

土木工程材料

(下册)

● 主编 杨医博 王绍怀 彭春元 李春红

土

木

工

程

系

列

教

材

华南理工大学出版社

土木工程系列教材

土 木 工 程 材 料

(下 册)

主 编 杨医博 王绍怀 彭春元 李春红

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书主要介绍常用土木工程材料的试验方法和技术要求,为配合开设设计性和综合性实验的需要,大幅扩充了试验内容,并增加了土木工程材料检测基本知识、测量不确定度、数据处理、小型构件性能试验、设计性和综合性实验等内容。全书分为18章,内容包括土木工程材料检测基本知识、石灰、水泥、砂、石、无机结合料稳定材料、混凝土外加剂、混凝土掺合料、混凝土、沥青、无机矿粉、沥青混合料、建筑砂浆、砌体材料、钢材、木材和结构构件性能试验、设计性实验与综合性实验等。

本书可作为高等院校土木工程和水利水电工程各专业的教学用书,也可作为土木、建筑类相关专业的教学用书,并可供从事土木工程科研、设计、施工、管理和监理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料(下册)/杨医博,王绍怀,彭春元,李春红主编. —广州:华南理工大学出版社,2007.8

(土木工程系列教材)

ISBN 978-7-5623-2685-4

I. 土… II. ①杨… ②王… ③彭… ④李… III. 土木工程-建筑材料
IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第126214号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学17号楼,邮编510640)

营销部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail: scutc13@scut.edu.cn

http://www.scutpress.com.cn

策划编辑:赖淑华

责任编辑:兰新文 詹志青

印刷者:湛江日报社印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:20.75 字数:531千

版次:2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

印数:1~3 000册

定 价:32.00元

版权所有 盗版必究

前 言

近几年来,随着科学技术的迅猛发展,传统的土木工程材料性能不断提高,新的土木工程材料品种层出不穷,相关的多项设计、施工规范和材料标准已经更新,原有的《土木工程材料》教材已经无法满足教学的需要。为此,由华南理工大学出版社牵头,组织广东多家高校编写了本书。本书分上下册,上册为理论部分,下册为实验部分。

本书具有以下特点:

1. 根据高等学校土木工程专业委员会制定的《土木工程材料》教学大纲编写而成,并在每章前设置学习要点,以方便学生掌握重点。

2. 从大土木的角度出发,兼顾土木工程、道路桥梁工程、水利水电工程、铁道工程、地下建筑工程及建筑学等专业的要求编写,具有较宽的专业适用面。

3. 更新和补充了大量新型土木工程材料,并对已淘汰的一些材料做了说明。全书按照国家 and 行业最新标准、规范编写。

4. 为配合开设设计性和综合性实验的需要,大幅扩充了实验的内容,增加了材料检测、测量不确定度、数据处理、小型构件性能实验、设计性和综合性实验等内容。

上册由梁松、程丛密、王绍怀和秦怀泉担任主编,由梁松和程丛密统稿。参与编写的有广州大学程从密(第1、2、3章),华南理工大学杨医博(第4章第1节和第2节、第8、13章),华南理工大学王绍怀(第4章第3节、第3、7章),华南理工大学梁松(绪论、第5章)和东莞理工学院秦怀泉(第9、10、11章)。

下册由杨医博、王绍怀、彭春元和李春红担任主编,由杨医博和王绍怀统稿。参与编写的有华南理工大学杨医博(第1、8、9、13、18章、第17章第1节部分内容、附录A、附录B、附录C),广州大学彭春元(第2、3、4、5章),华南理工大学王绍怀(第6、10、11、12章),华南理工大学梁松(第7章)和东莞理工学院李春红(第14、15、16章、第17章第1节部分内容和第2、3节)。

由于材料科学发展迅速,新材料不断涌现,有一些行业技术标准也不统一,限于编者水平,书中如有疏漏和不妥之处,敬请广大师生和读者不吝指正。

编 者

2007年5月

目 录

第 1 章 土木工程材料检测基本知识	1
1.1 检测机构	1
1.2 委托检验	2
1.3 不合格产品的处理方法	3
1.4 测量误差	4
1.5 测量不确定度	6
1.6 数据处理	8
第 2 章 石灰试验	11
2.1 相关标准	11
2.2 有效氧化钙的测定	11
2.3 氧化镁的测定	13
2.4 有效氧化钙和氧化镁含量的简易测定方法	15
2.5 技术要求	16
2.6 检验项目	16
第 3 章 水泥试验	17
3.1 相关标准	17
3.2 编号与取样	17
3.3 水泥密度试验	19
3.4 水泥细度试验	20
3.5 水泥标准稠度用水量试验	26
3.6 水泥凝结时间试验	28
3.7 水泥安定性试验	30
3.8 水泥胶砂强度试验	33
3.9 水泥胶砂流动度试验	38
3.10 技术要求	40
3.11 检验项目	41
3.12 判定规则	42
3.13 交货与验收	42
第 4 章 砂试验	43
4.1 相关标准	43
4.2 编号与取样	43
4.3 颗粒级配试验	44
4.4 表观密度试验	45
4.5 堆积密度与空隙率试验	46
4.6 含泥量试验	48
4.7 石粉含量试验	49

4.8	泥块含量试验	50
4.9	云母含量试验	51
4.10	氯化物含量试验	52
4.11	海砂中贝壳含量试验(盐酸清洗法)	53
4.12	吸水率试验	54
4.13	含水率试验	55
4.14	技术要求	56
4.15	检验项目	59
4.16	判定规则	59
第5章	石试验	60
5.1	相关标准	60
5.2	编号与取样	60
5.3	颗粒级配试验	61
5.4	表观密度试验	62
5.5	堆积密度与空隙率试验	64
5.6	含泥量试验	66
5.7	泥块含量试验	67
5.8	针片状颗粒含量试验	67
5.9	强度试验	69
5.10	吸水率试验	71
5.11	含水率试验	72
5.12	技术要求	72
5.13	检验项目	75
5.14	判定规则	75
第6章	无机结合料稳定材料试验	76
6.1	相关标准	76
6.2	无机结合料稳定材料的取样方法	76
6.3	无机结合料稳定土的含水量试验	77
6.4	无机结合料稳定土的击实试验	78
6.5	无机结合料稳定土的无侧限抗压强度试验	83
6.6	无机结合料稳定土的间接抗拉强度试验	86
6.7	水泥或石灰稳定土中水泥或石灰剂量的测定试验(EDTA 滴定法)	87
6.8	技术要求	90
6.9	检验项目	90
第7章	混凝土外加剂试验	93
7.1	混凝土外加剂匀质性试验	93
7.2	混凝土外加剂对水泥的适应性试验	97
7.3	掺外加剂混凝土性能试验	98
7.4	技术要求	101

7.5 检验项目	102
7.6 判定规则	103
7.7 复验	103
第 8 章 混凝土掺合料试验	104
8.1 粉煤灰试验	104
8.2 粒化高炉矿渣粉试验	108
第 9 章 普通混凝土试验	111
9.1 普通混凝土拌合物性能试验	111
9.2 普通混凝土力学性能试验	124
9.3 普通混凝土长期性能和耐久性能试验	137
第 10 章 沥青试验	145
10.1 相关标准	145
10.2 沥青试样准备方法	145
10.3 粘稠沥青密度与相对密度试验	146
10.4 沥青针入度试验	148
10.5 沥青软化点试验(环球法)	151
10.6 沥青延度试验	153
10.7 沥青薄膜加热试验	155
10.8 技术要求	158
第 11 章 矿粉试验	161
11.1 相关标准	161
11.2 矿粉筛分试验	161
11.3 矿粉密度试验	162
11.4 矿粉亲水系数试验	163
11.5 矿粉加热安定性试验	164
11.6 技术要求	164
11.7 检验项目	165
第 12 章 沥青混合料试验	166
12.1 相关标准	166
12.2 沥青混合料试件制作方法	166
12.3 沥青混合料密度试验(表干法)	172
12.4 沥青混合料马歇尔稳定度试验	173
12.5 沥青混合料劈裂试验	176
12.6 沥青混合料车辙试验	179
12.7 沥青混合料弯曲试验	181
12.8 沥青混合料渗水试验	183
12.9 技术要求	185
第 13 章 建筑砂浆试验	189
13.1 建筑砂浆基本性能试验	189

13.2 建筑砂浆保水性试验·····	194
第 14 章 砌体材料试验 ·····	196
14.1 砌墙砖试验·····	196
14.2 混凝土小型空心砌块试验·····	209
14.3 加气混凝土砌块试验·····	216
第 15 章 钢材试验 ·····	222
15.1 钢筋试验·····	222
15.2 钢筋焊接接头试验·····	229
15.3 钢绞线试验·····	233
15.4 钢结构用钢材试验·····	240
第 16 章 木材试验 ·····	245
16.1 相关标准·····	245
16.2 批量与取样·····	245
16.3 木材含水率试验·····	249
16.4 木材密度试验·····	250
16.5 木材干缩率试验·····	252
16.6 木材抗弯强度试验·····	253
16.7 木材抗弯弹性模量试验·····	254
16.8 木材顺纹抗压强度试验·····	256
16.9 木材顺纹抗剪强度试验·····	257
16.10 技术要求 ·····	259
16.11 判定规则 ·····	260
第 17 章 结构构件性能试验 ·····	262
17.1 混凝土结构构件试验·····	262
17.2 钢结构构件性能试验·····	294
17.3 砌体结构构件试验·····	299
第 18 章 设计性实验与综合性实验 ·····	307
18.1 设计性实验·····	307
18.2 综合性实验·····	308
18.3 科研论文格式·····	311
附 录 ·····	317
附录 A 常用土木工程材料试验项目·····	317
附录 B 中华人民共和国法定计量单位·····	319
参考文献 ·····	323

第 1 章 土木工程材料检测基本知识

1.1 检测机构

1.1.1 检测机构类别

检测机构:从事检测工作的实验室和检查机构。

根据检测机构的归属,将其分为第一方检测机构、第二方检测机构和第三方检测机构。

第一方检测机构:产品提供方的检测机构,通常为产品生产厂家的实验室,用于出具产品出厂检测报告。

第二方检测机构:产品使用方的检测机构,通常为施工单位的实验室,是企业内部质量保证体系的组成部分,可根据企业资质要求申请 ISO 9000 等质量安全体系认证和实验室认可,其出具的试验数据可作为工程质量安全的控制检验指标和工程竣工验收的依据,但必须有一定比例的试验委托第三方检测机构。

第三方检测机构:独立于产品生产方与使用方的检测机构,能独立承担第三方公正检验,具有资质的第三方检测机构出具的检验报告是工程竣工验收的依据。

1.1.2 检测机构资质

检测机构资质,是指向社会出具具有证明作用的数据和结果的实验室和检查机构应当具有的基本条件和能力。

中国合格评定国家认可委员会(CNAS)统一管理、监督和综合协调实验室和检查机构的资质认定工作。

各省、自治区、直辖市人民政府质量技术监督部门和各直属出入境检验检疫机构按照各自职责负责所辖区域内的实验室和检查机构的资质认定和监督检查工作。

资质认定的形式包括计量认证和审查认可。

1.1.2.1 计量认证与审查认可

计量认证证书:对向社会出具具有证明作用的数据和结果的实验室颁发,使用 CMA 标志。

审查认可证书:对向社会出具具有证明作用的数据和结果的检查机构颁发,使用 CMA 标志。

对产品设计、产品、服务、过程或工厂的核查,并确定其相对于特定要求的符合性,或在专业判断的基础上,确定相对于通用要求的符合性称为检查;从事检查活动的机构称为检查机构。

CMA 是 China Metrology Accreditation (中国计量认证)的缩写。取得计量认证合格证

书的检测机构,可按证书上所批准列明的项目,在检测(检验、测试)证书及报告上使用 CMA 标志。经计量认证合格的检测机构出具的数据,用于贸易的出证、产品质量评价、成果鉴定,作为公证数据具有法律效力。

计量认证分两级实施。一级为国家级,由中国合格评定国家认可委员会组织实施;一级为省级,由省级质量技术监督局负责组织实施,具体工作由计量认证办公室承办。不论是国家级还是省级,实施的效力均是完全一致的,不论是国家级还是省级认证,对通过认证的检测机构资质在全国范围内均有效,不存在办理部门不同效力不同的差异。

审查认可由中国合格评定国家认可委员会组织实施。

1.1.2.2 验收与授权

验收证书:对质量技术监督系统质量(纤维)检验机构颁发,使用 CAL 标志。

授权证书:对国家认监委授权的国家产品质量监督检验中心、省级质量技术监督部门授权的产品质量监督检验站颁发,使用 CAL 标志。

CAL 是 China Accredited Laboratory (中国考核合格检验实验室)的缩写,是政府授权的质量监督机构。

1.1.2.3 国家实验室认可

国家实验室认可是与国外实验室认可制度相一致的,是自愿申请的能力认可活动。通过国家实验室认可的检测技术机构,证明其符合国际上通行的标准与检测实验室能力的通用要求。

国家实验室认可由中国合格评定国家认可委员会负责实施;对于符合认可准则的机构,将授予 CNAS 认可资格、颁发 CNAS 认可证书。

1.2 委托检验

1.2.1 委托检验的程序

(1) 委托方按照有关技术标准、规范的规定,从检测对象中抽取检测样品。

(2) 委托方取样后将试样从取样现场送至检测机构。

(3) 委托方确定检测项目并填写委托检验单,将样品交检测机构并支付相关检测费用。检测机构对样品进行检查,如样品符合检测要求,则接收样品并编号;如样品不符合检测要求,则请委托方重新取样送检。

(4) 检测机构根据国家相关标准的规定对委托检测的样品进行检测,并根据检测结果出具检测报告,检测报告仅对送检的样品负责。

(5) 委托方从检测单位领取检测报告。

1.2.2 委托检验的分类

根据委托检验的性质,可将其分为普通送检、见证取样送检和监督抽检三类。

1.2.2.1 普通送检

(1) 由产品的卖方或者买方负责取样和送检。

(2) 送检材料的代表性由委托方负责。

1.2.2.2 见证取样送检

(1) 在见证人(通常由建设单位或工程监理单位具备建筑施工检测知识的人员担任,并需取得工程质量监督机构颁发的见证员资格证)的见证下,由取样人(通常是施工企业的现场取样人员)对工程中涉及结构安全和重要使用功能的试块、试件和材料在现场取样,见证人和取样人一起将试样送至通过计量认证的检测机构进行检测。

(2) 见证人制作见证记录,见证人和取样人对见证取样送检试样的代表性和真实性负责。

(3) 由送检单位填写委托单,由见证人和送检人在委托单中“见证人”和“送检人”签名栏签字确认。

(4) 检测机构在受理见证检测委托时,应对试样见证取样有效性进行确认(查验见证人资格证和见证记录并将复印件备案)。经确认后的见证检测项目,其检测报告除加盖计量认证章(CMA章)和检测报告专用章外,还应加盖有“见证检验”印章,在检测报告的备注中注明见证单位及见证人姓名。

(5) 水泥物理力学性能检验、钢筋(含焊接与机械连接)力学性能检验、砂石常规检验、混凝土强度检验、砂浆强度检验、简易土工试验、混凝土掺加剂检验、预应力钢绞线和锚夹具检验、沥青及沥青混合料检验等必须进行见证取样送检。

1.2.2.3 监督抽检

(1) 建设工程质量监督机构在负责实施项目质量监督员的见证下,对进入施工现场的建筑材料、构配件或工程实体等,按照规定的比率进行取样送检或实地检测。

(2) 检测机构在受理监督抽检委托时,应对试样监督抽查送检有效性进行确认,经确认后的检测项目,其检测报告除加盖计量认证章(CMA章)和检测报告专用章外,还应加盖“监督抽检”印章。

(3) 对实行见证取样送检的检测项目,有下列情形之一的,其工程质量应当由市建设工程质量监督站委派检测机构进行检测确定,检测费用由责任方承担:未按规定进行见证取样送检的;见证取样送检次数达不到要求的;检测不合格而需要进行结构检测的。

(4) 监督抽检通常需在具有验收/授权资质的检测机构进行,检测报告还应加盖验收/授权章(CAL章)。

1.3 不合格产品的处理方法

(1) 如送检材料检测不合格,通常需根据相关标准进行复检,并根据复检结果确定产品是否合格。

(2) 复检时通常需双倍取样,并送省级或省级以上国家认可的监督检测机构进行仲裁检验。

(3) 委托方对检测机构出具的检测数据有异议时,可提请本行政区域的监督检测机构复检;对监督检测机构出具的检测数据有异议的,可提请上级监督检测机构再复检。

1.4 测量误差

1.4.1 误差的概念

测量的目的是为了得到被测物理量的客观真实数,也称真值。但由于受到测量方法、测量仪器、测量条件以及试验者水平等多种因素的限制,测量值与真值会存在一定的偏差,测量值与真值之差称为误差。

误差反映了测量值偏离真值的大小,也反映了测量值的离散程度。由于真值通常是未知的,因此误差一般也是一个未知量。对可以多次测量的物理量,可以用已修正过的算术平均值来代替被测量的真值。

1.4.2 绝对误差和相对误差

1.4.2.1 绝对误差

被测量的测量值与其真值之差定义为该量的绝对误差,绝对误差是有名数,即带有单位的数。绝对误差反映测量值偏离被测量真值的大小及方向,测量值与真值相差越大,绝对误差的绝对值也越大;绝对误差为正,说明测量值大于真值;绝对误差为负,说明测量值小于真值。绝对误差不足以说明测量的准确度,换句话说,它还不能给出实验准确与否的完整概念。

绝对误差的应用极广,常见的有三类绝对误差:

- (1) 测量误差,是测量结果与被测量的真值之间的差值。
- (2) 量具的示值误差,是量具的标称值(即名义值)和真值之间的差值。
- (3) 计量仪器(仪表)的示值误差,是计量仪器(仪表)的示值和真值之间的差值。

1.4.2.2 相对误差

测量的绝对误差与被测量的真值之比称为相对误差,通常用百分数表示。相对误差是一个比值,其数值与被测量所取单位无关,因而是一个无名数。

对同一被测量,相对误差愈大,则真值与测量值之间相差愈大,测量结果的准确度愈低。

1.4.3 误差的分类

从不同的角度出发,误差有不同的分类方法。从误差的来源及其对测量结果影响的性质来分类,误差可分为系统误差、随机误差(或称偶然误差)和粗大误差(或称过失误差)。

1.4.3.1 系统误差

将在重复条件下对同一被测量进行无限多次测量结果的平均值减去被测量的真值称为系统误差。

在实验中要鉴别系统误差也是容易的,当发现观测值的误差总往一个方向偏,误差大小和符号在重复多次测量中几乎相同,或误差呈现一定的规律等,这种误差就是系统误差。

由于系统误差的出现是有规律的,所以在大多数情况下,系统误差可以通过技术途径来消除或使之大为减弱。

系统误差产生的原因多种多样,仪器设备、测量原理和方法、外界环境以及测量人员的习惯等均可引起系统误差。例如电表读数中的零点不准所引入的误差,实验方法本身所引

人的误差等都属于系统误差。

1.4.3.2 随机误差

测量结果减去在重复条件下对同一被测量进行无限多次测量结果的平均值称为随机误差。随机误差有时也称偶然误差,但并不是指误差只是偶然才出现,没有什么规律可循,“偶然”两字只是指误差的取值带有一定的偶然性。

随机误差是由各种因素(包括环境、仪器、实验者本人等)的起伏,即完全是由于某些难以控制的偶然因素所产生的综合影响而形成的。这些因素不可避免的起伏,使得重复测量时所得的一系列实验数据彼此各不相同而产生误差,所以在实验时产生误差是必然的。但对某一具体的测量来讲,随机误差的大小与正负很难预计,只有在大量的重复测量时才符合一定的统计规律,可以用概率统计的方法来研究。研究随机误差就是为了了解实验数据的离散性或重复性问题,或者讲是研究实验数据的精密度问题。

随机误差在大量的重复测量中遵循一定的统计规律,但它所遵循的是哪一种统计规律要随具体情况而定。在做实验时,如已知要处理的数据是按某一特定的规律分布的,则就要按那种规律来处理;如不能肯定遵循某一种特定规律分布,而误差是由无数微小独立的因素综合影响而产生的,那么在重复测量次数较多时,随机误差将遵循正态分布(或高斯分布),这正是绝大多数实验过程中碰到的情况。

1.4.3.3 粗大误差

粗大误差是一种显然与事实不符的误差,是应力求避免的。

粗大误差主要是由于粗枝大叶、过度疲劳或操作不正确等因素引起的。此类误差,虽无规律可循,但只要在实验中多加警惕,细心操作,粗大误差是完全可以避免的,而系统误差与随机误差是难以避免甚至是不可避免的误差。

1.4.3.4 误差的鉴别方法

几种误差的鉴别方法见表1-1。

表1-1 误差的鉴别

分类	产生误差的原因	误差的鉴别
系统误差	仪器结构不良或周围环境的改变	观测值总往一个方向偏,或者是周期性地变化;误差的大小和符号在重复多次测量中几乎相同;经过校正和处理可以减小乃至消除的误差
随机误差	某些难以控制的偶然因素造成	随机误差变化无常,但在等精度测量下有如下规律:误差绝对值不会超过一定界限;绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的次数多,趋近于零的误差出现的次数最多;绝对值相等的正误差与负误差出现的次数几乎相等;误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零
粗大误差	粗枝大叶造成的观测误差或计算误差	观察结果与事实不符 认真操作可以消除

1.4.4 修正值和偏差

1.4.4.1 修正值

修正值是以代数法相加于未修正结果,以补偿假设的系统误差之值,它等于假设的系统误差的负值。系统误差是不可能完全准确知道的,只能用有限次测量的平均值减去被测量的真值得到当前条件下所识别的系统误差的估计值,补偿之后,在已修正结果中还存在有系统误差,只不过其值已较小。

在量值溯源和量值传递中,常常采用这种加修正值的办法。用高一个等级的计量标准来校准或检定测量仪器,其主要内容就是获得准确的修正值。

1.4.4.2 偏差

一个值减去其参考值,称为偏差。这里的值是指测量得到的值,参考值是指设定值、应有值或标称值。

偏差与修正值相等,或与误差等值而反向。

偏差是相对于实际值而言,修正值与误差则相对于标称值而言,它们所指的对象不同。

1.5 测量不确定度

1.5.1 测量不确定度的定义与来源

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,称为测量不确定度。

不确定度是以误差理论为基础建立起来的一个新概念,表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度,它以参数的形式包含在测量结果中,用以表征合理赋予被测量的值的分散性,表示被测量真值所处的量值范围的评定结果。

不确定度的大小,体现着测量质量的高低。不确定度小,表示测量数据集中,测量结果的可信程度高。不确定度大,表示测量数据分散,测量结果的可信程度低。一个完整的测量结果,不仅要给出测量值的大小,而且要给出测量不确定度,以表明测量结果的可信程度。测量不确定度是对测量结果质量的定量评定。

测量中可能导致不确定度的来源一般有如下几个方面。

- (1) 被测量的定义不完整;
- (2) 复现被测量的测量方法不理想;
- (3) 取样的代表性不够,即被测样本不能代表所定义的被测量;
- (4) 对测量过程受环境影响的认识不能恰如其分或对环境的测量与控制不完善;
- (5) 对模拟式仪器的读数存在人为偏移;
- (6) 测量仪器的计量性能(如灵敏度、鉴别力、分辨力、死区及稳定性等)的局限性;
- (7) 测量标准或标准物质的不确定度;
- (8) 引用的数据或其他参量的不确定度;
- (9) 测量方法和测量程序的近似和假设;
- (10) 在相同条件下,被测量在重复观测中的变化。

1.5.2 测量不确定度的分类

测量结果的不确定度一般包含多个分量,按其数值评定方法的不同,把这些分量分成 A 类和 B 类。

A 类:用统计方法计算的分量,用标准偏差表征。

B 类:用其他方法计算的分量,用经验或资料及假设的概率分布估计的标准偏差表征。

不确定度的分类是按评定方法进行的,两类评定都基于概率分布,并且 A 类、B 类分量均以“标准差”的形式表示。用 A 类评定方法得到的标准不确定度称为 A 类标准不确定度分量,用 B 类评定方法得到的标准不确定度称为 B 类标准不确定度分量。A 类标准不确定度分量的全部集合称为 A 类不确定度, B 类标准不确定度分量的全部集合称为 B 类不确定度。

实际使用时,根据表示方式的不同,不确定度通常用到 3 种不同的术语:标准不确定度、合成不确定度和扩展不确定度。标准不确定度是指测量结果的不确定度用标准偏差表示。若测量结果是由若干个其他量计算得来的,则测量结果的标准不确定度受几个不确定度分量的影响,它由各分量的方差、协方差相加导出,得到合成“标准差”,即测量结果的标准不确定度由各不确定度分量运算得到,称为合成不确定度。扩展不确定度也叫总不确定度,是将合成不确定度乘以一个因子得到,所乘的因子称为包含因子或范围因子,通常取值在 2~3 之间。这是为了提高置信水平,增大包含概率,满足特殊用途,将合成标准不确定度扩大了 k 倍,得到测量结果附近的一个置信区间,被测量的值以较高的概率落在该区间内。用扩展不确定度时,必须注明所乘的因子和概率。

A 类、B 类不确定度与随机误差、系统误差之间不存在简单的对应关系。A 类和 B 类表示两种不同的评定方法,随机和系统表示两种不同的性质,不能简单地把 A 类不确定度对应为随机误差,把 B 类不确定度对应为系统误差。A 类和 B 类不确定度都可能是随机误差,也都可能是系统误差。用不确定度表示的测量结果的质量指标往往是既包含了随机影响,又包含了系统影响。特别是在不同的情况下,随机误差和系统误差可能相互转化,难以严格区分,引起了混乱和不统一。不确定度用评定方法划分不同性质因素产生的影响,避免了不必要的混淆,从而建立了评定测量结果、进行计量对比、质量控制、校准检定、测试检验、物质鉴定等的统一标准。

1.5.3 测量不确定度与误差的区别

测量不确定度和误差既有联系又有区别,误差理论是测量不确定度的基础,测量不确定度是经典的误差理论发展和完善的产物。二者的区别主要表现在以下几个方面。

(1) 不确定度是一个无正负符号的参数值,用标准偏差或标准偏差的倍数表示该参数的值。误差是一个有正号或负号的量值,其值为测量结果与被测量真值之差。

(2) 不确定度表明被测量值的分散性,误差表明测量结果偏离真值的大小。

(3) 不确定度与人们对被测量和影响量及测量过程的认识有关,误差是客观存在的,不以人的认识程度而改变。

(4) 不确定度可以由人们根据实验、资料、经验等信息进行评定,从而可以定量确定不确定度的值;而由于真值往往未知,通常不能准确得到误差的值,当用约定真值代替真值时,

可以得到误差的估计值。

(5) 不确定度分量评定时,一般不必区分其性质,若需要区分时,应表述为“由随机影响引入的不确定度分量”和“由系统影响引入的不确定度分量”。误差按性质可分为随机误差和系统误差两类,按定义,随机误差和系统误差都是无穷多次测量时的理想概念。

(6) 不能用不确定度对测量结果进行修正,已修正的测量结果的不确定度中应考虑修正不完善引入的测量不确定度分量;已知系统误差的估计值时,可以对测量结果进行修正,得到已修正的测量结果。

1.6 数据处理

1.6.1 有效数字和数字修约

1.6.1.1 有效数字

有效数字即表示数字的有效意义,用于表示连续物理量的测量结果,指示测量中实际能测得的数字。一个由有效数字构成的数值,从最后一位算起的第二位以上的数字应该是可靠的,或者说是确定的,只有末位数字是可疑的,或者说的不确定的。所以说有效数字构成的数值是由全部确定数字和一位不确定数字构成的。

测量结果的记录、运算和报告必须注意有效数字。由有效数字构成的数值(如测量值)与通常数字的数值在概念上是不同的,例如 34.5, 34.50, 34.500 这 3 个数在数学上看作同一数值,但如用于表示测量值,则 3 个数值反映的测量结果的准确度是不同的。

数字“0”,当它用于指示小数点的位置,而与测量的准确程度无关时,不是有效数字;当它用于表示与测量准确程度有关的数值大小时,则为有效数字,这与“0”在数值中的位置有关。第一个非零数字前的“0”不是有效数字,如 0.0398 为三位有效数字;非零数字中的“0”是有效数字,如 3.0098 为五位有效数字;小数中最后一个非零数字后的“0”是有效数字,如 3.9800 为五位有效数字;以“0”结尾的整数,有效数字的位数难以判断,如 39800 可能是三位、四位甚至是五位有效数字,在此情况下,应根据测量值的准确程度改写成指数形式,如 3.98×10^4 为三位有效数字。

记录和报告上的测量结果只应包含有效数字,对有效数字的位数不能任意增删。由有效数字构成的测量值必然是近似值。因此,测量值及其运算必须按近似计算规则进行。

1.6.1.2 数字修约

(1) 可用指定数位(如指明数值修约到 n 位小数、个位数、十位数等)或制定将数值修约成 n 位有效数字的方法确定修约位数。

(2) 修约规则。

① 在拟舍弃的数字中,若左边第一个数字小于 5(不包括 5),则舍去,即所拟保留的末位数字不变。如将 4.2432 修约到一位小数时为 4.2。

② 在拟舍弃的数字中,当左边第一个数字大于 5(不包括 5),则进一,即所拟保留的末位数字加一。如将 6.4843 修约到一位小数时为 6.5。

③ 在拟舍弃的数字中,若左边第一个数字等于 5 而其右边的数字并非全部为零,则进一,即所拟保留的末位数字加一。如将 1.0501 修约到一位小数时为 1.1。

④ 在拟舍去的数字中,若左边第一个数字等于5而其右边数字皆为零,所拟保留的末位数字若为奇数则进一;若为偶数(包括“0”)则不进。如将0.3500修约到一位小数时为0.4,将1.0500修约到一位小数时为1.0。

⑤ 负数修约时,先将它的绝对值按上述规则进行修约,然后在修约值前面加上负号。

⑥ 所拟舍弃的数字若为两位以上数字,不得连续多次修约,应根据所拟舍弃数字中左边第一个数字的大小,按上述规则一次修约出结果来。

⑦ 在具体实施中,有时测试与计算部门先将获得数值按指定的修约位数多一位或几位报出,而后由其他部门判定。为避免产生连续修约的错误,报出数值最右的非零数字为5时,应在数值后面加“(+)”或“(-)”或不加符号,以分别表明已进行过舍进或未舍未进;如果判定报出值需要进行修约,当拟舍弃数字的最左一位数字为5而后面无数字或皆为零时,数值后面有(+)号者进一,数值后面有(-)号者舍去,其他仍按上述规则进行。

1.6.2 计数及近似计算规则

1.6.2.1 记数规则

在测量结果的记录、运算和报告中,经常要记录数值,在记录这些数值时,应遵循以下几个规则。

(1) 记录测量数据时,只保留一位可疑(不确定)数字。

(2) 表示精密度时,通常只取一位有效数字,只有测量次数很多时,方可取两位数字,且最多只取两位。

(3) 在数值计算中,当有效数字位数确定之后,其余数字应按修约规则一律舍去。

(4) 在数值计算中,某些倍数、分数、不连续物理量的数值,以及不经测量而完全根据理论计算或定义得到的数值,其有效数字的位数可视为无限。这类数值在计算中需要几位就可以写几位。如数学中的常数 π , e , $1\text{ m}=100\text{ cm}$ 中的100等。

(5) 测量结果的有效数字所能达到的最后一位应与误差处于同一位上,重要的测量结果可多记一位估读数。

1.6.2.2 近似计算规则

(1) 加法和减法。几个近似值相加减时,所得和或差的有效数字取决于绝对误差最大的数值,最后结果的有效数字自左起不超过参加计算的近似值中出现的最大可疑数值。如在小数的加减计算中,各项所保留的小数点后的位数与各近似值中小数点位数最少者多保留一位,而计算结果所保留的小数点后的位数与各近似值中位数最少者相同。

例如, $508.4 - 438.68 + 13.046 - 6.0548 \approx 508.4 - 438.68 + 13.05 - 6.05 = 76.72$ 。最后计算结果只保留一位小数,为76.7。若尚需参与下一步计算,则取76.72。

(2) 乘法和除法。近似值相乘除时,所得积或商的有效数字位数取决于相对误差最大的近似值,即最后结果的有效数字位数要与各近似值中有效数字最少者相同。在实际计算中,先将各近似值修约至比有效数字位数最少者多保留一位有效数字,再将计算结果按上述规则处理。

例如, $0.0676 \times 70.19 \times 6.05237 \approx 0.0676 \times 70.19 \times 6.052 = 30.850975688$ 。最后的计算结果用三位有效数字表示为30.9。

对于第一位是8或9的近似值,在乘除计算中有效数字的位数可多计一位。