

高等学校试用教材

大气污染 控制工程实验

●林肇信 郝吉明 马广大 主编

高等教育出版社

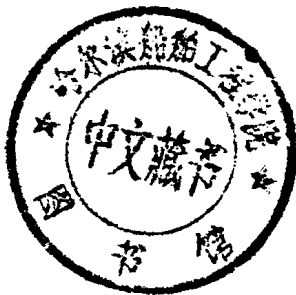
X 51-33
L 61

360378

高等学校试用教材

大气污染控制工程实验

林肇信 郝吉明 马广大 主编



高等教育出版社

一九九〇年

内 容 提 要

本书是根据高等工业学校环境工程教材委员会制定的，经国家教委审批的基本要求编写的，是与林肇信主编的《大气污染控制工程》(多学时)及郝吉明、马广大主编的《大气污染控制工程》(少学时)的配套教材。书中选编了大气扩散、烟气参数的测定、粉尘物理性质的测定、除尘器性能的测定、气态污染物的净化及演示等六大类型实验，共三十个实验项目，可供不同院校根据各自情况选用。

本书是高等院校环境工程专业的实验教材，亦可供有关科技人员参考。

高等学校试用教材

大气污染控制工程实验

林肇信 郝吉明 马广大 主编

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 8.125 字数 210 000

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数 0001— 3 940

ISBN 7-04-003433-6/K·171

定价 3.20 元

前 言

本教材系根据国家教委高等工业学校环境工程专业教材编审委员会审定的“大气污染控制工程实验”教材基本要求编写的。是林肇信主编的《大气污染控制工程》(多学时)、郝吉明,马广大主编的《大气污染控制工程》(少学时)教材的配套教材。

编者认真分析了1988年4月以前送交国家教委环境工程类教材编审委员会的某些兄弟院校的实验讲义,并将其中具有代表性的、较为成熟的实验项目,几经修改充实提高后,列入了本教材。与此同时,编者还注意到了该学科实验技术和测试设备的新发展,教材中也选入了一定数量应用现代仪器和设备的实验项目。

本教材除绪论外,选编了大气扩散、烟气参数的测定、粉尘物理性质的测定、除尘器性能的测定、气态污染物的净化以及演示六大类型实验,共三十个实验项目。

为使不同条件的院校在选择实验项目时,具有一定的灵活性,每一类实验都编有一定数量的、能够达到相同目的和要求的实验项目。在选择实验项目时,应尽可能兼顾到多种类型,以使學生能够得到较宽的实验技能训练。对于讲授少学时“大气污染控制工程”课的院校,建议从中选做4~6个实验;对于讲授多学时“大气污染控制工程”课的院校,建议从中选做6~8个实验。

本书由北京工业大学林肇信教授、清华大学郝吉明教授、西安冶金建筑学院马广大副教授主编。华北电力学院叶昌仁副教授主审。

参加本书编写人员有:北京工业大学林肇信、王富岩、张小鹏、耿其博、余名汉、黄小林;清华大学郝吉明、周中平、刘启才、贺克斌、晁红勋;西安冶金建筑学院马广大、曾汉侯、焦文

豹、党筱凤、张承中，同济大学袁辉。

该实验教材在编写过程中，还请到成都科技大学朱联锡副教授，昆明工学院李柳琼副教授，东南大学马光副教授，同济大学季学李副教授，高等教育出版社张月娥副编审及陈文编辑等同志对该书稿进行了审议，并提出宝贵的修改意见。在此一并对给予本书指导和帮助的所有同志表示衷心的感谢。

由于参加该书编写人员较多，编者水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者直言相助，以便再版时加以修正。

编者

1990.9 于北京

目 录

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 前言 | 1 |
| 绪论 | 1 |
| 1. 大气扩散实验 | 16 |
| 实验1-1 照像法求取大气扩散参数及烟云抬升高度 | 16 |
| 实验1-2 等容气球法求取大气扩散参数 | 24 |
| 实验1-3 激光测烟雷达探测大气扩散参数 | 39 |
| 2. 烟气参数测定 | 49 |
| 实验2-1 烟气状态(温度、压力、含湿量)、流速及流量的测定 | 49 |
| 实验2-2 烟气含尘浓度的测定 | 58 |
| 实验2-3 烟气中SO ₂ 浓度的测定 | 66 |
| 3. 粉尘物理性质的测定 | 72 |
| 实验3-1 利用密度仪测定粉尘真密度 | 72 |
| 实验3-2 比重瓶液相置换法测定粉尘真密度 | 81 |
| 实验3-3 光学法测定粉尘粒径 | 85 |
| 实验3-4 移液管法测定粉尘粒径分布 | 91 |
| 实验3-5 粉尘比电阻的测定 | 103 |
| 实验3-6 库尔特法测定粉尘粒径分布 | 108 |
| 实验3-7 巴柯法测定粉尘粒径分布 | 117 |
| 实验3-8 沉降天平法测定粉尘粒径分布 | 123 |
| 实验3-9 冲击法测定粉尘粒径分布 | 131 |
| 4. 除尘器性能实验 | 141 |
| 实验4-1 旋风除尘器性能测定 | 141 |
| 实验4-2 袋式除尘器性能测定 | 149 |
| 实验4-3 湿式文丘里除尘器性能测定 | 160 |

| | | |
|-----------|------------------------|------------|
| 实验4-4 | 电除尘器除尘效率测定 | 169 |
| 实验4-5 | 电除尘器伏安特性测定 | 176 |
| 5. | 气态污染物净化实验 | 182 |
| 实验5-1 | 碱液吸收气体中二氧化硫 | 182 |
| 实验5-2 | 硫化钠碱溶液吸收气体中的氮氧化物 | 193 |
| 实验5-3 | 氢氧化钠碱液吸收气体中氮氧化物 | 202 |
| 实验5-4 | 冷凝——吸收法治理高浓度有机废气 | 209 |
| 实验5-5 | 活性炭吸附气体中氮氧化物 | 216 |
| 实验5-6 | 活性炭吸附低浓度含苯废气 | 221 |
| 实验5-7 | 吸附法净化工业酸气 | 226 |
| 实验5-8 | 炽热碳还原气体中氮氧化物 | 234 |
| 实验5-9 | 催化燃烧法净化废气中苯系污染物 | 239 |
| 6. | 演示实验 | 245 |
| 实验6-1 | 吸气罩演示实验 | 245 |
| | 参考文献 | 252 |

绪 论

一、设置大气污染控制工程实验课程的目的和要求

(一) 教学目的

大气污染控制工程实验课是环境工程专业的一门实践性必修课，它的基本任务是：通过实验使学生掌握本课程的基本实验方法、手段及操作技能，学会正确使用各种测试仪器和实验设备的方法，掌握正确的数据处理和曲线绘制等科学方法。培养学生运用所学理论进行科学研究、分析问题和解决问题的能力，通过理论与实践的结合，巩固和加深对所学基本原理的理解，并在某些方面得到充实和提高。树立实事求是的科学态度和严谨的工作作风。

(二) 基本要求

1. 掌握实验所用仪器设备的基本原理以及实验的操作方法。
2. 能独立进行实验的全过程，包括装配和调节实验装置，观察实验现象，记录和处理实验数据，综合分析实验结果，最后作出正确的实验报告。
3. 实验过程中要求学生具有实事求是的科学态度，忠于所观察到的实验现象，养成严肃、认真、细致、整洁的良好实验习惯。

二、实验中的误差处理

所谓误差，粗略地讲，就是测量值与被测量的真实值或测量值与标准值之差。我们进行科学研究的目的，不仅是为了得到某种定性结果，而更重要的是得到定量的结果，为此就必须使用一定的测试仪器对未知量进行测量，以得到其准确数值。但实际上，就是采用最可靠的测试方法、精密的仪器、精细地进行操作，所测得的数值也不可能和真实数值完全一致。即使是同一个人，用

同一种方法对同一个项目进行数次测定，所得结果也往往并不完全一致。不管主观愿望如何，不论在测量时如何努力，在测试过程中误差总是存在的，这就是误差的必然性原理。但是，如果掌握了产生误差的基本规律，检查产生误差的原因，采取有效措施，就可以减小误差，使所测结果尽可能地反映被测量的真实数值，这就是我们研究误差问题的目的所在。

为了解产生误差的基本规律，有必要建立起准确度和精密度的概念。

(一) 准确度

准确度是指测定结果与真实数值的符合程度，通常用误差的大小来表示。测定结果与真实数值之差叫绝对误差，即

$$\text{绝对误差} = \text{测定数值} - \text{真实数值}$$

绝对误差可正可负。它只显示出误差绝对值的大小，而不能清楚地反映出误差在测定结果中所占比例，所以一般不用绝对误差而用相对误差表示测定结果的准确度。相对误差等于绝对误差与真实数值之比乘以100%，即：

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真实数值}} \times 100\%$$

例如，用天平称得某物质的质量为 2.1750 克，该物质的真实质量为 2.1751 克；又称得另一物质的质量为 0.2175 克，而它的真实质量为 0.2176 克。这两个物质的质量相差 10 倍，它们的绝对误差都为：

$$2.1750 - 2.1751 = -0.0001(\text{g})$$

$$0.2175 - 0.2176 = -0.0001(\text{g})$$

但它们的相对误差就不同了，分别为：

$$\frac{-0.0001}{2.1751} \times 100\% = -0.005\%$$

$$\frac{-0.0001}{0.2176} \times 100\% = -0.05\%$$

可见，相对误差能比较出它们准确度的不同。显然，在测定的精度一定的条件下，被测定对象的有关数值越大，则相对误差越小，测定的准确度就越高。

应当注意，任何测试方法都是由几个环节组成的，在测试过程中每一环节的准确度都必须符合该测试方法所要求的准确度。如用比重瓶液相置换法测定某粉尘试样的真密度，要求达到1%的准确度，则称重和测量浸液密度的准确度都不得低于1%。

(二) 精密度

精密度是指对同一未知量进行多次重复测定时，所得结果彼此间相符合的程度，亦即测定结果的重现性。在实际工作中，未知量的真实数值是不知道的，测定时总是在相同的条件下用同一方法对未知量进行平行的数次测定，求出它们的算术平均值，而把该平均值当做最合理的数值。各次测得的数值与其算术平均值之间相符合的程度就是测定的精密度，通常用偏差表示。偏差是各个测定结果与算术平均值之差。偏差也有正负，同样分绝对偏差与相对偏差，而用相对偏差的数值表示精密度的高低。

绝对偏差 = 测得数值 - 算术平均值

$$\text{相对偏差} = \frac{\text{绝对偏差}}{\text{算术平均值}} \times 100\%$$

在一般测试中，通常是在相同条件下至少做两次平行测定，根据两次测定结果即可算出精密度。例如对烟气流速的测定，两次平行测定的结果分别为27.4 m/s 和27.6 m/s，平均值为27.5 m/s，则精密度计算如下：

$$\text{第一次: } \frac{27.4 - 27.5}{27.5} \times 100\% = -0.4\%$$

$$\text{第二次: } \frac{27.6 - 27.5}{27.5} \times 100\% = 0.4\%$$

准确度与精密度的区别，可以用下图 0-0-1 来说明。图中的靶心表示未知量的真值。图 0-0-1(a) 中，测定结果间彼此符合

程度较好，即精密度高，但所有结果均偏离靶心，即准确度低；图 0-0-1 (b) 中，测定结果散布在靶心周围，即准确度较好，但它们相互间很分散，即精密度低；图 0-0-1 (c) 中，测定结果既散布在靶心周围且它们相互间又很接近，所以是既准确又精密，这样的结果正是我们所希望的。

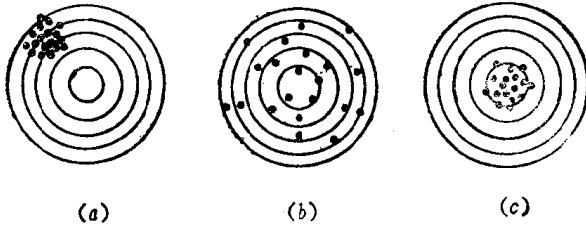


图0-0-1 准确度与精密度的区别

实际上，靶心所代表的真实数值是不知道的，正是需要我们去测定的。为了保证测定结果的可靠性，还应该了解准确度与精密度的联系。精密度高，准确度不一定高，但若要求准确度高，则精密度首先要高。因为如果测定结果很分散，则可靠性就要降低，也就难以保证其准确性。初学者往往只满足于实验数据的重现性，而忽略精密的测试结果是否准确，对于这一点，在实际工作中应予以充分的注意。

(三) 误差的种类及消除方法

误差根据其性质可分为系统误差和偶然误差两类。

1. 系统误差

系统误差又称可测误差，它是由测试过程中的某些经常原因造成的，在重复测试时，它会重复出现。它对测试结果的影响比较固定，在各次测试中误差的正负号相同，数值接近，造成的原因主要有：

(1) 方法误差：由于测试方法本身不够完善而带来的误差。如测试烟气含尘浓度时，因采样嘴口径不合适造成的误差。

(2) 仪器误差：由于仪器不够准确造成的误差。如天平砝码未经校正引起的称量误差。

(3) 试样误差：如测定粉尘分散度时，由于粉尘试样代表性不好而造成的误差。

(4) 环境误差：如测定时的实际温度对标准温度有偏差、测定过程中温度、湿度、气压等按一定规律变化。

(5) 主观误差：由于操作不正确引起的误差。如实验者的某些固有习惯导致的在读数时产生具有某一固定倾向的误差。

从造成系统误差的原因和特点来看，此种误差是可以采取措施加以消除或避免的。如对方法误差，可选用公认的标准方法与某方法进行比较，找出校正系数，然后将某方法测得的结果乘上校正系数，使误差消除。对仪器误差，可事先将仪器进行校正，测定时用校正值进行计算。试样代表性不好时，可以严格按标准的取样方法进行取样。对环境误差，可设法调节实验的环境条件，使之符合标准条件。建立统一的操作规程，严格的操作技术，可消除主观误差。

2. 偶然误差

偶然误差是由一些偶然的原因引起的误差。其符号和大小是不定的，来源往往难于察觉，可能是由于室温、气压、湿度等的变动引起的，也许是由于个人一时的辨别的差异使读数不一致引起的。这类误差难以找出确定的原因，因而常称为不定误差，也称随机误差，它不能用实验的方法加以修正，但可以估计出并减小它对测试结果的影响。

粗看起来，偶然误差似无一定的规律性，但就误差的总体来说，它服从统计规律。当测定次数很多时，可以发现偶然误差的出现表现出严格的规律性：①绝对值相等的正误差和负误差出现的机会相等；②小误差出现的次数多，而大误差出现的次数很少。

根据上述规律，测定次数越多，则测定结果的算术平均值的

偶然误差也就越小。因此，我们可以采用对同一未知量进行多次重复测定，取平均值的方法来减小偶然误差。

从以上叙述可以看出，偶然误差决定了测定的精密度，系统误差决定了测定结果的准确度。偶然误差小，则几次测定的结果都很接近，也就是精密度高。系统误差小，测得值就接近于真实值，也就是准确度高。

除以上两类误差之外，还有因工作粗心大意、不遵守操作规程等而引起的过失误差，如称量时看错了砝码的质量、记录时写错了数据以及计算错误等，这些都属于不应有的过失。过失误差的数值远远大于系统误差和偶然误差，会对测定结果带来严重影响。因此，在实验工作中，必须认真细致，一丝不苟，养成一套严格的实验习惯，尽力避免产生过失误差。

(四) 有效数字及其运算规则

为了得到准确的测试结果，不仅要准确地进行测定，还必须正确地记录数据和计算结果，也就是说要正确处理测量值和计算值的有效数字。

1. 有效数字

有效数字是指数据中所有的准确数字和第一位可疑数字（一般规定其可疑程度为 ± 1 ），它们都是直接由实验中测量到的。实验数据的有效数字位数取决于测量仪器的精密程度。例如，某物体在托盘天平上称重得 5.6 g ，由于托盘天平可称量至 0.1 g ，所以该数据中的数字“6”是估读出来的，该物体的实际质量为 $5.6 \pm 0.1\text{ g}$ ，它的有效数字是2位。如果该物体在电光天平上称重得 5.6155 g ，由于电光天平可称量至 0.0001 g ，所以该数据中的最后一位数“5”是估读出来的，那么该物体的实际质量为 $5.6155 \pm 0.0001\text{ g}$ ，它的有效数字是5位。又如，用温度计测温，其最小刻度为 $1\text{ }^\circ\text{C}$ ，如测得温度为 $32.4\text{ }^\circ\text{C}$ ，则表示“32”是准确的，而“4”是估计出来的，所以该温度实际应为 $32.4 \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ，它的有效数字是三位。

由此可见，有效数字中的最后一位数字已经不是十分准确的，所以称其为可疑数字。因此任何超过或低于测试仪器精密程度的有效数字位数都是不恰当的，例如，上述温度计的读数，既不能记作 32.40°C ，也不能记作 32°C ，因为前者夸大了测量的精度，后者减小了测量的精度。

有效数字的位数不仅表示测量数值的大小，还表示测量的准确程度。例如用分析天平称得某试样的质量为 0.5180 g ，这是四位有效数字，它不仅说明了试样的质量，同时也表明了最后一位数字“0”是可疑的，有 ± 1 的误差。也就是说，该试样的实际质量是在 $0.5180 \pm 0.0001\text{ g}$ 范围内的某一数值。这个称量的绝对误差是 ± 0.0001 ，相对误差为：

$$\frac{\pm 0.0001}{0.5180} \times 100\% = \pm 0.02\%$$

假如将上述称量结果写成 0.518 g ，最后一位“0”没有写上，这就变成三位有效数字了，它表示最后一位“8”是可疑数字，该试样的实际质量就变成是在 0.518 ± 0.001 克范围内的某一数值。这时的绝对误差为 ± 0.001 克，相对误差为：

$$\frac{\pm 0.001}{0.518} \times 100\% = \pm 0.2\%$$

由此可见，有效数字多写一位或少写一位就导致其准确度相差10倍。

下面举例说明有效数字的位数：

数值： 47.00 47.0 47 0.4070 0.0407 0.0047

有效数字位数： 4位 3位 2位 4位 3位 2位

从以上例子可以看出，数字“0”起的作用是不同的，它除用来作有效数字外，也用来定位。“0”如在数字前面，则只起定位作用，表示小数点位置，不是有效数字；“0”如果在数字的中间或末端，则表示一定的数值，是有效数字，不能随意取消。

对于很小的数值和很大的数值，为了清楚地表示出它的测量精度与准确度，可将有效数字写出，并在第一位有效数字后面加上小数点，该数值的数量级用 10 的整数幂来确定，这种数据的记法称为科学记数法。例如，0.000018 可记为 1.8×10^{-5} ，而 18000 可记为 1.8×10^4 。科学记数法的好处是不仅易于辨认一个数值的准确度，而且便于运算。

2. 有效数字的舍入规则

在有效数字的运算中，经常要遇到取舍问题，所以在介绍有效数字的运算规则之前，我们首先介绍一下有效数字的舍入规则。

若确定要保留有效数字的位数为 n ，则 n 位以后的数字的舍入规则如下：

(1) 若 n 位以后的数小于第 n 位的一个单位的一半，则舍去。

如 5.1249，要求保留三位有效数字，应为 5.12。

(2) 若 n 位以后的数大于第 n 位的一个单位的一半，则第 n 位增加一个单位。

如 2.86 与 2.8701，均要求保留二位有效数字，则均为 2.9。

(3) 如 n 位以后的数恰好是第 n 位的一个单位的一半，则舍入规则如下：

① 如第 n 位为偶数，则 n 位以后的数舍去。例如：

21.605，保留四位有效数字，应为 21.60；

33.450，保留三位有效数字，应为 33.4；

0.285，保留二位有效数字，应为 0.28。

② 如第 n 位为奇数，则增加一个单位。例如：

0.0935，保留三位有效数字，应为 0.094；

20.550，保留三位有效数字，应为 20.6；

7.55，保留二位有效数字，应为 7.6；

2.095，保留小数点后二位数字，应为 2.10。

3. 有效数字的运算规则

在计算过程中，有效数字的适当保留很重要，如果计算时运用了或多或少的没有意义的数字，则计算结果就变得不准确。下面主要就加减和乘除两种运算方法进行说明。

(1) 加减运算：几个数据相加减时，其和或差值的有效数字的位数，应依小数点后位数最少的数据为根据。舍去多余位数的数字要遵守前述舍入规则。

例①：将 0.0121、0.225、25.64 及 1.04782 四数相加，由有效数字含义知，四个数中最末一位都是可疑的，其中 25.64，小数点后第二位已不准确了，即从小数点后第二位开始即使与准确的有效数字相加，得出的数字也不会准确，因此，此例加法运算各数值的有效位应以 25.64 为根据，舍去的数字是小数点后三位的数字。相加结果为：

$$\begin{array}{r} 0.01 \\ 0.22 \\ 25.64 \\ +) 1.05 \\ \hline 26.92 \end{array}$$

如果不管各数据的准确度如何，一律相加得出 26.92492，则是不合理的。

例②：将 13.6 减去 2.25，其差值为：

$$\begin{array}{r} 13.6 \\ -) 2.2 \\ \hline 11.4 \end{array}$$

由 13.6 有效数字位数为 3 位，最后一位数 6 即为可疑数，其与 2.25 数字已无准确意义。而应根据前述舍入规则，13.6 与舍去小数点后两位 5 数字的 2.2 相减才为合理。

(2) 乘除运算：乘除运算的舍入规则与加减运算不同，参与加减运算的数值有效位数取决于绝对误差最大的那个数值（上述例①中 25.64 的绝对误差为 ± 0.01 为四个数值的最大值）。

与乘除法运算的数值有效位数取决于相对误差最大的那个数。例如下式

$$\frac{0.0325 \times 5.103 \times 60.06}{139.8} = 0.0713$$

各数的相对误差分别为：

$$\frac{\pm 0.0001}{0.0325} \times 100\% = \pm 0.3\%$$

$$\frac{\pm 0.001}{5.103} \times 100\% = \pm 0.02\%$$

$$\frac{\pm 0.01}{60.06} \times 100\% = \pm 0.02\%$$

$$\frac{\pm 0.1}{139.8} \times 100\% = \pm 0.07\%$$

可见四个数中，相对误差最大即准确度最差的是 0.0325，是三位有效数字，因此计算结果也应取三位有效数字 0.0713。如果用笔算所得的 0.071299 作为乘除的答数就不对了。

此外，乘方相当于乘法，开方是乘方的逆运算，故可按乘除法处理。对有效数字作对数或三角函数运算时，应选用比有效数字多一位的函数表读数，最后结果按舍入规则弃去多余的一位。

三、实验数据的表达方法

我们进行实验以获得测试数据的目的不仅仅是为了得到某一未知量的最可信值及其精密度，更多的则是为了得到两个或更多个变量之间的数量关系。在科学实验中，经常遇到一些变量处于一个统一体中，这些变量间存在密切的相关关系，但其具体的依存关系往往是不知道的，或者只是大致知道。在这种情况下，由一个或多个自变量的数值准确地求出另一个变量（因变量）的数值是做不到的。要得到这些变量之间的数量关系，就必须对所获得的大量实验数据进行适当方式的处理，表达出它们之间的对应关系，以满足我们的要求。在科学实验中常用的数据表达方法有列表法、作图法和公式法三种。这三种方法各有优缺点，对同一