

高等学校教材

大气污染控制实验教程

依成武 欧红香 主 编

储金宇 副主编



化学工业出版社

高等学校教材

大气污染控制实验教程

依成武 欧红香 主编

储金宇 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本教材是根据教育部环境工程类专业的基本教学要求编写的。选取实验方法和技术上有代表性的实验,介绍了现代大气污染控制工程研究中常用到的重要实验技术,并吸取我国科学研究中的新成果,还介绍了一些新的仪器、装置和测量方法等,给出了部分应用现代分析仪器和先进实验设备的实验项目,其中包括一些面向新技术开发、具有一定探索性的研究型综合性和设计性实验。内容可分为空气污染物监测、除尘器性能测定、气态污染物净化、机动车尾气测定四大类,共28个实验项目。

本书可作为高等院校环境工程和环境科学等专业学生的教材,也可供环境监测领域的科研人员、各级环境监测站的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制实验教程/依成武,欧红香主编. —北京:
化学工业出版社,2009.4
高等学校教材
ISBN 978-7-122-04911-7

I. 大… II. ①依…②欧…③储… III. 空气污染控制-
高等学校-教材 IV. X510.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第025450号

责任编辑:刘俊之

文字编辑:荣世芳

责任校对:王素芹

装帧设计:杨 北

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张9½ 字数176千字 2009年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:26.00元

版权所有 违者必究

前 言

在大气污染控制教学过程中,开设大气污染实验的主要目的是培养学生对大气污染控制过程的理解和分析能力,结合理论教学掌握大气污染控制技术的基本概念和基本原理,学习与大气污染控制相关的技术、方法、仪器和设备,了解实验在大气污染控制工艺与设备研究、开发过程中所起的作用,使学生获得一定程度的用实验方法和技术研究大气污染控制新工艺、新技术和新设备的独立工作能力,进一步培养学生良好的实验习惯和严谨的科学作风。

大气污染控制实验是实施全面的大气污染控制教育最有效的教学形式。在实验课程中,让学生运用科学方法,按照认识过程进行学习,即在获得知识和技术的同时,学会科学方法和思维,从而具有自学能力和解决问题的能力。要达到此目标,教材是教学环节中重要的一环,《大气污染控制实验教程》可作为大气污染控制教育的配套教材。

结合以上目的,本教程根据教育部环境工程类专业的基本教学要求,结合课题组在江苏省教育科学“十一五”规划重点课题(大气污染控制精品课程群建设研究,B-b/2006/01/019)中的研究和相关教学科研工作编写了该实验教程。本书在实验内容上,选取了那些在实验方法和技术上有代表性的实验,介绍现代大气污染控制工程研究中常用到的重要实验技术,注意吸取我国科学研究中的新成果。为扩大学生的知识面,使学生对该领域有较全面的了解,教材中介绍了一些新的仪器、装置和测量方法等,给出了部分应用现代分析仪器和先进实验设备的实验项目,其中包括一些面向新技术开发、具有一定探索性的研究型综合性和设计性实验。本教材内容可分为空气污染物监测、除尘器性能测定、气态污染物净化、机动车尾气测定四大类,共28个实验项目。因为大气污染控制实验教程涉及面广,值得开设的实验种类多,但学生只能选做其中一部分实验项目,因此各院校在安排教学实验时,可根据实际情况,选择性开设部分实验项目。

全书由依成武、欧红香担任主编,储金宇担任副主编,各章节编写分工如下:绪论、第一章由依成武、欧红香编写;第二章、第三章由欧红香编写;第四

章～第六章由依成武、欧红香、吴云涛编写；第七章由依成武编写；第八章由储金宇、吴云涛编写。在本书的编写过程中王延民、窦鹏等研究生也提供了帮助，本教程的出版得到了化学工业出版社的大力支持，编辑对书稿提出了宝贵的修改意见，在此对所有为本书出版提供支持和帮助的人致以衷心的感谢！

由于编者水平与时间有限，书中不妥之处，敬请各位读者提出批评和建议，以便加以修正。

编 者

2008 年 11 月

目 录

绪论	1
一、大气污染控制实验的目的	1
二、大气污染控制实验类型	1
三、实验的学习方法	2
四、大气污染控制实验规则	3
五、实验室的安全	4
第一章 实验误差理论与数据处理	6
第一节 误差与测定数据的取舍	6
第二节 测量结果不确定度的计算	7
第三节 有效数字	10
第四节 数据处理方法	11
第二章 大气质量监测	14
实验一 大气中总悬浮物 (TSP) 的测定	14
实验二 大气中可吸入颗粒物 (PM_{10}) 的监测——小流量 (冲击式) 采样-重量法	16
实验三 大气环境中 SO_2 浓度的监测——甲醛吸收-盐酸副玫瑰苯胺法	18
实验四 大气中二氧化氮的监测	24
实验五 大气降水 pH 值的测定——电极法	28
实验六 校园空气质量监测	30
第三章 室内空气质量监测	34
实验七 室内甲醛浓度的测定	35
实验八 室内氨浓度的测定——纳氏试剂分光光度法	41
实验九 室内空气中苯、甲苯、二甲苯的测定——毛细管气相色谱法	43
实验十 室内总挥发性有机化合物 (TVOC) 浓度的测定——热解吸- 毛细管气相色谱法	45
第四章 管道烟气参数的测定	49
实验十一 烟气温度、湿度的测定	49
实验十二 管道中风压、风速及流量的测定	51
实验十三 气体含尘浓度的测定	60
实验十四 烟气中二氧化硫浓度的测定 (设计性实验)	64

第五章 粉尘物理性质的测定	66
实验十五 粉尘真密度的测定	66
实验十六 粉尘比电阻的测定	69
实验十七 粉尘粒径分布的测定	78
第六章 除尘器性能的测定	85
实验十八 旋风除尘器性能测定	85
实验十九 袋式除尘器性能测定	90
实验二十 电除尘器除尘效率的测定	94
实验二十一 电除尘器伏安特性测定	98
第七章 气态污染物净化实验	102
实验二十二 碱液法吸收气体中的二氧化硫	102
实验二十三 吸附法净化气体中的氮氧化物	106
实验二十四 羟基自由基高级氧化技术净化 VOCs 废气	111
实验二十五 等离子体资源化烟气脱硫	116
第八章 机动车尾气的测定	122
实验二十六 机动车尾气中 CO、HC 的测定	122
实验二十七 机动车尾气中 NO _x 的测定	126
实验二十八 机动车尾气中颗粒物的测定	128
附录	133
附录一 《环境空气质量标准》规定的各项污染物的浓度限值 (摘自 GB 3095—1996)	133
附录二 《环境空气质量标准》各项污染分析方法 (摘自 GB 3095—1996)	134
附录三 《环境空气质量标准》各项污染物数据统计的有效性规定 (摘自 GB 3095—1996)	134
附录四 《室内空气质量标准》规定的各项参数的标准值 (摘自 GB/T 18883—2002)	135
附录五 室内空气中各种参数的检验方法 (摘自 GB/T 18883—2002)	136
附录六 《恶臭污染物排放标准》(摘自 GB 14554—93)	137
附录七 《锅炉大气污染物排放标准》(摘自 GB 13271—2001)	139
附录八 《火电厂大气污染物排放标准》(摘自 GB 13223—2003)	140
参考文献	143

绪 论

一、大气污染控制实验的目的

众所周知，实验教学是高校教育体系中的一个重要组成部分，是培养学生综合能力和素质的重要环节，实验教学水平的高低将直接影响到人才的质量，而实验教材是帮助学生学习和掌握实验原理和过程的重要工具书。

大气污染控制工程是环境工程专业学生的专业必修课，大气污染控制实验课程与该课程有着密切的联系。通过实验：①在观察分析各种实验现象和测量各种参数后，进一步理解和掌握大气污染控制方面的基础知识，加深对控制工艺、技术及设备的认识，为更好地掌握所学理论知识奠定基础。②通过实验训练，使学生能够自行阅读实验教材或资料，做好实验准备；能够借助实验教材或仪器说明书，熟悉常用仪器设备的基本原理和性能，并能正确使用；学习并掌握基本参数的测量方法并进行具体的测量；能够运用所学知识对实验现象进行初步分析和判断；能正确记录和处理实验数据，对实验结果做出分析，写出合格的实验报告，初步培养实验设计和实施的能力。③训练学生艰苦奋斗、勤奋不懈、谦虚好学、乐于协作、实事求是、创新存疑等科学品德和科学精神，养成严格操作、严密思维的工作作风以及爱护国家财产、遵守纪律的优良品德。

二、大气污染控制实验类型

大气污染控制实验与其他实验一样，根据形式和内容可分为演示性、操作性、验证性、综合性、设计性和研究创新性等类型。不同类型实验的实验目的、方法、特点和适用范围各不相同。

(1) 演示性实验 为便于学生对客观事物的认识，以直观演示的形式，使学生了解其事物的形态结构和相互关系、变化过程及其规律的实验教学过程。一般由教师操作，学生仔细观察，验证理论、说明原理和介绍方法。

(2) 操作性实验 一般由学生按要求，动手拆装和调试实验装置或上机操作、程序设计和数据处理，掌握其基本原理和方法。

(3) 验证性实验 以加深学生对所学知识的理解、掌握实验方法与技能为目的，验证课堂所讲某一原理、理论或结论；以学生为具体实验操作主体，通过现象衍变观察、数据记录、计算、分析直至得出被验证的原理、理论或结论的实验

过程。一般按照实验教材(或实验指导书)的要求,由学生操作验证课堂所学的理论,加深对基本理论、基本知识的理解,掌握基本的实验知识、实验方法和实验技能、实验数据处理,撰写规范的实验报告。

(4) 综合性实验 以强化已学若干知识内容的综合系统运用能力和综合分析、解决较复杂实际问题的能力为目的;实验内容涉及本课程的综合知识或与本课程相关课程的知识,以学生为实验操作主体,提交具备综合分析与应用能力的实验报告的系统过程。这类实验可以是学科内一门或多门课程教学内容的综合,也可以是跨学科的综合;学生要运用多方面知识、多种实验方法,按照要求(或自拟实验方案)进行实验,主要培养学生综合运用所学知识和实验方法、实验技能和分析、解决问题的能力。

(5) 设计性实验 以培养学生灵活掌握所学知识和创新能力为目的,给定实验目的、要求和实验条件,由学生自行设计实验方案并加以实现,通过观察、过程描述、记录、计算、分析,提交具有一定见解的实验报告的实验过程。这类实验可以是实验方案的设计,也可以是系统的分析与设计。学生独立完成查阅资料、拟定实验方案、实验方法和步骤(或系统的分析与设计)、选择仪器设备(或自行设计、制作)并实际操作运行,以完成实验的全过程,同时形成完整的实验报告,主要培养学生的组织能力和自主实验的能力。

(6) 研究创新性实验 运用多学科知识、综合多学科内容,结合教师的科研项目,使学生初步掌握科学思维方式和科学研究方法,学会撰写科研报告和有关论证报告,培养学生的创新能力。

教育部本科教学水平评估方案要求综合性、设计性实验的课程占有实验课程总数的比例 $\geq 80\%$ 方能达优。

三、实验的学习方法

大气污染控制实验的学习,不仅需要学生有一个正确的学习态度,还需要有正确的学习方法,现将学习方法归纳如下。

1. 预习

预习是做好实验的前提和保证,预习可从以下方面进行。

① 认真阅读本书有关章节、有关教科书及参考资料,做到明确目的、了解实验原理;熟悉实验内容、主要操作步骤及数据的处理方法;提出注意事项,合理安排实验时间,预习或复习基本操作、有关仪器的使用。

② 通过查阅附录或有关手册,列出实验所需的物理化学数据。

③ 在前面的基础上,认真写好预习报告。

2. 讨论

① 实验前师生共同讨论,以掌握实验原理、操作要点和注意事项等。

② 观看操作录像,或由教师操作示范,使基本操作规范化。

③ 实验后对实验现象、结果进行分析,对实验操作和素养进行评说,以达到提高的目的。

3. 实验

① 按拟定的实验步骤进行操作,既要大胆,又要细心,仔细观察实验现象,认真测定数据,并做到边实验、边思考、边记录。

② 观察到的现象、测定的数据等,要如实记录在报告本上,不得杜撰或随意删减原始数据,原始数据不得涂改或用橡皮擦拭,如记错可在原始数据上划一道杠,再在旁边写上正确值。

③ 实验中要勤于思考,仔细分析,遇到疑难问题,可查资料,也可与教师讨论获得指导。

④ 若对实验现象有怀疑,在分析和查找原因的同时,可以做对照实验、空白实验,或自行设计实验进行核对,必要时应多次实验,从中得出有益的结论。

⑤ 若实验失败,要检查原因,经教师同意后重做实验。

4. 实验后

做完实验仅仅是完成实验的一半,接下来更为重要的是分析实验现象,整理实验数据,把直接的感性认识提高到理性思维阶段。实验做完后要认真、独立完成实验报告,对实验现象进行解释,对实验数据进行处理,分析产生误差的原因,对实验现象以及出现的一些问题进行讨论,要敢于提出自己的见解,必要时对实验提出改进的意见或建议。实验报告要求字体端正,数据齐全,图表规范,通常包括以下几个部分:①实验名称;②实验目的;③实验原理;④实验简要步骤;⑤实验结果及数据处理的主要步骤;⑥实验讨论等。

四、大气污染控制实验规则

实验室是实验器材的集中地,是进行实验教学、开展科学研究的重要基地,是培养学生理论联系实际、严肃认真的科学态度和科学作风以及独立工作能力的场所。为维护实验室实验秩序,要求做到:

① 进入实验室的一切人员,必须严格遵守实验室的各项规章制度。

② 到实验室进行教学、科研等,必须根据教学、科研的计划,经实验室统一安排后方可进行。

③ 校外人员到实验室参观、学习需经教务处批准,并做好登记。

④ 实验室不得存放与实验无关的物品,更不允许存放个人物品及在实验室住宿。

⑤ 要严格遵守保密制度和安全、防火制度,坐班人员必须坚守岗位,认真负责,在实验室开放期间并要做好交接手续。

⑥ 学生进入实验室必须保持安静,严禁喧哗、打闹,严禁在实验室内吸烟、

乱丢杂物。

⑦ 学生实验前做好预习，明确实验目的，了解实验设备性能，严格遵守操作规程，做到实验内容及实验步骤心中有数。

⑧ 必须爱护实验仪器设备和实验材料，节约水电，未经教师同意，不得随意搬动和调换仪器。

⑨ 使用贵重仪器，按仪器使用登记本要求登记有关事项。

⑩ 实验完毕，应切断水、电、气源，清洁实验仪器和实验工作台，做好仪器复位工作。

⑪ 使用实验室仪器设备，需严格遵守操作规程，如发现损坏或丢失时，要立即报告主管部门，以便及时处理。

⑫ 因责任原因损毁、丢失仪器设备和器材，按规定进行赔偿。

五、实验室的安全

实验室的安全制度是保证在实验室工作的人员的人身、财产安全，保障科研工作正常进行的重要措施。实验室要认真落实安全制度，经常对在实验室工作的人员进行安全教育，坚持“安全第一，预防为主”的原则。实验室每年应对安全管理工作的执行情况进行一次检查和总结，安全制度须挂在实验室明显的地方，并严格贯彻执行。

① 实验室的电源情况要经常进行检查。

② 实验室所用的室内、外用电线路和装置，均应由具有国家认定资质的单位和人员架设、安装和施工。竣工后需经有关部门进行工程质量验收，然后方可使用。

③ 实验室用电应严禁超负荷运行，不准乱拉乱接电线。

④ 实验室内的用电线路和配电盘、板、箱、柜等装置及线路系统中的各种开关、插座、插头等均应经常保持完好可用状态，熔断装置所用的熔丝必须与线路允许的容量相匹配，严禁用其他导线替代。室内照明器具都要经常保持稳固可用状态。

⑤ 实验室应对进入实验室工作或学习的学生、老师、访问学者及其他人员经常进行安全用电教育，把安全用电制度落到实处。

⑥ 实验室严禁使用除固有设备外的电加热器具（包括各种类型的电炉、电取暖器、电水壶、电煲锅、电热杯、热得快、电熨斗、电吹风等），凡擅自使用电加热器具者，除没收器具，要对使用人进行批评教育。

⑦ 实验室内严禁存放个人钱物和其他非科研工作用的物品。

⑧ 每日最后离开实验室的人员要负责检查电源、门窗等的安全状况，关好电源，锁闭好门窗。

⑨ 如发现设备损坏、财物被盗等情况，发现人要保护好现场，立即向有关

部门报告，对隐瞒不报或缩小、扩大事故真相者，应予以追究责任。

⑩ 实验室内不得使用明火，严禁抽烟。

如果发现有违反上述条款的情况，实验室每一个工作人员都有权制止，直到行为人进行了改正，采取适当措施消除了安全隐患并取得实验室有关负责人的认可，方可重新工作。

第一章 实验误差理论与数据处理

第一节 误差与测定数据的取舍

一、误差

在进行定量分析实验的测定过程中,不可能使测出的数据与客观存在的真实值完全相同。真实值与测试值之间的差别就叫做误差。通常用准确度和精密度来评价测量误差的大小。

准确度是实验分析结果与真实值相接近的程度,通常以误差的大小来表示,误差值越小,准确度越高。误差又分为绝对误差和相对误差,其表示式分别如下:

$$\text{绝对误差}(E_a) = \text{个别测得值}(x) - \text{真实值}(\mu) \quad (1-1)$$

$$\text{相对误差}(E_r) = \frac{x - \mu}{\mu} \times 100\% \quad (1-2)$$

从以上两式可以看出,用相对误差来表示分析结果的准确度是比较合理的,因为它反映了误差值在整个结果的真实值中所占的比例。

然而在实际工作中,真实值是不可能知道的,因此分析的准确度就无法求出,只能用精密度来评价分析的结果。精密度是指在相同条件下,进行多次测定后所得数据相近的程度。精密度一般用偏差来表示,偏差也分绝对偏差和相对偏差:

$$\text{绝对偏差}(d_a) = \text{个别测定值}(x) - \text{算数平均值}(\bar{x}) \text{ (不计正负)} \quad (1-3)$$

$$\text{相对偏差}(d_r) = \frac{\bar{d}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\text{其中:} \quad \bar{d} = \frac{\sum(x - \bar{x})}{n} \text{ (} n \text{ 为测定次数)} \quad (1-5)$$

当然,和误差的表示方法一样,用相对偏差来表示实验的精密度比用绝对偏差更有意义。

在实验中,对某一样品常进行多次平行测定,求得其算术平均值作为该样品的分析结果。而该结果的精密度则用平均绝对偏差和平均相对偏差来表示。误差与偏差具有不同的含义,前者以真实值为标准,后者以平均值为标准。由于物质的真实值不能知道,我们在实际工作中得到的结果只能是多次分析后得到的相对

正确的平均值，而其精密度则只能以偏差来表示。

应该指出，用精密度来评价分析的结果是有一定的局限性的。分析结果的精密度很高（即平均相对偏差很小），并不一定说明实验的准确度也很高。如果分析过程中存在系统误差，可能并不影响每次测得数值之间的重合程度，即不影响精密度；但此分析结果却必然偏离真实值，也就是分析的准确度不高。当然，如果精密度不高，则无准确度可言。一般情况下为了方便，我们常常将偏差称为误差。

二、误差的分类

误差一般分为三类：系统误差、随机误差和粗大误差。系统误差是指在同一量的测量过程中，保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差。随机误差是指在多次测量同一量的过程中，误差时大时小，时正时负，以不可预知的方式变化的误差。粗大误差是指由于粗心大意或发生实验条件突变而引起的误差。

为了减少系统误差常采取下列措施。

(1) 空白实验 为了消除由试剂等原因引起的误差，可在不加样品的情况下，按与样品测定完全相同的操作手续，在完全相同的条件下进行分析，所得的结果为空白值。将样品分析的结果扣除空白值，可以得到比较准确的结果。

(2) 回收率测定 取一标准物质（其中组分含量都已精确地知道）与待测的未知样品同时作平行测定。测得的标准物质质量与所取之量之比的百分率就为回收率，可以用来表达某些分析过程的系统误差（系统误差越大，回收率就越低）。

(3) 仪器校正 对测量仪器校正以减少误差。

工作中，应合理安排实验系统，以使系统误差在测定中不起作用。为了减少随机误差，一般采取的措施是均匀取样和多次测定，以减少此类误差。对于粗大误差应将其剔除以提高测量的可靠性。

实际工作中，应根据需要的准确度选择测量手段（仪器与方法），如果需要较高的准确度，又无适宜的仪器设备，则可用提高样品用量的方法来达到。

第二节 测量结果不确定度的计算

测量与误差形影相随，一般情况下误差不可能确切知道。为了完善地说明测量结果，在报道被测量数值的同时还应出示测量结果的可信赖程度。通常把结果写成如下简洁形式：

$$x = \bar{x} \pm \sigma (\text{单位}) \quad (1-6)$$

式中， x 代表被测量； $\bar{x}$ 是被测量真值的最佳估值； σ 是测量结果的不确定度，用于表示测量结果的准确程度。由上式可见，表示测量结果有三个要素：数值、不确定度与单位。测量不确定度是衡量测量质量的一个重要指标，测量结果

的不确定度表明最佳估值与真值之差（即误差）以一定概率落在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间。不确定度越小，标志着测量的可信赖程度越高；不确定度越大，标志着测量的可信赖程度越低。

根据被测量是直接测量量还是间接测量量，对应的最佳估值和不确定度的计算要分别考虑。

一、最佳估值 $\bar{x}$ 的计算

1. 直接测量量的最佳估值

在直接测量中，对同一量要进行多次测量，以减小随机误差。若进行了 n 次测量，多次测量值的平均值就是对真值的最佳估值：

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-7)$$

式中， x_i 指第 i 次测量的测量值。

实验中有时也只进行一次测量，条件是随机误差远小于系统误差，这一条件暗含着多次测量的结果基本相同。

2. 间接测量量的最佳估值

设间接测量量为 N ，它有 k 个直接测量量 $x_1, x_2, \cdots, x_k$ ，其函数关系为： $N = N(x_1, x_2, \cdots, x_k)$ ，那么，间接测量量的最佳估值就是：

$$\bar{N} = N(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_k) \quad (1-8)$$

上式表明，只需把直接测量量的最佳估值代入函数表达式，即可算出间接测量量的最佳估值。

二、测量结果不确定度计算

测量结果的误差实际上是测量过程中许多误差影响的结果。“许多误差”中的每一个都是测量结果误差的一个分量，如果（仅仅是如果）每一个分量都知道，那么，将它们合成即可得到测量结果的误差。

测量结果的不确定度属于合成不确定度，合成不确定度含有两类分量：A 类分量（用统计方法计算，一般与读数分散对应）和 B 类分量（用非统计方法计算，一般与仪器误差对应）。

1. 直接测量量不确定度的计算

(1) A 类不确定度分量 $S_{\bar{x}}$ 用统计方法计算，以多次测量值的平均值的标准（偏）差 $S_{\bar{x}}$ 作为 A 类不确定度分量，符号中的下标 $\bar{x}$ 指被测量量的平均值。计算表达式为：

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{k(k-1)} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-9)$$

其中： $\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i$ 。

(2) B类不确定度分量 u S_r 是用统计方法计算的,与此相反, u 是用非统计方法计算的。计算步骤大致如下:①定误差极限值、分布及置信系数;②求误差极限与置信系数之商,得标准差,以此标准差作为B类不确定度分量。计算表达式为:

$$u = \frac{\Delta a}{C} \quad (1-10)$$

式中, Δa 为仪器误差限(本教材仅考虑这种误差,若细致计算还应包括环境变动等其他多项误差); C 为置信系数,随分布不同而不同,如对于正态分布, $C=3$,对于均匀分布, $C=\sqrt{3}$ 。此处仪器误差限是在正常使用仪器的条件下,仪器显示值的误差极限值。

(3) 合成不确定度 σ 在已知直接测量量的各 S 、 u 的条件下,怎样合成不确定度才合理?从数学运算来看,加、减最简单。对实验者而言,如果按相加计算,这是对测量误差的最保守的评价,很可能埋没测量的成绩;如果按相减合成,将是最冒险的报道,极有可能是谎报成绩。

由于A类与B类不确定度都具有统计特征,按概率理论,在 S 与 u 独立的条件下,以“方”和“根”方法合成最为可取。即:

$$\sigma = \sqrt{S^2 + u^2} \quad (1-11)$$

若A类与B类不确定度分量各有多个且各自独立,设A类有 n 个,B类有 m 个,仍按“方和根”法合成:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2 + \sum_{j=1}^m u_j^2}$$

2. 间接测量量不确定度的计算

在实验过程中,大量的测量属于间接测量。只有在已知各直接测量量的最佳估值及其不确定度之后才能计算间接测量量的不确定度。间接测量量不确定度的计算方法有多种,这里介绍最常见的两种,设间接测量量为 N ,有 k 个直接测量量,分别为 $x_1, x_2, \dots, x_k$,它们之间的函数关系为: $N = N(x_1, x_2, \dots, x_k)$:

方法一:和或差的不确定度

设有函数 $N = \sum_{j=1}^k a_j x_j$ ($j=1, 2, \dots, k$)

传递系数为 $\frac{\partial N}{\partial x_j} = a_j$,按“方和根”合成法

$$\sigma_N = \sqrt{\sum_{j=1}^k (a_j \sigma_j)^2} \quad (1-12)$$

即:和或差的不确定度等于各项不确定度的方和根。

方法二:积和商的不确定度

设有函数 $N = \prod_{j=1}^k x_j^{a_j}$ ($j=1,2,\cdots,k$)

偏导数 $\frac{\partial N}{\partial x_j} = a_j \frac{\prod_{j=1}^k x_j^{a_j}}{x_j}$ ，按“方和根”法合成

$$\sigma_N = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(a_i \frac{\prod_{j=1}^k x_j^{a_j}}{x_i} \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(a_i \frac{N}{x_i} \sigma_i \right)^2}$$

上式两边除以 N 后，整理得：

$$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(a_i \frac{\sigma_i}{x_i} \right)^2} \tag{1-13}$$

注意：方指数 a_i 在括弧内。

附：测量结果的表示与不确定度计算小结

一、测量结果的表示（附表 1-1）

附表 1-1

测量结果的表示	最佳估值的计算	
	直接测量量	间接测量量
$x = (x \pm \sigma)$ 单位 $\bar{x}$ —最佳估值 σ —测量结果不确定度	$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$N = N(x_j) \quad (j=1,2,\cdots,k)$

二、测量结果不确定度及其分量的计算（附表 1-2）

附表 1-2

A 类不确定度	B 类不确定度	直接测量量	间接测量量
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$	$u = \frac{\Delta a}{C}$ Δa —误差限 C —置信系数	$\sigma = \sqrt{S^2 + u^2}$	$\sigma_N = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial N}{\partial x_j} \sigma_j \right)^2}$

第三节 有效数字

在实验定量分析中应在记录数据和进行计算时注意有效数字的取舍。
有效数字应是实际可能测量到的数字，应该取几位有效数字，取决于实验方