



普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材

# 水处理实验技术 (第二版)

李燕城 吴俊奇 主编  
周玉文 主审

中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材

# 水处理实验技术

(第二版)

李燕城 吴俊奇 主编

周玉文 主审

中国建筑工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

水处理实验技术/李燕城, 吴俊奇主编. —2 版. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2004  
普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材  
ISBN 7-112-06154-7

I. 水... II. ①李... ②吴... III. 水处理-实验-  
高等学校-教材 IV. TU991.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 034844 号

责任编辑: 刘爱灵

责任设计: 孙 梅

责任校对: 张 虹

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材

**水处理实验技术**

(第二版)

李燕城 吴俊奇 主编

周玉文 主审

\*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{1}{4}$  字数: 382 千字

2004 年 6 月第二版 2004 年 6 月第九次印刷

印数: 23231—26730 册 定价: 22.00 元

ISBN 7-112-06154-7

TU·5421 (12167)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

## 第二版前言

本书自1989年出版以来,一直是高等院校给水排水工程专业本科生的重要参考教材之一。近十几年来本学科发展很快,出现了许多新理论、新工艺和新方法,而且现今提出的素质教育对学生动手能力培养方面有了新的要求和含义,为此,给水排水工程专业指导委员会建议对本书进行修改。受本书主编李燕城教授的委托,吴俊奇副教授负责此次的全面修订工作。

本书是李燕城教授等几位教师多年教学和科研工作的结晶,书中收集了大量第一手科研资料和成果,对学生科研能力培养很有益处,且也基本符合现今素质教育的要求,故对原书只作了少量的改动,但增加了一些新的实验如给水处理动态模型实验、SBR法实验、流动电流絮凝控制实验、膜生物反应器实验等。由于有些实验本身包括了生物处理、物理处理、化学处理、物理化学处理等原理,而有些实验又在给水处理、污水处理中都有应用,所以很难用物理处理、化学处理、生物处理或给水处理、污水处理来进行分类。但为了配合相关教材及沿袭过去的分类习惯,在参考了几所兄弟院校编写的水处理实验指导书后,对原书第3章按给水处理和污水处理进行分类编写。此外,为配合教学,本次修订尽可能使书中公式的符号与第四版《给水工程》和《排水工程》教材相一致。

本版所增加的给水排水动态模型实验主要是根据哈尔滨工业大学制造的水处理模型实验装置的说明资料和孙丽欣主编的《水处理工程应用实验》一书中有关内容编写而成,在此对有关作者表示衷心感谢。

本书在修订过程中得到了汪慧贞教授、张雅君教授、付婉霞副教授和韩芳工程师等多位教师的指导和帮助,在此一并表示感谢。

本书由北京工业大学周玉文教授主审。

因编者水平有限,书中不足之处敬请批评指正。

吴俊奇

2003年12月于北京建筑工程学院

# 第一版前言

《水处理实验技术》是给水排水工程专业必修课，是水处理教学的重要组成部分，是培养给水排水工程、环境工程技术人员所必需的课程。本课程可以加深学生对水处理技术基本原理的理解；培养学生设计和组织水处理实验方案的初步能力；培养学生进行水处理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。

本书根据 1983 年长沙给水排水工程专业教学大纲会议及 1984 年给水排水工程、环境工程教材编审委员会“水处理实验技术教学大纲”审定稿和 1987 年给水排水及环境工程教材编审委员会“水处理实验技术教学基本要求”审定稿编写。

本书内容包括：1. 实验方案的优化设计；2. 实验数据的分析处理；3. 给水处理及废水处理必开与选开的 19 个实验项目，其中（1）物理处理实验 7 项；（2）生物处理实验 5 项；（3）化学处理实验 5 项；（4）污泥处理实验 2 项。由于本书主要面向各高等院校教学，同时也面向生产和科研，考虑到本书的完整性、实验性及独立性，故编写了实验方案的优化设计及实验数据的分析处理部分。目前各院校情况不同，又考虑到科研、生产的需要，编写了 19 项水处理实验，有些实验项目还采用了几种不同的方法，或者选用了不同的实验设备。每个实验开头有简短的提要，主要介绍实验内容及在工程实践中的重要意义；结尾都有思考题以利于学生学习和实验工作的深入；在内容叙述上，力求做到：实验原理叙述清晰，计算公式推导完整，实验步骤简明扼要。

根据 1987 年给水排水及环境工程教材编审委员会第六次会议决定，本书作为给水排水工程专业本科教材，并决定本课程应开出包括水处理课在内的混凝沉淀、过滤、软化和除盐，自由沉淀（或成层沉淀）、生物处理（包括曝气充氧内容）、酸性废水中和、活性炭吸附、污泥处理 9 项必开实验，其他选开实验则由各院校根据本校的具体情况自定。

本书由北京建筑工程学院李燕城副教授主编。第一章及第二章由数学教研室马龙友副教授、贾玲华讲师及给水排水教研室李燕城副教授编写，第三章由给水排水教研室编写，其中实验 1（2）、4、5（2）、7、13（1）、14、15（1）由柳新根副教授编写，实验 5（1）、（3）、13（2）、15（2）由李耀曾副教授编写。此外给水排水教研室李常居助理工程师、邱少强工程师、王茂才实验师等参加了部分工作。

本书由哈尔滨建筑工程学院张自杰教授、重庆建筑工程学院姚雨霖教授主审。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，欢迎广大读者给予批评指正。

编 者

1988年5月

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 绪论                  | 1  |
| 第1章 实验设计            | 5  |
| 1.1 实验设计的几个基本概念     | 5  |
| 1.2 单因素优化实验设计       | 6  |
| 1.2.1 均分法与对分法       | 7  |
| 1.2.2 0.618法        | 7  |
| 1.2.3 分数法           | 9  |
| 1.3 多因素正交实验设计       | 11 |
| 1.3.1 正交实验设计        | 12 |
| 1.3.2 多指标的正交实验及直观分析 | 20 |
| 习题                  | 24 |
| 第2章 实验数据分析处理        | 27 |
| 2.1 实验误差分析          | 27 |
| 2.1.1 测量值及误差        | 27 |
| 2.1.2 直接测量值误差分析     | 28 |
| 2.1.3 间接测量值误差分析     | 30 |
| 2.1.4 测量仪器精度的选择     | 32 |
| 2.2 实验数据整理          | 33 |
| 2.2.1 有效数字及其运算      | 33 |
| 2.2.2 实验数据整理        | 34 |
| 2.2.3 实验数据中可疑数据的取舍  | 35 |
| 2.2.4 实验数据整理计算举例    | 38 |
| 2.3 数据处理            | 40 |
| 2.3.1 单因素方差分析       | 40 |
| 2.3.2 正交实验方差分析      | 45 |
| 2.3.3 实验成果的表格、图形表示法 | 54 |
| 2.3.4 回归分析          | 55 |
| 习题                  | 71 |
| 第3章 给水处理实验          | 74 |
| 3.1 混凝沉淀实验          | 74 |
| 3.2 过滤实验            | 79 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 3.2.1 滤料筛分及孔隙率测定实验 .....              | 79         |
| 3.2.2 过滤实验 .....                      | 83         |
| 3.2.3 滤池冲洗实验 .....                    | 86         |
| 3.3 流动电流絮凝控制系统运行实验 .....              | 91         |
| 3.4 消毒实验 .....                        | 95         |
| 3.4.1 折点加氯消毒实验 .....                  | 95         |
| 3.4.2 臭氧消毒实验 .....                    | 100        |
| 附: 臭氧浓度的测定方法 .....                    | 104        |
| 3.5 离子交换软化实验 .....                    | 105        |
| 3.5.1 强酸性阳离子交换树脂交换容量的测定实验 .....       | 105        |
| 3.5.2 软化实验 .....                      | 106        |
| 3.6 除盐实验 .....                        | 109        |
| 3.6.1 离子交换除盐实验 .....                  | 109        |
| 3.6.2 电渗析除盐实验 .....                   | 113        |
| 3.7 给水处理动态模型实验 .....                  | 119        |
| 3.7.1 脉冲澄清实验 .....                    | 120        |
| 3.7.2 水力循环澄清池模型实验 .....               | 121        |
| 3.7.3 重力式无阀滤池实验 .....                 | 123        |
| 3.7.4 虹吸滤池实验 .....                    | 125        |
| 3.7.5 斜板沉淀池实验 .....                   | 126        |
| 3.8 冷却塔热力性能测试实验 .....                 | 127        |
| <b>第4章 污水处理实验 .....</b>               | <b>132</b> |
| 4.1 颗粒自由沉淀实验 .....                    | 132        |
| 4.1.1 颗粒自由沉淀实验 .....                  | 132        |
| 4.1.2 原水颗粒分析实验 .....                  | 138        |
| 4.2 絮凝沉淀实验 .....                      | 140        |
| 4.3 成层沉淀实验 .....                      | 145        |
| 4.4 污水可生化性能测定 .....                   | 151        |
| 4.4.1 BOD <sub>5</sub> /COD 比值法 ..... | 152        |
| 4.4.2 瓦勃氏呼吸仪测定污水可生化性实验 .....          | 152        |
| 4.5 活性污泥活性测定实验 .....                  | 159        |
| 4.5.1 吸附性能测定实验 .....                  | 159        |
| 4.5.2 生物降解能力测定实验 .....                | 161        |
| 4.6 好氧生物处理实验 .....                    | 163        |
| 4.6.1 曝气池混合液耗氧速率测定实验 .....            | 164        |
| 4.6.2 完全混合生化反应动力学系数测定实验 .....         | 166        |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 4.7 曝气充氧实验 .....                              | 177 |
| 4.7.1 曝气设备清水充氧性能测定实验 .....                    | 177 |
| 4.7.2 污水充氧修正系数 $\alpha$ 、 $\beta$ 值测定实验 ..... | 185 |
| 4.8 间歇式活性污泥法 (SBR 法) 实验 .....                 | 189 |
| 4.9 高负荷生物滤池实验 .....                           | 192 |
| 4.10 污水处理动态模型实验 .....                         | 196 |
| 4.10.1 完全混合型活性污泥法曝气沉淀池实验 .....                | 196 |
| 4.10.2 生物转盘实验 .....                           | 198 |
| 4.10.3 塔式生物滤池实验 .....                         | 200 |
| 4.11 膜生物反应器实验 .....                           | 202 |
| 4.12 污水、污泥厌氧消化实验 .....                        | 204 |
| 4.13 污泥脱水性能实验 .....                           | 211 |
| 4.13.1 污泥比阻测定实验 .....                         | 211 |
| 4.13.2 污泥滤叶过滤实验 .....                         | 215 |
| 4.14 气浮实验 .....                               | 217 |
| 4.14.1 气固比实验 .....                            | 218 |
| 4.14.2 释气量实验 .....                            | 221 |
| 4.15 活性炭吸附实验 .....                            | 222 |
| 4.16 酸性污水升流式过滤中和及吹脱实验 .....                   | 228 |
| <b>附录 实验用数据表和图</b> .....                      | 231 |
| 附表 1 常用正交实验表 .....                            | 231 |
| 附表 2 离群数据分析判断表 .....                          | 238 |
| (1) 克罗勃 (Grubbs) 检验临界值 $T_{\alpha}$ 表 .....   | 238 |
| (2) Cochran 最大方差检验临界 $C_{\alpha}$ 表 .....     | 239 |
| 附表 3 F 分布表 .....                              | 240 |
| 附表 4 相关系数检验表 .....                            | 241 |
| 附表 5 氧在蒸馏水中的溶解度 (饱和度) .....                   | 242 |
| <b>参考文献</b> .....                             | 243 |

# 绪 论

## 1. 水处理实验技术的作用

自然科学除数学而外，几乎都可以说是实验科学，离不开实验技术。实验不仅用来检验理论正确与否，而且大量的客观规律、科学理论的发现与确立又都是从科学实验中总结出来的，因此实验技术是科学研究的重要手段之一。

给水排水工程本身就不是一个纯理论性学科，因而实验技术更为重要，不仅一些现象、规律、理论，而且工程设计和运行管理中的很多问题，也都离不开实验。例如，给水处理工程中的混凝沉淀，其药剂种类的选择及生产运行适宜条件的确定；又如废水处理工程中活性污泥系统沉淀池的设计，其污泥沉速与极限固体通量等重要设计参数都要通过实验测定，才能正确地选择。同时，水处理实验可应用于指导水处理规律的研究，改进现有工艺、设备以及研究新工艺、新设备。因此在学习给水排水工程有关专业课程的同时，必须有意识地加强《水处理实验技术》课程的学习，注意培养自己独立解决工程实践中一些实验技术问题的能力。

水处理实验技术课的教学目的与任务是：

- (1) 通过对实验的观察、分析，加深对水处理基本概念、现象、规律与基本原理的理解；
- (2) 掌握一般水处理实验技能和仪器、设备的使用方法，具有一定的解决实验技术问题的能力；
- (3) 学会设计实验方案和组织实验的方法；
- (4) 学会对实验数据进行测定、分析与处理，从而能得出切合实际的结论；
- (5) 培养实事求是的科学态度和工作作风。

## 2. 水处理实验过程

水处理实验过程一般分为：实验准备工作；实验；实验数据分析与处理 3 个步骤。

### (1) 实验准备工作

实验前的准备工作，不仅关系到实验的进度，而且直接影响实验的质量和成果。其准备工作大致如下：

#### 1) 理论准备工作

主要包括 3 个方面：

- a. 搞清实验原理和实验目的。实验前搞清实验目的及实验原理，才能更好地指导实验、进行实验并得到满意的结果。例如，在研制生化处理中使用的曝气

设备时,当搞清充氧原理和实验目的后,就可以通过清水充氧实验,分析产品的优缺点、存在问题和改进方向,以期得到一个较佳的新产品及适宜的运行条件。

b. 进行实验方案的优化设计。如何以最小代价迅速地圆满地得到正确的实验结论,关键在于实验方案的设计。所以在掌握实验原理和实验目的之后,要利用所学实验设计的知识及专业知识进行实验方案设计,从而正确地编排实验内容,指导实验。

c. 查阅有关文献资料。了解当前技术发展情况,掌握研究现状。

## 2) 实验设备、测试仪器的准备

设备、仪器是完成实验必不可少的工具,水处理问题的复杂性以及当前测试设备、仪器还不够完备,给水处理实验带来了一定的困难。

a. 一般设备、仪器的准备。为了保证实验顺利进行并有足够的精度,对所使用的设备、仪器要求做到:事先熟悉其性能、使用条件,并正确地选择仪器的精度;检查设备、仪器的完好度;记录各种必要的的数据;某些易损易耗的设备、仪表要有备用品。

b. 专用实验设备的准备。为了进行某项水处理实验而选用专用设备时,必须注意这些设备的可靠性、使用条件和性能。当某些专用设备和某种工艺流程所需各种构筑物需自己设计加工时,除了从理论上要符合水处理、水力学等要求外,还要考虑到实验条件与今后生产运行条件的一致性,以使实验成果具有良好的实用价值。在没有运行前,一般要先经清水调试修改至正常运行为止。

## 3) 测试步骤与记录表格的准备

a. 步骤。整个实验分几步或几个工况完成,每一步或每一工况操作的内容、解决的问题、使用的设备、仪表、取样与化验项目、观察与记录内容、人员分工、注意事项、要求等,都要做到测试人员人人心中有数。

b. 记录表格。设计记录表格是一项重要的工作,实验前应认真地设计出各种测试所需的记录表格。对于某些新开实验则应根据实验过程中发现的问题,随时进行修改、调整。要求记录表格正规化,便于记录、便于整理。其内容包括:参加人员、测试条件、仪器设备名称、型号、精度、观察现象、测试原始数据等。

4) 人员分工。水处理实验,一般均需多人同时配合进行,因此要事先共同制定出实验方案,使每一个参加测试的人员对实验原理、目的、测试步骤,从整体上做到心中有数,同时每人分工负责各项工作,如:操作、取样、化验、观察、记录等,以便使实验有条不紊地进行。

## (2) 实验

### 1) 仪器设备的安装与调试

使用各种仪器、设备进行实验时,必须满足仪器、设备的正常运行要求。安装调试后要认真检查,确认一切符合要求后方能开始实验,否则事倍功半,这一

点特别要引起足够的重视。一般要注意, 仪器设备安装位置应便于观察、读数和记录。条件允许时, 最好通过试做以达到对整个实验的了解并检查全部准备工作。

## 2) 实验

在上述各项工作结束后, 即可进入实验阶段, 按人员分工, 分别完成各项工作。

a. 取样与分析。取样一定要注意要求, 例如, 时间、地点、高度等, 以便能正确地取出所需的样品, 提供分析。样品分析, 一般可参照水质分析要求进行。

b. 观察。实验中某些现象只能通过肉眼观察并加以描述, 因此要求观察时一定要集中精力, 排除外界干扰, 边观察, 边记录, 用图与文字加以描述。例如做悬浮物絮凝沉淀时, 对颗粒絮凝作用及絮凝体形成和凝聚变大、下沉过程的描述; 曝气设备清水充氧实验时, 各类曝气设备所形成的池内气泡分布, 气泡大小变化的观察描述等。

c. 记录。记录是实验中一项经常的工作, 它们记下的数据是今后整个实验计算、分析的依据, 是整个实验的宝贵资料。一般要求有:

- 记录要记在记录纸或记录本上, 不得随便乱记, 更不得记后再整理抄写而丢掉原始记录。记错改动不得乱涂, 而应打叉后重写, 以便今后分析时参考。

- 记录就是如实地记下测试中所需要的各种数据, 要求清楚、工整。

- 记录的内容要尽可能地详尽。一般分为, 一般性内容: 如实验日期、时间、地点、气温等; 与实验有关的内容如: 实验组号、参加人员、实验条件、测试仪表名称、型号、精度等; 实验原始数据, 即由仪表或其他测试方法所得, 未经任何运算的数值。读出后马上记录, 不要过后追记, 尽可能减少差错; 实验中所发现的问题及观测到的一些现象或某些特殊现象等, 也应随时详细记录。

总之记录不要怕多、怕麻烦, 避免由于实验前对其规律认识还不透彻、记录内容考虑不周, 实验后进行分析、计算时发现缺这少那, 又后悔莫及, 造成不可弥补的损失。

## (3) 实验数据分析处理与实验报告

### 1) 实验数据的分析处理

这是整个实验过程中的一个重要部分。实验过程中应随时进行数据整理分析, 一方面可以看出实验效果是否能达到预期目的, 另一方面又可以随时发现问题, 修改实验方案, 指导下一步实验的进行。整个实验结束后, 要对数据进行分析处理, 从而确定因素主次, 最佳生产运行条件, 建立经验式, 给出事物内在规律等。其内容大致分为实验数据的误差分析, 实验数据的分析整理, 实验数据的处理。

### 2) 实验报告

这是对整个实验的全面总结。要求全篇报告文字通顺、字迹端正、图表整齐、结果正确、讨论认真。一般报告由以下几部分组成：(1) 实验名称；(2) 实验目的；(3) 实验原理；(4) 实验装置仪表；(5) 实验数据及分析处理；(6) 结论；(7) 问题讨论。

# 第1章 实验设计

实验是解决水处理问题必不可少的一个重要手段，通过实验可以得出三方面结论。

1. 找出影响实验结果的因素及各因素的主次关系，为水处理方法揭示内在规律，建立理论基础。

2. 寻找各因素的最佳量，以使水处理方法在最佳条件下实施，达到高效、省能，从而节省土建与运行费用。

3. 确定某些数学公式中的参数，建立起经验式，以解决工程实际中的问题等。

在实验安排中，如果实验设计得好，次数不多，就能获得有用信息，通过实验数据的分析，可以掌握内在规律，得到满意结论；如果实验设计得不好，次数较多，也摸索不到其中的变化规律，得不到满意的结论。因此如何合理地设计实验，实验后又如何对实验数据进行分析，以用较少的实验次数达到我们预期的目的，是很值得我们研究的一个问题。

优化实验设计，就是一种在实验进行之前，根据实验中的不同问题，利用数学原理，科学地安排实验，以求迅速找到最佳方案的科学实验方法。它对于节省实验次数，节省原材料，较快得到有用信息是非常必要的。由于优化实验设计法为我们提供了科学安排实验的方法，因此，近年来优化实验设计越来越被科技人员重视，并得到广泛的应用。优化实验设计打破了传统均分安排实验等方法，其中单因素的0.618法和分数法、多因素的正交实验设计法在国内外已广泛地应用于科学实验上，取得了很好效果。本章将重点介绍这些内容。

## 1.1 实验设计的几个基本概念

1. 实验方法——通过做实验获得大量的自变量与因变量——对应的数据，以此为基础来分析整理并得到客观规律的方法，称为实验方法。

2. 实验设计——是指为节省人力、财力，迅速找到最佳条件，揭示事物内在规律，根据实验中不同问题，在实验前利用数学原理科学编排实验的过程。

3. 指标——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，天然水中存在大量胶体颗粒，使水浑浊，为了降低浑浊度需往水中投放混凝剂，当实验目的是求最佳投药量时，水样中剩余浊度即作为实验指标。

4. 因素——对实验指标有影响的条件称为因素。例如，在水中投入适量的混凝剂可降低水的浊度，因此水中投加的混凝剂即作为分析的实验因素，简称其为因素。有一类因素，在实验中可以人为地加以调节和控制，如水质处理中的投药量，叫做可控因素。另一类因素，由于自然条件和设备等条件的限制，暂时还不能人为地调节，如水质处理中的气温，叫做不可控因素。在实验设计中，一般只考虑可控因素。因此，书中说到因素，凡没有特别说明的，都是指可控因素。

5. 水平——因素在实验中所处的不同状态，可能引起指标的变化，因素变化的各种状态叫做因素的水平。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。

因素的各个水平有的能用数量来表示，有的不能用数量来表示。例如：有几种混凝剂可以降低水的浑浊度，现要研究哪种混凝剂较好，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，经常会遇到定性因素。对定性因素，只要对每个水平规定具体含义，就可与通常的定量因素一样对待。

6. 因素间交互作用——实验中所考察的各因素相互间没有影响，则称因素间没有交互作用，否则称为因素间有交互作用，并记为  $A(\text{因素}) \times B(\text{因素})$ 。

## 1.2 单因素优化实验设计

对于只有一个影响因素的实验，或影响因素虽多但在安排实验时，只考虑一个对指标影响最大的因素，其他因素尽量保持不变的实验，即为单因素实验。我们的任务是如何选择实验方案来安排实验，找出最优实验点，使实验的结果（指标）最好。

在安排单因素实验时，一般考虑三方面的内容：

首先确定包括最优点的实验范围。设下限用  $a$  表示，上限用  $b$  表示，实验范围就用由  $a$  到  $b$  的线段表示（如图 1-1 所示），并记作  $[a, b]$ 。若  $x$  表示实验点，则写成  $a \leq x \leq b$ ，如果不考虑端点  $a$ 、 $b$ ，就记成  $(a, b)$  或  $a < x < b$ 。

然后确定指标。如果实验结果（ $y$ ）和因素取值（ $x$ ）的关系可写成数学表达式  $y = f(x)$ ，称  $f(x)$  为指标函数（或称目标函数）。根据实际问题，

在因素的最优点上，以指标函数  $f(x)$  取最大值、最小值或满足某种规定的要求为评定指标。对于不能写成指标函数甚至实验结果不能定量表示的情况，例如，比较水库中水的气味，就要确定评定实验结果好坏的标准。

最后确定实验方法，科学地安排实验点。本节主要介绍单因素优化实验设计方法。内容包括均分法、对分法、0.618 法和分数法。



图 1-1 单因素实验范围

### 1.2.1 均分法与对分法

#### 1. 均分法

均分法的作法如下, 如果要做  $n$  次实验, 就把实验范围等分成  $n+1$  份, 在各个分点上作实验。如图 1-2。

$$x_i = a + \frac{b-a}{n+1}i \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (1-1)$$

把  $n$  次实验结果进行比较, 选出所需要的最好结果, 相对应的实验点即为  $n$  次实验中最优点。



图 1-2 均分法实验点

均分法是一种古老的实验方法。优点是只需把实验放在等分点上, 实验可以同时安排, 也可以一个接一个地安排; 其缺点是实验次数较多, 代价较大。

#### 2. 对分法

对分法的要点是每次实验点取在实验范围的中点。若实验范围为  $[a, b]$ , 中点公式为

$$x = \frac{a+b}{2} \quad (1-2)$$

用这种方法, 每次可去掉实验范围的一半, 直到取得满意的实验结果为止。但是用对分法是有条件的, 它只适用于每作一次实验, 根据结果就可确定下次实验方向的情况。

如某种酸性污水, 要求投加碱量调整  $\text{pH} = 7 \sim 8$ , 加碱量范围为  $[a, b]$ , 试确定最佳投药量。若采用对分法, 第一次加药量  $x_1 = \frac{a+b}{2}$ , 加药后水样  $\text{pH} < 7$  (或  $\text{pH} > 8$ ), 则加药范围中小于  $x_1$  (或大于  $x_1$ ) 的范围可舍弃, 而取另一半重复实验, 直到满意为止。

### 1.2.2 0.618 法

单因素优选法中, 对分法的优点是每次实验可以将实验范围缩短一半, 缺点是要求每次实验要能确定下次实验的方向。有些实验不能满足这个要求, 因此,

对分法的应用受到一定限制。

科学实验中, 有相当普遍的一类实验, 目标函数只有一个峰值, 在峰值的两侧实验效果都差, 将这样的目标函数称为单峰函数。图 1-3 所示为一个上单峰函数。

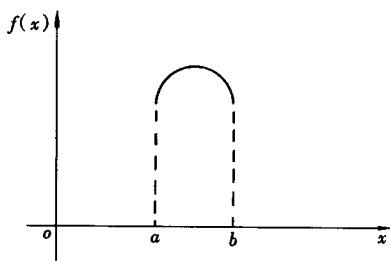


图 1-3 上单峰函数

0.618 法适用于目标函数为单峰函数的情形。其做法如下: 设实验范围为  $[a, b]$ , 第一次实验点  $x_1$  选在实验范围的 0.618 位置

上, 即:

$$x_1 = a + 0.618(b - a) \quad (1-3)$$

第二次实验点选在第一点  $x_1$  的对称点  $x_2$  上, 即实验范围的 0.382 位置上。

$$x_2 = a + 0.382(b - a) \quad (1-4)$$

实验点  $x_1$ 、 $x_2$  如图 1-4 所示。

设  $f(x_1)$  和  $f(x_2)$  表示  $x_1$  与  $x_2$  两点的



实验结果, 且  $f(x)$  值越大, 效果越好。

图 1-4 0.618 法第 1、2 个试验点分布

(1) 如果  $f(x_1)$  比  $f(x_2)$  好, 根据“留好去坏”的原则, 去掉实验范围  $[a, x_2)$  部分, 在剩余范围  $[x_2, b]$  内继续做实验。

(2) 如果  $f(x_1)$  比  $f(x_2)$  差, 同样根据“留好去坏”的原则, 去掉实验范围  $(x_1, b]$ , 在剩余范围  $[a, x_1]$  内继续做实验。

(3) 如果  $f(x_1)$  和  $f(x_2)$  实验效果一样, 去掉两端, 在剩余范围  $[x_1, x_2]$  内继续做实验。

根据单峰函数性质, 上述 3 种做法都可使好点留下, 将坏点去掉, 不会发生最优点丢掉的情况。

继续做实验, 第一种情况下, 在剩余实验范围  $[x_2, b]$  上用公式 (1-3) 计算新的实验点  $x_3$ 。

$$x_3 = x_2 + 0.618(b - x_2)$$

如图 1-5 所示, 在实验点  $x_3$  安排一次新的实验。

在第二种情况下, 剩余实验范围  $[a, x_1]$ , 用公式 (1-4) 计算新的实验点  $x_3$ 。

$$x_3 = a + 0.382(x_1 - a)$$

如图 1-6 所示, 在实验点  $x_3$  安排一次新的实验。

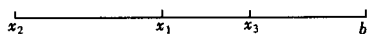


图 1-5 (1) 时第 3 个实验点  $x_3$



图 1-6 (2) 时第 3 个实验点  $x_3$

在第三种情况下, 剩余实验范围为  $[x_2, x_1]$ , 用公式 (1-3) 和 (1-4) 计算两个新的实验点  $x_3$  和  $x_4$ 。

$$x_3 = x_2 + 0.618(x_1 - x_2)$$

$$x_4 = x_2 + 0.382(x_1 - x_2)$$

在  $x_3$ 、 $x_4$  安排两次新的实验。

无论上述 3 种情况出现哪一种, 在新的实验范围内都有两个实验点的实验结果, 可以进行比较。仍然按照“留好去坏”原则, 再去掉实验范围的一段或两段, 这样反复做下去, 直至找到满意的实验点, 得到比较好的实验结果为止, 或实验范围已很小, 再做下去, 实验结果差别不大, 就可停止实验。

例如: 为降低水中的浑浊度, 需要加入一种药剂, 已知其最佳加入量在