。

在国防工业各种兵器、战机、火箭导弹的研制和生产过程中,更需要进行大量的试验和测量,如一台火箭发动机在研制过程中需要经过多次地面热试车,在几秒到几十秒的工作中,要同时测量发动机产生的推力、燃烧室压力、燃气压力场和温度场、壳体的温度、应力、应变等这些参数随时间的变化。

在常规兵器的研制阶段,对各种火炮试验炮弹发射的瞬间,需采用多种测试方法来测量各种参数,如膛压的变化过程、弹底压力、弹后压力波、炮口激波压力、弹丸在膛内的挤进过程和运动速度、膛内燃气温度、身管的温度分布和应力分布,以及发射时炮身的振动加速度和反作用力等。同时还有外弹道和终点弹道的若干参数的测试。

在医学生物领域,通过各种医疗设备,如超声心动仪、CT螺旋扫描仪、核磁共振仪、多普勒脑血流测量仪等先进的诊断设备,可实时确诊患者的生理状况,采取相应治疗措施,达到延年益寿的效果。

在体育运动领域,为了要研究运动员在跑、跳、掷等过程中最佳状态,常采用由多分力传感器组成的测力平台,测量运动员在起跑或起跳瞬间着力的大小、方向和状态,通过综合分析,科学训练,以提高竞技水平。

现代测试技术的普遍采用,使国民经济各领域受益匪浅,它的重要性和应用前景越来越受到人们的重视和欢迎。

二、测试系统的组成

测试系统是指非电参量的电测系统,该测试系统的方框图如图 0-1 所示。

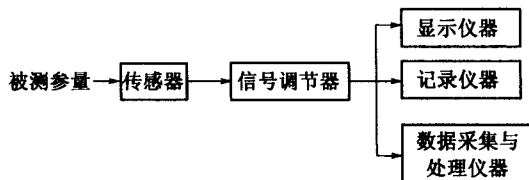


图 0-1 测试系统组成框图

1. 传感器

传感器是把被测非电参量转化成电参量的器件,根据不同类别的传感器可将被测量的变化转变成电压、电流、电阻、电荷、电容、电感等的变化,以便于后续电子仪表的处理。传感器种类繁多,有物理量传感器,化学量传感器、生物医学传感器等,要根据被测参数性质的不同来选择相应的传感器。

2. 信号调节器

信号调节器是把传感器输出的电参量调节转换成下一环节仪表适用的电参量,通常是转换成为电压或电流的输出,以便显示记录仪表能把被测信号显示、记录下来。

根据传感器的不同性质,有专用配套的信号调节器,也有通用的信号调节器,主要作用是信号变换、阻抗变换、信号放大。较常见的电路有电桥电路、阻抗变换电路、放大电路、调制解调电路、相敏检波电路、滤波电路等。

3. 显示记录仪

测量的最终目的是要获取被测参量的量值大小和变化过程,显示记录仪就是为达到这个目的而设置的终端仪表。显示记录仪分为模拟式和数字式两类:模拟式显示仪如常见的各种指针式仪表,模拟式记录仪有各种笔式记录仪,光线示波器,电子示波器,模拟磁带记录仪等;数字式显示仪有种类繁多的各类数字仪表,数字记录仪有数字磁带记录仪,电子记忆示波器,瞬态波形记录仪等。

对动态或瞬态信号测试来说,通常的显示记录仪表很难满足要求,此时应采用高速数据采集与处理系统,这部分内容详见第八章。

以上是把测试系统分为三大环节来看待,目前常用的测试系统仍按这一原则来处理。但是,现代测试技术的发展已经突破了各环节之间的界限,如各种智能传感器,它已把传感、信号转换、信号采集与处理融入到传感器内部,虽然直观地看是一个传感器,但它的功能已包含了上述测试系统的三个环节。

三、现代测试技术的发展动向

1. 传感器的发展动向

随着科学技术的发展,对测试技术提出了更高更新的要求,首先要根据被测参数的特性开发相适应的传感器,近年来各国从基础研究着手,开发新原理、新材料、新工艺的新型传感器已经取得显著成果,如研制的光导纤维传感器、高温超导传感器、非接触式微波传感器、核辐射传感器、各种生物医学传感器等都已投入应用。为满足高速发展的航空、航天、生物医学领域的要求,微型、智能型传感器具有很大的发展空间。如测量火炮膛内压力,过去一直沿用放入式铜柱测压器(俗称测压蛋),现在可用一种电子测压蛋,它是集压力转换、信号调节、数据采集与储存于一体,组成一个智能型传感器。此外,根据某些特殊测量的需求,开发双参数、双量程、多分力传感器成为传感器研究新课题。

据有关资料介绍:俄罗斯载人飞船上采用的高质量传感器有 3500 多套,用来测量压力、压差、温度、热流、热耗量、燃气浓度、介质成分、密度、湿度、机械变形、摩擦、电场、磁场、生物电势等参数;美国航天飞机上使用的传感器有 100 多种 4000 多个,其中,温度传感器有 1300 多个,压力传感器有 1200 多个。对传感器的要求很严格,必须满足微型化(平均质量应小于 100g,特殊要求的只有几克)、高精度(0.1% ~ 0.01%)、低功耗(长时间飞行时应在几十毫瓦到几毫瓦)、响应快(响应时间从毫秒级到微秒级)、寿命长(使用寿命长于 10 年)、可靠性高(一般要达到 0.995,用于控制的要达到 0.9998。在连续工作条件下,无故障时间应为 $(10 \sim 50) \times 10^3 \text{h}$)。还需进一步开发特殊品种的传感器,如耐高温(3000°C)烧蚀传感器、超低超高加速度($10^{-6} \text{g} \sim 10^6 \text{g}$)振动传感器、超高压(1000MPa)压力传感器等。

2. 测试系统的发展动向

在计算机技术迅速发展的带动下,测试系统已经突破了常规的由三大环节组成的概念。尤其在一些大型、综合性的试验中,如航空发动机和火箭发动机的地面试车,各种模型的风洞试验,燃气轮机试验,汽车破坏性碰撞试验等,都已经采用了以计算机为核心的多通道自动测试系统,该系统在计算机软件与硬件的配合下能实现多路信号调理、采集、分析、处理,并可对各通道进行自动校准、自动修正和自动故障诊断。还可在功能强大的软件支持下,对被测动态信号进行动态特性分析,动态误差补偿与修正。这种现代数据采集与处理系统,能对成百

上千的多参数同时测试,不仅测试速度快,准确性和可靠性也大大提高,是测试技术发展的方向。

测试系统的内涵从各自独立的“三大环节”到所谓“卡式仪表”再到今天的“虚拟仪器”,经历了短短十多年时间。“卡式仪表”是把某些信号调节电路和显示记录仪做成一块一块的电路板(仪器模块),统一插在一个框架内,各卡片与计算机总线相连,不仅使各仪器的电源、旋钮、表头、显示屏大大简化,还可通过计算机的键盘来操作各卡片的功能,并按预定程序进行测试。“虚拟仪器”是在卡式仪表的基础上,利用计算机的强大资源,使卡式仪表硬件与软件充分融合,达到测量与控制的功能。“虚拟仪器”的特点是根据不同的被测对象和需求,用户可自由选择组合各种功能,具有充分的灵活性,使用非常方便。

总之,以计算机为核心的多通道自动测试系统是测试系统的发展方向。

第一章 测量误差与数据处理

1.1 测量误差的基本概念

一、真值

真值即真实值,是指在一定条件下,被测量客观存在的实际值。真值通常是个未知量,一般所说的真值是指理论真值、规定真值和相对真值。

理论真值:理论真值也称绝对真值,如平面三角形三个内角之和恒为 180° 。

规定真值:国际上公认的某些基准量值,如1960年国际计量大会规定“一米等于真空中氩86原子的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁时辐射的1650763.73个波长的长度”。1982年国际计量局召开的米定义咨询委员会提出新的米定义为“米等于光在真空中 $1/299\,792\,458\text{s}$ 时间间隔内所经路径的长度”。这个米基准就当做计量长度的规定真值。规定真值也称约定真值。

相对真值:计量器具按精度不同分为若干等级,上一等级的指示值即为下一等级的真值,此真值称为相对真值。例如,在力值的传递标准中,用二等标准测力机校准三等标准测力计,此时二等标准测力机的指示值即为三等标准测力计的相对真值。

二、误差

根据误差表示的方法不同,有绝对误差和相对误差。

绝对误差是指测得值与真值之差,可表示为

$$\text{绝对误差} = \text{测得值} - \text{被测真值}$$

用符号表示,即

$$\delta = x - A \quad (1-1)$$

相对误差是指绝对误差与被测真值之比,通常用百分数表示,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{被测真值}} \times 100\%$$

用符号表示,即

$$\rho = \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

当被测真值为未知数时,可用测得值(或测得值的算术平均值)代替被测真值计算。对于不同的被测量值,用测量的绝对误差往往很难评定其测量精度的高低,通常都用相对误差来评定。

三、误差来源

在任何测量过程中,无论采用多么完善的测量仪器和测量方法,也无无论在测量过程中怎样细心和注意,都不可避免地存在误差。产生误差的原因是多方面的,可以归纳如下。

1. 工具误差

它包括试验装置、测量仪器仪表带来的误差,如试验装置加工粗糙,安装调整不准确,摩擦和间隙过大等;仪器仪表的线性度、迟滞、刻度不准,以及运动元件之间的摩擦和间隙等带来的误差。

2. 环境误差

在测量过程中,因环境条件的变化而产生的误差称为环境误差。环境条件主要指环境的温度、湿度、气压、电场、磁场以及振动、气流、辐射等。如温度的变化会引起传感器的零点漂移和灵敏度漂移,微小的振动或电信号干扰都会对高灵敏磁电式仪表和光线示波器的振子产生扰动。

3. 方法误差

测量方法不正确而引起的误差称为方法误差。测量仪表安装和使用方法不正确,如压力表在水平位置读数时引起的误差(按规定应垂直安放读数)。测量方法误差还包括测量时所依据的原理不正确而产生的误差,如航空用高度表,它是根据气压随高度改变的规律而确定高度的,但气压并不只受高度影响,还受温度、气体密度的影响,如不进行修正就会引起误差,这种误差也称为原理误差或理论误差。

4. 人员误差

测量者生理特性和操作熟练程度的优劣而引起的误差称为人员误差。如测量者的感觉器官不正常,视觉的近视、斜视、色盲,听觉不良等。测量者的习惯和精神状态的变化也都会带来误差。

四、误差的分类

为了便于对测量误差进行分析和处理,按照误差的性质进行分类。

1. 随机误差

在实际测量条件下,多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化。也就是说,产生误差的原因及误差数值的大小、正负都是不固定的,也没有确定的规律性,它的出现具有随机性,或者说带有偶然性,这样的误差

就称为随机误差(或偶然误差)。随机误差就个体而言,从单次测量结果来看是没有规律的,它有时大,有时小,有时正,有时负,即大小和正负都不确定。但就其总体来说,即对一个量进行等精度的多次测量后就会发现,随机误差服从一定的统计规律,即符合概率论的一般法则,可通过理论公式计算它对测量结果影响的大小。

2. 系统误差

误差的数值大小和正负在测量过程中恒定不变,或按一定规律变化的误差就称为系统误差。系统误差又可分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指误差的数值和符号已经确定的系统误差;未定系统误差是指误差数值或符号变化不定或按一定规律变化的误差,未定系统误差也称为变值系统误差。未定系统误差根据不同的变化规律,有线性变化的、周期性变化的,以及按复杂规律变化的等。

系统误差由于它的数值恒定或具有一定的规律性,因此可通过实验的方法找出,并予以消除,或加修正值对测量结果予以修正。

3. 粗大误差

粗大误差也称为粗差,是指那些误差数值特别大,超出在规定条件下预计的误差。出现粗大误差的原因是由于在测量时仪器操作的错误,或读数读错,记数记错,或计算出现明显的错误等。粗大误差一般都是由于测量者粗心大意造成的,所以粗大误差也称为疏失误差。

粗大误差由于误差数值特别大,容易从测量结果中发现,一经发现有粗大误差,可认为该次测量无效,测量数据作废,即可消除它对测量结果的影响。

五、精度

精度的高低是用误差大小来衡量的,误差大则精度低,误差小则精度高。由于精度与误差相对应,而误差按其性质分为系统误差和随机误差,因此,精度也有不同的表示方法。

1. 精密度

精密度表示测量结果中随机误差大小的程度。它是指在一定条件下,进行多次重复测量时,所得测量结果彼此间重复的程度,或称为测量结果彼此之间的分散性,随机误差越小,测量结果越精密。

2. 准确度

准确度表示测量结果中系统误差与随机误差综合大小的程度。它综合反映了测量结果与被测真值偏离的程度,综合误差越小,测量结果越准确。准确度是一个定性的概念,它表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。如某压力表

准确度为 0.5 级,而不是该压力表准确度为 0.5%。

对上述有关精度名词的定义,目前尚不完全统一,有的把准确度称为精确度,或简称精度。有的把精密度简称为精度。还有的把系统误差影响测量结果程度的称为正确度。尽管在名词的称谓上有所差异,但其包含的内容(即系统误差或随机误差或系统误差与随机误差综合对测量结果影响的程度)是完全一致的。

在实际应用中,采用精密度和准确度(精确度)这两种表述较为普遍。

六、测量不确定度

测量不确定度定义为表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数。不确定度可以是标准差或其倍数,或是说明了置信水准的区间的半宽度。

以标准差表示的不确定度称为标准不确定度,以标准差的倍数表示的不确定度称为扩展不确定度。标准不确定度依据其评定方法的不同分为 A、B 两类。用统计分析的方法来评定观测值的标准不确定度称为 A 类不确定度评定,简称 A 类不确定度;用非统计分析的其他方法来评定观测值的标准不确定度称为 B 类不确定度评定,简称 B 类不确定度。

有关测量不确定度的表述与评定方法详见 1.5 节。

1.2 随机误差理论

在测量中,随机误差是无法消除的,对单次测量结果,随机误差的大小、正负都不确定。但对同一个量,进行等精度的多次重复测量,发现随机误差具有一定的规律性,并符合统计规律,即概率(或然率)理论。

1.2.1 统计直方图

举一个简单测量的例子,如用长 300mm 的钢尺,测量已知长度为 836mm 的导线,在相同的观测条件下,共测量了 150 次,测得的中心值为 x_i ,对应的误差为 δ_i ,各误差出现的次数为 n_i ,相对次数(频率)为 f_i ,并列于表 1-1 内。

如以 δ 为横坐标,间距 $\Delta\delta_i = 1\text{mm}$,以 $y_i = f_i/\Delta\delta_i$ 为纵坐标作图,所得图形如图 1-1 所示,该图称为统计直方图。

图中 $y_i = f_i/\Delta\delta_i$ 是对应区间为单位长度时的频率,称为频率密度。从图中可见,误差落在 $\Delta\delta_i$ 区间中的频率为 $f_i = y_i\Delta\delta_i$,它是图中小矩形的面积。显然统计直方图的总面积等于 1。

表 1-1 测量数据

区间号	中心值 x_i/mm	误差 δ_i	次数 n_i	频率 $f_i/\%$
1	831	-5	1	0.66
2	832	-4	3	2.00
3	833	-3	8	5.33
4	834	-2	18	12.00
5	835	-1	28	18.66
6	836	0	34	22.66
7	837	+1	29	19.33
8	838	+2	17	11.33
9	839	+3	9	6.00
10	840	+4	2	1.32
11	841	+5	1	0.66

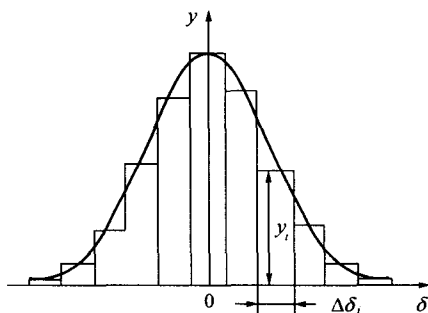


图 1-1 统计直方图

如果测量次数 $n \rightarrow \infty$, 区间 $\Delta\delta \rightarrow 0$, 则无限多个直方图的顶点的连线就形成一条光滑连续的曲线。该曲线称为随机误差的概率密度分布曲线, 也称为高斯误差分布曲线或误差正态分布曲线。

1.2.2 随机误差的特性

从图 1-1 所得的误差分布曲线可表达为误差 δ 的函数 $y = f(\delta)$, 并可用解析方法推导出正态分布曲线的解析方程式为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-3)$$

或

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2\delta^2} \quad (1-4)$$

上式称为误差方程, 也称或然率方程。式中 h 称为精密指数, σ 称为均方根偏差或标准偏差, h 与 σ 的关系为

$$h = \frac{1}{\sigma \sqrt{2}} \quad (1-5)$$

由式(1-3), 结合前面的实例和图形, 可得出随机误差正态分布具有以下特性。

1. 随机误差的单峰性

由式(1-3)可知, 当 $\delta = 0$ 时, $y = 1/(\sigma \sqrt{2\pi})$ 为最大值。也可以说, 小误差比大误差出现的机会多。

2. 随机误差的对称性

由式(1-3)可知, $y = f(\delta)$ 为偶函数, 故有 $f(+\delta) = f(-\delta)$ 。即绝对值相等的正误差和负误差出现的机会相同。

3. 随机误差的有界性

由式(1-3)可知,误差 δ 的区间为 $(-\infty, +\infty)$,但实际上,误差 δ 只出现在一定的区间 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 内。可以证明,当随机误差 $\delta > \pm 3\sigma$ 时的概率 $P = 0.27\%$ 。也就是说,在1000次测量中,最多只有3次测量的误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围,因此,可把 $\pm 3\sigma$ 作为单次测量随机误差的界限。

4. 随机误差的抵偿性

由随机误差的对称性可知,当测最次数增加到无限多次时,随机误差的算术平均值趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = 0 \quad (1-6)$$

1.2.3 标准偏差与概率积分

标准偏差 σ 定义为各个误差平方和的平均值的平方根。因此,标准偏差也称为均方根偏差,用公式表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-7)$$

式中 δ ——各测量值的误差;

n ——测量次数。

标准偏差 σ 的大小取决于具体的测量条件,不同的 σ 值,其正态分布曲线各不相同,如图1-2所示。图中 $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$,可见 σ 值越小,分布曲线越陡,即小误差出现的概率大,大误差出现的概率小。 σ 值增大,则与此相反。因此,常用标准偏差 σ 值来表征测量的精密度, σ 值越小,说明测量的精密度越高。

由式(1-3)概率分布密度函数 $y = f(\delta)$ 可知,随机误差落在 $d\delta$ 区间中的概率为 $f(\delta)d\delta$ 。若设误差落在 $[-\delta, +\delta]$ 之间的概率为 $P[-\delta, +\delta]$,则

$$P[-\delta, +\delta] = \int_{-\delta}^{+\delta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1-8)$$

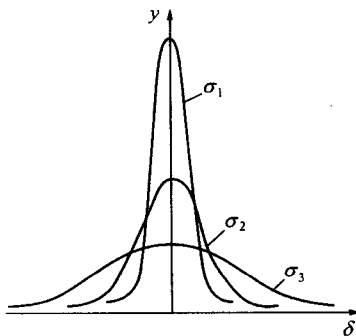


图1-2 σ 值对分布曲线的影响