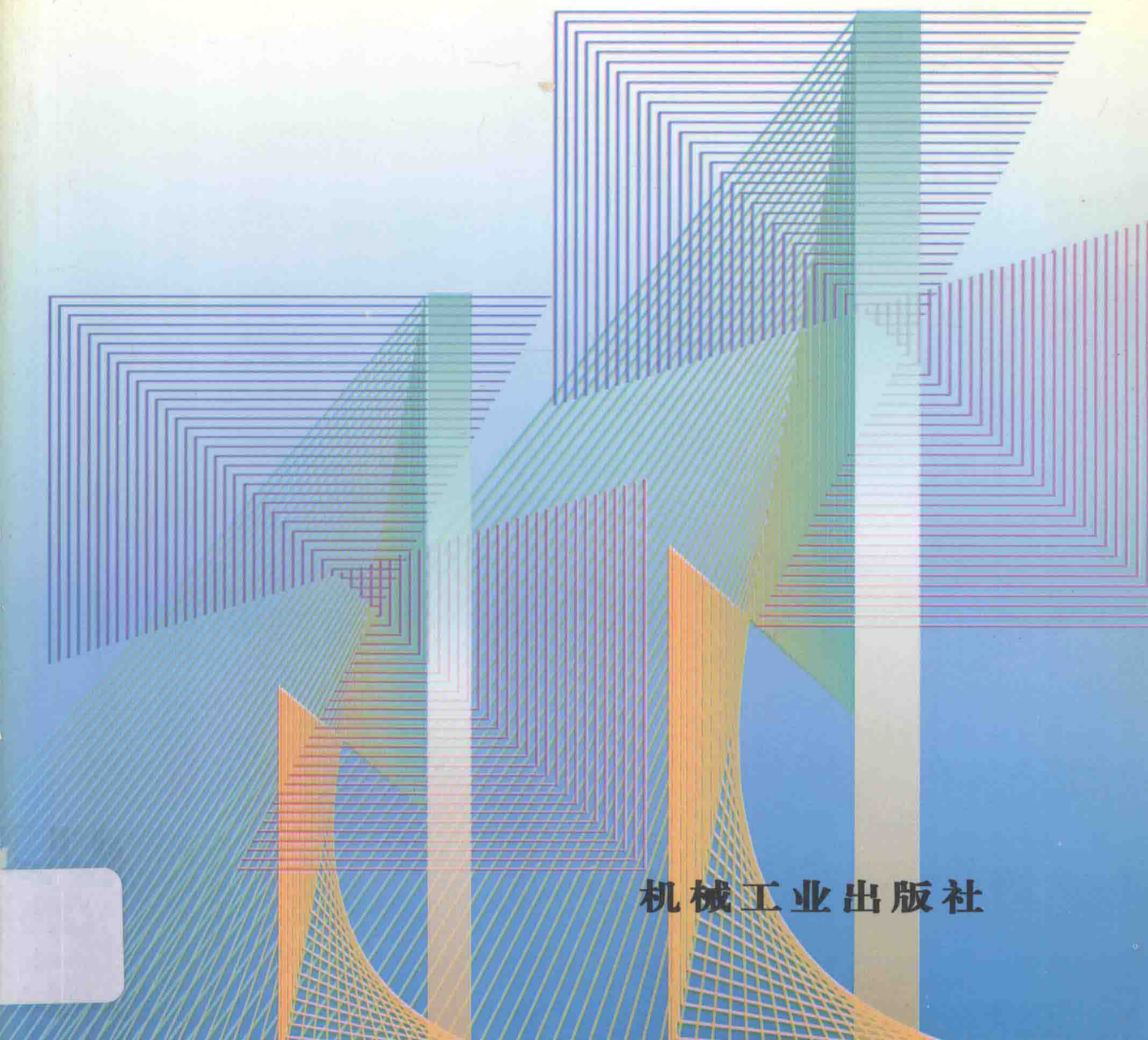




普通中等专业教育机电类规划教材

热加工检测技术

湖南省机械工业学校 肖智清 主编



机械工业出版社

普通中等专业教育机电类规划教材

热加工检测技术

主 编 肖智清

副主编 王 欣 刘世锋

参 编 胡凤翔 许晓坤 陈玉平

项 东 李喜红

主 审 张家春

江苏工业学院图书馆
藏书章



机械工业出版社

本书系统地介绍了金属热加工检测的基础知识,以及热加工生产过程和产品质量控制中常用的检测手段。主要内容有:检测的基本知识;金属力学性能检测;温度检测及调节;压力、流量及物位检测;化学成分检测;金相检测;无损检测等。

本书作为普通中等专业教育机电类“九五”规划教材,主要适用于复合型的金属热加工专业,也适用于金属热处理、铸造和焊接等单一专业,并可供从事热加工检测的工程技术人员参考。

热 加 工 检 测 技 术

湖南省机械工业学校 肖智清 主编

*

责任编辑:董连仁 版式设计:霍永明

封面设计:方 芬 责任校对:刘志文

责任印制:路 琳

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街 22 号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 13.5·字数 326 千字

1999 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

印数:0001-3000·定价:19.50 元

*

ISBN7-111-06534-4/TG·1226(课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书是根据原机械工业部热加工学科组,1996年5月南昌会议审定的招收初中毕业生四年制中专金属热加工专业教学计划及《热加工检测技术》课程教学大纲组织编写的,作为普通中等专业教育机电类“九五”规划教材。

《热加工检测技术》是改革专业——金属热加工专业的一门必修专业课,主要培养学生具有对热加工生产过程和产品质量进行检测的初步能力。

为适应当前形势对中等职业人才的要求,教材力求体现中等职业教育的特点,着眼于学生基本素质和职业技能的培养。教材以实用内容为主,较系统地讨论了有关检测的基础知识和热加工生产中常用的各种检测方法。

本书适用于中等专业学校金属热加工、铸造、焊接、热处理等专业,也可供各类职业学校选用及有关大专院校和工程技术人员参考。

本书由肖智清主编,王欣、刘世锋为副主编。参编人员(按姓氏笔划为序):王欣、刘世锋、许晓坤、李喜红、肖智清、陈玉平、项东、胡凤翔。全书由肖智清统纂与定稿。

本书由国防科技大学张家春教授主审,经原机械工业部热加工学科组1997年10月长沙会议集体审查通过。

本书在编审过程中,得到了原机械工业部教材编辑室、原机械工业部中专热加工专业教学指导委员会暨热加工学科组和热处理学科组,以及各兄弟学校的大力支持与帮助,在此特致以衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中缺点错误在所难免,诚请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前 言		
绪 论		
第一章 检测技术概论	2	
第一节 测量的概念和基本方法	2	
一、测量的概念	2	
二、测量的基本过程	2	
三、测量的基本方法	3	
第二节 测量误差及数据处理	4	
一、测量误差及分类	4	
二、随机误差	5	
三、系统误差	8	
四、粗大误差	8	
五、测量数据的处理	9	
第三节 测量仪表的基本特性及选用	11	
一、测量仪表的静态特性	12	
二、测量仪表的动态特性	13	
三、测量仪表的组成与功用	14	
四、测量仪表的选用	15	
复习思考题	15	
第二章 金属力学性能检测	16	
第一节 强度与塑性	16	
一、拉伸试验	16	
二、强度	17	
三、塑性	18	
第二节 硬度检测	18	
一、布氏硬度	18	
二、洛氏硬度	20	
三、维氏硬度	21	
第三节 冲击吸收功与冲击韧度	22	
一、金属夏比冲击试验	22	
二、韧脆转变温度	23	
三、小能量多次冲击试验	24	
第四节 金属的疲劳	24	
一、金属的疲劳现象	24	
二、疲劳试验与疲劳极限	25	
三、提高疲劳极限的途径	26	
复习思考题	26	
第三章 温度检测及调节	28	
第一节 温度检测概述	28	
一、温度与温标	28	
二、测温仪表的组成	29	
三、测温仪表的分类	30	
第二节 热电偶与热电阻	32	
一、热电偶的测温原理	32	
二、热电偶的结构及类型	34	
三、热电偶冷端温度的影响及其修正	38	
四、热电偶的安装、使用与维护	41	
五、热电阻	42	
第三节 动圈式温度仪表	44	
一、仪表的测温原理	45	
二、仪表的结构	46	
三、仪表的安装、使用与维护	47	
第四节 电子电位差计	48	
一、电子电位差计的工作原理	48	
二、电子电位差计的测量桥路	49	
三、电子电位差计的结构	51	
四、电子电位差计的抗干扰问题	52	
五、电子电位差计的选择、安装、使用与维护	52	
第五节 数字式温度显示仪表	54	
一、概述	54	
二、面板式数字温度仪表	54	
三、数字巡回检测仪表	55	
四、带微处理机的数字式温度仪表	56	
第六节 辐射式高温计	57	
一、辐射测温的基本原理	57	
二、光学高温计与光电高温计	57	
三、全辐射高温计	60	
第七节 测温仪表的检定	62	
一、直流电位差计	62	
二、热电偶的检定	64	
三、动圈式温度指示仪表的检定	65	
四、电子电位差计的检定	65	
五、测温系统总误差的计算与成套		

检定	67	三、常用国产金相显微镜简介	130
第八节 测温仪表的选择与热加工测温	67	四、金相显微镜的使用	132
一、测温仪表的选择	67	第三节 金相摄影与暗室技术	134
二、热处理生产中温度的测量	68	一、金相摄影	134
三、铸造生产中温度的测量	69	二、暗室技术	137
第九节 炉温的自动调节	72	三、彩色金相摄影简介	141
一、炉温的位式调节	73	第四节 特殊光学金相检测	144
二、炉温的连续调节	76	一、偏振光金相检测	144
复习思考题	80	二、高温金相检测	148
第四章 压力、流量及物位检测	81	三、显微硬度检测	150
第一节 压力的测量	81	第五节 电子显微分析	152
一、压力测量概述	81	一、电子光学基础	152
二、常用压力计	82	二、透射电子显微镜	154
第二节 流量的测量	86	三、扫描电子显微镜	156
一、流量测量概述	86	四、电子探针 X 射线显微分析仪	157
二、常用流量计	87	复习思考题	158
第三节 物位的测量	90	第七章 无损检测	160
一、物位测量概述	90	第一节 射线检测	160
二、常用物位计	91	一、射线的性质及产生	160
复习思考题	96	二、X 射线检测的基本原理	160
第五章 化学成分检测	97	三、X 射线检测的方法及应用	162
第一节 炉气成分分析	97	第二节 超声波检测	167
一、炉气分析的基本原理	97	一、超声波的产生、主要特性参数及其性质	167
二、常用炉气分析仪的结构及应用	97	二、超声波探伤仪及其检测的基本原理	172
第二节 热分析法	98	三、超声波检测的方法及应用	175
一、热分析法的基本原理	98	第三节 磁粉检测	179
二、热分析法的测试装置	100	一、磁粉检测的基本原理	179
三、热分析法在热加工生产中的应用	102	二、磁化方法与退磁	180
第三节 化学分析法	110	三、磁粉检测设备与器材	183
一、容量分析法	110	四、磁粉检测工艺	185
二、比色分析法	110	第四节 渗透检测	187
三、极谱分析法	111	一、渗透检测原理	187
四、光谱分析法	111	二、渗透探伤剂及器材	187
复习思考题	111	三、渗透检测方法	189
第六章 金相检测	112	复习思考题	192
第一节 金相试样的制备	112	附录 A 金属布氏硬度数值表	193
一、取样与镶嵌	112	附录 B 黑色金属硬度及强度换算表	200
二、试样的研磨	114	附录 C 热电偶分度表 (JJG351—84)	202
三、金相显微组织的显示	117	参考文献	209
第二节 金相显微镜	121		
一、金相显微镜的基本原理	121		
二、金相显微镜的构造	124		

绪 论

检测技术是一门研究检测原理、检测方法和检测工具的技术学科。在工业生产中,无论是生产过程的控制,还是产品质量的检验,或是新产品、新工艺的开发研究,都离不开检测。因此,检测技术在现代生产过程中发挥着极其重要的作用,其水平反映了一个国家或地区的生产力水平。

在生产过程控制方面,检测是控制的依据。一切生产过程,实质上都是由物质流程与信息流程组合而成的,其中信息流程正是人们用以控制物质流程的依据。为了控制生产过程,首先必须及时准确地检测表征该生产过程特性的各种信息。只有通过检测,才能了解生产过程是否符合工艺规程,是否达到了预期的质量、安全及技术经济指标,从而对生产过程进行及时准确的调整,以确保生产过程能处于预定的、最安全、最可靠和最经济的状态下运行。特别是在自动化生产中,准确快捷的检测手段更是实现生产过程自动化的必要前提。因此,检测是监控生产过程的“耳目”,是实现生产过程自动化的基础。

在质量控制方面,检测是产品质量的保障。在社会主义市场经济逐步建立和完善的今天,市场竞争越来越激烈,只有性能价格比较高的产品才具有竞争力。因此,在现代企业的科学质量管理体系中,不仅是事后进行产品质量检验,更主要的是通过控制生产过程的质量来预先控制产品质量,以确保其产品的性能价格比。显然这一切与检测技术是密不可分的,脱离先进的检测技术,对生产过程和产品质量不能实现准确快捷的检测,产品质量就无法保证。

热加工是机械工业的基础领域,铸造、锻造和焊接等方法生产的毛坯质量,以及零件在加工制造过程中为改善材料性能而进行的热处理质量,都直接影响机械产品的质量及技术经济指标,影响产品的性能价格比。因此,科学地检测和控制热加工生产过程,确保热加工生产的质量、安全性和经济性,对发展机械工业具有特别重要的意义。

热加工生产过程中的工艺参数很多,影响产品质量的因素也很多,因而热加工检测的范畴很广。诸如:温度、成分、压力、流量、物位等工艺参数的检测,性能、组织与缺陷等质量要素的检测,都渗透于热加工生产过程中的各个环节。因此,应用和发展现代检测技术是实现热加工生产现代化的基础。

《热加工检测技术》是金属热加工专业的一门专业课程。该课程系统地讨论有关检测的基础知识和热加工生产中常用的检测方法。主要包括:检测的基础知识;金属力学性能检测;温度检测与调节;化学成分检测;压力、流量及物位的检测;金相检测;无损检测等。通过本课程的学习,使学生具有对热加工生产过程和产品质量进行检测的初步能力,能够根据生产条件和质量要求,正确选择和运用常规检测方法和检测工具。

第一章 检测技术概论

第一节 测量的概念和基本方法

一、测量的概念

1. 测量的概念 测量是借助于仪器或设备,采用一定的方法从被测量对象上取得定性或定量信息的认识过程。所谓“定性”指通过测量大致判断出被测量存在与否,或者在某一数量范围内。所谓“定量”是指用一定精度等级的测量仪器比较精确地确定出被测量数值大小。其目的就是为了在限定时间内尽可能准确地收集被测量的有关信息,以便掌握被测量的参数和控制生产过程。例如:用热电偶接二次仪表测量热处理炉内的温度;在铸造生产过程中对风压、风量、温度、物位的测量等。

2. 测量的定义 测量就是以同性质的标准量与被测量进行比较,并确定被测量对标准量的倍数。所采用的标准量应该是国际上或国家所公认的。

上述定义用数学公式表示,则为

$$K = \frac{X}{A} \quad (1-1)$$

式中 X ——被测量;

A ——标准量(测量单位);

K ——比值,无量纲的数值,又称测量值。

由式(1-1)可知, K 的大小随采用的标准量 A 的大小而定,所采用的单位越小,对给定的被测量 X 而言,其比值 K 越大。为了把测量结果正确反映出来,必须在测量结果 K 的后面标明标准量 A 所用的单位。式(1-1)称为测量的基本方程式。

3. 测量的标准 由测量定义可知,测量总得有一个标准量作为参考,以便拿被测量与这个参考标准作比较。这样的参考标准,一般可分三种类型:

(1) 理论真值 例如,平面三角形的三个内角之和恒为 180° 。

(2) 计量学约定真值 国际计量大会的决议已定义了长度、质量、时间、电流强度、热力学温度、发光强度及物质的量等七大基本单位。凡是满足有关规定条件复现出的数值即为计量学约定真值。

(3) 标准器的相对真值 在有些情况下,以高级标准器的测量值作为低一级标准器或普通仪器的测量值之相对真值。这里所谓“高级”、“低级”和“普通”的概念都是相对的,因此这种真值也是相对的。在实际工作中,总是把高级计量标准器的量值,当作真值看待的。

二、测量的基本过程

以天平称重为例来分析测量过程。测量开始应先调节空天平至平衡,即称为“调零”。接着将被测重物和标准砝码分别放到两侧秤盘中,这叫“对比”。然后借助于天平中间指针偏转方向,判别哪侧轻哪侧重,指针偏离中间位置的大小称为“示差”。如存在“示差”就该调整

砝码的大小和数量，直到重物与砝码平衡为止，这个调节动作称作“调平衡”。上述动作完成后，即可根据砝码的大小和数量读出重物的数字值，称作“读数”。

综上所述，整个测量过程包括调零、对比、示差、调平衡和读数等五个基本动作。它是贯穿在一切测量过程中的。在生产过程中常希望自动实现上述测量过程，这种自动测量过程称为自动检测。

测量的关键在于被测量和标准量的比较，但是被测量与标准量直接进行比较的场合并不多。大多数的被测量和标准量都要变换到双方都便于比较的某个中间量，才能进行比较，这种变换称为测量变换。例如用水银温度计测量室温时，室温被变换成玻璃管内水银柱热膨胀的直线长度，而温度的标准量变换为玻璃管上的直线刻度，这时被测量和标准量都变换到直线上“度”这样的中间量，再进行比较。可见，通过变换可以实现测量或者使测量更方便。因此，变换是测量的核心。

综上所述，测量变换是指把被测量按一定规律变换成另一种物理量的过程。实现这种变换过程的元件称为变换元件。

变换元件是以一定的物理定律为基础来完成一个特定的变换任务的。多个变换元件的有机组合可构成变换器或测量仪表，后者将被测量一直变换到测量者能够直接感受到为止。

三、测量的基本方法

测量方法就是如何实现被测量与标准量（测量单位）比较的方法。测量方法很多，可从不同角度进行分类。

（一）按获得测量结果的方法不同分类

1. 直接测量法 一个量具或仪器上的标准量是经过校准的，故其量值是已知的。如果被测量与这种标准量属于相同的物理量，则可把二者直接比较。这是工程技术中应用最广泛的一种测量方法，称为直接测量法。例如把一个工件的未知长度与直尺或量块相比较，或把一个未知重量物放在天平上与砝码相比较等。

2. 间接测量法 某些被测量无法直接比较，因此要设法使被测量转变为另一种能与已知标准量直接比较的物理量。当然这种变换必须满足一定的单值函数关系。例如用弹簧秤称重时，是从标尺的位移量——即弹簧的伸长长度来得出重量的，虽然标尺上的刻度是经过已知的标准量校准过的，可以代表标准重，但它本身毕竟是长度而不是重量。这种方法就是间接测量法。间接测量法是以物理量之间的函数关系为依据的，这种关系或由理论推导的物理公式来表达，或由实验结果的经验公式来表达，有的甚至仅由实验数据或关系曲线来表达。而这种公式与数据总是难免存在误差，故一般来说间接测量法的误差比直接测量法大。显然，无法直接测量的物理量也就无法避免这种误差。

3. 组合测量法 测量中使各个未知量以不同的组合形式出现（或改变测量条件以获得这种不同的组合），根据直接测量或间接测量所获得的数据，通过求解联立方程组以求得未知量的数值。这种测量方法称为组合测量法。此法因比较繁杂，通常只用于实验室和一些特殊场合的测量。

（二）按读数方法不同分类

1. 直读法 直接从仪表的刻度尺上读出测量结果的方法为直读法。例如用水银玻璃温度计测量温度时，可直接读出温度值。

2. 零值法 将被测的未知量与已知量相比较，当二者达到平衡时仪表指示为零，这时已

知量的数值就是被测量的数值。这种方法也称为补偿法。

如图 1-1 所示,被测质量 m 悬挂在 B 点上,称重的砝码悬挂在 A 点上。由于 A 、 B 两个臂长相等,故必须使所加砝码的重与被测质量完全相等,才能使指针指在刻度尺的零位上。在天秤秤上称重时,如果要求指针必须严格指零而直接从砝码的重量得出被测质量的方法即为零值法。

在各种测量系统的平衡电桥中常以检流计指示零位,即无电流时表示平衡,故亦称零位法。从误差分析的观点来看,零值法的误差比直读法小,故其准确度高。从测量操作来看,靠人工调节到平衡状态比直读法仪器达到平衡状态要麻烦得多,而且人工调节平衡不能用于动态测量。

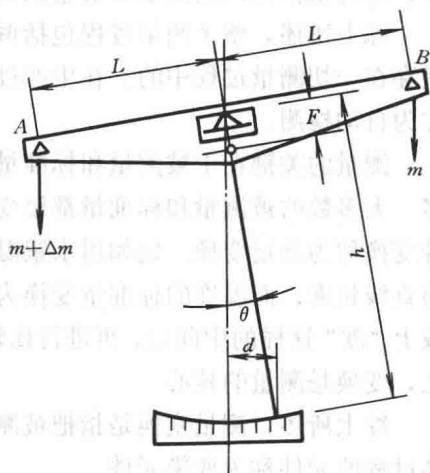


图 1-1 天秤秤示意图

3. 差值法 差值法是零值法的一种特殊情况,即没有补偿到完全平衡,而把剩余的不平衡量用刻度尺来指示。例如图 1-1 中的天秤秤上,当砝码的质量为 $m + \Delta m$ 时,指针即不会指零而偏转一个角度。剩余不平衡量 Δm 可以从刻度上读出。不平衡电桥也是采用这种方法。差值法的准确度虽比零值法低些,但操作简便多了。

(三) 按测量仪器是否与被测对象接触分类

1. 接触测量法 仪器的一部分与被测对象接触,并受到被测对象的作用,才能得出测量结果的测量方法称为接触测量法。例如用水银玻璃温度计测量温度时,温度计的水银感温包必须与被测介质(如室内空气或容器中的液体)接触,才能测出介质的温度值。

2. 非接触测量法 仪器的任何部分均不必与被测对象直接接触,就能得到测量结果的测量方法称为非接触测量法。例如用光学高温计测量铁液温度就属于这种测量方法。

(四) 按测量条件不同来分类

1. 等精度测量 在测量条件完全相同的情况下进行测量,其精度相同,称为等精度测量。例如某测量者用同一温度计测量不同被测对象时,因测量者与温度计不变,所得测量值精度相同,则此测量称为等精度测量。这种测量的数据处理较简便,也较常见。

2. 不等精度测量 在测量条件不同的情况下进行测量,其测量的精度也不相同,称为不等精度测量。例如,同样为测量温度,若测量者不同或使用的温度计不同,甚至测量方法也不同,则其测量值的精度必不相同,这就是不等精度测量。此法在组合测量时常见,其数据处理较为复杂。

第二节 测量误差及数据处理

一、测量误差及分类

(一) 测量误差

测量是一个对比、示差、调平衡和读数的综合过程。如果在这个过程中,各个环节都是在理想的环境与条件下进行,测量的结果将是十分精确的,即没有误差。但是,在实际测量

中,由于测量方法不完善、测量工具不准确、测量过程中条件不稳定,以及受测量者的知识、责任心、经验和熟练程度的限制,无论是被测量、测量设备或方法甚至测量者本身,都会不同程度受到各种因素的影响。当这些因素变化时,被测量的示值必然会随之发生相应变化,使仪器的示值 X_i 与被测量的真值 A_0 间造成差异。这个差异就是测量误差 Δ , 即有 $\Delta = X_i - A_0$ 关系存在,它是无法避免的。

测量的最终目的是求得被测量的真值。但真值是永远测量不到的,测量结果只能以不同的准确度逐渐逼近它。随着科学技术水平的提高和人们经验、技巧、专门知识的丰富,误差可以被控制得越来越小,但不能使它为零。

在实际工作中,对于一个具体的测量任务,只需达到相应的某一准确程度就可以了,不一定是准确度越高越好。因为无谓地追求准确度,不仅要大大增加费用,而且也会降低测量的可靠性。科学研究中测量准确度的要求应放在首位,而在一般生产中的测量则常将可靠性放在第一位,并根据测量目的综合考虑准确度、经济性和使用性。

(二) 测量误差的分类

由于各种客观及主观原因,任何测量过程必定存在误差,根据测量误差的性质及产生的原因,可将测量误差分为三类。

1. 系统误差 在同一条件下多次重复测量同一量时,误差的大小和符号保持不变或按一定规律变化,这种误差称为系统误差。系统误差主要是由于检测装置本身在使用中变形、未调到理想状态、电源电压下降等原因造成的有规律的误差,一般可通过实验或分析的方法查明其产生的原因。因此,它是可以预测的,也是可以消除的。系统误差的大小表明测量结果的准确度。

2. 随机误差 在同一条件下多次重复测量同一量时,误差的大小、符号均无规律变化,这种误差称为随机误差。随机误差是由于许多偶然因素所引起的综合结果,它既不能用实验方法消除,也不能修正。然而,它的变化虽无一定规律可循、难以预测,但在多次的重复测量时,总体上服从统计规律。实践证明,统计规律绝大多数服从正态分布,根据随机误差的统计规律,便能对其大小及测量结果的可靠性等做出估计。随机误差的大小表明测量结果的精密度。

3. 粗大误差 明显歪曲了测量结果,使该次测量失效的误差称为粗大误差。这种误差是由于观测者对仪器不了解或疏忽大意而导致的错误之读数。就数值的大小而言,通常它明显地超过正常条件下的系统误差和随机误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。正常的测量结果中不应含有坏值,应予以剔除。但不能凭主观随便去除,必须根据统计检验方法的某些准则来判断哪个测量值是坏值,然后科学地舍弃之。

由上所述,正常的测量结果中不能包含有粗大误差,因此在误差分析中,要研究的误差项只有系统误差和随机误差两种。系统误差和随机误差是两种产生原因和特点都不相同的测量误差。在测量过程中,它们又往往混合在一起,两者的合成称为综合误差。综合误差能较全面地说明测量的质量情况,其大小反映了测量的精确度。

二、随机误差

(一) 正态分布定律

在消除系统误差和粗大误差的情况下,对同一被测量进行多次等精度的重复测量,得到一系列不同测量值,这表明在实测数据中包含随机误差。随机误差就每一个个体而言是没有

规律和控制的,但在总体上它服从统计规律。实际统计证明,随机误差遵循正态分布定律。正态分布定律指出了随机误差的规律性,是进行误差分析的依据。正态分布定律的数学表达式为

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

式中 y ——出现随机误差 δ 的概率;

δ ——随机误差;

σ ——标准误差。

由正态分布定律可做出正态分布曲线(也称为随机误差的概率密度分布曲线),如图 1-2 所示。由该曲线可以看出随机误差具有以下特性:

(1) 对称性 绝对值相等而符号相反的误差出现的概率相等。

(2) 单峰性 绝对值小的误差出现的概率高,绝对值大的误差出现的概率低,绝对值很大的误差出现的概率近于零。

(3) 有界性 在一定的测量条件下,随机误差的绝对值有一定的界限,超过此界限的误差概率等于零。

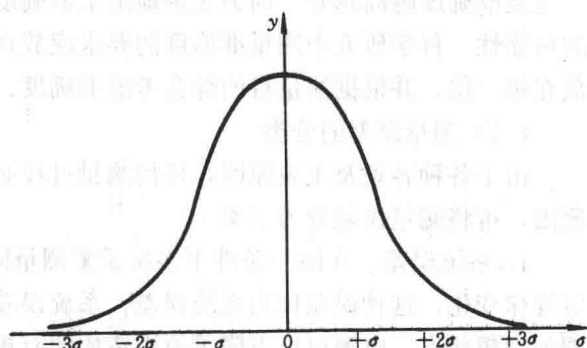


图 1-2 典型正态分布曲线

(4) 抵偿性 正号的随机误差之和与负号的随机误差之和的绝对值相等,互相抵消。

(二) 随机误差的评价

随机误差是一种大小、正负都不固定的误差,如何评价它对测量结果的影响,是人们十分关心的问题。常用的评价指标有:

1. 算术平均误差 即一组 n 次测量值中各次测量随机误差绝对值的算术平均值。即

$$\bar{\delta} = \frac{|\delta_1| + |\delta_2| + \cdots + |\delta_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i|}{n} \quad (1-3)$$

式中 $\bar{\delta}$ ——算术平均误差;

δ_i ——各测量值的随机误差;

n ——测量次数。

算术平均误差 $\bar{\delta}$ 反映了随机误差的大小与测量次数有关的这一重要特点,但 $\bar{\delta}$ 不能判定同一个 $\bar{\delta}$ 值的两组不同准确度测量值之间的差异,即 $\bar{\delta}$ 不能衡量一组测量值的真实精确度。例如,对一被测量(100)进行两组测量,第一组测量值为 97, 98, 96, 102, 101, 102, 96, 103, 98, 103; 第二组测量值为 101, 99, 93, 102, 101, 101, 108, 101, 97, 101, 则

$$\bar{\delta}_1 = \frac{3+2+4+2+1+2+4+3+2+3}{10} = 2.6$$

$$\bar{\delta}_2 = \frac{1+1+7+2+1+1+8+1+3+1}{10} = 2.6$$

它们的算术平均误差相同,这显然不能反映实际情况。实际上第一组测量精确度比第二

组测量精确度高。因第一组中,误差值彼此之间变化较小(示值分散度小),而在第二组中,误差值彼此变化较大(示值分散度大)。由此可见,算术平均误差无法反映出测量值的分布情况。

2. 标准误差 即一组测量值中各随机误差的平方和的平均值的平方根。即

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-4)$$

式中 σ ——标准误差;

δ_i ——各测量值的随机误差;

n ——测量次数。

标准误差 σ 较好地反映了随机误差的分散程度,能够把较大误差的影响予以充分地显示出来,被广泛用于评价随机误差。在工程测量中常用标准误差来表示误差的可能范围。标准误差对测量值的分布状况十分敏感,因它将误差首先平方,故有较大误差时,其标准误差就会明显地反映出来。仍以前述两组测量值为例,计算各组的标准误差,则得出 $\sigma_1 = 2.76$, $\sigma_2 = 3.63$, 所以 $\sigma_1 < \sigma_2$, 说明第一组测量值的分散度比第二组小,故测量准确度高。

上面各式中的 δ_i 为测量值的随机误差(测得值 X_i 与其真值 A_0 之差),即 $\delta_i = X_i - A_0$ 。但由于真值 A_0 是不可知的,因此误差 δ_i 难以确定,算术平均误差 $\bar{\delta}$ 和标准误差 σ 就无法计算。

对被测量 X 进行 n 次等准确度测量,其测得值为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 先求出其算术平均值

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

然后计算出各测得值 X_i 与其算术平均值 $\bar{X}$ 的差,并用符号 V_i 表示,即

$$V_i = X_i - \bar{X} \quad (1-5)$$

式中 V_i ——残余误差(又称残差)。

在 n 次等准确度测量中,存在着

$$\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} - A_0$$

由正态分布的抵偿性可知,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \rightarrow 0$, 所以 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \rightarrow A_0$, 即 $\bar{X} \rightarrow A_0$ 。由此可见,多次等准确度测量的算术平均值是最接近其真值的,这一规律称为平均值原理。通常,人们正是根据这一原理将残差 V_i 代替随机误差 δ_i , 并用于误差计算。这时,上述算术平均误差可写成

$$\delta_i = \frac{\sum_{i=1}^n |V_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \quad (1-6)$$

标准误差可写成

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

式(1-7)称为贝塞尔公式。根据该式,可由残差求得一组测量值中任一次(单次)测量的标准误差。

设一组测量值的标准误差为 σ ,则任一测量值的误差介于 $\pm\sigma$ 范围内的概率为68%,介于 $\pm2\sigma$ 范围内的概率为95%,介于 $\pm3\sigma$ 范围内的概率为99.7%(如图1-2所示)。误差出现在 $\pm3\sigma$ 范围之外的概率只有0.3%,相当于300多个数据才可能有一个数据出现在 $\pm3\sigma$ 之外的随机误差,则可认为不属于随机误差,而为系统误差或粗大误差。工程技术测量中常用 $\pm3\sigma$ 表示为极限误差,把这个极限误差当作测量值的绝对误差限。

三、系统误差

系统误差影响测量结果的正确性,只有当不含有系统误差或系统误差消除到可以忽略的程度时,这样的测量数据经过整理和评定才有意义。

(一) 产生系统误差的主要原因

1. 工具误差与环境影响 如因测量工具结构上的缺陷、刻度不正确,或因温度、磁场等环境的影响使测量工具的结构发生变化等。

2. 方法误差 亦称理论误差,是由测量方法本身所形成的误差,或者由于测量所依据的理论本身尚不完善等所引起的误差。

3. 人员误差 这是由测量者的分辨能力、反应速度和固有习惯不同所引起的误差。如记录信号时有滞后或超前的趋向和读数时始终偏左或偏右、偏上或偏下等。

因此,在进行精确测量时不仅要认真地考虑测量方法,合理地配置仪器设备并进行必要的调试,对测量工具引入修正值,还要配备合适的测量者。这样才能尽可能地减小系统误差,使之归入随机误差的范畴。

(二) 系统误差的分类

系统误差根据它的数值变化情况可分为固定的系统误差和变化的系统误差两类。

1. 变化的系统误差 可以分为:①累进的系统误差,即逐次积累的误差;②周期性变化的系统误差;③变化规律复杂的系统误差。

2. 固定的系统误差 当在某些条件下测量时,测量值的残差基本上均为某一固定的符号。当在另一些条件下测量时,比如更换量具或仪器,或某些条件变化时,误差值都改变符号,则此时的测量值含有固定的系统误差,它随着测量条件的变化而消失或出现。

如果事先已估计到测量中存在系统误差,此时必须对同一个未知量用不同的方法,不同的仪器,且由不同的测量者进行测量,并将得到的测量结果进行比较。因为在所有这些测量中都产生同样的系统误差的概率很小,若所得各测量结果之间有差异,表明存在系统误差。另外,当测量次数足够多时,如果残差的分布曲线与正态分布曲线相差甚远,或把数据与测量条件的变化联系起来分析比较,发现测量数据随测量条件的变化而变化时,则表明存在系统误差。测量者应想方设法予以排除或削弱。

四、粗大误差

粗大误差是由于测量人员主观因素或测量条件意外地突然改变造成的,如读数错误、记录错误、计算错误、外界振动冲击、电源电压变化、仪器失灵等因素。

在测量过程中,若当时发现有错误数据,可当场从观测记录中划出,但必须注明原因。在测量之后,如发现某测量值与其它测量值相差很大,则可怀疑存在粗大误差。对可疑数值的舍弃可以采用“拉依达准则”来判断。

根据随机误差正态分布理论可知,随机误差的绝对值不会超过标准误差的三倍。拉依达准则认为:如果测量所得值 X_i 的残差 $V_i = X_i - \bar{X}$ 满足 $|V_i| > 3\sigma$, 则认为 X_i 含粗大误差,是坏值,应予剔除。拉依达准则的数学表达式为

$$|V_k| = |X_k - \bar{X}| > 3\sigma \quad (1-8)$$

式中 X_k ——应被剔除的测量值,称为坏值;

$\bar{X}$ ——包括坏值在内的全部测量值的算术平均值;

V_k ——坏值的残差。

满足式 (1-8) 的测量值 X_k 属于坏值,应予以剔除,剔除坏值后再计算测量值的算术平均值与标准误差,然后再用这一准则鉴别,直至坏值不存在为止。

各种误差对测量结果的影响如图 1-3 所示。图中 A_0 为被测量的真值,黑点为每次测量所得数据。从图中可以看出:图 a 表示随机误差小,系统误差大,说明测量的精密度高而准确度低;图 b 表示随机误差大,系统误差小,说明测量的精密度低而准确度高;图 c 表示除去一个坏值 X_k 以外,随机误差和系统误差都小,说明测量的精密度和准确度都高。因而认为图 c 中除去坏值后的测量结果是较精确的测量结果。

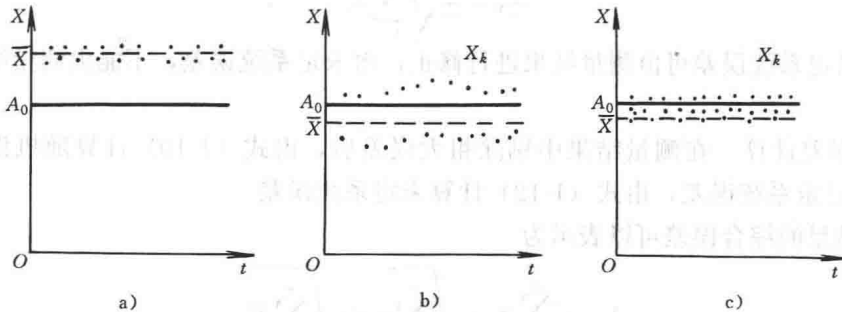


图 1-3 误差对测量结果的影响

五、测量数据的处理

测量数据的处理,就是对通过检测而获取的一系列带有随机性的数据进行适当归纳整理,以便得到各参数之间规律性的关系。在讨论各种误差性质的基础上,研究各种误差合成方法,综合成总误差对测量结果的影响,使之掌握测量数据处理的基本方法。

(一) 误差的合成

在测量过程中,可能同时存在许多系统误差、随机误差和粗大误差。当粗大误差剔除之后,决定测量准确度的是系统误差和随机误差,它们分别对测量结果产生一定影响。所谓误差合成,就是将各原始误差所引起的单项误差合成能表征测量方法的测量总误差。

误差合成过程的一般步骤是:周密查找原始误差因素;分析原始误差的性质、分布和相互关系;确定原始误差的数值或极限变动范围;按误差的不同性质,分类合成各类总误差;将各类总误差合成为测量结果的总误差。

1. 随机误差的合成 如果在—组测量结果中存在 n 项随机误差,设每一项随机误差的标准误差分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, 则其合成结果的标准误差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (1-9)$$

在多数情况下, 已知 n 个随机误差的极限误差 $\delta = \pm 3\sigma_1, \delta = \pm 3\sigma_2, \dots, \delta = \pm 3\sigma_n$ 。这样, 它们的合成极限误差可以计算为

$$\delta = \pm 3\sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1-10)$$

2. 系统误差的合成

(1) 已定系统误差的合成 n 个已定系统误差 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ 产生的综合误差 Δ 仍为已定系统误差, 其数值为 n 个系统误差的代数和, 即

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (1-11)$$

(2) 未定系统误差的合成 未定系统误差实际上是一种定值系统误差, 只不过它的数值没有确定 (或无法确定), 但是它的极限变动范围一般为已知。通过对测量结果的分析, 可大致估计出单个未定系统误差的最大范围 $\pm e$, 然后便可进行综合。

已知 n 个未定系统误差的极限变动范围为 $\pm e_1, \pm e_2, \dots, \pm e_n$, 其综合误差 $\pm e$ 仍为未定系统误差。

$$\pm e = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (1-12)$$

注意, 已定系统误差可由测量结果进行修正; 而未定系统误差, 不能由测量结果进行修正。

3. 综合误差计算 在测量结果中剔除粗大误差后, 由式 (1-10) 计算随机误差, 由式 (1-11) 计算已定系统误差, 由式 (1-12) 计算未定系统误差。

其测量结果的综合误差可以表示为

$$\Delta_{\text{lim}} = \sum_{i=1}^n \Delta_i \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1-13)$$

式中 Δ ——定值系统误差, 可由测量结果修正;

$\pm e$ ——未定系统误差的极限变动范围;

$\pm \delta$ ——随机误差的极限变动范围。

(二) 测量数据处理

测量结果的数据处理, 主要包含两部分内容: 一是由测量数据求得测量结果; 二是对测量结果作出精度评定。

1. 等精度测量数据处理 对等精度测量的数据处理步骤如下:

1) 求算术平均值

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

2) 计算残差

$$V_i = X_i - \bar{X}$$

3) 校核算术平均值的计算是否有误

$$|\sum V_i| < \frac{n}{2} A$$

式中 n ——测量次数;

A ——残差末位数单位。

4) 判别一组测量结果是否存在系统误差。对于已定系统误差加以修正, 对于未定系统误差, 要尽量加以控制和减小。

5) 求单次测量的标准误差, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}}$$

6) 判断测量结果是否含有粗大误差。

7) 求算术平均值的标准误差, 即

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

8) 求测量结果的极限误差, 即

$$\pm \delta = \pm 3\sigma_{\bar{X}}$$

9) 最后把测量结果写成

$$L = \bar{X} \pm \delta = \bar{X} \pm 3\sigma_{\bar{X}}$$

2. 不等精度测量的数据处理 不等精度测量的数据处理步骤与等精度测量的数据处理步骤基本相同。首先考虑不等精度测量是否存在系统误差和粗大误差, 若有则加以修正和剔除。

(三) 不确定度

1. 不确定度定义 不确定度就是表示由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度。它是指测量结果不能肯定的误差范围。如前所述, 当已定系统误差修正以后, 还存在随机误差和未定系统误差, 因此每个测量结果总是存在着不确定度。

2. 不确定度分类 不确定度是一个未定误差, 它可以分为 A 、 B 两类分量。 A 类分量是能用统计方法计算出的“标准误差”; B 类分量是能用其它方法估计出的近似的“标准误差”。

A 类分量与 B 类分量均以“标准误差”的形式表示, 通常用合成方差的方法, 将其合成所得的“标准误差”称为合成不确定度。该不确定度的概率为 68.27%。平常所说的测量不确定度就是指这一数值。

3. 不确定度和准确度的关系 不确定度是指测量结果中未定误差的综合; 准确度是指测量结果中全部误差(系统误差、随机误差)的综合。它们的关系如下:

$$\text{准确度} = \text{已定系统误差} + \text{未定系统误差} + \text{随机误差}$$

$$\text{不确定度} = \text{未定系统误差} + \text{随机误差}$$

所以, 准确度 = 已定系统误差 + 不确定度。

若已定系统误差作了修正, 则准确度大小就等于不确定度。

第三节 测量仪表的基本特性及选用

测量仪表的基本特性在很大程度上决定着测量结果。测量仪表的基本特性, 通常分为静态特性和动态特性两个方面。