

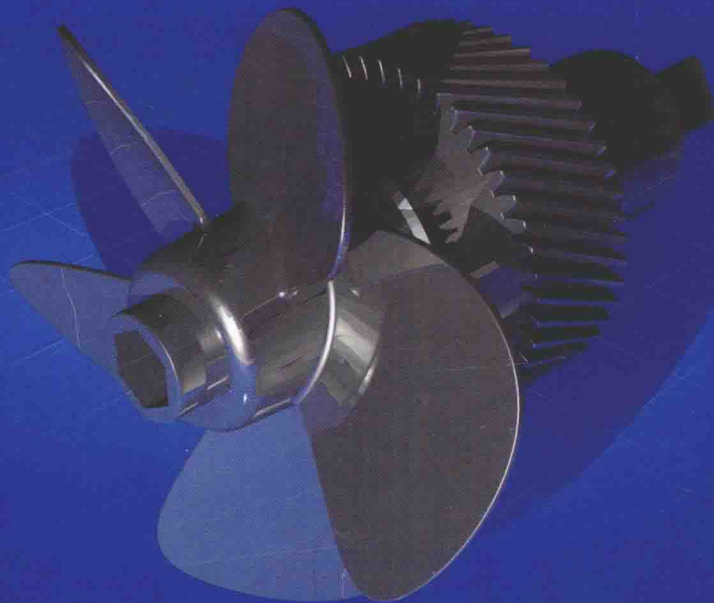


船舶与海洋工程

国家“十二五”重点图书
船舶与海洋工程·经典教材

船舶动力装置测试技术

陈 峻 刘允嘉 编著
张雅娣 主审



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家“十二五”重点图书
船舶与海洋工程·经典教材

船舶动力装置测试技术

陈 峻 刘允嘉 编著
张雅娣 主审

内容提要

本书是“十二五”国家重点图书“船舶与海洋出版工程·经典教材”系列重点建设教材,为经典教材《动力机械测试基础》的修订再版。全书共分12章:第1章测量技术概述;第2章测量误差分析;第3章测量系统基本特性;第4章传感器技术;第5章温度测量;第6章压力与流速测量;第7章流量测量;第8章转速和扭矩测量;第9章船舶液位测量;第10章烟度测量和废气分析;第11章噪声与振动的测量;第12章轴功率测试与航行试验。

本书主要作为高等院校轮机工程专业、船舶海洋工程专业教学用书,也可作为从事相关工作的研究人员及工程技术人员参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶动力装置测试技术 / 陈峻,刘允嘉编著. —上海:上海交通大学出版社,2015
ISBN 978-7-313-10441-0

I. ①船… II. ①陈… ②刘… III. ①船舶机械-动力装置-测试技术-教材 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 015393 号

船舶动力装置测试技术

编 著:陈 峻 刘允嘉

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海天地海设计印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:450 千字

版 次:2015 年 2 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-10441-0/U

定 价:39.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:18.5

印 次:2015 年 2 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-64835344

前 言

本教材是在《动力机械测试基础》教材基础上修订而成。原教材于1987年首次出版,至今已近20年,在社会上发挥了很好的作用,有一定影响。2000年前后,教材第一次修订再版,由上海交通大学罗次申主编,书名改为《动力机械测试技术》,旨在使学生在校学习期间接受必要的基础实践知识技能培训,使之走上工作岗位时初步具备了从事科学试验研究的独立工作能力。

然而,随着科学技术的迅速发展,测试技术也在不断地进步,多项常规、成熟的测量仪器设备逐步向船舶监控装备方向推进。在上海交通大学船舶海洋及建筑工程学院动力装置研究所、上海交通大学出版社与相关部门、院所专家的关心支持下,确认了本次教材重新修订的紧迫性,并指出,修订任务在内容上注重与本专业结合,贴近工业实践,与当前造船工业发展趋向紧密结合。因此,教材名称定为《船舶动力装置测试技术》,入选“十二五”国家重点图书“船舶与海洋出版工程·经典教材”系列。

本次教材修订由陈峻、刘允嘉担任主编。全书共12章,其中第1,2,3,4,5,6,7章由陈峻编写;第8,9,12章由刘允嘉编写;第10章由杨冉、李明、张海娟编写;第11章由车驰东编写。张雅娣担任本书主审。在修订过程的调研中,很多研究院所的研究员、高级工程师、工程师都给予了十分热忱的支持。他们是中船总704研究所李涛、商维禄,708研究所周师鹏、张雅娣、傅颐婷等,上海交通大学历届校友崔健生、孔曼军、杨海、夏冬莺等,在此对他们表示由衷的感谢。对组建本专业实验课的李铭慰教授表示深切缅怀。对曾为本教材建设做出过重要贡献的马福寿、陶裕民、朱士禄、徐大中、朱敏学、周校平、刘国庆、罗次申、卢士红、杨本法等同志表示十分敬意。

此外,感谢马捷教授、刘雁集博士为本书出版所做的工作。

由于编者的理论水平与实践经验有限,书中存在的不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014年

目 录

第 1 章 测量技术概述	1
1.1 测量方法	1
1.2 测量系统的组成	3
1.3 测量精度与误差	5
1.4 有效数字	8
第 2 章 测量误差分析	11
2.1 随机误差的分布规律.....	11
2.2 直接测量的误差分析与处理.....	18
2.3 粗大误差.....	30
2.4 系统误差.....	35
2.5 间接测量误差分析处理.....	36
2.6 误差的综合.....	42
第 3 章 测量系统基本特性	48
3.1 测量系统的静态特性.....	48
3.2 测量系统的动态特性.....	53
3.3 测量系统的校准.....	64
第 4 章 传感器技术	71
4.1 传感器基本形式、原理	71
4.2 信号转换与传输.....	84
4.3 信号处理.....	93
4.4 测量电路噪声与抑制.....	95
4.5 智能传感器.....	99
第 5 章 温度测量	102
5.1 温度测量基本概念	102
5.2 热电偶测温	104
5.3 电阻测温	117
5.4 热膨胀式温度计	122
5.5 辐射式温度计	123
5.6 温度计的选择、安装.....	127

第 6 章 压力与流速测量	131
6.1 压力的基本概念	131
6.2 稳态压力的测量	133
6.3 稳态压力指示仪表	141
6.4 动态压力的测量	146
6.5 流体速度的测量	150
6.6 热线测速技术	154
第 7 章 流量测量	158
7.1 流量测量概述	158
7.2 测速法测流量	161
7.3 压差法测流量	164
7.4 涡轮流量计	172
7.5 其他流量计	175
第 8 章 转速和扭矩的测量	180
8.1 转速的测量——频率计数法测量转速的基本原理	180
8.2 模拟方法测量的转速表	184
8.3 扭矩的测量	186
8.4 测功系统的评定	198
第 9 章 船舶液位测量	200
9.1 压载水舱的液位测量	201
9.2 淡水舱的液位测量	202
9.3 燃油的液位测量	204
第 10 章 烟度测量和废气分析	207
10.1 概述.....	207
10.2 废气颗粒物的测量.....	209
10.3 废气分析.....	216
第 11 章 噪声与振动的测量	226
11.1 振动与噪声测量概述.....	226
11.2 船体振动试验.....	236
11.3 船舶机械设备振动试验.....	237
11.4 船舶轴系振动试验.....	238
11.5 船舶噪声试验.....	242
11.6 船舶结构振动测量及故障诊断(选读).....	243
11.7 船舶发电机组振动测试(选读).....	248

11.8 船舶运行模态测量(选读).....	253
第 12 章 轴功率测试与航行试验	257
12.1 轴功率测试.....	257
12.2 航行试验的目的.....	265
12.3 船舶性能试验.....	266
12.4 主机、轴系和其他装置试验	273
12.5 船舶自动化系统试验.....	276
参考文献	285

第 1 章 测量技术概述

知识的获取往往从测量开始。测量是人类对客观事物获得数量概念的认识过程,是将客观事物的量转换成人们可以接受或者可以利用的信息的过程。测量获得的信息,可以用数字、图形、表格、公式、声响等形式显示出来,还可以用于控制、选择、报警等不同领域,因此测量技术与其他学科有着广泛而密切的联系。

要正确地对物理量进行测量,首先必须选择正确的测量方法,其次应根据测量的复杂程度合理地组成测量系统。

任何测量中都不可避免地包含误差,因此测量技术的发展与“误差及数据处理”理论紧密相关。运用“误差理论”,能够分析和判断测量结果的可靠性和有效性。“数据处理”过程运用数学方法对大量的测量数据加以整理和分析研究,可将测量得到的数据群转换成为一定的函数式或其他形式,使测量结果更符合科学性,从而得出反映事物间联系的规律。

1.1 测量方法

1.1.1 被测量

在工程和试验中,需要测量的参数通常被称为“被测量”。在船舶动力装置中,常用的被测量有:转速、扭矩、轴功率、压力、流量、温度、振动、液位、烟度、废气组成等。

按照随时间变化的关系,被测量可分成:

(1) 静态参数:在测量的过程中,随时间变化不显著的参数。在较短的时间内,静态参数可近似地看成为常数。例如环境温度、大气压力、大气湿度;稳定工况下,动力机械的转速、扭矩等;

(2) 动态参数:在测量过程中,随时间变化急剧的参数。例如柴油机燃烧室内的燃气温度、压力;过渡工况下,动力机械的转速、扭矩等。动态参数与时间的关系,可以是周期性函数、非周期性函数或随机函数。

1.1.2 测量方法分类

测量,指用试验的方法,把被测量与同性质的标准量进行比较,确定二者的比值,从而得到被测量的量值。测量方法是实现被测量与单位(即标准量)比较的方法。

测量方法有不同的分类标准。

1. 按照获得测量结果的方法分类

按照获得测量结果的方法的不同,通常将测量方法分成直接测量和间接测量两大类。

1) 直接测量

将被测量直接与选用的测量单位进行比较,而得出被测量数值的方法。例如,用压力表测量容器内介质压力,用转速表测量发动机输出转速等。直接测量又可分成直读法和比较法

两种:

(1) 直读法。直接从测量仪表(或系统)上读出测量结果。如从水银温度计上读得温度值。该方法的优点是测量过程简单而迅速,测量结果直观,缺点是测量精度较差。

(2) 比较法。这种测量方法不是直接从测量仪表上读出测量结果,而是与某一已知量或标准量进行比较,因此测量手续比较复杂,但测量仪表本身的误差以及其他某些误差往往在测量过程中被抵消,故测量精度一般比直读法高。

比较法又分成以下三种方法:零示法、差值法和替代法。

零示法,使被测量对仪表的影响被同类已知量对仪表的影响相互抵消,则被测量等于已知量。如,用天平测定物体的质量,用电位差计测量热电势等。

差值法,从仪表上直接读出被测量与已知量之间的差值。如用 U 型液柱式压差计测量介质的压力差。

替代法,用已知量代替被测量,使两者对仪表的影响相等,则被测量等于已知量。如,用光学高温计测量温度。

2) 间接测量

在工程中,有的被测量无法(或不便)直接测量,或者直接测量的精度不能满足要求,如果可以根据某些规律找出被测量与其他几个量的函数关系。在进行测量时,首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,然后将测量值代入函数关系式,经过计算得到所需的结果,这种方法称为间接测量。

如,船舶柴油机有效功率 P_e 的测量,首先用直接测量的方法分别测量得到柴油机输出扭矩 M 和转速 n ,然后通过计算得到 P_e 。

$$P_e = \frac{M \cdot n}{9550} \text{ (kW)} \quad (1-1)$$

式中, M 为柴油机转轴传递的扭矩(N·m); n 为柴油机转轴的转速(r/min)。

2. 按照测量条件是否改变分类

根据测量条件相同与否,测量方法可分为等精度测量和不等精度测量。一般情况下,等精度测量常用于科学实验中对某参数的精确测量,非等精度测量常用于对新研制仪器的性能检验。

1) 等精度测量

在完全相同条件(测量者、仪器、测量方法、测量环境等)下进行的一系列重复测量称为等精度测量。如,要精确测量某物质的熔点温度,采用同一测温仪器,用相同的测量方式,在相同测量条件下测量多次,取测量数据的平均值可以得到较高的测量精度,测量结果如表 1-1 所示,表中显示 5 次温度测量的平均值 1 008℃ 可以较准确地表示被测温度。

表 1-1 高炉温度测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
测量温度	1 010℃	1 009℃	1 012℃	1 005℃	1 002℃	1 008℃

2) 非等精度测量

在多次测量中,测量条件不尽相同的测量称为非等精度测量。

3. 按被测量在测量过程中的状态分类

根据被测量在测量过程中状态是否变化,测量方法可以分成静态测量和动态测量。

1) 静态测量

在测量过程中,被测量不随时间而变化或随时间变化极其缓慢的测量称为静态测量。如,理想恒温水槽中的温度测量,风洞流场稳定状态下的气流速度的测量等。

2) 动态测量

在测量过程中,被测量随时间变化的测量称为动态测量。如,柴油机在过渡工况时的转速和扭矩测量,柴油机缸内温度和压力的测量。相对于静态测量,动态测量更为困难,对测量系统的要求更高。选择测量仪表(或系统)时不仅要考虑仪表(或系统)的静态特性,还要关注动态响应的要求。测量数据的处理在某些方面与静态测量数据处理有不同的原理和方法。

必须指出,严格地讲,绝对不随时间变化的量是不存在的,在实际测量过程中,只是将那些随时间变化较慢的量近似看成静态的量,对这种量的测量认为是静态测量。

4. 按测量点不同分类

1) 点参数测量

在工程测量中,对某些参数只需测量一个点即可表示整个平面或空间的物理状态,这种测量称为点参数测量。如柴油机排气温度的测量。

2) 场参数测量

工程测量中,有些量是在空间或平面分布不均匀,如内燃机运行过程的每一瞬间,其燃烧室内各点温度分布是不均匀的;气流在弯管内流动时,通道截面上各点速度分布是不均匀的。这一类参数必须进行多点测量,多点测量称为场测量。

5. 按测量器具是否与被测体接触分类

按测量器具与被测量体接触或不接触,测量可分为接触式测量和非接触式测量。如,测量转速有接触式转速表和非接触式转速表;热电阻测量温度时与被测物体接触,而光学高温计进行温度测量时不接触被测物体。

以上各种测量方法各有特点,测量方法的选择取决于测试的具体条件和要求。在满足测量精度的前提下,选择合适的测量方法,选择尽可能经济的测量系统,力求测量简便、迅速,不应苛求于使用高精度的仪表(或系统)。

1.2 测量系统的组成

通常,为了测量某一被测量的值,根据测量精度要求,需要将若干测量设备按照一定方式连接起来,组成测量系统。由于测量的目的和要求不同,测量所使用的仪表、装置、元件及辅助设备也会有很大差别,可以是一台简单的仪器,也可以是由许多设备组成的复杂测量系统。但是,就在测量过程中各部分所起的作用来看,任何测量系统都可分成感受元件、转换和处理单元、显示和记录单元、信号传输部分四部分(见图 1-1)。

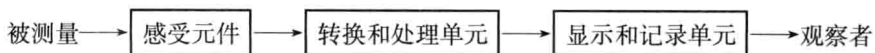


图 1-1 测量系统的组成

1.2.1 感受元件

感受元件(敏感元件)与被测对象直接发生关系,它的功能是拾取信息并将该信息进行转换。通常,感受元件将被测量(如温度、转速、扭矩等)转换为另一种易测定的物理量(如电压、位移、压差等)。转换信号的形式有两种,一种是转换成非电信号,如用水银温度计测量温度,其感受部分感受到被测介质的温度变化,转换成与之相应的水银柱位移信号;又如,用弹簧管压力计测量压力,感受部分把被测压力转换成相应的弹簧管位移信号。另一种形式是将被测量直接转换为电信号输出,如用热电偶测量温度时,热电偶直接将温度值转换为相应的电压信号。

理想的感受元件应转换速度快、抗干扰能力强、良好的线性转换、尽可能不干扰被测量介质的状态。

1.2.2 转换和处理单元

这部分的功能是连接感受元件和显示记录单元,将感受元件输出的信号转换为显示记录单元易于接收的信号。

对于不同的测量系统,转换和处理单元一般有两种形式:一种是非电量的转换,如手持模拟转速表为了显示转速,利用飞块机构将转速信号变换成为指针位移信号,以供显示转速;另一种是电信号的转换和处理,由于感受元件输出的电信号一般都很微弱且包含干扰和噪声,如电压一般是毫伏级,电阻一般是微欧级,需要经过信号调理、放大、整形后可直接送到显示单元,也可通过 A/D 转换器转换成数字量。

对转换和处理单元而言,不仅要求性能稳定、精确度高,也应使信息损失最小。

1.2.3 显示和记录单元

这部分的功能是把被测量的信息用适当的形式进行显示和记录,以便进行观测和数据处理。

显示可分成模拟显示和数字显示两种。常见的模拟显示器有指针式仪表、示波器等。常用的数字式显示器是数字电压表、数字式频率计等。计算机的显示屏也可作为数字式或模拟式的显示器来用。

记录器用于记录测量过程中信号对时间变化的关系,常用的记录器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪等。高速瞬态过程的记录可用记忆示波器、瞬态记录仪、高速数据采集器等。

1.2.4 信号传输部分

对于整个测量系统,需要把信号从感受元件传输到转换处理单元,最后送到显示记录单元,这之间依靠导线、导管、光导纤维、无线电通信等来连接,由被传递信号的物理性质而定。

不同测量系统的信号传输部分差异很大,可以非常简单,只是一根导线或导管,如 U 型管压力计的信号传输部分只有橡皮管或塑料管,也可以非常复杂。

应该指出,测量系统组成和各组成部分的功能描述并不是唯一的,关键在于弄清其在系统中的作用,而不必拘泥于名称本身。

1.3 测量精度与误差

如果测量过程是在理想环境条件下进行,则测量的结果将十分正确。但这种理想的测量环境和条件在实际中是不存在的,无论是传感器、仪表、测量对象、测量方法等,都不同程度地受到各种因素的影响,当这些因素发生变化时,必然会影响到被测量示值,使示值和被测量值之间产生差异,这个差异就是测量误差。

1.3.1 误差的定义

被测物理量所具有的客观存在的量值,称为真值 x_0 。由测量仪表(或系统)测得的结果称为测量值 x 。测量值 x 与真值 x_0 之间的差异称为测量误差 Δx 。

因为真值 x_0 无法准确得到,实际上用的都是约定真值。测量误差的存在不可避免,任何测定值只能近似地反映被测量的真值。

误差的大小与测量仪表的精度、测量过程中的随机因素、测量方法等许多因素有关,随着科技水平的不断提高,误差有可能被控制得越来越小。人们的目标是尽可能减少误差 Δx ,使测量值 x 接近于真值 x_0 ,或者应用误差理论分析产生误差的原因和性质,并采取必要的措施,使测量误差控制在可以接受的合理范围内。

1.3.2 误差的表达形式

误差一般有绝对误差和相对误差两种表达形式:

1) 绝对误差

它表示测量误差绝对量的大小,即

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

测量的结果记作

$$x \pm \Delta x \quad (1-3)$$

2) 相对误差

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

绝对误差 Δx 与测量值 x 之比称为相对误差 δ ,用百分率表示,用相对误差表示的测量结果可记作

$$(1 \pm \delta)x$$

绝对误差只能表示出误差值的大小,而不能表示出测量结果的精度。例如,有两个温度测量值 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $(150 \pm 1)^\circ\text{C}$,尽管他们的绝对误差都是 $\pm 1^\circ\text{C}$,显然后者的测量精度明显高于前者,因为两者的相对误差不同, $\delta_1 = \pm 6.7\%$, $\delta_2 = \pm 0.7\%$ 。

1.3.3 测量误差的分类

1. 按误差的特性分类

在测量过程中产生误差的因素多种多样,如果按照这些因素出现的规律及它们对测量结果的影响程度来区分,可以分成3类误差:

1) 系统误差

在相同条件下对某一量进行多次测量时,误差的绝对值和符号均保持一致恒定,或者按照一定的规律变化,这类测量误差称为系统误差。前者称为恒值系统误差,后者称为变值系统误差。

这类误差是由某些固定的因素造成的,其来源主要包括:

(1) 由仪表和装置引入,如,仪表的示值不准、零值误差、仪表结构误差等。

(2) 环境因素引入,实际测量环境和仪表(或系统)标定环境不同而造成的、按一定规律变化的误差。

(3) 理论测量方法引入,某些理论公式本身的近似性,或实验条件不能满足理论公式所规定的要求,或测量方法本身所带来的误差。

(4) 个人因素引入,由于实验者的生理或心理特点所造成的,使实验结果产生系统误差。如,在刻度上估计读数时,习惯上偏于某一方向等。

系统误差就个体而言具有规律性,其产生的原因往往是可知的或者是能够掌握的。因此,系统误差产生的原因通过仔细地检查、校验,可以被发现。在采取相应的校正措施后,系统误差可以减小或消除,也可以通过引入更正值的方法加以修正。

2) 随机误差

对同一被测量进行多次测量时,由于受到大量的、微小的、相互独立的随机因素的影响,测量误差的大小和符号没有一定规律,并且无法估计,这类误差称为随机误差。

随机误差的产生取决于测量过程中一系列随机因素的影响。所谓随机因素是指测量者无法严格控制的因素,如,仪表内部存在有摩擦和间隙等不规则变化;测量过程中外界环境条件(如气压、温度、湿度、空气振动、电磁干扰等)的瞬间变化;测量时不定的读数误差等。

随机误差的出现是无法控制的,所以任何测量过程中,随机误差均不可避免,且在同一条件下重复进行的各次测量中,随机误差或大或小,或正或负。因此,随机误差从个体而言是没有规律的,不能通过试验的方法来消除它。但,只要在等精度条件下进行测量,且测量次数足够多,从总体上来看,随机误差又符合一定的统计规律。因此,可以用数理统计的方法从理论上估计随机误差对测量结果的影响。

3) 粗大误差

在测量过程中,完全由于人为过失而造成的、明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差。如读数错误、记录错误、计算错误等。粗大误差的值往往大大超过在同样测量条件下的系统误差和随机误差,以至于使测量结果完全不可信赖。因此,粗大误差一经发现,必须予以剔除,同时应通过主观努力克服这类错误。

2. 按误差产生的来源分类

1) 仪表误差(也称为装置误差)

由于测量仪表或装置本身的误差所引起的,其值与测量仪表或装置的制造精度、结构、安

装以及技术状况的优劣有关。

2) 方法误差(理论误差)

由于测量方法的不完善,或测量所依据的理论不完善而形成的误差。

3) 环境误差

由于测量环境(如温度、气压、湿度、光线、电场、磁场等)不符合测量要求而产生的附加误差。

4) 动态误差

在动态测量中,由于测量系统中的自振频率、阻尼的关系,响应存在快慢。因此,被测的动态参数的真值和测量值之间存在幅值和相位的误差。

5) 人为误差(也称为操作误差)

由于操作者分辨能力、反应速度的快慢、某些固有习惯以及操作熟练程度的不同等引起的误差。

1.3.4 测量的正确度、精密度、准确度、不确定度

系统误差、随机误差和粗大误差都会引起测量结果的歪曲,测量中应设法减小误差对测量结果的影响。在测量理论中引入正确度、精密度、准确度的概念,用以衡量测量结果与被测量真值的逼近程度。

1. 正确度(measurement trueness)

在等精度测量条件下,对同一被测量进行多次测量,测量均值偏离真值 x_0 的程度称为测量正确度。正确度与系统误差有关,与随机误差无关。系统误差大,则测量的正确度低。

2. 精密度(measurement precision)

在等精度测量条件下,对同一被测量进行多次测量,测量值间的一致程度,或者说测量值分布的密集程度,称为测量的精密度。一般用不精密程度表示,不精密度可以用测量值的标准偏差、方差等表示。精密度反映了随机误差的影响,随机误差大,测量的精密度低,测量数据的弥散程度大。

需要指出,无论精密度还是正确度,都是就多次测量获得的测量值的分布而言的。如果仅有一个测量值,很难说明测量的精密度和正确度。

3. 准确度(measurement accuracy)

被测量的测量值与其真值间的一致程度称为测量的准确度。准确度是正确度和精密度的综合反映,同样也是随机误差和系统误差的综合反映。准确度高意味着正确度和精密度都好。

在工程测量中经常会提到的“精度”通常就是指测量的准确度。

测量的正确度、精密度、准确度的关系可用图 1-2 进行说明。靶心中央一点相当于被测量的真值 x_0 ,而打靶时的命中点则为每次的测量值。在图 1-2(a)中,多次测量的测量值离散性大,测量精密度低;但均值 \bar{x} 接近靶心真值 x_0 ,测量正确度高。在图 1-2(b)中,多次测量的测量值密集,测量精密度高;但均值 \bar{x} 偏离靶心真值 x_0 较大,测量正确度低。在图 1-2(c)中, x_k 明显异于其他测量值,可判断为含有粗大误差的坏值,在剔除坏值 x_k 后,该组测量的精密度和正确度均高,即测量的准确度高。

4. 不确定度(measurement uncertainty)

测量误差客观存在,且不能确定其大小和方向,所以一切测量结果都不可避免地具有不确

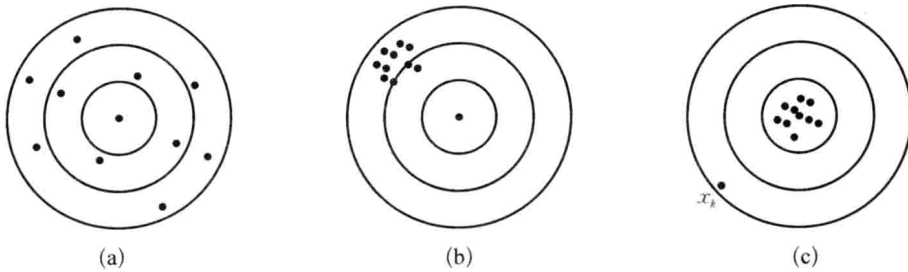


图 1-2 正确度、精密度、准确度之间的关系

定性,因此引入了“测量不确定度”的概念。

测量不确定度表明等精度条件下进行重复测量时得到的测定值的分散性,是通过分析和评定得到的一个区间。测量不确定度越小,测量结果的可信程度越高;测量不确定度越大,测量结果的可信程度越低。

测量不确定度可以用测量的标准差、标准差的倍数、置信区间的半宽三种形式来表示。

由于被测量的真值无法准确得到,用的都是约定真值,约定真值需用测量不确定度来表征所处的范围,按某一置信概率给出真值可能落入的区间。即,测量结果可以表示为:

$$\text{测量结果} = \text{被测量估计值} \pm \text{测量不确定度}$$

用统计方法对测量不确定度的估算详见本书第 2 章。

1.4 有效数字

测量是被测量的物理量和标准量(即单位)进行比较,确定出是标准量的多少倍。因此测量值会因所用单位的不同而不同,在确定某一单位的情况下,表示测量值的数值位数不能随意取位,写多了没有实际意义,写少了又不能比较真实的表达物理量。因此,一个物理量的数值和数学上的某一个数就有着不同的意义,这就引入了“有效数字”的概念。

1.4.1 直接测量量的有效数字

图 1-3 为用毫米尺测量某工件长度的示意图。此工件的长度介于 13 mm 和 14 mm 之间,其右端点超过 13 mm 刻度线处,估计为 6/10 格,即工件的长度为 13.6 mm。

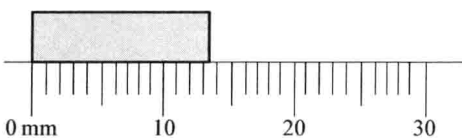


图 1-3 用毫米尺测量工件长度

从获得结果看,前两位 13 是直接读出,称为可靠数字,而最末一位 0.6 mm 则是从尺上最小刻度间估计出来的,称为欠准数字。欠准数字虽然可以,但不是无中生有,而是有根有据有意义的。显然,有一位欠准数字,就使测量值更接近真实值,更能反映客观实际。因此,测量值应保留到这一位,即使估计数是 0,也不能舍去。

由几位可靠数字加上一位欠准数字,称为有效数字。从左起第一个非 0 数字开始,到最末一位数字止的所有数字都是有效数字,有效数字的个数称为有效数字的位数,如上述的 13.6 mm 有三位有效数字。有效数字位数的多少,表示了测量所能达到的准确程度,这与所用的测量工具有关,如 0.0135 m 是用最小刻度为毫米的测量工具测量的,而 1.030 m 的测量工

具最小刻度为厘米。

有效数字与十进制单位变换无关,即与小数点位置无关。如,0.013 5 m 和 1.35 cm 及 13.5 mm 三者是等效的,有三位有效数字,只不过是分别采用了米、厘米和毫米作为长度的表示单位。当数据过大或过小时,可用科学计数法书写。

用有效数字记录测试结果时,一般须遵守下列一些主要规则:

(1) 对不需标明误差的数据,其有效位数应取到最后一位是欠准数字,且通常认为在末位有 $\pm(0.5\sim 1)$ 个单位的误差,例如在图 1-3 所示测量中的例子。

(2) 对需标明误差的数据,其有效位数应取到与误差同一数量级。如用不确定度为 0.05 mA 的电流表对某电流进行测量,测量值为 1.678 mA,测量结果记作 (1.678 ± 0.05) mA 是不合适的。由于使用该电流表,测量结果在百分位上已经有了误差,在百分位以后的数字没有意义,所以应把测量结果记作: (1.68 ± 0.05) mA。

(3) 有效数字的修约。当有效数字的位数确定后,后续的多余数字应一律舍弃。舍弃原则是“四舍六入,五凑偶数”,五凑偶数,即被处理的数据是 5 时,看 5 后面若为非 0 的数则入,5 后面无数字或为 0 则将拟保留的数凑成偶数。如将下表测量值修约为四位有效数字:

修约前	修约后	修约前	修约后	修约前	修约后
3.142 45	3.142	3.215 60	3.216	5.623 50	5.624
5.624 50	5.624	3.384 51	3.385	3.384 5	3.384

需要注意的是,修约数字时,对原测量值要一次修约到所需位数,不能分次修约。如将 3.314 9 修约成三位数,不能先修约成 3.315,再修约成 3.32;只能一次修约为 3.31。

1.4.2 间接测量量的有效数字

间接测量物理量是通过几个与之有函数关系的直接测量物理量计算得到的,进行数字运算处理时,计算的结果也存在着应取多少位数来正确表达的问题。如果间接测量值所取的有效位数超过实际所能达到的精度,多取的几位其实是无效的,即仅从计算上增加有效位数不可能提高测量精度。反之,如果间接测量值所取的有效位数少于实际所能达到的精度,就不能把已经达到的测量精度表示出来,会造成使用错误。

在进行运算时,有效数字遵循以下规则:

(1) 加减计算,参与运算的各数所保留的小数点后的位数,应与所给各数中小数点位数最少的相同,即以绝对误差最大的原始数据为准。

如 $0.012 1 + 25.64 + 1.057 82 = 26.709 92$,按 25.64 为依据,有效数字保留小数点后两位,即计算结果 $= 26.71$ 。

(2) 乘除计算,参与运算的各数保留的位数以有效数字最少的数字为标准,即以相对误差最大的原始数据为准。

如 $\frac{0.032 5 \times 5.103 \times 60.06}{139.8} = 0.071 250 4$,在参与运算的数中有效数字最少的是 0.032 5,则计算结果 $= 0.071 3$ 。

(3) 对数、指数、三角函数运算,结果的有效数字的位数与变量的有效数字位数相同。

如 $(7.325)^2 = 53.66$, $\sqrt{32.8} = 5.73$, $\sin 60^\circ 00' = 0.8660$ 。

(4) 常数,公式中的常数,如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 等,它们的有效数字位数是无限的,运算时一般根据需要,比参与运算的其他量多取一位有效数字即可。

应该指出的是,上述的运算规则不是绝对的。一般说来,进行手算时,为了避免在运算过程中因数字的取舍而引入计算误差,则在运算过程中的中间结果多保留一位数字为妥,但最后结果仍以间接测量值最后一位数字与不确定度对齐的原则为准。

1.4.3 不确定度的有效数字

按照测量技术规范规定,在通常情况下,测量的不确定度(通常所指的误差)最多取两位有效数字。为了对测量提供必要的保险,避免过于乐观,最终结果的不确定度在设定的有效位数截断后末尾进一。如, 0.2412×10^{-8} 写作 0.25×10^{-8} , 而不是 0.24×10^{-8} 。

需要注意的是,如果不确定度只保留一位有效数字,尤其是该数字较小时,可能导致很大的修约误差。

例如:经计算一温度测量结果的不确定度为 0.149°C ,将其修约到一位有效数字时,测量结果不确定度为 0.2°C ,只考虑有效数字修约引起的误差为 0.051°C ,是测量结果不确定度的 25.5%,这对评定测量结果的质量影响很大。

若将测量结果的不确定度修约到两位有效数字,测量结果的不确定度为 0.15°C ,由修约引起的误差为 0.001°C ,是测量结果不确定度的 1%,对评定测量结果质量的影响可以忽略不计。

当修约前测量结果不确定度的第 1 位数字增大时,则由修约引起的误差对测量结果不确定度的影响将减小。

例如:用一测温仪表测量某一物体的温度,计算出其测量结果的不确定度为 0.249°C ,将其修约到一位有效数字时,测量结果的不确定度为 0.3°C ,由修约引起的误差为 0.051°C ,是测量结果不确定度的 17%。

若测量结果的不确定度为 0.349°C ,将其修约到一位有效数字时,测量结果的不确定度为 0.4°C ,由修约引起的误差为 0.051°C ,仅是测量结果不确定度的 12.8%。

因此,当修约前第 1 位有效数字为 1 时,测量结果的不确定度应取两位有效数字。2 或以上时,可用一位或两位有效数字。