

# 环境工程

HUANJI GONGCHENG  
SHEJIXING YANJIUXING SHIYANJISHU

## 设计性、研究性实验技术

④ 尹奇德 王琼 夏畅斌 等编著

.....  
.....  
.....  
.....



化学工业出版社

# 环境工程

## 设计性、研究性实验技术

主 编 尹海强 副 编 李 强 张 强 张 强 张 强

本书可作为环境工程专业及相关专业的教材，也可供从事环境工程工作的工程技术人员参考。

环境工程专业教材

本书可作为高等院校环境工程专业及相关专业的教材，也可供从事环境工程设计的工程技术人员参考。

# 环境工程

HUANJIING GONGCHENG

SHEJIXING YANJIUXING SHIYANJISHU

## 设计性、研究性实验技术

◎ 尹奇德 王琼 夏畅斌 等编著

.....

第一章 绪论

第一节 环境工程概论

第二节 环境工程的发展概况

第三节 环境工程的研究内容

第四节 环境工程的研究方法

第五节 环境工程的研究成果

第六节 环境工程的研究展望

第七节 环境工程的研究现状

第八节 环境工程的研究趋势

第九节 环境工程的研究意义

第十节 环境工程的研究价值

第十一节 环境工程的研究作用

第十二节 环境工程的研究影响

第十三节 环境工程的研究地位

第十四节 环境工程的研究前景

第十五节 环境工程的研究挑战

第十六节 环境工程的研究机遇

第十七节 环境工程的研究希望

第十八节 环境工程的研究信心

第十九节 环境工程的研究决心

第二十节 环境工程的研究恒心

第二十一节 环境工程的研究耐心

第二十二节 环境工程的研究毅力

第二十三节 环境工程的研究恒心



化学工业出版社

· 北京 ·

环境工程 尹奇德 王琼 夏畅斌 等编著

300mm×160mm

本书全面介绍了环境工程实验技术,内容包括实验设计、误差分析与实验数据处理、实验样本的采集与保存、水处理实验、大气污染控制实验、固废处理与处置实验、环境噪声实验等方面。

本书可作为高等院校环境类专业实验教材,也可供环境工程领域工程技术人员、科研人员和管理人员参考。

环境工程实验技术

尹奇德,王琼,夏畅斌等编著

化学工业出版社

#### 图书在版编目(CIP)数据

环境工程设计性、研究性实验技术/尹奇德,王琼,夏畅斌等编著. —北京:化学工业出版社, 2009.4  
ISBN 978-7-122-04955-1

I. 环… II. ①尹…②王…③夏… III. 环境工程-实验  
IV. X5-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 025433 号

责任编辑:刘兴春  
责任校对:陈 静

文字编辑:荣世芳  
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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张15¼ 字数396千字 2009年7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:48.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

环境工程是建立在实验基础上的学科。环境工程实验是环境工程学科的重要组成部分，是科研和工程技术人员解决环境污染治理中各种问题的一个重要手段。许多污染现象的解释，污染治理技术、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，污水处理中混凝沉淀所用药剂种类的选择和生产运行条件的确定、热解焚烧技术处理固体废物时工艺参数的确定等，都需要通过实验测定才能较合理地进行工程设计。

针对环境工程设计性、研究性实验技术我们进行了一些研究和开发工作，在一般的检测性验证性实验的基础上，增加了大量的设计性、研究性实验，内容涵盖水处理、大气污染控制、固废处理与处置、环境噪声等各个方面，实验从初步学习如何设计实验到研究一个全新的课题。

本书可供环境工程领域科研和工程技术人员参考，也可作为高等学校专业实验指导书，供环境类专业学生使用。

本书由尹奇德、王琼、夏畅斌、邹鹏、刘志华编著。另外，在本书编著过程中，尹令实、邓永强、刘道根、谭万春、刘春华、曾经、彭青林、宋剑飞、蒋朝晖、张玲、罗彬、散灵丹、杨洁、吴欢等参与了录入、绘图、校对等工作，在此表示感谢。

本书出版获得了长沙理工大学和湖南省自科基金（08JJ3021）的资助。在编著过程中参阅了一些专家、学者的相关文献和书籍，并得到了广州粤能电力科技开发有限公司、广东电网公司电力科学研究院、江西省电力试验研究院、湖南大学、武汉大学等单位的指导，在此一并表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，本书可能存在许多疏漏，不足之处在所难免，敬请同行和读者批评指正。

编著者

2009年3月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 实验的教学目的 .....        | 1  |
| 1.2 实验的基本程序 .....        | 1  |
| 1.3 实验的教学要求 .....        | 2  |
| 1.4 设计性、研究性实验 .....      | 2  |
| 2 实验的设计 .....            | 5  |
| 2.1 实验设计简介 .....         | 5  |
| 2.1.1 实验设计的目的 .....      | 5  |
| 2.1.2 实验设计的几个基本概念 .....  | 6  |
| 2.1.3 实验设计的应用 .....      | 7  |
| 2.1.4 实验设计的步骤 .....      | 7  |
| 2.2 单因素实验设计 .....        | 8  |
| 2.2.1 均分法和对分法 .....      | 8  |
| 2.2.2 0.618 法 .....      | 9  |
| 2.2.3 分数法 .....          | 10 |
| 2.2.4 分批实验法 .....        | 12 |
| 2.3 双因素实验设计 .....        | 12 |
| 2.3.1 从好点出发法 .....       | 13 |
| 2.3.2 平行线法 .....         | 13 |
| 2.4 多因素正交实验设计 .....      | 13 |
| 2.4.1 正交表与正交实验方案设计 ..... | 14 |
| 2.4.2 正交实验分析举例 .....     | 16 |
| 3 误差分析与实验数据处理 .....      | 19 |
| 3.1 误差分析 .....           | 19 |
| 3.1.1 真值与平均值 .....       | 19 |
| 3.1.2 误差与误差的分类 .....     | 20 |
| 3.1.3 准确度与精密度 .....      | 22 |
| 3.1.4 误差分析 .....         | 23 |
| 3.2 实验数据整理 .....         | 24 |
| 3.2.1 有效数字及其运算 .....     | 24 |
| 3.2.2 可疑观测值的取舍 .....     | 25 |
| 3.3 实验数据处理 .....         | 26 |
| 3.3.1 方差分析 .....         | 26 |
| 3.3.2 实验数据的表示法 .....     | 36 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>4 实验样本的采集与保存</b>        | 46  |
| 4.1 水样的采集与保存               | 46  |
| 4.1.1 水样的采集                | 46  |
| 4.1.2 水样的保存                | 48  |
| 4.2 气体样本的采集与保存             | 54  |
| 4.2.1 气体样本的采样              | 54  |
| 4.2.2 气体样本的保存              | 58  |
| 4.3 固体样本的采集与保存             | 59  |
| 4.3.1 固体样本的采集              | 59  |
| 4.3.2 固体样本的保存              | 62  |
| <b>5 水处理实验</b>             | 63  |
| 5.1 常用指标及分析方法              | 63  |
| 5.1.1 表征酸碱性                | 63  |
| 5.1.2 表征感官性状               | 65  |
| 5.1.3 表征有机物类               | 66  |
| 5.1.4 气体类                  | 70  |
| 5.1.5 某些特定物质               | 70  |
| 5.2 水处理实验                  | 72  |
| 5.2.1 混凝实验                 | 72  |
| 5.2.2 絮凝沉淀实验               | 78  |
| 5.2.3 成层沉淀实验               | 81  |
| 5.2.4 过滤实验                 | 85  |
| 5.2.5 气浮实验                 | 89  |
| 5.2.6 活性炭吸附实验              | 93  |
| 5.2.7 离子交换实验               | 97  |
| 5.2.8 加氯消毒实验               | 102 |
| 5.2.9 膜分离实验                | 105 |
| 5.2.10 电渗析实验               | 108 |
| 5.2.11 曝气设备充氧性能的测定         | 113 |
| 5.2.12 工业污水可生化性实验          | 119 |
| 5.2.13 活性污泥性质的测定           | 124 |
| 5.2.14 完全混合曝气池处理污水实验       | 126 |
| 5.2.15 间歇式活性污泥法 (SBR 法) 实验 | 129 |
| 5.2.16 高负荷生物滤池实验           | 131 |
| 5.2.17 厌氧消化实验              | 134 |
| 5.2.18 酸性污水升流式过滤中和及吹脱实验    | 140 |
| * 5.2.19 城市污水深度处理及回用技术与研究  | 142 |
| * 5.2.20 工业废水处理试验与研究       | 143 |
| * 5.2.21 微电解处理制药工业废水的试验与研究 | 144 |
| <b>6 大气污染控制实验</b>          | 146 |
| 6.1 常用指标及分析方法              | 146 |

|         |                                             |     |
|---------|---------------------------------------------|-----|
| 6.1.1   | 颗粒物 .....                                   | 146 |
| 6.1.2   | 二氧化硫 (SO <sub>2</sub> ) .....               | 147 |
| 6.1.3   | 甲醛 .....                                    | 148 |
| 6.2     | 粉尘物理性质的测定 .....                             | 149 |
| 6.2.1   | 粉尘真密度测定 .....                               | 149 |
| 6.2.2   | 粉尘比电阻的测定 .....                              | 151 |
| 6.2.3   | 粉尘质量分散度测定 .....                             | 154 |
| 6.3     | 除尘器性能的实验 .....                              | 158 |
| 6.3.1   | 电除尘器电晕放电特性实验 .....                          | 158 |
| 6.3.2   | 旋风除尘器性能测定 .....                             | 160 |
| 6.3.3   | 袋式除尘器性能测定 .....                             | 166 |
| * 6.3.4 | 文丘里洗涤器性能实验 .....                            | 172 |
| 6.4     | 气态污染物控制实验 .....                             | 177 |
| 6.4.1   | 碱液吸收法净化气体中的 SO <sub>2</sub> .....           | 177 |
| 6.4.2   | 活性炭吸附净化气体中的 NO <sub>x</sub> .....           | 182 |
| 6.4.3   | 机动车尾气的测定 .....                              | 185 |
| * 6.4.4 | 气态挥发性有机物 (VOCs) 污染控制实验研究 .....              | 189 |
| 7       | 固体废物处理与处置实验 .....                           | 192 |
| 7.1     | 常用指标及分析方法 .....                             | 192 |
| 7.1.1   | 物理组成 .....                                  | 192 |
| 7.1.2   | 含水率 .....                                   | 192 |
| 7.1.3   | 挥发性物质与灰分 .....                              | 192 |
| 7.1.4   | 元素分析 .....                                  | 193 |
| 7.1.5   | 热值 .....                                    | 193 |
| 7.1.6   | 容重与空隙率 .....                                | 193 |
| 7.1.7   | 耗氧速率 (velocity of oxygen consumption) ..... | 194 |
| 7.2     | 固体废物处理与处置实验 .....                           | 194 |
| 7.2.1   | 有机固体废物热值测定 .....                            | 194 |
| 7.2.2   | 固体废物的风力分选实验 .....                           | 197 |
| 7.2.3   | 固体废物的重介质分选实验 .....                          | 201 |
| 7.2.4   | 好氧堆肥模拟实验 .....                              | 202 |
| 7.2.5   | 生活垃圾的渗滤实验及渗滤液的处理方案设计 .....                  | 205 |
| 7.2.6   | 热解焚烧条件实验 .....                              | 207 |
| 7.3     | 固体废物资源化减量化无害化技术研究实验 .....                   | 209 |
| 7.3.1   | 污泥浓缩实验 .....                                | 209 |
| * 7.3.2 | 废旧轮胎热解资源化研究实验 .....                         | 212 |
| * 7.3.3 | 有害废弃物固化后的性能测定实验 .....                       | 213 |
| * 7.3.4 | 电子线路板基材资源化研究 .....                          | 214 |
| * 7.3.5 | 矿化垃圾、废塑料等固体废物资源化工艺与机理的试验与研究 .....           | 215 |
| 8       | 环境噪声控制实验 .....                              | 218 |
| 8.1     | 概述 .....                                    | 218 |



|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 8.2 环境噪声控制实验 .....                         | 218 |
| 8.2.1 城市区域环境噪声测量 .....                     | 218 |
| 8.2.2 城市道路交通噪声测量 .....                     | 221 |
| 8.2.3 工业企业噪声排放测量 .....                     | 223 |
| 8.2.4 设备辐射噪声频谱的现场测量 .....                  | 225 |
| 8.2.5 材料吸声性能的实验室测量 .....                   | 226 |
| 附录 .....                                   | 230 |
| 附录1 常用正交实验表 .....                          | 230 |
| 附录2 $F$ 分布表 .....                          | 237 |
| 附录3 相关系数检验表 .....                          | 239 |
| 附录4 克罗勃斯 (Grubbs) 检验临界值 $T_\alpha$ 表 ..... | 239 |
| 附录5 含盐量与水电阻率计算图 .....                      | 240 |
| 参考文献 .....                                 | 241 |

# 1 绪 论

环境工程是建立在实验基础上的学科。许多污染现象的解释,污染治理技术、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,污水处理中混凝沉淀所用药剂种类的选择和生产运行条件的确定以及采用热解焚烧技术处理固体废物时工艺参数的确定等,都需要通过实验测定才能较合理地进行工程设计。

环境工程实验是环境工程学科的重要组成部分,是科研和工程技术人员解决环境污染治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:a. 掌握污染物在自然界的迁移转化规律,为环境保护提供依据;b. 掌握污染治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;c. 开发新的污染治理技术和设备;d. 实现污染治理设备的优化设计和优化控制;e. 解决污染治理技术开发中的放大问题。

## 1.1 实验的教学目的

实验教学的宗旨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:a. 加深学生对基本概念的理解,巩固新的知识;b. 使学生了解如何进行实验方案的设计,并初步掌握环境工程实验研究方法和基本测试技术;c. 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。

## 1.2 实验的基本程序

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

### (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、实验装置、实验步骤、测试项目和测试方法等内容。

### (3) 实验研究

主要内容包括:a. 根据设计好的实验方案进行实验,按时进行测试;b. 收集实验数据;c. 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:

a. 通过实验掌握了哪些新的知识; b. 是否解决了提出研究的问题; c. 是否证明了文献中的某些论点; d. 实验结果是否可用于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; e. 当实验数据不合理时,应分析原因,提出新的实验方案。

### 1.3 实验的教学要求

#### (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: a. 实验目的和主要内容; b. 需测试项目的测试方法; c. 实验注意事项; d. 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,必须对数据进行科学的整理分析,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

编写实验报告是实验教学必不可少的环节,这一环节的训练可为学生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: a. 实验目的; b. 实验原理; c. 实验装置和方法; d. 实验数据和数据整理结果; e. 实验结果讨论。

### 1.4 设计性、研究性实验

环境类专业是一个综合性很强的学科,然而长期以来,环境工程实验的教材形成了一种传统的模式,它指出实验的目的要求、阐明实验的基本原理、描述实验的仪器设备并介绍实验的方法和步骤。学生阅读了这样的教材后,只要按部就班地在实验室已安排好的仪器设备上进行调试、测量、记录,并进行适当的数据处理,就可以得出结果,完成实验。这样的实验教材,对于让学生初步学习如何进行实验、学会基本仪器的使用、加深对理论的了解,都是有益的,也是必要的。但仅有这样的实验是不够的。这在一定程度上限制了学生的主动性与积极性,难以激发他们独立思考的兴趣和激情,因而不利于创新人才的培养。

本书在一般的“检测性、验证性实验”的基础上,增加了大量“设计性、研究性实验”。对于“设计性、研究性实验”,要求学生通过查阅有关书籍、文献资料,了解和掌握与课题

有关的国内外技术状况、发展动态,并在此基础上,根据实验课题要求和实验室条件,提出具体的实验方案设计,包括实验工艺技术路线、实验条件要求、实验计划进度等。虽然这种实验一般要花费较多的时间,而且往往要经历某些失败,但却是培养学生独立从事科学研究工作能力特别是创新能力所必需的。通过这样的实验,学生能深入理解环境科学与工程原理,提高自学能力、动手能力、设计能力,激发创新精神。

设计性、研究性实验的研究报告内容应包括:a.课题的调研;b.实验方案的设计;c.实验过程的描述;d.实验结果的分析讨论;e.实验结论;f.参考文献等。

设计性、研究性实验,使学生经历“三个全面”的过程,即:经历一次全面分析研究问题的过程,实验技能得到全面的锻炼,综合能力得到全面的提升。具体的培养方式和要求如下。

#### (1) 实验题目和内容

实验题目的设计是设计性、研究性实验的关键。实验题目要体现内容、难度适中和可操作性强。内容结合学科的发展,使学生能体会到学科发展的最新动态;难度适中体现在适合本科生的实际水平,控制在使学生努力之后可以完成的程度,使学生有信心、有能力完成,并得到相应的锻炼;可操作性是要求实验的题目与实验室的条件、指导教师的研究方向相一致,避免出现实验过程失控的现象。

实验内容以环境科技的发展方向、承担的研究项目和现有基础为依托,结合本科生创新人才的培养要求。开设设计性、研究性实验,每个实验课题宜在一个大题目下,设若干个分题,当实验的学生较多时,可以避免出现题目重复现象,确保实验质量,同时也有利于实验难度和可操作性控制。

#### (2) 实验方案讨论与确定

与学生进行实验方案的讨论是设计性、研究性实验的另一关键点。本科生不同于研究生,提出的实验方案会出现各方面的不合理,需要指导老师予以具体分析,积极引导,协助确定一个切实可行的实验方案。同时,实验方案的讨论也是对学生发现问题、分析问题和创新能力的重要培养锻炼过程。

#### (3) 实验目标与要求

① 独立文献查阅与检索 学生应在了解实验背景、目的及基本内容后,学习和掌握文献资料的查阅、检索和应用,独立进行文献查阅与检索工作,完成实验方案的设计。

② 自主实验研究 在巩固实验操作技能的基础上,学习实验研究技术。在指导教师的辅助与引导下,自主完成实验装置的装配、分析测定试剂配制与仪器准备;自主运行实验装置,掌握实验数据记录格式设计、数据整理与分析方法;在指导教师的督导下,学习并实施相关大型分析仪器的分析操作。

③ 科学分析推导 要求学生学习和初步掌握对实验数据的科学分析与推演方式。掌握依据实验结果推演到结论的思维过程,巩固所学的基础知识和相关专业知识,培养和提高科学研究能力。

④ 创新思维 and 能力的提高 通过整个实验研究过程,培养和锻炼发现问题、分析问题和解决问题的综合能力,使主观能动性、创新思维和能力得到启发和提高。

#### (4) 教学过程

① 查阅资料、提出实验方案 这一过程要求学生通过查阅有关书籍、文献资料,了解和掌握与课题有关的国内外技术状况、发展动态,并在此基础上,根据实验课题要求和实验室条件,提出具体的书面实验方案设计,包括提出实验工艺技术路线与实验装置、实验条件

要求、测试项目和测试方法、实验计划进度等。

② 方案的讨论与确定 指导教师在对实验方案审议的基础上,与学生开展讨论。由学生介绍实验方案,指导教师根据可行性、实验室条件等因素对方案进行修正,使之具有可操作性,满足实验目的要求,在尊重学生思路和实验要求的前提下,确定实验方案。

③ 实验室试验 按确定的实验方案,在实验室由学生自己动手准备必要的实验材料、搭置实验装置,开展具体的试验和测试工作。指导教师负责现场指导,解答学生试验中遇到的难题,启发学生深入思考,创造必要的实验条件,如分析条件、必要的设备材料等。

④ 实验总结 由学生自主对实验结果数据进行分析、总结,教师负责指导和答疑,这一过程使学生分析问题的能力得到锻炼和提高,最终按要求编写出实验研究报告。

#### (5) 注意事项

① 实验时数、人数 与验证性、演示性等传统实验不同,设计性、研究性实验要经过资料查阅、方案讨论、较长的实验过程和总结阶段等。因此,需要足够的实验时间来保证开放性实验教学的质量,实验时数宜大于 36 学时。为确保在实验过程中学生得到独立的锻炼,一个子课题的实验人数以 3~5 人为宜。

② 实验条件 设计性研究性实验课题方向较多、内容较新,实验过程中所需要的实验装备类型较多,先进性要求也较高,创造较好的实验条件是综合开放性实验开设成功的重要方面。同时,在学生设计实验方案之前,应将实验条件告诉学生,避免出现实验方案与实验条件脱节,挫伤学生实验积极性的现象。

对于工艺实验,为避免学生在分析测试上耗费过多的时间,在有限的时间内达到实验目的,在实验条件上需要创造较好的实验分析条件,包括提供部分配置好的分析试剂等。

## 2 实验的设计

### 2.1 实验设计简介

#### 2.1.1 实验设计的目的

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,以便使用最少的人力、物力和时间获得满足要求的实验结果。广义地说,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、确定量测精度要求、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步骤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 2-1 是 3 种不同的实验设计得到的结果。图 2-1 和图 2-2 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,就要同时调整  $k_1$  和  $L_u$ 。由图 2-2 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,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(表 2-1 中第 4 天 6 个点,第 20 天 6 个点)

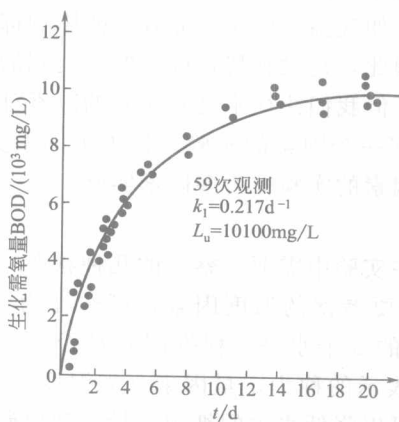


图 2-1 20d、59 次观测的 BOD 曲线

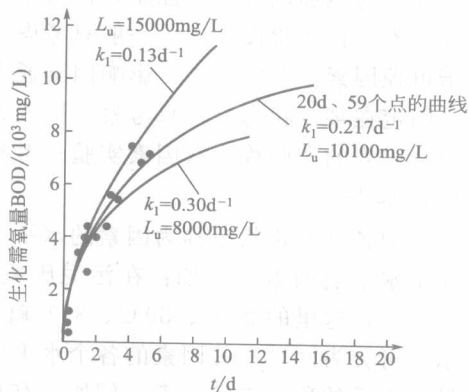


图 2-2 5d、30 次观测的 BOD 曲线

表 2-1 三种 BOD 实验设计所得结果

| 实验安排                  | 参数估算值               |                     | 参数的协方差  |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------|
|                       | $k_1/\text{d}^{-1}$ | $L_0/(\text{mg/L})$ |         |
| 20d, 59 次观测           | 0.22                | 10100               | -0.85   |
| 0~5d, 30 次观测          | 0.19                | 11440               | -0.9989 |
| 第 4 天 6 次, 第 20 天 6 次 | 0.22                | 10190               | -0.63   |

测试次数最少，且其参数估算值结果与 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，使实验的工作量显著减少。如果实验点安排不好（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，也是得到可信的实验结果的重要保证。

2.1.2 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一一对应的数据，并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

在实验之前，明确实验目的，找出需要解决的主要问题，并根据实验中的不同问题，利用数学原理、科学安排实验，以迅速找到最佳的实验方法。

(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，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，以更好地降低水中的浊度，选定水样中的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。

(4) 因素

对实验指标有影响的条件称为因素。有一类因素，在实验中可以人为地加以调节和控制，称为可控因素。例如碱液吸收法净化气体中的 SO<sub>2</sub> 实验中吸收液的流量和气体的流量可以通过控制阀调节，属于可控因素。另一类因素，由于自然条件和设备等条件的限制，暂时还不能人为地加以调节和控制，称为不可控因素。例如气温、风对沉淀效率的影响都属于不可控因素。在实验设计中，一般只考虑可控因素。因此，凡没有特别说明的，提到的因素均是指可控因素。在实验中，影响因素通常不止一个，但我们往往不是对所有的因素都加以考察。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，称为单因素实验；考察两个因素的实验称为双因素实验；考察两个以上因素的实验称为多因素实验。

(5) 水平

因素的各种变化状态称为因素的水平。某个因素在实验中需要考察它的几种状态，就叫它是几个水平的因素。例如：在污泥厌氧消化实验时要考察的温度因素，可选择为 25℃、30℃、35℃，这里的 25℃、30℃、35℃就是温度因素的 3 个水平。根据因素是否可以用数量表示，可分为两种：凡因素的各个水平能用数量来表示的称为定量因素（如温度），不能用数量来表示的称为定性因素。例如，有几种消毒剂可以降低水中的细菌含量，现要研究哪种消毒剂较好，各种消毒剂就表示消毒剂这个因素的各个水平，不能用数量表示，即是定性



因素。定性因素在多因素实验中会经常出现,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。

### 2.1.3 实验设计的应用

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,包括以下3方面的应用。

① 在生产过程中,人们为了达到优质、高产、低耗等目的,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,可以使我们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  $\frac{dy}{dt}|_{t=0} = k_1 L_u$ , 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  $L_u$  的变化而得到补偿(图2-2),故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 当可以用几种形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来保证实验向我们提供可靠的信息,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2-3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。

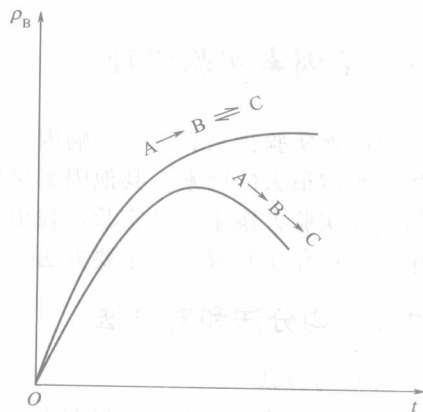


图2-3  $\rho_B$  与  $t$  的关系

### 2.1.4 实验设计的步骤

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。我们不可能通过一次实验把这些问题都解决,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。又如,气体中  $\text{SO}_2$  的吸收净化实验中,不同的吸收剂、不同的吸收剂浓度、气体流速、吸收液流量等因素均会影响吸收效果,可在以往实验的基础上,控制吸收剂浓度和吸收剂流量在一定水平,考察不同种类吸收剂和气体流速对吸收效果的影响。

## (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;三个以上因素的问题,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的部分基本方法,原理部分可根据需要参阅有关书籍。

# 2.2 单因素实验设计

单因素实验指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。在单因素实验设计中,主要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。下面主要介绍单因素优化实验设计的主要方法。

## 2.2.1 均分法和对分法

### (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 2-4 所示。



图 2-4 均分法实验点

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

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。

均分法是一种比较传统的实验方法。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

采用对分法时,每次实验点均取在实验范围的中点。设实验范围为  $[a, b]$ ,中点公式为

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

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