



高等学校教材

水污染控制工程 实验

陈泽堂 主编 ●



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

水污染控制工程实验

陈泽堂 主编

化学工业出版社

教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水污染控制工程实验/陈泽堂主编. —北京: 化学工业出版社, 2003.3
高等学校教材
ISBN 7-5025-4281-7

I. 水… II. 陈… III. 水污染-污染控制-实验-高等学校-教材 IV. X52-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 010328 号

**高等学校教材
水污染控制工程实验**

陈泽堂 主编
责任编辑: 王文峡
文字编辑: 杨欣欣
责任校对: 蒋 宇
封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 12 字数 296 千字

2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4281-7/G · 1146

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

“水污染控制工程实验”是环境工程专业和给水排水工程专业必修课程，是水污染控制工程教学的重要组成部分。本书是高等工科院校环境工程专业“水污染控制工程”课程的配套教材。

本书内容包括：实验设计、误差与实验数据的处理、水样的采取与保存、水污染控制工程实验内容必开与选开的 18 个实验项目和附录。

本书在编排上由浅入深、由繁到简，实验项目具有科学性、准确性和实用性。本书为高等学校环境工程专业教材，同时可供相关工程技术人员参考。

前 言

“水污染控制工程实验”是高等学校环境工程专业和给水排水工程专业必修课程，是水污染控制工程教学的重要组成部分。本教材可以加深学生对水污染控制工程基本原理的理解；培养学生设计和组织水污染工程实验方案的初步能力，培养学生进行水污染控制工程实验的一般技能及使用实验仪器、设备的基本能力，培养学生分析实验数据与处理数据的基本能力。

本书是高等工科院校环境工程专业“水污染控制工程”课程的配套教材，是根据环境工程教材编审委员会制定的“水污染控制工程实验教学基本要求”编写的。

本书内容包括：1. 实验设计；2. 误差与实验数据的处理；3. 水样的采取与保存；4. 水污染控制工程实验内容的必开与选开的 18 个实验项目；5. 附录 21 项。本书主要面向高等院校教学，同时也面向生产和科学研究，可供选用。本书在编排上尽量做到由浅入深、由繁到简，在实验项目上具有完整性、实用性、独立性、正确性和科学性。

本书的前言、绪论、第一章、第二章、第三章，实验一、六、八、十一、十六、十八和附录由陈泽堂副教授编写；实验四、十、十三、十四、十五、十七由王光辉讲师编写；实验二、三、五、七、九、十二由韦红刚讲师编写；王学刚老师参与了实验二、三、五、七、九、十二、附录的编排与文字修改工作。全书由陈泽堂副教授和王学刚老师负责统稿，由陈泽堂副教授主编，由南昌大学李鸣教授和陈国树教授主审。此外，本书在编写过程中得到了环境工程教研室其他几位老师的帮助和支持，在此表示衷心感谢。

本书由东华理工学院教材基金及江西省“十五”重点建设学科“地质工程”建设基金资助。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2002 年 12 月

目 录

绪论	1
一、实验教学目的	1
二、实验教学程序	1
三、实验教学要求	2
第一章 实验设计	3
一、实验设计简介	3
二、单因素实验设计	5
三、双因素实验设计	7
四、正交实验设计	8
五、正交实验分析举例	12
第二章 误差与实验数据处理	17
一、误差的基本概念	17
二、实验数据处理	23
第三章 水样的采集与保存	32
一、一般要求	32
二、采样的形式	32
三、水样的保存	33
第四章 水污染控制工程实验	34
实验一 混凝沉淀实验	34
实验二 颗粒自由沉淀实验	36
实验三 絮凝沉淀实验	40
实验四 成层沉淀实验	44
实验五 过滤实验	49
一、滤料筛分及孔隙率测定实验	49
二、过滤实验	52
三、滤池冲洗实验	55
实验六 曝气设备充氧能力的测定实验	59
实验七 气浮实验	63
一、气固比实验	64
二、释气量实验	66
实验八 活性污泥性质的测定实验	67
实验九 反渗透实验	69
实验十 活性炭吸附实验	71
实验十一 臭氧消毒实验	75

实验十二	折点加氯消毒实验	78
实验十三	废水可生化性实验	82
实验十四	活性污泥动力学参数的测定实验	89
实验十五	生物转盘实验	92
实验十六	离子交换软化实验	93
一、强酸性阳离子交换树脂交换容量的测定		93
二、软化实验		95
实验十七	污泥过滤脱水——污泥比阻的测定实验	97
实验十八	自来水的深度处理实验	101
附录		105
1. 计量单位		105
2. 重要元素相对原子质量表		108
3. 几种酸及氨水的近似相对密度和浓度		109
4. 常用正交实验表		110
5. 离群数据分析判断表		116
6. F 分布表		118
7. 相关系数检验表		120
8. 水中饱和溶解氧量		120
9. 氧在蒸馏水中的溶解度 (饱和度)		121
10. 含盐量与水电阻率计算图		121
11. 样品的保存与数据记录		122
11.1 常用样品保存技术 (据 GB 12999—1991)		122
11.2 采样现场数据记录 (据 GB 12999—1991)		127
11.3 管理程序记录卡片 (据 GB 12999—1991)		128
12. 样品保存的一般技术 (据 ISO/DIS 5667/3, 1983)		128
13. 水质监测实验室质量控制指标——水样测定值的精密度和准确度允许差		135
14. 地面水环境质量		139
14.1 地面水环境质量标准 (据 GB 1—1999)		139
14.2 地面水环境质量标准选配分析方法 (据 GB 1—1999)		141
15. 海水质量标准		142
15.1 海水水质要求 (据 GB 3097—1982)		142
15.2 海水中有毒物质最高容许浓度 (据 GB 3097—1982)		143
16. 渔业水域水质标准 (据 TJ 35—1979)		143
17. 农田灌溉水质标准 (据 GB 5084—1985)		144
18. 污水排放综合标准及测定方法		145
18.1 第一类污染物最高允许排放浓度 (据 GB 8978—1996)		145
18.2 第二类污染物最高允许排放浓度		145
18.3 部分行业最高允许排水量		149

18.4 测定方法.....	152
19. 农用污泥中污染物控制标准值 (据 GB 4284—1984)	153
20. 常用污水水质检验方法标准	154
21. 洗片废水中污染物的测定	179
参考文献	185

绪 论

水污染控制工程是环境工程专业的一门重要学科，是建立在实验基础上的科学。许多水处理方法、处理设备的设计参数和操作运行方式的确定，都需要通过实验解决。例如，采用塔式生物滤池处理某种工业废水时，需要通过实验测定负荷率、回流比、滤池高度等工艺参数才能较合理地进行工程设计。

水污染控制工程实验是水污染控制工程的重要组成部分，是科研和工程技术人员解决水和污水处理中各种问题的一个重要手段。通过实验研究可以解决下述问题。

- (1) 掌握污染物在自然界的迁移转化规律，为水环境保护提供依据。
- (2) 掌握污水处理过程中污染物去除的基本规律，以改进和提高现有的处理技术及设备。
- (3) 开发新的水处理技术和设备。
- (4) 实现水处理设备的优化设计和优化控制。
- (5) 解决水处理技术开发中的放大问题。

一、实验教学目的

实验教学是使学生理论联系实际，培养学生观察问题、分析问题和解决问题能力的一个重要方面。本课程的教学目的如下。

- (1) 加深学生对基本概念的理解，巩固新的知识。
- (2) 使学生了解如何进行实验方案的设计，并初步掌握水污染控制实验研究方法和基本测试技术。
- (3) 通过实验数据的整理使学生初步掌握数据分析处理技术，包括如何收集实验数据、如何正确地分析和归纳实验数据、运用实验成果验证已有的概念和理论等。

二、实验教学程序

为了更好地实现教学目的，使学生学好本门课程，下面简单介绍实验研究工作的一般程序。

1. 提出问题

根据已经掌握的知识，提出打算验证的基本概念或探索研究的问题。

2. 设计实验方案

确定实验目标后要根据人力、设备、药品和技术能力等方面的具体情况进行实验方案的设计。实验方案应包括实验目的、装置、步骤、计划、测试项目和测试方法等内容。

3. 实验研究

- (1) 根据设计好的实验方案进行实验，按时进行测试。
- (2) 收集实验数据。
- (3) 定期整理分析实验数据。实验数据的可靠性和定期整理分析是实验工作的重要环节。实验者必须经常用已掌握的基本概念分析实验数据，通过数据分析加深对基本概念的理解，并发现实验设备、操作运行、测试方法和实验方向等方面的问题，以便及时解决，使实验工作能较顺利地进行。

(4) 实验小结。通过实验数据的系统分析,对实验结果进行评价。小结的内容包括以下几个方面:

- ① 通过实验掌握了哪些新的知识;
- ② 是否解决了提出研究的问题;
- ③ 是否证明了文献中的某些论点;
- ④ 实验结果是否可用以改进已有的工艺设备和操作运行条件,或设计新的处理设备;
- ⑤ 当实验数据不合理时,应分析原因,提出新的实验方案。

由于受课程学时等条件限制,学生只能在已有的实验装置和规定的实验条件范围内进行实验,并通过本课程的学习得到初步的培养和训练,为今后从事实验研究和进行科学实验打好基础。

三、实验教学要求

1. 课前预习

为完成好每个实验,学生在课前必须认真阅读实验教材,清楚地了解实验项目的目的要求、实验原理和实验内容,写出简明的预习提纲。预习提纲包括:①实验目的和主要内容;②需测试项目的测试方法;③实验中应注意事项;④准备好实验记录表格。

2. 实验设计

实验设计是实验研究的重要环节,是获得满足要求的实验结果的基本保障。在实验教学中,宜将此环节的训练放在部分实验项目完成后进行,以达到使学生掌握实验设计方法的目的。

3. 实验操作

学生实验前应仔细检查实验设备、仪器仪表是否完整齐全。实验时要严格按照操作规程认真操作,仔细观察实验现象,精心测定实验数据并详细填写实验记录。实验结束后,要将实验设备和仪器仪表恢复原状,将周围环境整理干净。学生应注意培养自己严谨的科学态度,养成良好的工作学习习惯。

4. 实验数据处理

通过实验取得大量数据以后,必须对数据作科学的整理分析,去伪存真、去粗取精,以得到正确可靠的结论。

5. 编写实验报告

将实验结果整理编写成一份实验报告,是实验教学必不可少的组成部分。这一环节的训练可为今后写好科学论文或科研报告打下基础。实验报告包括下述内容:①实验目的;②实验原理;③实验装置和方法;④实验数据和数据整理结果;⑤实验结果讨论。对于科研论文,最后还要列出参考文献。实验教学的实验报告,参考文献一项可省略。实验报告的重点放在实验数据处理和实验结果的讨论。

第一章 实验设计

一、实验设计简介

实验设计的目的是选择一种对所研究的特定问题最有效的实验安排，以使用最少的人力、物力和时间获得满足要求的实验结果。从广义来说，它包括明确实验目的、确定测定参数、确定需要控制或改变的条件、选择实验方法和测试仪器、确定测量精度要求、实验方案设计和数据处理步骤等。实验设计是实验研究过程的重要环节，通过实验设计可以使我们的实验安排在最有效的范围内，以保证通过较少的实验得到预期的实验结果。例如，在进行生化需氧量（BOD）的测定时，为了能全面地描述废水有机污染的情况，往往需要估计最终生化需氧量（ BOD_u 或 L_u ）和生化反应速率常数 K_1 。完成这一实验需对 BOD 进行大量的、较长时间的（约 20d）测定，既费时又费钱。此时如有较合理的实验设计，就可能以较少的时间得到较正确的结果。表 1-1 是三种不同的实验设计得到的结果。图 1-1，图 1-2 是实验得到的 BOD 曲线。从上述图、表中可以看出，30 个测点的一组实验设计是不合适的，它不能给出满意的参数估算值。原因在于 BOD 是一级反应模型，因此，如果要使实验曲线与实测数据拟合得好些，要同时调整 K_1 和 L_u 。由图 1-2 可以看到，如果只调整 K_1 ，会使 L_u 值变化很大，但模型对前 30 个数据的拟合情况却无显著差异，也就是说，两组截然不同的参数，其前 30 个点的拟合情况差别不大。可见在这种实验设计条件下，在一定的实验误差范围内，虽然两个实验者所得的结果都是对的，但结论可能相差很大。20d 59 次观测的结果虽然好，但需要大量人力与物力。而 20d 12 次观测的实验安排（图 1-1 中第 4 天 6 个点，第 20 天 6 个点）测试次数最少，而其参数估算结果与 59 次观测所得结果相接近。这个例子说明，只要实验设计合理，不必进行大量观测便可得到精确的参数估算值，使实验的工作显著地减少。如果实验点安排不好（例如，全部安排在早期），虽然得到的参数估算值高度相关，但实验不能达到预期目的。此外，即使实验观测的次数完全相同，如果实验点的安排不同，所得结果也可能截然不同。因此，正确的实验设计不仅可以节省人力、物力和时间，并且是得到可信的实验结果的重要保证。

表 1-1 三种 BOD 实验设计所得结果

实 验 安 排	参 数 估 算 值		参数的均方差
	K_1/d^{-1}	$L_u/(mg/L)$	
20d 59 次观测	0.22	10100	-0.85
30 次观测, 0~5d	0.19	11440	-0.9989
第 4 天 6 次, 第 20 天 6 次	0.22	10190	-0.63

在生产和科学研究中，实验设计方法已得到广泛应用，概括地说，包括三方面的应用。

(1) 在生产过程中，人们为了达到优质、高产、低消耗等目的，常需要对有关因素的最佳点进行选择，一般是通过实验来寻找这个最佳点。实验的方法很多，为能迅速地找到最佳点，这就需要通过实验设计，合理安排实验点，才能最迅速找到最佳点。例如，混凝剂是污水污染控制常用的化学药剂，其投加量因具体情况不同而异，因此常需要多次实验确定最佳投

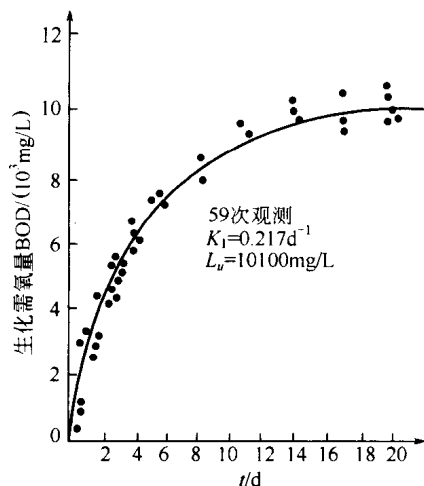


图 1-1 20d 59 次观测的 BOD 曲线

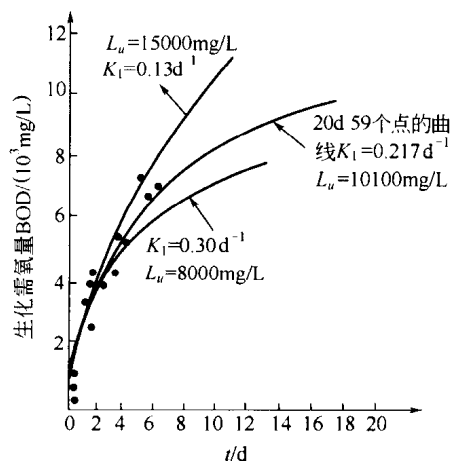
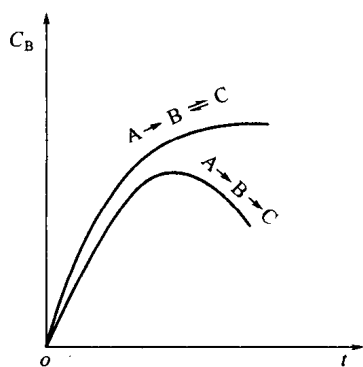


图 1-2 5d 30 次观测的 BOD 曲线

药量，此时便可以通过实验设计来减少实验的工作量。

(2) 估算数学模型中的参数时，在实验前，若通过实验设计合理安排实验点、确定变量及其变化范围等，可以以较少的时间获得较精确的参数。例如，已知 BOD 一级反应模型 $Y = L_u (1 - 10^{-K_1 t})$ ，要估计 K_1 和 L_u 。由于 $\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = K_1 L_u$ ，说明在反应的前期参数 K_1 和 L_u 相关性很好。所以如果在 t 靠近 0 的小范围内进行实验，就难以得到正确的 K_1 和 L_u ，因为在此范围内， K_1 的任何偏差都会由于 L_u 的变化而得补偿（见图 1-2）。因此，只有通过正确的实验设计，把实验安排在较大的时间范围内进行，才能较精确地获得 K_1 和 L_u 。

(3) 当可以用几种型式描述某一过程的数学模型时，常需要通过实验来确定哪一种是比较恰当的模型（即竞争模型的筛选），此时也需要通过实验设计

图 1-3 C_B 与 t 的关系

来保证实验提供可靠的信息，以便正确地进行模型筛选。例如，判断某化学反应是按 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 进行，还是按 $A \rightarrow B \rightleftharpoons C$ 进行时，要做许多实验。根据这两种反应动力学特征，B 的浓度与时间 t 的关系分别为图 1-3 所示的两条曲线。从图中可以看出，要区分表示这两种不同反应机理的数学模型，应该观测反应后期 B 的浓度变化，在均匀的时间间隔内进行实验是没有必要的。如果把实验安排在前期，用所得到的数据进行鉴别，则无法达到筛选模型的目的。这个例子说明，实验设计对于模型筛选是十分重要的，如果实验点位置取得不好，即使实验数据很多，数据很精确，也得不到预期的实验

目的。相反，选择适当的实验点位置后，即使测试精度稍差些，或者数据少一些，也能达到实验目的。

实验设计的方法很多，有单因素实验设计、双因素实验设计、正交实验设计、析因分析实验设计、序贯实验设计等。各种实验设计方法和出发点不同，因此，在进行实验设计时，应根据研究对象的具体情况决定采用哪一种方法。

在生产过程和科学研究中，对实验指标有影响的条件，通常称为因素。有一类因素，在实验中可以人为地加以调节和控制，叫做可控因素。例如，混凝实验中的投药量和 pH 值是

可以人为控制的,属于可控因素。另一类因素,由于技术、设备和自然条件的限制,暂时还不能人为控制,叫做不可控因素。例如,气温、风对沉淀效率的影响都是不可控因素。实验方案设计一般只适用于可控因素。下面说到因素,凡没有特别说明的都是指可控因素。在实验中,影响因素通常不止一个,但往往不是对所有的因素都加以考察。有的因素在长期实验中已经比较清楚,可暂时不考察,固定在某一状态上,只考察一个因素。这种考察一个因素的实验,叫做单因素实验。考察两个因素的实验称双因素实验。考察两个以上因素的实验称多因素实验。

在实验设计中用来衡量实验效果好坏所采用的标准称为实验指标,或简称指标。例如,在进行地面水的混凝实验时,为了确定最佳投药量和最佳 pH 值,选定浑浊度作为评定比较各次实验效果好坏的标准,即浊度是混凝实验的指标。

进行实验方案设计的步骤如下。

(1) 明确实验目的、确定实验指标 研究对象需要解决的问题,一般不止一个。例如,在进行混凝效果的研究时,要解决的问题有最佳投药量问题、最佳 pH 值问题和水流速度梯度问题。不可能通过一次实验把所有这些问题都解决,因此,实验前应首先确定这次实验的目的究竟是解决哪一个或者哪几个主要问题,然后确定相应的实验指标。

(2) 挑选因素 在明确实验目的和确定实验指标后,要分析研究影响实验指标的因素。从所有的影响因素中排除那些影响不大,或者已经掌握的因素,让它们固定在某一状态上;挑选那些对实验指标可能有较大影响的因素来进行考察。例如,在进行 BOD 模型的参数估计时,影响因素有温度、菌种数、硝化作用及时间等。通常是把温度和菌种数控制在一定状态上,并排除硝化作用的干扰,只通过考察 BOD 随时间的变化来估计参数。

(3) 选定实验设计方法 因素选定后,可根据研究对象的具体情况决定选用哪一种实验设计方法。例如,对于单因素问题,应选用单因素实验设计法;3 个以上因素的问题,可以用正交实验设计法;若要进行模型筛选或确定已知模型的参数估计,可采用序贯实验设计法。

(4) 实验安排 上述问题都解决后,便可以进行实验点位置安排,开展具体的实验工作。

下面我们仅介绍单因素实验设计、双因素实验设计及正交实验设计法的部分基本方法,原理部分可根据需要参阅有关书籍。

二、单因素实验设计

单因素实验设计方法有 0.618 法(黄金分割法)、对分法、分数法、分批实验法、爬山法和抛物线法等。前 3 种方法可以用较少的实验次数迅速找到最佳点,适用于一次只能出一个实验结果的问题。对分法效果最好,每做一个实验就可以去掉实验范围的一半。分数法应用较广,因为它还可以应用于实验点只能取整数或某特定数的情况,以及限制实验次数和精确度的情况。分批实验法适用于一次可以同时得出许多个实验结果的问题。爬山法适用于研究对象不适宜或者不易大幅度调整的问题。

下面介绍对分法、分数法和分批实验法。

1. 对分法

采用对分法时,首先要根据经验确定实验范围。设实验范围在 $a \sim b$ 之间,第一次实验点安排在 (a, b) 的中点 x_1 ($x_1 = \frac{a+b}{2}$)。若实验结果表明 x_1 取大了,则丢去大于 x_1 的一

半, 第二次实验点安排在 (a, x_1) 的中点 $x_2 \left(x_2 = \frac{a+x_1}{2} \right)$ 。如果第一次实验结果表明 x_1 取小了, 便丢去小于 x_1 的一半, 第二次实验点就取在 (x_1, b) 的中点。这个方法的优点是每做一次实验便可以去掉一半, 且取点方便。适用于预先已经了解所考察因素对指标的影响规律, 能够从一个实验的结果直接分析出该因素的值是取大了或取小了的情况。

例如, 确定消毒时加氯量的实验, 可以采用对分法。

2. 分数法

分数法又叫菲波那契数列法, 它是利用菲波那契数列进行单因素优化实验设计的一种方法。当实验点只能取整数, 或者限制实验次数的情况下, 采用分数法较好。例如, 如果只能做一次实验时, 就在 $\frac{1}{2}$ 处做, 其精确度为 $\frac{1}{2}$, 即这一点与实际最佳点的最大可能距离为 $\frac{1}{2}$ 。如果只能做两次实验, 第一次实验在 $\frac{2}{3}$ 处做, 第二次在 $\frac{1}{3}$ 处做, 其精确度为 $\frac{1}{3}$ 。如果能做三次实验, 则第一次在 $\frac{3}{5}$ 处做实验, 第二次在 $\frac{2}{5}$ 处做, 第三次在 $\frac{1}{5}$ 或 $\frac{4}{5}$ 处做, 其精确度为 $\frac{1}{5}$ ……做几次实验就在实验范围内 $\frac{F_n}{F_{n+1}}$ 处做, 其精度为 $\frac{1}{F_{n+1}}$, 如表 1-2 所示。

表 1-2 分数法实验点位置与精确度

实验次数	2	3	4	5	6	7	...	n	...	...
等分实验范围的份数	3	5	8	13	21	34	...	F_{n+1}	...	...
第一次实验点的位置	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{8}{13}$	$\frac{13}{21}$	$\frac{21}{34}$	...	$\frac{F_n}{F_{n+1}}$	...	...
精 确 度	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{21}$	$\frac{1}{34}$	...	$\frac{1}{F_{n+1}}$	...	...

表 1-2 中的 F_n 及 F_{n+1} 叫“菲波那契数”, 它们可由下列递推式确定

$$F_0 = F_1 = 1 \quad F_K = F_{K-1} + F_{K-2} \quad (K=2, 3, 4, \dots)$$

由此得 $F_2 = F_1 + F_0 = 2$, $F_3 = F_2 + F_1 = 3$, $F_4 = F_3 + F_2 = 5 \dots F_{n+1} = F_n + F_{n-1} \dots$

因此, 表 1-2 第三行中各分数, 从分数 $\frac{2}{3}$ 开始, 以后的每一分数, 其分子都是前一分数的分母, 而其分母都等于前一分数的分子与分母之和, 照此方法不难写出所需要的第一次实验点位置。

分数法各实验点的位置, 可用下列公式求得

$$\text{第一个实验点} = (\text{大数} - \text{小数}) \times \frac{F_n}{F_{n+1}} + \text{小数} \quad (1-1)$$

$$\text{新实验点} = (\text{大数} - \text{中数}) + \text{小数} \quad (1-2)$$

式中 中数——已实验的实验点数值。

上述两式推导如下。

首先由于第一个实验点 x_1 取在实验范围内的 $\frac{F_n}{F_{n+1}}$ 处, 所以 x_1 与实验范围左端点 (小数) 的距离等于实验范围总长度的 $\frac{F_n}{F_{n+1}}$ 倍, 即

$$\text{第一实验点} - \text{小数} = [\text{大数}(\text{右端点}) - \text{小数}] \times \frac{F_n}{F_{n+1}} \text{ 移项后, 即得式(1-1).}$$

又由于新实验点 ($x_2, x_3 \dots$) 安排在余下范围内与已实验点对称的点上, 因此不仅新实验点到余下范围的中点的距离等于已实验点到中点的距离, 而且新实验点到左端点的距离也等于已实验点到右端点的距离 (图 1-4), 即

$$\text{新实验点} - \text{左端点} = \text{右端点} - \text{已实验点}$$

移项后即得式 (1-2)。

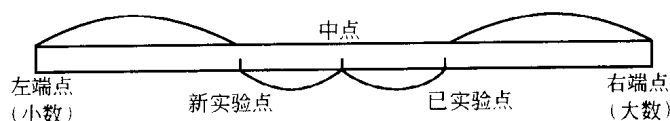


图 1-4 分数法实验点位置示意图

下面以一具体例子说明分数法的应用。

某污水厂准备投加三氯化铁来改善污泥的脱水性能, 根据初步调查投药量在 160mg/L 以下, 要求通过 4 次实验确定出最佳投药量。具体计算方法如下。

① 根据式 (1-1) 可得到第一个实验点位置

$$(160 - 0) \times \frac{5}{8} + 0 = 100 (\text{mg/L})$$

② 根据式 (1-2) 得到第二个实验点位置

$$(160 - 100) + 0 = 60 (\text{mg/L})$$

③ 假定第一点比第二点好, 所以在 60~160 之间找第三点, 丢去 0~60 的一段, 即

$$(160 - 100) + 60 = 120 (\text{mg/L})$$

④ 第三点与第一点结果一样, 此时可用对分法进行第四次实验, 即在 $\frac{100 + 120}{2} = 110$ (mg/L) 处进行实验得到的效果最好。

3. 分批实验法

当完成实验需要较长的时间, 或者测试一次要花很大代价, 而每次同时测试几个样品和测试一个样品所花的时间、人力或费用相近时, 采用分批实验法较好。分批实验法又可分为均匀分批实验法和比例分割实验法。这里仅介绍均匀分批实验法。这种方法是每批实验均匀地安排在实验范围内。例如, 每批要做 4 个实验, 我们可以先将实验范围 (a, b) 均分为 5 份, 在其 4 个分点 x_1, x_2, x_3, x_4 处做 4 个实验。将 4 个实验样品同时进行测试分析, 如果 x_3 好, 则去掉小于 x_2 和大于 x_4 的部分, 留下 (x_2, x_4) 范围。然后将留下部分再分成 6 份, 在未做过实验的 4 个分点实验, 这样一直做下去, 就能找到最佳点。对于每批要做 4 个实验的情况, 用这种方法, 第一批实验后范围缩小 $\frac{2}{5}$, 以后每批实验后都能缩小为前次余下的 $\frac{1}{3}$ (见图 1-5)。

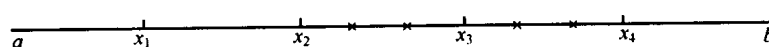


图 1-5 分批实验法示意图

例如, 测定某种有毒物质进入生化处理构筑物的最大允许浓度时, 可以用这种方法。

三、双因素实验设计

对于双因素问题, 往往采取把两个因素变成一个因素的办法 (即降维法) 来解决, 也就

是先固定第一个因素，做第二个因素的实验，然后固定第二个因素再做第一个因素的实验。这里介绍两种双因素实验设计。

1. 从好点出发法

这种方法是先把一个因素，例如 x 固定在实验范围内的某一点 x_1 (0.618 点处或其他点处)，然后用单因素实验设计对另一因素 y 进行实验，得到最佳实验点 $A_1 (x_1, y_1)$ ；再把因素 y 固定在好点 y_1 处，用单因素方法对因素 x 进行实验，得到最佳点 $A_2 (x_2, y_1)$ 。若 $x_2 < x_1$ ，因为 A_2 比 A_1 好，可以去掉大于 x_1 的部分，如果 $x_2 > x_1$ ，则去掉小于 x_1 的部分。然后，在剩下的实验范围内，再从好点 A_2 出发，把 x 固定在 x_2 处，对因素 y 进行实验，得到最佳实验点 $A_3 (x_2, y_2)$ ，于是再沿直线 $y = y_1$ 把不包含 A_3 的部分范围去掉，这样继续下去，能较好地找到需要的最佳点 (见图 1-6)。

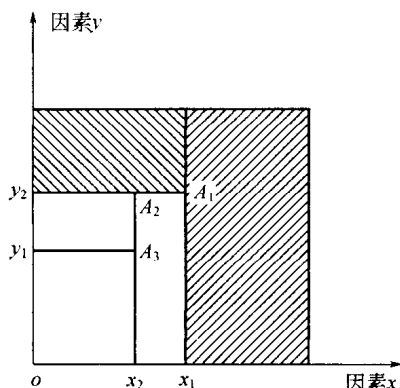


图 1-6 从好点出发法示意图

这个方法的特点是对某一因素进行实验选择最佳点时，另一个因素都是固定在上次实验结果的好点上 (除第一次外)。

2. 平行线法

如果双因素问题的两个因素中有一个因素不易改变时，宜采用平行线法。具体方法如下。

设因素 y 不易调整，把 y 先固定在其实验范围的 0.5 (或 0.618) 处，过该点做平行于 x 轴的直线，并用单因素方法找出另一因素 x 的最佳点 A_1 。再把因素 y 固定在 0.25 处，用单因素法找出因素 x 的最佳点 A_2 。比较 A_1 和 A_2 ，若 A_1 比 A_2 好，则沿直线 $y = 0.25$ 将下面的部分去掉，然后在剩下的范围内再用对分法找出因素 y 的第三点 0.625。第三次实验将因素 y 固定在 0.625 处。用单因素法找出因素 x 的最佳点 A_3 。若 A_1 比 A_3 好，则又可将直线 $y = 0.625$ 以上的部分去掉。这样一直做下去，就可以找到满意的结果 (见图 1-7)。

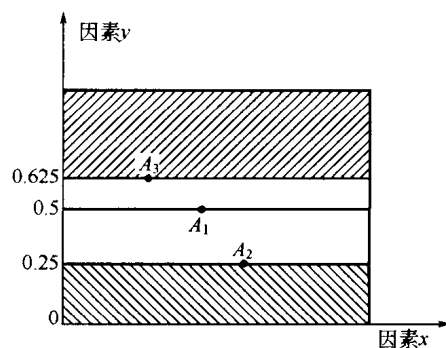


图 1-7 平行线法示意图

例如，混凝效果与混凝剂的投加量、pH 值、水流速度梯度三因素有关。根据经验分析，主要的影响因素是投药量和 pH 值，因此可以根据经验把水流速度梯度固定在某一水平上，然后，用双因素实验设计法选择实验点进行实验。

四、正交实验设计

在生产和科学研究中遇到的问题，一般都是比较复杂的，包含多种因素，且各个因素又有不同的状态，它们往往互相交织、错综复杂。要解决这类问题，常常需要做大量实验。例如，某工业废水欲采用厌氧消化处理，经过分析研究后，决定考察 3 个因素 (如温度、时间、负荷率)，而每个因素又可能有 3 种不同的状态 (如温度因素为 25℃、30℃、35℃ 等 3 个水平)，它们之间可能有 $3^3 = 27$ 种不同的组合，也就是说要经过 27 次实验后才能知道哪一种组合最好。显然，这种全面进行实验的方法，不但费时费钱，有时甚至是不可能的。对于这样的一个问题，如果采用正交设计法安排实验，只要经过 9 次实验便能得到满意的结

果。对于多因素问题，采用正交实验设计可以达到事半功倍的效果，这是因为可以通过正交设计合理地挑选和安排实验点，较好地解决多因素实验中的两个突出问题：

- ① 全面实验的次数与实际可行的实验次数之间的矛盾；
- ② 实际所做的少数实验与要求掌握的事物的内在规律之间的矛盾。

正交实验设计法是一种研究多因素实验问题的数学方法。它主要是使用正交表这一工具从所有可能的实验搭配中挑选出若干必需的实验，然后再用统计分析方法对实验结果进行综合处理，得出结果。下面先介绍两个有关的概念。

(1) 水平 因素变化的各种状态叫因素的水平。某个因素在实验中需要考察它的几种状态，就叫它是几水平的因素。因素在实验中所处状态（即水平）的变化，可能引起指标发生变化。例如，在污泥厌氧消化实验中要考察 3 个因素：温度、泥龄和负荷率。温度因素选择为 25℃、30℃、35℃ 3 种状态，这里的 25℃、30℃、35℃ 就是温度因素的 3 个水平。

因素的水平有的能用数量表示（如温度），有的则不能用数量表示。例如，在采用不同混凝剂进行印染废水脱色实验时，要研究哪种混凝剂较好，在这里各种混凝剂就表示混凝剂这个因素的各个水平，不能用数量表示。凡是不能用数量表示水平的因素，叫做定性因素。在多因素实验中，有时会遇到定性因素。对于定性因素，只要对每个水平规定具体含义，就可与定量因素一样对待。

(2) 正交表 用正交设计法安排实验都要用正交表。它是正交实验设计法中合理安排实验，以及对数据进行统计分析的工具。正交表都以统一形式的记号来表示。如 $L_4(2^3)$ （图 1-8），字母 L 代表正交表；L 右下角的数字“4”表示正交表有 4 行，即要安排 4 次实验；括号内的指数“3”表示表中有 3 列，即最多

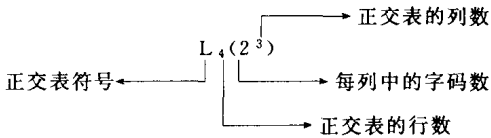


图 1-8 正交表记号示意图

可以考察 3 个因素；括号内的底数“2”表示表中每列有 1、2 两种数据，即安排实验时，被考察的因素有两种水平 1 与 2，称为 1 水平与 2 水平。如表 1-3 所示。

表 1-3 $L_4(2^3)$ 正交表

实 验 号	列 号			实 验 号	列 号		
	1	2	3		1	2	3
1	1	1	1	3	2	1	2
2	1	2	2	4	2	2	1

如果被考察各因素的水平不同，应采用混合型正交表，其表示方式略有不同。如 $L_8(4 \times 2^4)$ ，它表示有 8 行（即要做 8 次实验）5 列（即有 5 个因素）；而括号内的第一项“4”表示被考察的第一个因素是 4 个水平，在正交表中位于第一列，这一列由 1、2、3、4 四种数字组成；括号内第二项的指数“4”表示另外还有 4 个考察因素；底数“2”表示后 4 个因素是 2 水平，即后 4 列由 1、2 两种数字组成。用 $L_8(4 \times 2^4)$ 安排实验时，最多可以考察一个具有五因素的问题，其中一因素为 4 水平，另四因素为 2 水平，共要做 8 次实验。

1. 正交设计法安排多因素实验的步骤

(1) 明确实验目的，确定实验指标。

(2) 挑因素选水平，列出因素水平表。影响实验成果的因素很多，但是，我们不是对每个因素都进行考察。例如，对于不可控因素，由于无法测出因素的数值，因而看不出不同水平的差别，难以判断该因素的作用，所以不能列为被考察的因素。对于可控因素则应挑选那