

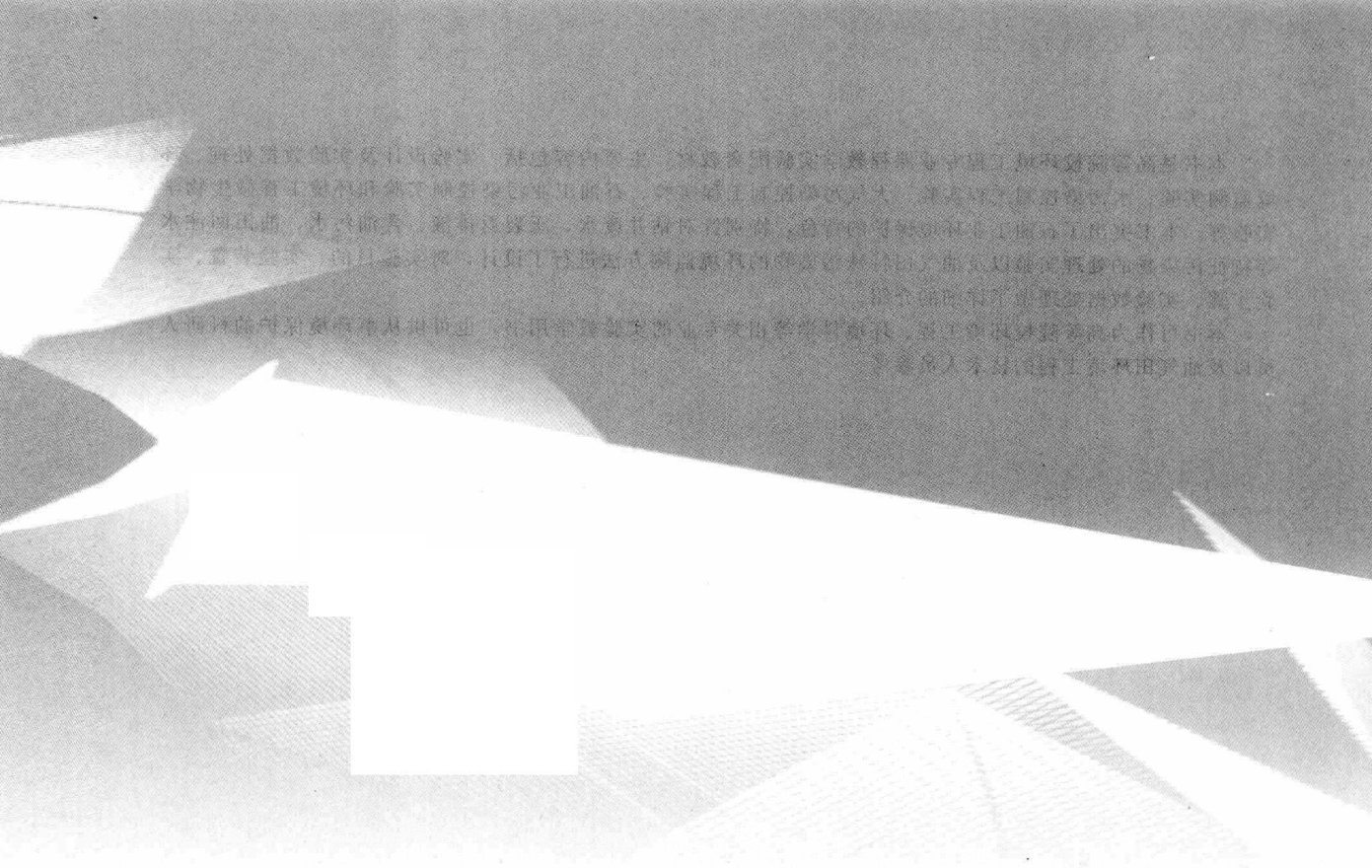
□ 高等学校教材 □

环境工程综合实验教程

◎ 王兵 主编



化学工业出版社



国家精品课程

□ 高等学校教材 □

环境工程综合实验教程

◎ 王兵 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

定价：28.00元

ISBN 7-122-08111-1

本书是高等院校环境工程专业课程教学实验配套教材, 主要包括: 实验设计及实验数据处理、环境监测实验、水污染控制工程实验、大气污染控制工程实验、石油工业污染控制实验和环境工程微生物学实验等。本书突出了石油工业环境保护的特色, 特别针对钻井废水、压裂返排液、含油污水、油田回注水等特征污染物的处理实验以及油气田特殊污染物的环境监测方法进行了设计, 对实验目的、实验装置、实验步骤、实验数据处理做了详细的介绍。

本书可作为高等院校环境工程、环境科学等相关专业的实验教学用书, 也可供从事环境保护的科研人员以及油气田环境工程的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程综合实验教程/王兵主编. —北京: 化学工业出版社, 2011.1
高等学校教材

ISBN 978-7-122-10364-2

I. 环… II. 王… III. 环境工程-实验-高等学校-教材 IV. X5-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 003900 号

责任编辑: 杨 菁 彭喜英 金 杰
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 郑 直
装帧设计: 韩 飞

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 10½ 字数 256 千字 2011 年 2 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

随着经济、社会的不断发展，人类对环境质量的要求日益提高，对高等院校环境工程专业人才培养提出了更高的要求。环境工程实验教学是整个环境工程专业人才培养过程的重要组成部分，对于学生的实践能力培养起着重要作用。

石油天然气的勘探开发过程中产生大量的污染物，如不有效治理将对当地生态环境产生严重的影响，以墨西哥湾漏油事件为代表的污染事件表明，油田特殊污染物的治理和监测技术的开发是确保石油工业可持续发展的关键。

本书的主要内容包括：实验设计及实验数据处理、环境监测实验、水污染控制工程实验、大气污染控制工程实验、石油工业污染控制实验和环境工程微生物学实验等。在编写过程中力求突出石油工业环境保护的特色，特别针对钻井废水、压裂返排液、含油污水、油田回注水等特征污染物的处理实验以及油气田特殊污染物的环境监测方法进行了设计。

书中各章节的编写人员如下：第1章由王兵编写，第2章由王兵、任宏洋编写，第3章由冯英编写，第4章由任宏洋编写，第5章由王兵编写，第6章由冯英编写，第7章由梁宏编写，第8章由吴雁编写。

本书编写过程中参考了一些从事教学、科研、生产工作同行撰写的论文、教材、手册等，在此表示衷心感谢。

限于编者的水平，书中难免存在不足之处，敬请各位读者批评指正。

编 者

2010年10月

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 实验教学的目的和要求	1
1.2 实验研究的基本程序	1
第 2 章 实验设计	3
2.1 实验设计的基本原则	3
2.2 实验方案的制订	4
2.2.1 单因素设计方法	4
2.2.2 多因素实验方案	4
第 3 章 误差与实验数据处理	7
3.1 误差的基本概念	7
3.1.1 准确度和误差	7
3.1.2 精密度和偏差	7
3.1.3 产生误差的原因	8
3.2 实验数据的处理	8
3.2.1 真值与平均值	9
3.2.2 精密度的表示法	9
3.2.3 有效数字	10
3.2.4 可疑测量值的取舍	11
3.2.5 实验数据的表示方法	11
第 4 章 环境监测实验	13
4.1 环境监测方案的制定	13
4.1.1 水环境监测方案的制定	13
4.1.2 空气污染监测方案的制定	15
4.1.3 噪声监测	17
4.2 实验项目	18
4.2.1 常规环境监测实验	18
实验一 废水悬浮固体的测定	18
实验二 重铬酸钾法测定化学需氧量	20
实验三 五日生化需氧量的测定	22
实验四 水中石油类物质的测定	25
实验五 水中六价铬的测定	27
实验六 挥发酚类的测定	28
实验七 大气中总悬浮颗粒物的测定	31

实验八 大气中二氧化硫的测定	32
实验九 大气中氮氧化物的测定	34
实验十 环境噪声监测	36
4.2.2 油田特殊污染物监测	38
实验十一 油田回注水中颗粒物粒径测试	38
实验十二 油气田采出水中硫化物的测定(亚甲基蓝比色法)	39
实验十三 油田回注水腐蚀速率监测	41
实验十四 空气中石油烃的监测	46
实验十五 油田土壤中石油类的监测	49
实验十六 井场柴油机的噪声监测	51
第5章 水污染控制工程实验	53
5.1 水样的采集与保存	53
5.2 实验项目	54
实验一 混凝实验	54
实验二 自由沉淀实验	58
实验三 絮凝沉淀实验	61
实验四 过滤实验	63
实验五 压力溶气浮上法实验	66
实验六 活性污泥评价指标实验	70
实验七 污水可生化性实验	72
实验八 曝气设备氧的总转移系数的测定	75
实验九 生物滤池处理效率系数的确定	78
实验十 臭氧氧化实验	81
实验十一 活性炭吸附实验	83
第6章 石油工业污染控制实验	86
6.1 石油天然气开发过程中的污染源极其污染特征	86
6.1.1 油气勘探的主要污染源	86
6.1.2 油气钻井的主要污染源	86
6.1.3 油气开采主要污染源	87
6.1.4 油气储运主要污染源	88
6.1.5 天然气脱硫的污染源	88
6.2 实验项目	88
实验一 钻井废水污染特征评价及处理	88
实验二 压裂返排废液污染特征评价及处理	90
实验三 含油污水处理综合实验	93
第7章 大气污染控制工程实验	98
7.1 样品的采集与保存	98
7.1.1 样品的采集	98
7.1.2 样品保存	101
7.2 实验项目	102

实验一	旋风除尘器性能测定	102
实验二	袋式除尘器性能测定	108
实验三	电除尘器伏安特性测定	111
实验四	碱液吸收气体中的二氧化硫	114
实验五	活性炭吸附气体中的二氧化硫	118
实验六	催化转化法去除汽车尾气中的氮氧化物	120
实验七	油烟净化器性能测定	122
实验八	室内空气污染监测	124
第 8 章	环境工程微生物学实验	133
8.1	环境工程微生物实验的目的和要求	133
8.2	实验项目	134
实验一	显微镜的使用	134
实验二	微生物的染色及其微生物形态观察	136
实验三	培养基的制备及灭菌	139
实验四	微生物的分离与纯化	144
实验五	微生物细胞大小测定和计数	146
实验六	环境因素对微生物的影响	151
实验七	空气中微生物的检测	153
实验八	水中细菌总数和大肠菌群的检测	156
参考文献		160

第1章 导 论

1.1 实验教学的目的和要求

实验教学作为整个教学过程的重要组成部分,对于学生的实践能力培养起着重要作用,实验教学是培养学生掌握科学实验方法与技能,提高科学素质、动手能力与创新能力的重要手段,是高等学校的重要教学环节,在再创新人才培养中有着特殊的不可替代的作用。

环境工程是一门新兴的边缘学科,也是一门综合性较强的学科。随着社会对环境保护和污染治理要求的提高,对高校环境工程专业培养人才的目标提出了更高的要求,为培养出适应社会发展的新型人才,应进一步加强实验教学改革,以培养学生的动手能力为基础,逐步提高学生独立发现问题、分析问题和解决问题的能力,训练其运用理论知识去进行分析、设计和开发的实践技能,适应工程教育的要求。

1.2 实验研究的基本程序

一般情况下,实验研究分为四个阶段,即研究项目选择、实验设计、实验工作、总结工作。

(1) 研究项目选择 在研究项目的选择中,首先根据国内外的科学发展趋势凝练出一个研究方向,进行相关文献的收集、阅读、分析,了解本研究的国内外研究现状,在对本领域的研究内容进行深入分析后,确定本研究的方向。

(2) 实验设计 实验设计的目的是确定一个科学合理的实施计划,使整个研究工作有目的、有步骤地进行,最大限度地降低研究误差。

(3) 实验工作 按照研究计划(方案)所规定的对象、内容、时间、手段、方法和程序等,展开科学研究工作,以获得研究者所希望结果的过程。

① 实验准备。按照实验方案做好相应的准备,包括文献复习和理论准备、仪器设备、材料准备、人员准备等。

② 预实验。在正式实验之前,一般要先进行预实验,从而为正式实验确定可行的实验方法和步骤。

③ 正式实验。正式实施实验,在实验过程中要依据实验的变化及时调整实验计划。

④ 数据资料积累。记录保存实验数据。

(4) 总结工作 整理验证假说所需要的资料和数据,通过分析、综合、归纳、演绎等思



维过程，使假说（论点）和资料（论据）按照逻辑规律结合起来，完成具体论证过程，假说成为结论，最终提出论文的工作总结。

- ① 数据资料处理。整理归纳分类实验数据。
- ② 统计分析。对实验数据进行统计学分析。
- ③ 提出结论。撰写论文报告。

小环境或小组内使非处理因素尽量一致。每个比较一致的小环境或小组，称为单位组（或区组）。因为单位组之间的差异可在方差分析时从实验误差中分离出来，所以局部控制原则能较好地降低实验误差。

以上所述重复、随机化、局部控制三个基本原则称为费雪（R. A. Fisher）三原则，是实验设计中必须遵循的原则，再采用相应的统计分析方法，就能够最大程度地降低并无偏估计实验误差，无偏估计处理的效应，从而对于各处理间的比较做出可靠的结论。

2.2 实验方案的制订

实验方案是指根据实验目的与要求而拟定的进行比较的一组实验处理的总称，是整个实验工作的核心部分，实验方案按供试因素的多少可区分为单因素实验方案、多因素实验方案。

2.2.1 单因素设计方法

单因素实验（single-factor experiment）是指整个实验中只比较一个实验因素的不同水平的实验。单因素实验方案由该实验因素的所有水平构成。单因素实验方案是最基本、最简单的实验方案。

单因素优化实验设计包括均分法、对分法、黄金分割法等多种方法，统称为优选法。

（1）均分法 均分法是在因素水平的实验范围 $[a, b]$ 内按等间隔安排实验点。在对目标函数没有先验认识的场合下，均分法可以作为了解目标函数的前期工作，确定有效的实验范围。

（2）对分法 对分法也称为等分法、平分法，是一种有广泛应用的方法，常用于特定的实验条件的优化过程，在实验范围 $[a, b]$ 内每次将搜索范围缩小一半，是一种高效的单因素实验设计方法，7次实验就可以把目标范围锁定在实验范围的1%之内；10次实验就可以把目标范围锁定在实验范围的0.1%之内。它不是整体设计，需要在每一次实验后确定下一次实验位置，属于序贯实验。

（3）黄金分割法 黄金分割法的思想是每次在实验范围内选取两个对称点做实验，这两个对称点的位置直接决定实验的效率。理论证明这两个点分别位于实验范围 $[a, b]$ 的0.382和0.618处是最优的选取方法。这两个点分别记为 X_1 和 X_2 ，则 $X_1 = a + 0.382(b - a)$ ， $X_2 = a + 0.618(b - a)$ 。对应的实验指标值记为 Y_1 和 Y_2 。如果 Y_1 比 Y_2 好，则 X_1 是好点，把实验范围 $[X_2, b]$ 划去，保留的新的实验范围是 $[a, X_1]$ ；如果 Y_2 比 Y_1 好，则 X_2 是好点，把实验范围 $[a, X_1]$ 划去，保留的新实验范围是 $[X_2, b]$ 。不论保留的实验范围是 $[a, X_1]$ 还是 $[X_2, b]$ ，不妨统一记为 $[a_1, b_1]$ 。对这新的实验范围 $[a_1, b_1]$ 重新使用以上黄金分割过程，得到新的实验范围 $[a_2, b_2]$ ， $[a_3, b_3]$ ， $\dots$ ，逐步做下去，直到找到满意的、符合要求的实验结果。

2.2.2 多因素实验方案

多因素实验（multiple-factor or factorial experiment）是指在同一实验中同时研究两个或两个以上实验因素的实验。在生产过程中影响实验指标的因素通常是很多的，首先需要从众多的影响因素中挑选出少数几个主要的影响因素，多因素实验方案由该实验的所有实验因

素的水平组合（即处理）构成。

（1）选择实验方案的原则

① 实验因素的数目要适中。实验因素不宜选得太多。如果实验因素选得太多（例如超过10个），这样不仅需要做较多的实验，而且会造成主次不分。如果仅从专业知识不能确定少数几个影响因素，就要借助筛选实验来完成这项工作。实验因素也不宜选得太少。若实验因素选得太少（例如只选定一两个因素），可能会遗漏重要的因素，使实验的结果达不到预期的目的。

② 实验因素的水平范围应当尽可能大一些。如果实验在实验室中进行，实验范围尽可能大的要求比较容易实现；如果实验直接在现场进行，则实验范围不宜太大，以防实验性生产产生过多次品，或发生危险。因素的水平数要尽量多一些。如果实验范围允许大一些，则每一个因素的水平数要尽量多一些。

③ 在实验设计中实验指标要使用计量的测度，不要使用合格或不合格这样的属性测度，更不要将计量的测度转化为不合格品率，这样会丧失数据中的有用信息，甚至产生误导。

（2）因素轮换法 因素轮换法也称为单因素轮换法，是解决多因素实验问题的一种非全面实验方法，是在实际工作中被工程技术人员所普遍采用的一种方法。这种方法的思路是：每次实验中只变化一个因素的水平，其他因素的水平保持固定不变，希望逐一地把每个因素对实验指标的影响摸清，分别找到每个因素的最优水平，最终找到全部因素的最优实验方案。

实际上这个想法是有缺陷的，它只适合于因素间没有交互作用的情况。当因素间存在交互作用时，每次变动一个因素的做法不能反映因素间交互作用的效果，实验的结果受起始点影响。如果起始点选得不好，就可能得不到好的实验结果，对这样的实验数据也难以做深入的统计分析，是一种低效的实验设计方法。

（3）完全方案 在列出因素水平组合（处理）时，要求每一个因素的每个水平都要碰见一次，这时，水平组合数等于各个因素水平数的乘积。根据完全实验方案进行的实验称为全面实验。全面实验既能考察实验因素对实验指标的影响，也能考察因素间的交互作用，并能选出最优水平组合，从而能充分揭示事物的内部规律。多因素全面实验的效率高于多个单因素实验的效率。全面实验的主要不足是，当因素个数和水平数较多时，水平组合数太多，以至于在实验时，人力、物力、财力、场地等都难以承受，实验误差也不易控制。因而全面实验宜在因素个数和水平数都较少时应用。

（4）不完全方案 这也是一种多因素实验方案，但与上述多因素实验完全方案不同。它是将实验因素的某些水平组合在一起形成少数几个水平组合。这种实验方案的目的在于探讨实验因素中某些水平组合的综合作用，而不在于考察实验因素对实验指标的影响和交互作用。这种在全部水平组合中挑选部分水平组合获得的方案称为不完全方案。

正交实验是常见的多因素分析方法。正交表是根据组合理论，按照一定规律构造的表格，它在实验设计中有广泛的应用。以正交表为工具安排实验方案和进行结果分析的实验称为正交实验。它适用于多因素、多指标（试验需要考察的结果）、多因素间存在交互作用（因素之间联合起作用）、具有随机误差的实验。通过正交实验，可以分析各因素及其交互作用对实验指标的影响，按其重要程度找出主次关系，并确定对实验指标的最优工艺条件。在正交实验中要求每个所考虑的因素都是可控的。在整个实验中每个因素所取值的个数称为该因素的水平。

正交表的符号为 $L_a(b^c)$ ，其中 L 表示正交表；下标 a 是正交表的行数，表示实验次数； c 是正交表的列数，表示实验至多可以安排的因素个数； b 是表中不同数字的个数，表示每个因素的水平数。例如 $L_8(2^7)$ ，8 表示正交表中有 8 行，即安排实验的次数为 8 次；7 表示正交表中有 7 列，实验至多可安排 7 个因素（包括交互作用的因素）；2 表示每个因素只有两个水平。这种正交表称为 2 水平型的正交表，见表 2-1。

表 2-1 2 水平型的正交表 $[L_8(2^7)]$

水平 实验号 \ 列号	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

一般情况下，正交表的设计可遵循以下几个步骤

- ① 确定实验中变化因素的个数及每个因素变化的水平。
- ② 根据专业知识或经验，初步分析各因素之间的交互作用，确定哪些是必须考虑的，哪些是暂时可以忽略的。
- ③ 根据实验的人力、设备、时间及费用，确定可能进行的大概实验次数。
- ④ 选用合适的正交表，安排实验。

一个周密、完善的实验方案，不仅可以节省人力、物力，多快好省地完成实验任务，而且可以获得正确的实验结论。如果方案拟定不合理，如因素、水平选择不当，部分实验方案所包含的水平组合针对性或代表性差，实验将得不出应有的结果，甚至导致实验的失败。因此，实验方案的拟定在整个实验中占着极其重要的位置。

测量的真实值很难准确知道，于是用多次重复测量结果的平均值代替真实值。这样单次测定的结果与平均值之间的偏离程度称为偏差。偏差与误差一样，也有绝对偏差和相对偏差。

绝对偏差 = 单位测定值 - 平均值

相对偏差 = 绝对偏差 / 平均值

从相对偏差的大小可以反映出测量结果再现性的好坏，即测量的精密度。相对偏差小，即可视为再现性好，即精密度高。

3.1.3 产生误差的原因

产生误差的原因很多。根据误差的性质及发生的原因，一般可分为系统误差、偶然误差、过失误差等。

(1) 系统误差 由于测定过程中某些经常性的原因所造成的误差称为系统误差，它对分析结果的影响比较恒定。在做多次重复测量时，由于这些固定因素的影响，使结果总是偏高或偏低。这些固定因素主要来源有以下几个方面：①由于分析测定的方法不够完善而引入的误差；②所用的仪器本身缺陷造成的误差，如量具刻度不准，砝码未校正等；③试剂不纯引起的误差，如试剂不纯或器皿质量不高，引入了微量的待测组分或对测定有干扰的杂质而造成的误差；④个人生理特点引起的误差，如人对颜色变化不敏感造成的误差。

系统误差可以用改善实验方法、在实验前校正仪器、检查试剂纯度、提纯药品或在实验中同时进行空白实验等措施来减少。有时也可以在找出误差原因后，算出误差的大小而加以修正。

(2) 偶然误差 在多次重复测定中，即使操作者技术再高，工作再细致，每次测定的数据也不可能完全一致。而是有时稍偏高些，有时稍偏低些。这种误差产生的原因常常难以察觉，例如有时可能由于温度、气压、偶然波动引起，也有可能在读数时个人一时辨别差异使读数不一致等。这种误差是由于偶然因素引起的，在实验操作中不能完全避免。

偶然误差的大小可由精密度表现出来。测定结果的精密度越高，偶然误差越小；反之，精密度越差，测定的偶然误差越大。通常可采用“多次测定，取平均值”的方法来减小偶然误差。

(3) 过失误差 除了上述两类误差外，还有由于工作粗枝大叶、不遵守操作规程等原因而造成测量的数据有很大的误差。这些属于不应有的过失，但会对分析结果带来严重影响，必须注意避免。为此，必须严格遵守操作规程，一丝不苟，耐心细致地进行实验，在学习过程中养成良好的实验习惯。如果确知由于过失差错而引起的误差，则在计算平均值时应去除该次测量的数据。

3.2 实验数据的处理

实验数据处理时，一般都需要在校正系统误差和剔除错误的测定结果后，计算出结果可能达到的准确范围，即应算出分析结果中包含的偶然误差。首先要把数据加以整理，剔除由于明显、充分的原因而与其他测定结果相差甚远的数据，对于那些精密度似乎不甚高的可疑数据，则应按照处理规则决定取舍。然后计算出剩下数据的平均值，以及各数据对平均值的偏差和平均偏差。再从平均偏差算出平均值与真实数值的差距，以求出真实数值可能存在的范围。

3.2.1 真值与平均值

实验过程中做各种测试工作, 由于受到仪器、实验方法、环境、人为因素等方面的限制, 不可能测得真实值。如果对同一考察项目进行无限多次的测试, 然后根据误差分布定律中正负误差出现概率相等的原则, 可以求出测试值的平均值, 在无系统误差的情况下此值接近于真实值。但通常实验的次数是有限的, 用有限次数求得平均值是真实值的近似值。

常用的平均值有: 算术平均值、均方根平均值、加权平均值、中位值、几何平均值。计算平均值方法的选择, 主要取决于一组观测值的分布类型。

(1) 算术平均值 算术平均值是最常用的一种平均值, 当观测值呈正态分布时, 算术平均值最近似真实值。设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各次的测量值, n 代表测量次数, 则算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(2) 均方根平均值 均方根平均值为:

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

(3) 加权平均值 若对同一事物用不同方法去测定, 或者由不同的人去测定, 计算平均值时, 常用加权平均值。

$$\bar{x} = \frac{\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

式中 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ——与各测量值相应的权。

(4) 中位值 中位值是指一组测量值按大小顺序排列的中间值。若测量次数是偶数, 则中位值是中间两个值的平均值。中位值最大的优点是求法简单, 只有当测量值的分布呈正态分布时, 中位值才能代表一组测量值的中心趋向, 近似于真实值。

(5) 几何平均值 如果一组测量值是非正态分布, 当这组数据取对数后, 所得图形的分布曲线更对称时, 常用几何平均值。几何平均值是一组 n 个测量值连乘并开 n 次方求得的值:

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}$$

也可用对数表示:

$$\lg \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i$$

3.2.2 精密度的表示法

若在某条件下进行多次测试, 其误差为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, 因为单个误差可大可小, 可正可负, 无法表示该条件下测试精密度, 因此常采用极差、算术平均偏差、标准偏差等来表示精密度的高低。

(1) 极差 极差是指一组测量值中的最大值与最小值之差, 是用以描述实验数据分散程度的一组特征参数。计算式为:

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

极差的缺点是只与两极端值有关，而与测量次数无关，用它反映精密度的高低比较粗糙。但其计算简便，在快速检验中可以用以度量数据波动的大小。

(2) 算术平均偏差 算术平均偏差是测量值与平均值之差的绝对值的算术平均值，用下式表示：

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

式中 δ ——算术平均偏差；

x_i ——测量值；

$\bar{x}$ ——全部测量值的平均值；

n ——测量次数。

算术平均偏差的缺点是无法表示出各次测试间彼此符合的情况。因为，在一组测试中偏差比较接近的情况下，与另一组测试中偏差有大、中、小三种情况下，所得的算术平均偏差可能完全相等。

(3) 标准偏差（均方根偏差） 为各测量值与平均值之差的平方和的算术平均值的平方根：

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

在有限测量次数中，标准偏差常用下式表示：

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

当测量值越接近平均值时，标准偏差越小；当测量值和平均值相差越大时，标准偏差越大，即标准偏差对测试中的较大误差或较小误差比较灵敏，它是表示精密度的较好方法，是表明实验数据分散程度的特征参数。

3.2.3 有效数字

实验中，为了得到准确的分析结果，不仅要准确地测量、记录，而且还要正确地计算。因此，表示测定结果数字的位数应当恰当。位数多少常用“有效数字”表示。有效数字就是指准确测定的数值加上最后一位估读数所得的数字。实验中测量值的有效数字与仪器仪表的刻度有关，一般可根据实际可能估计到 1/10、1/5、1/2。

在整理数据时，常要运算一些精密度不相同的数值，此时要按照一定的计算规则，合理地取舍各数据的有效数字位数。一些常用的运算规则如下：

- ① 记录测量值时，只保留一位可疑数，其余一律舍去。
- ② 几个数据相加或相减时，它们的和或差的有效数字的保留，应以小数点后位数最少的数据为根据。
- ③ 乘除法运算中有效数字的位数取决于相对误差最大的那个数。
- ④ 计算有效数字的位数时，若首位有效数字是 8 或 9，则有效数字位数要多计 1 位。

⑤ 在计算过程中,可以暂时多保留一位数字,得到最后结果时,再根据四舍五入原则弃去多余的数字。但当尾数为5时,则看保留下来的末位数是奇数还是偶数,是奇数就将5进位,是偶数就将5舍去。

3.2.4 可疑测量值的取舍

在实际工作中,作平行测定时,有时会发现个别测量值与其他测量值相差很大,通常称为可疑值。如果保留这样的数据,会影响平均值的可靠性。但也不可以为了单纯追求实验结果的“一致性”,而把这些数据随便舍弃。处理这类可疑数据的方法较多,此处仅介绍 Q 值检验法。

当测定次数 $n=3\sim 10$ 时,根据所要求的置信度(如取90%)按照下列步骤,检验可疑数据是否可以弃去。

① 将各数据按递增的顺序排列: $x_1, x_2, \dots, x_n$;

② 求出最大与最小值之差 $x_{\max} - x_{\min}$;

③ 求出可疑数据与其临近数据之间的差 $x_n - x_{n-1}$;

④ 求出 $Q = (x_n - x_{n-1}) / (x_{\max} - x_{\min})$;

⑤ 根据测定次数 n 和要求的置信度查表3-1得出 Q_{090} ,将 Q 和 Q_{090} 相比,若 $Q > Q_{090}$ 则弃去可疑值,否则予以保留。

表 3-1 不同置信度下舍弃可疑数据的 Q 值表

测定次数 n	置 信 度		
	90% (Q_{090})	95% (Q_{095})	99% (Q_{099})
3	0.94	0.98	0.99
4	0.76	0.85	0.93
5	0.64	0.73	0.82
6	0.56	0.64	0.74
7	0.51	0.59	0.68
8	0.47	0.54	0.63
9	0.44	0.51	0.60
10	0.41	0.48	0.57

3.2.5 实验数据的表示方法

在对实验数据进行误差分析整理去除错误数据后,还可通过数据处理,将实验所提供的数据归纳整理,用图形、表格或经验公式加以表示,以找出影响研究事物的各因素之间互相影响的规律,为得到正确的结论提供可靠的信息。

常用的实验数据表示方法有列表表示法、图形表示法和方程表示法三种,表示方法的选择主要依据经验。

(1) 列表表示法 是将一组实验数据中的自变量、因变量的各个数值依一定的形式和顺序一一对应列出来,借以反映各变量之间的关系。完整的表格应包括表的序号、表题、表内项目的名称和单位、说明,以及数据来源等。

实验测得的数据,其自变量和因变量的变化有时是不规则的,使用起来不方便。此时可以通过数据的分度,使表中所列数据有规则地排列,即当自变量作等间距顺序变化时,因变量也随着顺序变化,这样的表格查阅较方便。数据分度的方法有多种,较为简单的方法是先

用原始数据画图，作出一条光滑曲线，然后在曲线上一一读出所需数据，并列表。

(2) 图形表示法 图形表示法的优点在于形式简明直观，便于比较，易显出数据中的最高点或最低点、转折点、周期性以及其他奇异性等。当图形作得足够准确时，可以不必知道变量间的数学关系，对变量进行运算后得到需要的结果。

图形表示法用于两种场合：①已知变量间的依赖关系图形，通过实验，将取得数据作图，然后求出响应的一些参数；②两个变量之间的关系不清，将实验数据点绘于坐标纸上，用于分析变量间的关系和规律。

(3) 方程表示法 实验数据用列表或图形表示后，使用时虽然直观简便，但不便于理论分析研究，故常需用数值表达式来反映自变量与因变量的关系。

方程表示法通常包括下面两个步骤。

第一步：选择经验公式。表示一组实验数据的经验公式应该是形式简单，式中系数不应太多。通常是先将实验数据在坐标纸上描点，再根据经验和几何知识推测经验公式的形式。若经验证明此形式不够理想时，则应立新式，再进行实验，直到得到满意的结果为止。表达式中容易直接用实验验证的是直线方程，因此，应尽量使所得函数形式呈直线式，若不是直线式，可以通过变量变换，使所得图形改为直线。

第二步：确定经验公式的系数。确定经验公式系数的方法有多种，直线图解法和回归分析中的一元线性回归、一元非线性回归，以及回归线的相关系数与精度等，都可以依据所掌握的数学知识获得。