



全国高等院校环境科学与工程统编教材

# 环境工程综合实验指导书

HUANJING GONGCHENG ZONGHE SHIYAN ZHIDAOSHU

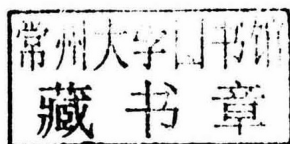
张惠灵 龚洁 主编

 华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

# 环境工程综合实验指导书

主 审 冯 涛  
主 编 张惠灵 龚 洁  
副主编 范先媛 陈永亮



华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 提 要

本书针对环境工程专业实验教学目标的要求,设置了三种不同层次的实验:基础性实验、综合性实验以及创新性实验。本书内容包括:环境化学、环境工程微生物学、环境监测、水污染控制工程、大气污染控制工程、噪声污染控制、固体废物处理与处置对应的实验项目以及与实践环节对应的环境仿真实验。

本书可作为高等学校环境工程、环境科学及其他相关专业的实验教材,也可供环境工程领域科研和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

环境工程综合实验指导书/张惠灵,龚洁主编. —武汉:华中科技大学出版社,2019.6  
全国高等院校环境科学与工程统编教材  
ISBN 978-7-5680-5201-6

I. ①环… II. ①张… ②龚… III. ①环境工程-实验-高等学校-教材 IV. ①X5-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 091852 号

### 环境工程综合实验指导书

Huanjing Gongcheng Zonghe Shiyan Zhidaoshu

张惠灵 龚洁 主编

策划编辑:王新华

责任编辑:李佩 王新华

封面设计:潘群

责任校对:李琴

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录排:武汉正风天下文化发展有限公司

印刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:15

字数:390千字

版次:2019年6月第1版第1次印刷

定价:38.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

随着党中央、国务院对生态环境保护工作的日益重视,社会对环境工程专业人才的需求也在逐渐增加,同时对环境工程专业人才综合素质也提出了更高的要求。实验教学是环境工程学科重要的实践环节,是培养具有工程应用能力和创新意识的高素质环境工程专业人才的重要手段。本书以能力培养为核心,将环境工程专业课程与工程实际问题相结合,设置基础性、综合性、创新性三种不同层次的实验;利用环境仿真软件实操加深学生对水污染控制工程、大气污染控制工程、固体废弃物处理与处置工艺等基本理论的理解,培养学生设计实验方案、使用实验仪器设备、分析与处理实验数据的基本技能,提升学生专业技能和工程应用能力,使其在就业中体现出良好的竞争优势。

本书按照教育部环境科学与工程教学指导委员会提出的环境工程本科教学规范编写,内容包括绪论、环境化学实验、环境工程微生物学实验、水污染控制实验、大气污染控制实验、固体废物处理与处置实验、噪声污染控制实验、环境监测实验、环境仿真实验等。为加强学生科研创新能力的培养,设置了基础性、综合性、创新性三种不同层次的实验,实验标题中标注有“△”号的为综合性实验,标注有“\*”号的为创新性实验。

本书由武汉科技大学张惠灵、龚洁担任主编,范先媛、陈永亮担任副主编,武汉科技大学冯涛教授主审。本书在编写过程中得到了武汉科技大学资源与环境工程学院领导与各系教师的帮助与支持,蒋炘鑫、胡传智、田立欣、周华、陈博彧、代馨悦、王文沛、喻红艳、蒋杉等同学参与了录入、绘图、校对等工作。同时本书的编写由北京东方仿真软件技术有限公司提供了仿真软件、数字化教学资源以及大量的专业设备实物图片,在此表示诚挚的感谢。

本书可作为高等学校环境工程、环境科学专业以及其他相关专业的实验教材,也可供环境工程领域科研和工程技术人员参考。

由于编者水平有限,书中难免存在不当之处,本教材也将在实践过程中不断改进,恳请读者批评指正。

编 者

2019年1月

# 目 录

## 第一章 绪论 /1

第一节 环境工程实验的教学目的与要求 /1

第二节 实验设计 /2

第三节 误差与数据处理 /10

## 第二章 环境化学实验 /15

实验一 苯酚的光降解速率常数 /15

实验二 有机物的正辛醇-水分配系数 /17

△实验三 交通干线附近空气中 NO 和 NO<sub>2</sub> 的含量日变化规律 /19

## 第三章 环境工程微生物学实验 /22

实验一 显微镜的使用 /22

实验二 培养基的制备与灭菌 /25

实验三 细菌纯种分离、培养和接种技术 /28

实验四 细菌的染色、显微镜观察 /30

实验五 水中细菌菌落总数的测定 /32

△实验六 活性污泥微生物菌种形态的观察和分析 /35

\*实验七 紫外灭菌实验的设计及效果研究 /39

## 第四章 水污染控制工程实验 /42

实验一 自由沉淀实验 /42

实验二 过滤及反冲洗实验 /45

实验三 混凝实验 /47

实验四 离子交换实验 /51

实验五 活性炭吸附实验 /54

实验六 加压溶气气浮实验 /58

实验七 辐流式沉淀池运行实验 /60

实验八 生物接触氧化池运行实验 /61

实验九 纳滤反渗透膜分离实验 /63

实验十 UASB 反应器实验 /66

△实验十一 MBR 工艺污水处理实验 /69

△实验十二 A<sup>2</sup>/O 城市污水处理工艺实验 /72

\*实验十三 水处理剂的制备与应用实验 /74

## 第五章 大气污染控制工程实验 /77

实验一 粉尘真密度的测定 /77

实验二 空气污染控制设备流速、流量、压力损失的测定 /79

实验三 板式静电除尘器粉尘浓度与除尘率的测定 /82

△实验四 旋风除尘器性能的测定 /84

△实验五 袋式除尘器性能的测定 /88

△实验六 湿式喷淋水浴除尘器性能的测定 /93

\*实验七 袋式除尘器滤料性能的测试 /97

## 第六章 固体废物处理与处置实验 /102

实验一 固体废物的破碎 /102

实验二 固体废物的粒度分析——筛分分析法 /104

实验三 固体物料的磁选 /106

实验四 固体废物的浮选 /108

实验五 危险废物的固化及浸出毒性鉴别 /110

实验六 污泥的脱水性能实验 /112

实验七 堆肥腐熟度测定 /113

实验八 激光粒度分析仪测定粒径分布 /114

△实验九 污泥板框压滤脱水综合实验 /116

## 第七章 噪声污染控制实验 /121

实验一 声级计的使用及声源设备噪声测量 /121

实验二 校园环境噪声测量 /124

实验三 材料吸声系数测定实验 /128

## 第八章 环境监测实验 /133

实验一 废水悬浮固体和浊度的测定 /133

实验二 化学需氧量的测定——重铬酸盐法 /136

实验三 五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)的测定——稀释与接种法 /139

实验四 氨氮的测定——纳氏试剂分光光度法 /145

实验五 总磷的测定——钼酸铵分光光度法 /148

实验六 水质总汞的测定——冷原子吸收分光光度法 /150

实验七 电感耦合等离子体发射光谱法对水中 32 种元素的测定 /157

实验八 环境空气 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的测定——重量法 /162

实验九 空气中二氧化硫的测定——甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法 /165

实验十 空气中氮氧化物(NO 和 NO<sub>2</sub>)的测定——盐酸萘乙二胺分光光度法 /170

---

实验十一	固体废物中多环芳烃的测定——高效液相色谱法	/174
实验十二	土壤和沉积物中砷的测定——微波消解/原子荧光法	/182
△实验十三	某污水处理厂运营管理监测	/186
△实验十四	校园空气质量监测	/190
△实验十五	城市道路交通噪声测量	/195
<b>第九章</b>	<b>环境仿真实验</b>	<b>/199</b>
实验一	城市污水 A <sup>2</sup> /O 工艺仿真实验	/199
实验二	生活垃圾焚烧尾气处理工艺仿真实验	/212
实验三	环境污染事故应急处理与监测仿真实验	/221
附录 A	常用质量标准化环境监测技术规范	/228
附录 B	各类监测分析方法测定项目	/231
参考文献		/232

# 第一章 绪 论

## 第一节 环境工程实验的教学目的与要求

环境工程是一门涉及多个学科交叉融合的专业。环境工程实验教学是培养高素质环境工程专业人才的重要环节。本书结合教育部环境科学与工程教学指导委员会提出的环境工程本科教学规范的建议,将本专业所需要开设的各门实验融为一体,并结合环境工程专业课程以及工程实际问题,设置了基础性、综合性( $\Delta$ 表示)、创新性(\*表示)三种不同层次的实验,内容包括环境化学、环境监测、环境工程微生物、水污染控制工程、大气污染控制工程、噪声污染控制、固体废物处理与处置对应的实验项目,以及与实践环节对应的环境仿真实验,可逐步巩固和加深学生对环境工程相关基础理论及主要污染治理技术的理解和认识,提高学生的实践能力。

本书的目的和任务是通过实验环节使学生掌握本专业的基础知识,掌握水污染控制工程、大气污染控制工程、固体废物处理与处置技术等基本污染控制技术及实验技能,其中包括实验设计、实验操作、仪器设备的使用、处理设施的基本调试、样品的监测分析、数据的统计及处理、实验报告的编写等综合技能的训练和培养;掌握正确的数据处理和图表绘制方法,培养学生运用所学理论进行科学研究、分析问题与解决问题的能力;并在环境仿真实操中,进一步结合工程实践,巩固和加深对所学基本原理的理解,提升学生的专业技能与工程应用能力。本书实现了理论教学与实验教学、操作实验与虚拟实验的有机结合,注重培养学生的专业基础素质、科研能力、工程应用和创新能力,体现环境工程的实验特色。

实验的教学要求如下。

### 1. 课前预习

为了保证实验质量,学生在进行实验课程之前必须认真预习实验内容,掌握实验目的、要求和原理,了解实验步骤以及实验装置的实际操作并写出简明的预习报告,其主要内容包括实验目的、实验内容、测试方法、所涉及的实验设备、注意事项及记录表格。

### 2. 实验设计

对部分创新实验,还需要学生自行检索与查阅有关文献资料,设计实验方案,包括实验目的、原理、装置组装以及操作步骤等。

### 3. 实验操作

学生实验前应仔细检查实验设备、仪器仪表是否运行正常。实验时,严格按照操作规程操作,观察实验现象,记录实验数据。实验结束后,要将实验设备和仪器仪表恢复原状,清理实验台面,将周围环境整理干净。

### 4. 实验数据处理

学会处理实验数据,以及图表的绘制方法,并通过实验现象以及数据进行分析,得出正确的实验结论。

## 5. 撰写实验报告

将实验结果整理编写成一份完整的实验报告,主要内容包括:①实验目的;②实验原理;③实验设备与试剂;④实验步骤;⑤数据分析及实验结果;⑥思考题。对于创新性实验报告,最后还要列出参考文献、实验报告重点给出实验数据的处理分析以及实验结果。要求整篇实验报告内容实事求是、分析全面、文字简练、撰写清晰、图表规范、结果正确。

## 第二节 实验设计

优化实验设计是在实验开展前根据实验目的及要解决的问题利用数学原理科学地安排实验,迅速寻求最佳实验方案。实验设计主要包括:明确实验目标、选择实验条件或参数、确定需要控制或改变的条件、选择实验方法、确定实验方案以及数据处理等。实验设计是科学研究和实际生产过程中的重要内容,通过实验设计可以更科学合理地安排实验,减少实验次数、节省实验时间、节约人力和物力,更快获取有用的信息。例如,在进行混凝沉淀效果实验的研究中,分别研究了药剂种类、投加量和反应 pH 值 3 个影响因素,每个因素分别设置 3 个水平。如果采用全面实验,需要 27 次才能完成,而采用正交实验,9 次即可完成。

优选法是根据科研课题和生产中的不同问题,采用数学原理,科学合理地安排实验点,减少实验次数,在最短时间内找到最佳点的一类方法,因此在环境工程实验中通常采用优选法来设计实验,其中包括单因素的黄金分割法、对分法和多因素的正交实验设计法。

### 一、单因素优化实验设计

通常将在实验中只有一个影响因素或者影响因素多但是只考虑一个对目标影响最大的因素,其他因素尽量保持不变的实验称为单因素实验。单因素优选法首先假定: $y=f(x)$ 是定义在区间 $(a,b)$ 的目标函数, $y$ 代表实验结果, $x$ 代表因素取值。在实验设计中,区间 $(a,b)$ 表示实验因素的取值范围。实验过程中用尽量少的实验次数,来确定 $f(x)$ 的最大值。在环境工程领域常用的单因素优选法包括对分法、黄金分割法、分数法、分批实验法等。

#### 1. 对分法

对分法的特点是每个实验点的位置都在实验区间的中点,每做一次实验,实验区间长度就缩短一半。具体方法:首先确定实验区间 $(a,b)$ ,则第一次实验点设在 $(a,b)$ 的中点 $x_1\left(x_1=\frac{a+b}{2}\right)$ 。若实验结果在 $(a,x_1)$ 这一侧,则去掉 $(x_1,b)$ 。第二次实验点则安排在 $(a,x_1)$ 的中点 $x_2\left(x_2=\frac{a+x_1}{2}\right)$ 。若实验结果在 $(x_1,b)$ 这一侧,则去掉 $(a,x_1)$ 这一侧,并在 $(x_1,b)$ 这一侧继续取点,直至选出合适的值。对分法的优点是每次实验将实验范围缩小 1/2,缺点是要求每次实验能确定下次实验的方向。

#### 2. 黄金分割法(0.618 法)

黄金分割法的基本方法:设实验范围为 $(a,b)$ ,则第一个实验点 $x_1$ 选在实验范围的 0.618 位置上,第二个实验点 $x_2$ 则取 $x_1$ 的对称点,即实验范围的 0.382 位置上。即

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

$$x_2 = a + 0.382(b - a) \quad (1-2)$$

如果  $f(x_1) > f(x_2)$ ,  $f(x_1) > f(a)$ ,  $f(x_1) > f(b)$ , 则极值点在  $(b, x_2)$  之间, 去掉  $(x_2, a)$ , 然后在余下范围内继续寻找点, 直到得出合适的结果, 如图 1-1 所示。



图 1-1 0.618 法示意图

例如:为了降低水中的 SS 值,可加入某种药剂,最佳投加量为 20~40 mg/L,通过 0.618 法找到此点,可先在实验范围的 0.618 处做第一个实验点,  $x_1 = 20 + 0.618 \times (40 - 20) = 32.36$  mg/L, 第二个试验点,  $x_2 = 20 + 0.382 \times (40 - 20) = 27.64$  mg/L。比较两次实验结果,如果  $x_1$  比  $x_2$  好,则去掉低于 27.64 mg/L 的那一部分,在  $(27.64, 40)$  区间内,再找到第三个实验点,  $x_3 = 27.64 + 0.618 \times (40 - 27.64) = 35.28$  mg/L;如果仍然是  $x_1$  点效果好,则去掉大于 35.28 的那一部分,剩下区间  $(27.64, 35.28)$  计算第四个实验点,  $x_4 = 27.64 + 0.382 \times (35.28 - 27.64) = 30.56$  mg/L。如果这一点效果比  $x_1$  好,则去掉大于 32.36 的那一部分,留下的区间按相同的方法继续做实验,最终找到最佳点。

### 3. 分数法

分数法又叫斐波那契数列法,是利用斐波那契数列进行单因素优化实验设计的一种方法,是由斐波那契(Fibonacci)数列  $(1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233 \dots)$  得出分数数列  $(1/2, 2/3, 3/5, 5/8, 8/13, 13/21, 21/34, 34/55, 55/89 \dots)$  然后用分数数列来安排实验点的一种优选法。

通常,在实验条件受限只能做几次实验时,采用分数法较好,实验数只能取整数。在使用分数法进行单因素优选时,首先根据实验区间确定分数。

分数法实验点的位置,可用公式(1-3)和公式(1-4)求得:

$$\text{第一个实验点} = (\text{大数} - \text{小数}) \times \frac{F_n}{F_{n+1}} + \text{小数} \quad (1-3)$$

$$\text{新实验点} = (\text{大数} - \text{中数}) + \text{小数} \quad (1-4)$$

式中:中数为已实验的实验点数值。

新实验点安排在余下范围内与已实验点对称的位置上,新实验点到余下范围中点的距离等于已实验点到中点的距离,同时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 1-2),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(1-4)。

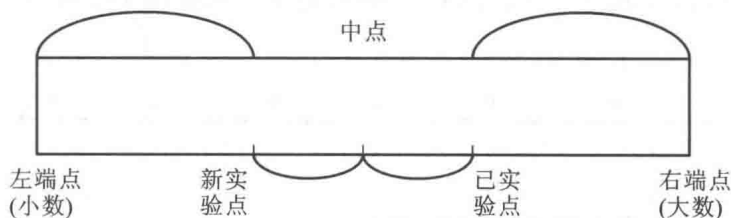


图 1-2 分数法实验点位置示意图

表 1-1 列出了分数法实验点位置与实验次数。

表 1-1 分数法实验点位置与实验次数

分数 $F_n/F_{n+1}$	第一批实验点位置	等分实验范围的份数 $F_{n+1}$	实验次数
2/3	2/3, 1/3	3	2
3/5	3/5, 2/5	5	3
5/8	5/8, 3/8	8	4
8/13	8/13, 5/13	13	5
13/21	13/21, 8/21	21	6
21/34	21/34, 13/34	34	7
34/55	34/55, 21/55	55	8

4. 分批实验法

为缩短实验时间,可采用同一批次多个实验同时进行的方法,即分批实验法。该方法又可分为均分法和比例分割法。

(1) 均分法。

具体实验步骤:如果要做  $n$  次实验,就把实验范围等分成  $n+1$  份,在各个分点上做实验,如图 1-3 所示。



图 1-3 均分法示意图

做第一批实验,比较实验结果,留下效果好的点及相邻左右一段,然后把这两段都等分为  $n+1$  段,在分点处继续做第二批实验,直至得出合适的值。均分法优点是只需要把实验放在等分点上,既可以同时安排,又可以一个接一个地安排,缺点是实验次数较多。

(2) 比例分割法。

具体实验步骤:每批设定  $2n+1$  个实验,先把实验范围划分为  $2n+2$  段,相邻两段长度为  $a$  和  $b(a>b)$ ,长短段比例为

$$\lambda = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{n+5}{n+1}} - 1 \right) \tag{1-5}$$

在  $2n+1$  个分点上做第一批实验,比较实验结果,在较好的实验点左右留下一长一短,然后把  $a$  分成  $2n+2$  段,相邻两段为  $a_1, b_1 (a_1>b_1)$ ,且  $a_1=b$ ,如图 1-4 所示,依次划分下去,直至找到合适的值。

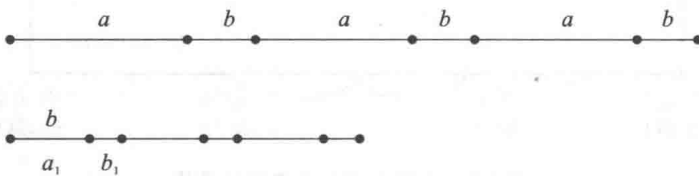


图 1-4 比例分割法示意图

## 二、多因素正交实验设计

在实际的科学研究及生产过程中,影响因素往往是复杂多样的。实验结果往往受多个因素的影响,而同一因素,其不同水平也会引起实验结果的变化,我们将这种实验中需要考虑多个因素,而每个因素又要考虑多个水平的实验称为多因素实验。如果将不同因素和水平全面搭配,进行全面实验设计,则实验次数非常多,在有限的时间、人力和物力条件下,难以完成这样的实验组合。例如,某个实验考察 4 个因素,每个因素 3 个水平,全部实验要  $3^4 = 81$  次才能完成,这样实验在短期内是无法实现的。正交实验设计是研究多因素多水平实验的一种高效、快速、经济的实验设计方法,其在优选区内利用正交表科学地安排实验点,通过实验结果的数据分析,缩小优选范围,或者得到较优的多因素实验方法。

### 1. 正交表

正交表是在正交实验设计中合理安排实验,以及对数据进行统计分析的工具。

常用正交表的形式:

$$L_n(r^m) \quad (1-6)$$

式中: $L$ ——正交表;

$n$ ——要做的实验次数;

$r$ ——因素的水平数;

$m$ ——允许安排的因素个数。

正交表可分为如下几种形式。

(1) 等水平正交表:指各个因素的水平数都相等的正交表。如  $L_4(2^3)$ (表 1-2),如果以它安排实验,需要做 4 次实验,最多考察 3 个 2 水平的因素。

表 1-2  $L_4(2^3)$  正交表

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

(2) 混合水平正交表:指实验中各因素的水平数不相等的正交表。

如果被考察因素的水平不同,应采用混合型正交表。如  $L_8(4 \times 2^4)$ (表 1-3),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 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。

表 1-3  $L_8(4 \times 2^4)$  正交表

实 验 号	列 号				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1
7	4	1	2	2	1
8	4	2	1	1	2

## 2. 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。实验前需明确实验需要解决的问题,并确定可以量化的指标。例如,在进行混凝沉淀效果实验的研究中,实验目的是提高混凝沉淀效果,实验指标为上清液的浊度。

(2) 选择因素,列出因素水平表。在众多影响因素中,需通过文献以及实际情况优选对实验指标影响较大的因素,去掉不可控因素并确定每个因素的范围和水平。因素水平选定后,便可列出因素水平表。

(3) 选择合适的正交表。常用的正交表有几十个,可结合实验的实际情况灵活选择,尽可能选择较小的正交表。对于水平数相等的实验,正交表的列数大于或等于因素及交互作用所占列数。对于水平数不等的实验,混合正交表的某一水平的列数应大于或等于相应水平的因素数。

(4) 表头设计。表头设计就是将因素和交互作用合理地安排到正交表的各列中。若无交互作用,各因素可以随意安排。若有交互作用,各因素需按对应的正交表的交互作用列表安排到相应的列中。

(5) 确定实验方案。根据表头设计,将正交表每一列(不含交互作用列)的不同水平数字换成对应因素的水平值。

## 3. 实验结果分析

实验按照正交表进行,记录实验数据,分析每组条件下的评价指标值。通过正交实验结果可以得到因素中哪些影响大,哪些影响小;各影响因素中,哪个水平的结果更好,从而可以找到最佳的实验条件。

一般实验分析步骤如下。

(1) 计算实验指标评价。将每组实验数据进行分析处理后,求出相应的评价指标值。

(2) 计算各列的水平效应值  $K_i$ 、均值  $\bar{K}_i$  和极差  $R$ 。

各列的  $K_i$  = 该列中  $i$  水平相对应的指标值之和。

$$\text{各列的 } \bar{K}_i = \frac{K_i}{\text{该列中 } i \text{ 水平的重复次数}} \quad (1-7)$$

各列的极差  $R = \text{该列中 } \bar{K}_i \text{ 中最大值和最小值之差}$ , 极差  $R$  是衡量数据波动大小的重要指标,  $R$  越大的因素越重要。

(3) 比较各因素的  $R$ , 根据大小得出因素的主次关系。

(4) 比较同一因素下每个水平效应值  $\bar{K}_i$ , 使指标达到满意结果的值为较理想的水平, 从而确定最佳实验条件。

#### 4. 正交实验分析实例

拟通过混凝法对某废水进行处理, 混凝药剂采用聚合氯化铝、聚丙烯酰胺(PAM)。原水 SS 值约为 350 mg/L, 试通过正交实验进行实验设计。

(1) 实验方案的确定。

① 实验目的: 找出影响混凝沉淀效果的主要因素及最优实验条件, 本实验以出水 SS 值为评价指标。

② 挑选因素: 根据文献资料, 对混凝实验中采用的混凝药剂(聚合氯化铝、聚丙烯酰胺(PAM))的投加量以及实验的 pH 值作为考察因素。

③ 确定各因素水平: 根据实际应用经验, 确定每个因素选用 4 个水平, 结果如表 1-4 所示。

表 1-4 正交实验因素与水平

因素 水平	聚合氯化铝(A)/ (mg/L)	聚丙烯酰胺(B)/ (mg/L)	硫酸亚铁(C)/ (mg/L)	pH 值(D)
1	0.6	0.20	0.5	3
2	0.9	0.25	1	5
3	1.2	0.30	1.5	7
4	1.5	0.35	2	9

④ 选择正交表: 根据以上所选择的因素与水平, 选择  $L_{16}(4^4)$  正交实验表, 如表 1-5 所示。

表 1-5  $L_{16}(4^4)$  正交实验表

列号 实验号	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3

续表

列号 实验号	1	2	3	4
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

⑤ 确定实验方案:根据已定的因素、水平及选用的正交表确定实验方案,得出正交实验方案表 1-6,共需进行 16 次实验,每组具体实验条件如表 1-6 各横行所示。

表 1-6 正交实验方案表  $L_{16}(4^4)$ 

因素 实验号	聚合氯化铝(A) /(mg/L)	聚丙烯酰胺(B) /(mg/L)	硫酸亚铁(C) /(mg/L)	pH 值(D)
1	0.6	0.20	0.5	3
2	0.6	0.25	1	5
3	0.6	0.30	1.5	7
4	0.6	0.35	2	9
5	0.9	0.20	1	7
6	0.9	0.25	0.5	9
7	0.9	0.30	2	3
8	0.9	0.35	1.5	5
9	1.2	0.20	1.5	9
10	1.2	0.25	2	7
11	1.2	0.30	0.5	5
12	1.2	0.35	1	3
13	1.5	0.20	2	5
14	1.5	0.25	1.5	3
15	1.5	0.30	1	9
16	1.5	0.35	0.5	7

## (2) 实验结果分析。

根据实验过程得出实验数据,对数据处理后得出实验指标,然后进行正交实验分析及方差

分析,具体做法如表 1-7 所示。

表 1-7 正交实验结果

序号	聚合氯化铝(A) /(mg/L)	聚丙烯酰胺(B) /(mg/L)	硫酸亚铁(C) /(mg/L)	pH 值(D)	出水 SS 值 /(mg/L)
1	1	1	1	1	120
2	1	2	2	2	92
3	1	3	3	3	96
4	1	4	4	4	82
5	2	1	2	3	113
6	2	2	1	4	73
7	2	3	4	1	85
8	2	4	3	2	69
9	3	1	3	4	102
10	3	2	4	3	123
11	3	3	1	2	98
12	3	4	2	1	65
13	4	1	4	2	134
14	4	2	3	1	92
15	4	3	2	4	86
16	4	4	1	3	73

① 填写评价指标:将每一实验条件下所得的出水 SS 值填入正交表右侧相应的评价指标栏内。

② 计算各列的水平效应值  $K$ 、均值  $\bar{K}$  及极差  $R$ ,将计算结果填到表 1-8 相应列中。

如计算聚合氯化铝投加量这一因素时,各水平的水平效应值  $K$  如下:

第 1 水平:  $K_1 = 120 + 92 + 96 + 82 = 390$ ;

第 2 水平:  $K_2 = 113 + 73 + 85 + 69 = 340$ ;

第 3 水平:  $K_3 = 102 + 123 + 98 + 65 = 388$ ;

第 4 水平:  $K_4 = 134 + 92 + 86 + 73 = 385$ 。

其均值  $\bar{K}$  分别为:

$\bar{K}_1 = 390/4 = 97.5$ ;

$\bar{K}_2 = 340/4 = 85$ ;

$\bar{K}_3 = 388/4 = 97$ ;

$\bar{K}_4 = 385/4 = 96.25$ 。

表 1-8 正交实验分析

名 称	参 数	聚合氯化铝(A)	聚丙烯酰胺(B)	硫酸亚铁(C)	pH 值(D)
SS 值	$K_1$	390	469	364	362
	$K_2$	340	380	356	393
	$K_3$	388	365	359	405
	$K_4$	385	289	424	343
	$\bar{K}_1$	97.5	117.25	91	90.5
	$\bar{K}_2$	85	95	89	98.25
	$\bar{K}_3$	97	91.25	89.75	101.25
	$\bar{K}_4$	96.25	72.25	106	85.75
	$R$	12.5	45	17	15.5

③ 结果分析:由表 1-8 的极差分析可以看出,影响混凝沉淀效果的出水 SS 值的因素主次顺序:聚丙烯酰胺>硫酸亚铁>pH 值>聚合氯化铝。

由表 1-8 中各因素水平值的均值可知,各因素中的较佳水平条件分别为聚合氯化铝投加量为 0.9 mg/L、聚丙烯酰胺投加量为 0.35 mg/L、硫酸亚铁投加量为 1 mg/L、pH=9,该实验结果同表中已做的最好实验结果(第 12 次实验)不一致,应将两个实验条件再各做实验加以比较,最后确定最佳实验条件。

### 第三节 误差与数据处理

#### 一、误差的基本概念

##### 1. 真值与平均值

真值是指实验的真实结果,由于仪器测试方法、环境、实验方法等因素的影响,往往我们无法测得真值(真实值)。如果我们对同一考察项目进行无限次的测试,然后根据误差分布定律正负误差出现的概率相等的概念,可以求得各测试值的平均值,在无系统误差的情况下,此值为接近于真值的数值。通常我们测试的次数总是有限的,用有限测试次数求得的平均值,只能是真值的近似值。

常用的平均值有下列几种:算术平均值、均方根平均值、加权平均值、中位值(或中位数)、几何平均值。

##### (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,算术平均值最接近真值。算术平均值定义为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-8)$$

式中: $\bar{x}$ ——算数平均值;

$x_i$ ——各次观测值, $i=1,2,3,\cdots,n$ ;

$n$ ——观测次数。