

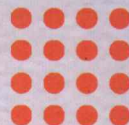
普通高等学校“十一五”规划教材



HIGHER

FOR

EDUCATION



SHIYAN LIXUE

实验力学

张天军 韩江水 屈钧利 编

西北工业大学出版社



实 验 力 学

张天军 韩江水 屈钧利 编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书根据普通高等学校力学专业对“实验力学”课程的基本要求,阐述了进行实验应力分析的常用实验方法。主要内容包括误差分析和实验数据处理、量纲分析和相似理论、电阻应变测量技术基础、光弹性实验方法,同时对全息光弹性法、全息干涉法、云纹法、散斑干涉法、焦散线法、脆性涂层法和 X 射线法等其他实验应力分析方法作了简单介绍。本书在编写和内容选取上,力求切合普通高等学校的实际教学要求,并注意反映近年来实验应力分析领域中的新设备、新技术和发展趋势。

本书可作为普通高等院校力学、机械等专业本科学生及研究生的“实验力学”课程教材,也可作为相关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实验力学/张天军,韩江水,屈钧利编. —西安:西北工业大学出版社,2008. 12
ISBN 978-7-5612-2486-1

I. 实… II. ①张…②韩…③屈… III. 实验应力分析 IV. O348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008)第 189099 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西丰源印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:12.25

字数:295 千字

版次:2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

本书是根据普通高等学校“实验力学”课程的基本要求及作者多年从事该课程教学的经验,结合实验应力分析技术近年来发展的实际情况编写而成的。

“实验力学”课程是工程力学专业本科生必修的重要专业课,是一门结合力学、光学、电学和计算机领域知识的交叉学科课程,其内容与高新技术的发展密切联系。

本书共分6章。第一章是绪论,第二章讲述误差分析和实验数据处理,第三章讲述量纲分析和相似理论,第四章讲述电阻应变测量技术基础,第五章讲述光弹性实验方法,第六章简单介绍了其他实验力学方法。编写本书的目的旨在使学生掌握实验力学的基本理论和实验方法,为解决工程实际中的结构强度问题和进行力学及相关学科的科学研究的科学研究,打下坚实的理论基础并掌握较强的实验技能。

本书在编写上注重逻辑性和系统性,内容精练,循序渐进,文字叙述通俗易懂,可作为高等理工院校力学专业高年级本科生及研究生的“实验力学”课程教材,也可以作为机械、土木、材料和化工等专业本科生选修课的教材。

本书第一至四章由张天军编写,第五章由屈钧利、张天军合编,第六章由韩江水、屈钧利合编。在本书的编写过程中,参考了国内外公开出版的一些图书、会议资料、网上资料及兄弟院校的有关讲义,还得到了学校主管部门的大力支持,在此谨致以衷心的感谢。

由于编者学识有限,书中疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008年8月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 误差分析和实验数据处理	7
第一节 误差分析中的基本概念	7
第二节 有效数字与其运算法则	10
第三节 误差分析的理论基础	11
第四节 间接测量值的误差估计	15
第五节 实验数据的表示方法	16
第三章 量纲分析和相似理论	20
第一节 单位和量纲	20
第二节 量纲分析	21
第三节 相似理论	22
第四节 用方程式分析结构相似	25
第五节 用量纲分析法分析结构相似	27
第四章 电阻应变测量技术基础	29
第一节 电阻应变计的构造及工作原理	29
第二节 电阻应变计的测量电路	54
第三节 电阻应变仪	74
第四节 记录仪器	88
第五节 静态应变测量	90
第六节 动态应变测量	100
第七节 电阻应变测量在工程中的应用	112
第五章 光弹性实验方法	130
第一节 光弹性实验方法的基本原理	130
第二节 等差线和等倾线	142
第三节 平面光弹性应力计算	149
第四节 三维光弹性的冻结切片法简介	154
第五节 光弹性材料和模型	164
第六章 其他实验方法简介	169
第一节 全息光弹性法及全息干涉法	169

第二节	云纹法.....	175
第三节	散斑干涉法.....	178
第四节	焦散线法.....	181
第五节	脆性涂层法.....	183
第六节	X 射线法.....	185
参考文献.....		189

第一章 绪 论

实验分析和理论计算是解决各种工程中的力学问题常用的两种方法,两者相辅相成。实验的设计和实验必须以前理论分析作为指导,新理论的提出和理论计算结果需要实验结果的支持和验证。在解决工程实际问题时,理论方法提供了理论计算的基本方程式,能够对一些简单问题给出精确解。但是对于几何形状或者载荷情况比较复杂的工程构件,常常遇到数学计算方面的困难,采用理论方法往往需要进行一些假设和理想化,因此所得结果均为近似值,此时必须依据实验进行验证。目前,随着计算机软硬件技术的飞速发展和广泛应用,运用有限单元法、边界元法等数值计算方法,几乎可解答所有问题。但是,应用数值计算方法,必须以建立正确的数学模型为前提,才能获得正确的结果,而且同样必须要得到实验方法的验证。此外,工程实际中存在着许多载荷和边界条件未知的问题,对于此类问题,数值计算所需要的力学参数必须通过实验测量才能获得。

实验力学是用实验分析方法确定构件在受力情况下的应力状态的学科,是一门与工程实际联系密切的学科。实验力学的任务是研究处于不同环境中的构件在载荷作用下,其内力、位移、应力、应变的变化规律,为合理地选择构件的几何尺寸和截面形状提供依据,使强度设计达到既经济又安全的目的。实验分析方法既可用于研究基本规律,为发展新理论提供依据,又是提高工程设计质量,进行失效分析的重要手段。其特征是用实验的手段对各种力学问题进行研究,得到第一性的认识,并据此总结出规律(定理、定律、公式、理论),建立以力学模型为表征的理论。实验分析方法相对于理论计算与分析方法,具有很强的实践性和更高的可靠性。它不但对理论计算做出贡献,而且能有效解决许多理论工作不能解决的工程实际问题,在应力分析中有其独特的作用,因此它不可能被理论所替代。但是,我们也应该看到实验应力分析方法的局限性,由于某一点的应力是作为一种极限过程求得的,其应变实际上是位移导数的函数,因此实验不论在模型上或在实物上所得的结果均包含理想化和近似的因素。同时,由于测试技术的限制,在某些特殊环境条件下,现在还不能进行实验,此外测量精度亦有待于进一步提高。

实验应力分析方法主要有电阻应变测量、光弹性实验法、脆性涂层法、云纹法、全息干涉法、散斑干涉法、声全息法、声弹性法、比拟法、X射线法等。

下面我们简要地介绍现在最常用的应变电测法、光学方法、声学方法等。

一、电阻应变测量

电阻应变测量技术起源于19世纪。1856年,W.汤姆逊(W. Thomson)对金属丝进行了拉伸试验,发现金属丝的应变与电阻的变化有一定的函数关系,惠斯登电桥可用来精确地测量这些电阻的变化。1938年,E.西门斯(E. Simmons)和A.鲁奇(A. Ruge)制造出了第一批实用的纸基丝绕式电阻应变计(电阻应变计是一种能将构件上的尺寸变化转换成电阻变化的变换器,一般由敏感栅、引线、黏结剂、基底和盖层构成)。1953年,P.杰克逊(P. Jackson)利用光刻

技术,首次制成了箔式应变计,随着微光刻技术的进展,这种应变计的栅长可短到 0.178mm。1954 年,C. S. 史密斯(C. S. Smith)发现了半导体材料的压阻效应。1957 年,W. P. 梅森(W. P. Mason)等研制出了半导体应变计并应用半导体应变计制作传感器测量位移、力与力矩等物理量。现在已研制出数万种用于不同环境和条件的电阻应变计。

电阻应变测量方法是用电阻应变计测定构件的表面应变,再根据应变-应力关系确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。这种方法是将电阻应变计粘贴在被测构件上,当构件受到载荷作用后,构件表面会产生微小变形,敏感栅随之变形,引起应变计电阻产生变化,其变化率与应变计所在处构件的应变成正比。测出应变计电阻的变化,即可按公式算出该处构件表面的应变,并算出相应的应力。根据敏感栅材料的不同,电阻应变计分为金属电阻应变计和半导体应变计两大类。另外还有薄膜应变计、压电场效应应变计和各种不同用途的应变计,如温度自补偿应变计、大应变计、应力计、测量残余应力的应变计等。电阻应变测量方法具有很高的灵敏度和精度,由于它在测量时输出的是电信号,因此,容易实现测量数字化和自动化,并可进行无线电遥测。电阻应变测量方法可在高温、高压液体、高速旋转及强磁场等特殊条件下进行;同时,电阻应变计的基长可制作得很短,并具有很高的频率响应能力,因此在应变变化梯度较大的构件上测量时仍然能获得一定的准确度,在高频的动应变测量中具有独特的优点。

电阻应变测量技术的缺点主要有:一个电阻应变计只能测量构件表面一个点的某一个方向的应变,不能进行全域性的测量;电阻应变计只能测得被测点上应变计基长内的平均应变值,在应变梯度大的部位,难以测得该处的最高峰值;此外,在温度变化大,强磁场等情况下,需采用一定措施,才能保证测量精度。

二、光弹性实验法

戴维·布鲁斯特(David Brewster)等人在 1816 年前后发现将玻璃板置于偏振光场中,在载荷作用下会出现彩色条纹,而这些条纹的分布与板的几何形状及所受的载荷密切相关。这是由于玻璃板在载荷作用下任一点的各方向应力不同,使得玻璃板任一点各方向的折射率不同,在偏振光场中由于双折射现象产生条纹。19 世纪中期纽曼(Neumann)和马克斯威尔(Maxwell)等人,在实验基础上建立了著名的纽曼-马克斯威尔应力光学定律,证明了主折射率与主应力成线性关系,从而得到了应力与光学量之间的定量关系,为光测力学奠定了理论基础。1906 年赛璐珞被用做光弹性材料之后,随着酚醛树脂和环氧树脂等光学敏感性材料的出现,推动了光弹性实验法的发展。

光弹性实验法是运用光学原理研究弹性力学问题的一种应力分析方法。某些各向同性透明的非晶体高分子材料受载荷作用时,呈现光学各向异性,使一束垂直入射偏振光沿材料中的两主应力方向分解成振动方向互相垂直、传播速度不同的两束平面偏振光;卸载后,又恢复光学各向同性。这就是所谓的暂时双折射效应。这种方法是用具有这种效应的透明塑料按一定比例制成零构件模型,置于偏振光场中,施加一定的载荷,利用偏振光通过透明受力模型获得干涉条纹图,直接确定模型各点的主应力差和主应力方向,通过计算,就能确定模型受载时各部位的应力大小和方向。光弹性实验法可得到整个模型的应力条纹图,从而可直接观察模型的全部应力情况,特别是能直接看到应力集中部位,可迅速准确地确定应力集中因数。目前,经典的光弹性实验技术已从二维、三维模型实验(如光弹性法、光弹性应力冻结法)发展成为能用于工业现场测量的光弹性贴片法,用来解决扭转和轴对称问题的光弹性散光法,研究应力波

传播和热应力的动态光弹性法和热光弹性法,进行弹-塑性应力分析的光塑性法,以及研究复合材料力学的正交异性光弹性法。

三、脆性涂层法

在生产实践中,人们早就发现在热轧钢构件表面的氧化层上,凡出现裂纹或剥落的地方,就是材料已进入塑性状态的区域。后来,人们在某些构件上涂了石灰水,不仅显示出塑性区,还能增加裂纹的清晰度,这就是用脆性涂层测定应力的开端。1932年,德国人迪特里希(Dietrich)和莱尔(Lehr)首次提出脆性涂层法,将脆性涂层用于应变测量。1934年,法国Portevin和Cymboliste研究了脆性涂层材料,用天然树脂和各种溶剂制成脆性涂层。1937年,埃利斯(G. Ellis)系统研究了脆性涂层材料的成分和性能。1941年,脆性涂层材料在美国进行生产并得到广泛应用。

脆性涂层法是把特殊的脆性涂料喷涂在工程构件或模型表面上,以确定主应力方向和估计主应力大小的一种全场实验方法。涂料喷涂到构件表面后,经过处理,就在构件表面结成脆性层。当此构件由于加载而产生的应变在某点达到一定的临界值时,该点涂层就出现一条与主应力方向垂直的裂纹。连接同一载荷下所有裂纹的端点,其连线上各点具有相等的应力值,称为等应力线。通过逐级加载,可得到几乎遍布整个涂层表面的裂纹图 and 对应于不同载荷的等应力线,从而可直接观察到构件表面各处主应力大小和方向的分布状况。此法容易获得主应力迹线,主要用来测出最大应力区和主应力方向,是电阻应变计测量技术的辅助方法。它可以在实物上进行测量,全域性地显示,但受温度和湿度的影响较大,一般只能做定性的测量。由于它的价格低廉及使用方便,因此可以与电阻应变测量方法配合使用,由它来确定构件最大应力的部位,然后用电阻应变测定最大应力值。脆性涂层还可以对动应变进行测量,采用陶瓷材料制成的脆性涂层材料可用于 300°C 的高温应变测量,但比室温与静态应变测量时的测量精度要差一些。

四、云纹法

云纹法又称叠栅干涉法,是通过测定云纹图并对其进行分析以确定试件的位移场或应变场的一种实验分析法。用两块半透明丝绸重叠在一起会产生美丽的条纹,云纹法因此而得名。19世纪70年代,由于衍射光栅的发展,人们已了解云纹干涉的现象,但因当时还不能制造面积较大的栅板,云纹法只用于透镜质量的检验、栅板相对位移的测定等。20世纪50年代初,栅板制造技术取得较大的进展,云纹法才开始作为实验应力分析方法发展起来,并且在理论上、技术上和应用上都获得较快的进展而成为一种常用方法。其原理是,当栅板和栅片重叠时,因栅片牢固地粘贴在试件表面而随之变形,遂使栅板和栅片上的栅线因几何干涉而产生条纹即云纹。可通过云纹测定物体表面的等高线,以及板壳的挠度分布等。由于云纹法是几何干涉方法,因此可以测量较大的变形,同时它不受温度的影响,可在较高温度范围内进行测量,缺点是在小变形时灵敏度低,但在测量大变形时要比其他方法优越,因此适用于弹塑性变形和裂纹开裂等情况下的测量。云纹法不仅可以用来测量面内位移,还可以采用影像法与反射法测量离面位移和斜率,这对测量板、壳等构件的挠度及斜率是一种很有用的方法。采用云纹法直接获得的是位移,若要得到应变需要进行微分,因此精度要差一些。

五、全息干涉法

全息干涉法是利用全息照相获得物体变形前后的光波波阵面相互干涉所产生的干涉条纹图,以分析物体变形的一种干涉量度方法。1947年英国盖伯在提高电子显微镜分辨率研究课题中,提出了光学成像的一种新方法,奠定了全息照相的理论基础。激光是具有很高的时间和空间相干性的光源,它的出现为全息照相的发展创造了条件。1962年利思用激光光源拍摄了第一张可供实用的激光全息图,1964年又提出了漫射全息图的概念。全息照相是一种不用透镜而能记录和再现被摄物体的三维图像的照相方法。它能把来自物体的光波波阵面的振幅和相位信息以干涉条纹的形式记录下来,又能在需要时再现出来,以观察到物体的三维图像。全息干涉法的主要内容是研究条纹图的形成、条纹的定位以及对条纹图的解释。对于具有漫反射表面的不透明物体,条纹图表示物体沿观察方向的等位移线;对于透明的光弹性模型(如有机玻璃),则表示模型中主应力之和等于常数的等和线。由于它是非接触式测量方法,对构件表面粗糙度没有要求,构件表面不需要做专门加工,同时它是全域性显示,可得到构件全部位移场,可在实物上进行测量,具有很高的灵敏度和精度,灵敏度为波长量级,采用脉冲激光光源可测量瞬态位移。

六、散斑干涉法

散斑干涉法是精确检测物体表面各点位移的光学测试法。1968年,由Burch和Tokaski在疲劳检验尝试测量位移时提出散斑干涉法。1969—1971年间Ennos和Eliasson等人利用散斑干涉测量振型,同时Archbodd等人利用散斑测量位移,对结构变形进行研究,1973年前后,利用散斑相关、杨氏条纹逐点观测法测量裂纹尖端开裂位移。其原理是,激光照射在漫反射物体表面时,由反射光波干涉形成的散斑随物体变形或位移而变化。采用适当装置,通过双曝光法把变形前后的散斑记录在一张全息底片上,经显影定影后便可获得存储物体表面各点位移信息的散斑图。用激光照射散斑图,就显出散斑干涉条纹。在进行光学傅里叶变换信息处理后,便可分析出位移信息。散斑干涉法可以较好地测量构件面内位移,也可以测量离面位移,也是一种非接触式测量方法,可在实物上进行测量,被测构件表面不需要进行特别加工,并且可以逐点测量或全场显示,还具有灵敏度高及设备简单等优点,亦能用于动态及高温应变测量,缺点是散斑干涉法形成的条纹不够清晰。

七、声学方法简介

声弹性法是利用超声剪切波的双折射效应测量应力的一种方法。超声波在有应力的介质中传播时,其剪切波沿两主应力方向发生偏振,两偏振波以不同速度传播。经实验和理论分析得到应力-光学定律:沿主应力方向的两个超声剪切波的速度差与两主应力差成正比。该比例系数称为声弹性系数,与材料的弹性常数有关。这种现象和透明材料的光弹性效应相似,可以用来进行应力测量。声弹性方法的主要优点是可以测量非透明材料中的应力,特别是金属内部的应力,并可测量焊接件的残余应力。

构件在受力过程中产生变形或裂纹时,以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射;利用接收的声发射信号,对构件进行动态无损检测的技术称为声发射技术。此技术可用于检测裂纹和研究腐蚀断裂过程,以及监视构件的疲劳裂纹扩展等;还可用来评价构件的完整性,判

断结构的危险程度。

声全息法是 20 世纪 60 年代发展起来的成像技术。其原理和全息照相相同,即利用波的干涉原理记录物波的振幅和相位,并利用衍射原理再现物体的像。它的不同处是用超声波代替光波。此法的成像分辨率高,用于无损检验,可显示试件内部缺陷的形状和大小。

八、X 射线法

X 射线法是利用 X 射线穿透金属晶格时发生衍射的原理,测量衍射角的变化并通过布拉格公式确定晶格的变化,从而算出金属构件表面应力的一种实验方法。此法可无损地测量构件中的应力或残余应力,特别适于测量薄层和裂纹尖端的应力分布,是检验产品质量,研究材料强度,选用较佳工艺的一种重要手段。

九、比拟法

比拟法是根据两种物理现象之间的比拟关系,通过一种物理现象的观测实验,研究另一种物理现象的方法。如果两种物理现象中存在以形式相同的数学方程描述的物理量,它们之间便存在比拟关系,可用一种较易测试的物理现象模拟另一种难以测试的物理现象,从而使实验工作大为简化。在实验应力分析领域中,常用的有薄膜比拟、电比拟、电阻网络比拟、沙堆比拟等。

十、模型和原型实验

应用上述这些方法进行工程构件的应力分析,往往要利用模型或原型进行实验。对于新设计的复杂工程结构,要用模型做实验,校核该设计方案的可靠性,或选择较优的设计方案。在工程完成后,有时还须进行现场原型实验,验证模型实验的结果。此外,还可通过模型或原型实验,找出工程构件失效的原因,以便提出改进的方案。非金属材料制成的模型,在小载荷作用下容易变形,加上制造方便,可在同一模型上修改原设计方案和重复进行实验,故通常采用这类材料(例如硬聚氯乙烯、有机玻璃、铝粉增强环氧树脂等工程塑料)制造模型。模型或原型实验往往采用多种实验应力分析方法相结合的测试方式。

20 世纪下半叶以来,随着计算机软硬件技术、激光技术、微电子技术、控制技术、精密加工技术等现代技术的发展,实验力学的发展具有如下特点:①实验技术向广度和深度发展。就广度而言,例如,由于电阻应变测量技术的广泛应用,所以,对于真空、高压、深冷、高温、静态和在数十万赫频率条件下的应变,都可获得有效的测量数据。就深度而言,开展宏观和微观相结合的实验研究,深入探索失效的机理和各种影响材料强度的因素的规律性。②实验装备的自动化。在实验数据的采集、处理、分析和控制等方面,正在实现计算机化,如大型动载实验,已能做到实时的数据处理,大大缩短实验周期,及时提供准确的实验分析数据和图表。即使是多年来难以实现自动化的光弹性仪,也已出现多种光弹性自动测试装置的方案。③随着电子计算机及有限元和其他数值分析方法的应用,经典的应力分析正朝着实验和计算相结合、物理模型和数学模型相结合的方向发展。近些年来,微/纳米力学实验测试技术发展很快,微压痕法已成为测取涂层、晶片、微电子器件等力学性质的重要手段。

当今社会,随着各项工程建设的飞速发展,许多重大难题迫切需要力学工作者去解决。例如我国的特大型三峡水利枢纽工程,航天、航空的高可靠性的飞机发动机工程,超大型运输船

舰,高速运输车(高速火车、汽车)和道桥工程,超高层建筑、地震及泥石流自然灾害的预防工程以及微重力条件下的测试、微电子、微机械与微传感技术,生物活体组织及其力学行为,复合材料的研究及应用,等等,都向实验力学工作者提出了大量难以解决的课题。这些研究对象具有大(如地球、巨轮、特大型三峡水利、高速桥梁等)、高(如高温、高转速、高辐射、高真空、高压等)、难(指解决这些技术普遍具有高难度,靠计算很难解决或没把握的问题,要靠试验测试解决问题,大多为初次实践,缺少经验)的特点。这些对实践者来讲既是挑战也是机遇。科学技术飞速发展既对实验力学工作者提出了迫切要解决的难题,又为其提供了新技术和新手段。总之,实验力学方法本身还有许多工作要做,一些新的实验方法及新的实验技术有待于人们进一步开拓。

第二章 误差分析和实验数据处理

任何实验都离不开对物理量的测量、观察与分析,由于测试方法、测试设备、测试人员的技术水平以及测试环境的影响,使得测试结果和真值之间不可避免地存在着差异,这种差异称为测试误差。从制定实验方案,按照实验目的选择实验仪器和设备,到确定实验方法和步骤以及对测得的实验数据进行合理的分析和处理,都需要误差分析和数据处理方法的基本知识。在实验应力分析中常常需要使用模型,量纲分析理论和相似理论是研究模型与原型之间规律的基本理论,模型实验时的问题必须应用这些理论来解决。本章将对力学实验中用到的误差分析和数据处理的基本理论以及量纲分析理论和相似理论的一些基本概念作简单的介绍。

第一节 误差分析中的基本概念

一、测量的分类

测量是根据相关理论,用专门的仪器或设备,通过实验和必要的数据处理,求得被测量量值的过程。其本质就是为获得被测对象的量值而进行的实验过程。这个实验过程可能是极为复杂的物理实验,如地球至月球距离的测定,也可能是一个很简单的操作,如物体称重或卡尺测量轴的直径等。对物理量进行测量,是力学实验过程中的一个重要环节。对同一被测量,可能有多种不同的测量方法,需要做出选择,选择正确与否直接关系到测量工作是否能正常进行,以及能否符合规定的技术要求。因此,必须根据不同的测量任务要求,找出切实可行的测量方法,然后根据测量方法选择合适的测量工具,组成测量系统,进行实际测量。如果测量方法不合理,即使有高级精密的测量仪器或设备,也不能得到理想的测量结果。

1. 根据是否直接测量出被测量来分类

(1)直接测量:即将未知的物理量与一个具有相同性质的标准物理量相比较,看未知量是标准物理量的多少倍,从而确定未知量的数量。该数量的大小依赖于标准物理量的选取。通常,称标准物理量为未知物理量的单位。例如,用压力表测量压力,用电表测量电压或电流,用工具显微镜测量轴的直径尺寸等。

(2)间接测量:若未知的物理量不能直接用标准物理量去度量,但它与某些可以直接测量的物理量之间存在着确定的函数关系,于是可以通过对那些能够直接测定的物理量进行测定,借助于其间的函数关系,算出未知物理量。例如,测量运动物体的加速度,先将被测的加速度通过相应的传感器转变成电量,通过放大器将电量放大或转换,再送入显示器或记录仪,或者送入计算机处理,从而得到被测的加速度。

2. 根据测量时是否与标准件进行比较来分类

(1)绝对测量:指测量时被测量的绝对数值由计量器具的显示系统直接读出。例如,用测长仪测量轴径,其尺寸由仪器标尺直接读出。

(2)相对测量:亦即比较测量,测量时先用标准件调整计量器具零位,再由标尺读出被测几何量相对于标准件的偏差,被测量的数值等于此偏差与标准件量值之和。一般来说,相对测量法比绝对测量法精度高。

3. 根据测量时工件被测表面与测量器具是否有机接触来分类

(1)接触测量:是指测量器具的测头与工件被测表面有机接触。例如,用千分尺测量轴径。

(2)非接触测量:是指测量器具的测头与工件被测表面无机接触。例如,用工具显微镜测量零件几何尺寸。

接触测量对被测表面上的油污、灰尘等不敏感,但由于测量力的存在,会引起被测表面和测量器具的变形,因而影响测量精度。非接触测量则与其相反。

此外,根据测量次数,测量方法还可以分为单次测量和多次测量;根据测量时被测工件所处运动状态的不同,测量方法可以分为静态测量和动态测量;根据测量对工艺过程所起作用的不同,测量方法可以分为被动测量和主动测量;根据测量过程的特征,测量方法可分为等精度测量和非等精度测量;等等。

在实际测量过程中,一个物理量的测量不是单按其中一种分类方法来分,而是以上各种分类的综合。

二、测量误差的分类

在力学实验的实际测量中,无论所选取的标准物理量显示仪表的刻度多么精细或其数/模转换之间的比例关系取得多么精细,被测物理量总是不可避免地处在某相邻的两个最小读数之间,这样被测物理量就因读数而存在着误差。另外,在测量过程中,或因外界条件的变化,如温度、湿度、振动等原因,或因其他偶然因素的影响,被测物理量的数量就不等于该量的真实大小。通常,我们把被测物理量的真实值(简称真值)与测得的数值(测定值或实验值)之间的差别叫做误差,显然误差是可正可负的。随着科学技术的发展,测试仪器设备的进步,测试人员素质的不断提高以及测试环境的改善,误差或误差影响会不断减少,测试准确度会不断提高,但误差不会完全消失。误差分析就是研究误差的分类、产生原因、表现规律并设法消除其对测试结果的影响。

根据误差产生原因可将误差分为以下几类。

1. 系统误差

由某些固定不变的因素引起的,对测量值的影响总是有同一偏向或相近大小的误差称为系统误差,又称为恒定误差。其特点是在整个测量过程中始终有规律地存在着,其大小和符号都按某一规律改变。这类误差的来源有以下几个方面:

(1)仪器调整误差:由于测量人员没有调整好仪器所带来的误差。例如,测量前未将仪器安装在正确位置上,仪器未校准或使用零点调整不准确的仪器等。

(2)实验条件误差:测量过程中,由于测量条件变化所造成的误差。例如,实验过程中仪器的工作条件(温度、湿度、气压等)不同于校准条件等。

(3)实验方法误差:由于所采用的测量方法或数学处理方法不完善所产生的误差。例如采用简化的测量方法和近似计算方法以及对某些经常作用的外界条件影响的忽略等,导致测量结果偏高或偏低。

(4)主观误差:由测量人员的一些主观因素所造成的误差。例如测量工作者个人技术的不完善或某种不正确的工作习惯,导致误差有固定偏向和一定规律性,可根据具体原因采取适当措施予以校正和消除。

2. 偶然误差

由不易于控制的多种随机因素造成的,没有固定的大小和偏向,但其数值服从概率统计规律的误差称为偶然误差,又叫实验误差或随机误差。这类误差来源于以下几个方面:

- (1)判断误差或视差:主要是由于估计仪器的最小分度的分数不准而引起的。
- (2)涨落变化:主要指测定过程中客观条件的变化,例如温度、湿度、电压等因素的变化。
- (3)干扰:主要指外界对测试仪器产生的干扰。
- (4)其他种种偶然因素对测量的影响。

偶然误差通过客观测定,借助于误差理论对测定值进行数学处理可以消除或降低到最小限度。

3. 过失误差

过失误差又称粗大误差,指显然与实际不符的误差,它无一定规律,误差值可以很大,主要是由于测量者粗心,操作不当或过度疲劳造成。例如读错刻度,记录或计算差错,这类误差只能靠测量者认真细致地正确操作和加强校对才能避免。

三、准确度、精密度和精确度

准确度是对测试结果正确性的度量,指多次测量数据平均值与真值接近的程度。影响准确度的因素主要是系统误差。准确度并不反映多次测量数据的集中程度,因而是系统误差对测试结果的影响。

精密度是对测量数据集中程度的度量,指多次测量所得数据的重复程度。影响精密度的因素主要是偶然误差,精密度高说明测试结果比较集中,它并不反映测量数据与真值之间的关系。

精确度是对测量数据集中程度和测量结果与真值偏离程度的度量。精确度高说明测量数据比较集中,并且集中于真值的周围,即精密度和准确度都较高,此种情况说明测试结果的随机误差和系统误差都较小。通常所说的精度应理解为精确度。

图2-1形象地表示了精密度与准确度之间的关系。图(a)表示测量值精确度高,即精密度和准确度都高;图(b)表示测量值精密度低,准确度高;图(c)表示测量值精密度高,准确度低;图(d)表示测量值精密度低,准确度亦低。

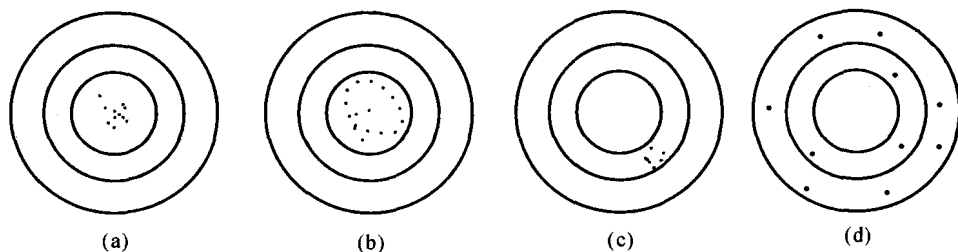


图2-1 精密度与准确度之间的关系

四、测量不确定度

测量精确度的高低只是一种定性概念,难以应用于测量结果的评定,若要定量评定测量结果宜用不确定度描述。不确定度愈小,测量的水平愈高,数据的质量愈高,其使用价值也愈高;不确定度愈大,测量的水平愈低,数据的质量愈低,其使用价值也愈低。在质量管理与质量保证中,对不确定度极为重视,ISO9001 规定:检验、计量和试验设备使用时,应保证所用设备的测量不确定度已知且测量能力满足要求。

测量不确定度指用以表征合理赋予被测量的值的分散性而在测量结果中含有的一个参数。测量结果的不确定度由许多原因引起,一般是一些随机性的因素,使测量误差值服从某种分布。用概率分布的标准差表示的不确定度称为标准不确定度。测量结果的不确定度往往含有多个标准不确定度分量,可以用不同方法获得。标准不确定度的评定方法有两种:A类评定和B类评定。由测得值用统计分析方法进行的不确定度评定称为不确定度的A类评定,相应的标准不确定度称为统计不确定度分量或“A类不确定度分量”;采用非统计分析方法所做的不确定度评定,称为不确定度的B类评定,相应的标准不确定度称为非统计不确定度分量或“B类不确定度分量”。将标准不确定度区分为A类和B类的目的,是使标准不确定度可通过直接或间接的方法获得,两种方法只是计算方法的不同,并非本质上存在差异,两种方法均基于概率分布。

测量不确定度与测量误差紧密相连但却有区别:在实际工作中,由于不知道被测量值的真值才去进行测量,误差的影响必然使测量结果出现一定程度上的不真实,故必须在得出测量结果数值的同时表达出结果的准确程度,按现行的标准要求要用测量不确定度来描述。不确定度是对测得值的分散性的估计,是用以表示测量结果分散区间的量值,而不是指具体的、确切的误差值,它虽可以通过统计分析方法进行估计,却不能用于修正、补偿测量值。

第二节 有效数字与其运算法则

测量数据通常是用若干位数字表示的,在测量数据计算中确定用几位有效数字代表测量结果十分重要,测量数据的位数与测量准确度有关,位数取得过多,超过测量可能的准确度是不对的;相反,位数过少,低于测量能达到的准确度也是错误的。

一、有效数字

实验测定的最终结果是以数字和相应的单位表示的。如前所述,测量中总包含误差,于是在表示测量值的数字中,也应该有误差的反映,这种反映,一般用有效数字去体现。所谓有效数字,即有意义的数字或可以信赖的数字。通常把正确测量条件下经过直接或间接测量得到的数字称为有效数字,而又把有效数字最末一个数字称欠准数字,误差即包含在欠准数字中。

若测量结果的极限误差不大于测量数据某一位上的半个单位,则该位数为有效数字的末位,从该位到测量结果的左起第一位非零数字有几位,则称为几位有效数字。对于直读式仪器仪表,最小刻度的一位小数为有效数字,如300kN液压式万能材料实验机,读数刻度盘的量程为300kN,每小格代表1kN,因而有效数字的末位为小数点后一位。

数字0可以是有效数字,也可以不是。例如长度为0.00450m,前3个0均非有效数字,

因为这些 0 只与所取单位有关,而与测量准确度无关,如用 mm 为单位,则变成 4.50mm,前 3 个 0 消失,后 1 个 0 是有效数字,有效位数三位,后一个 0 如丢掉,则有效位数变成二位,数值的准确度降低了。

二、运算法则

根据有效数字的含义,可以把有效数字书写成用测定值和误差表示的形式,即

$$T = M \pm \delta \quad (2-1)$$

于是,有效数字的四则运算法则也就是单次测定值的误差的四则运算法则,具体如下:

(1) 记录测量数据时,只保留一位可疑数字,一般可疑数字表示末位上 ± 1 个单位,或下一位有 5 个单位的误差。

(2) 有效数字以后的数字舍弃方法,凡末位有效数字后的第一位数字大于 5,则在末位上增加 1;若小于 5,则舍去不计;若等于 5 时,末位数为奇数则增加 1,为偶数则舍去不计。例如 56.0247,取 4 位有效数字时为 56.02,取 5 位有效数字时为 56.025。

(3) 含有小数的不同位数的两个以上有效数字在进行加、减法运算中,每个数保留有效数位应以最末一个有效数字的单位相同为原则,若各测量值小数点后均有有效数字,则各数所保留的小数点后的位数应与各数中小数点后位数最小的相同,例如 $12.58 + 0.0081 + 4.546$ 应写成 $12.58 + 0.01 + 4.55 = 17.14$ 而不应算成 17.1341。

(4) 在乘、除运算中,各测量值保留的位数应以其中相对误差最大者或有效位数最少者为标准,其余各数舍入至较有效数字位数最少数字多一位。乘、除运算结果的有效位数应与有效数字位数最少的数字位数相同,而与小数点的位置无关,如

$$\frac{605.32 \times 0.64}{4.065} = \frac{605 \times 0.64}{4.06} = 95.4 \approx 95$$

第三节 误差分析的理论基础

由于测量误差的存在,测量结果带有不可信性。为提高其可信程度和准确程度,常对同一量进行相同条件下的重复多次的测量,取得一系列包含有误差的数据,按统计方法处理,获知各类误差的存在和分布,再分别给以恰当的处理,最终得到较为可靠的测量值,并给出可信程度的结论。

一、物理量多次测量结果的特性

对某个物理量进行多次测量,所得结果具有不同的分布特性,其中正态分布最常见。它具有以下特性:

(1) 测量值的分布大体上对称于出现次数最多的数值,或者说绝对值相等的正、负误差出现的概率相等。

(2) 一组测量值中,出现次数最多的那个数值,接近该组测量值的算术平均值。

(3) 若以算术平均值作为基准,估计各测量值所具有的误差,则具有最大误差的测量值的出现次数最少。

(4) 误差随着出现次数的减少而增大,即绝对值小的误差出现的概率大,绝对值大的误差