

SHUIZHI GONGCHENGXUE SHIYAN YU JISHU

水质工程学

实验与技术

◎郝瑞霞 吕 鉴 主编 ◎吴之丽 主审



北京工业大学出版社

水质工程学实验与技术

郝瑞霞 吕 鉴 主编
吴之丽 主审

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水质工程学实验与技术/郝瑞霞, 吕鉴主编. —北京: 北京工业大学出版社, 2006.2

ISBN 7-5639-1640-7

I. 水... II. ①郝... ②吕... III. 水质-水处理-技术
IV. TU991.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 010116 号

水质工程学实验与技术

郝瑞霞 吕 鉴 主编

※

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: 010-67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

※

2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷

787mm × 1 092mm 16开本 24.25印张 599千字

印数: 1~2 000册

ISBN 7-5639-1640-7/G·809

定价: 39.00元

前 言

水质科学与工程是建立在实验基础上的科学。水质科学与工程涉及的许多基本概念、专业理论、工程设计参数、操作条件、运行控制指标等均需要通过科学实验进行验证、分析、测试来决定,因此实验技术是进行科学研究、新技术开发、技术改造的必要手段,是科研和工程技术人员应该具备的专业技能。本书是我们结合 40 多年的专业教学经验,总结、提炼出来的与水质科学与工程有关的专业实验技术、实验操作过程和操作要领详解。水质科学与工程实验技术已经作为部分高等学校水务工程、给排水科学与工程和环境工程等相关专业的必修课程。

随着全球水资源危机和水环境污染的加剧,水质科学与工程技术、水环境保护和水资源的可持续开发与利用、水处理与水质恢复新方法和新技术研究、水处理设施的运行管理与挖潜改造等领域正在发挥越来越重要的作用,这就要求高等学校要注重学生综合能力和素质的培养和训练,尤其是实验操作技能、解决实际问题和创新能力方面的培养。本书正是以此为出发点,系统地、完整地介绍了水质科学与工程实验技术,内容涉及各项专业基础和专业实验方法、操作技能,还对实验项目安排、实验要求进行了介绍;同时考虑到水质科学与工程实验技术对相关知识和技术的需要,本书还包括了实验设计、误差分析与处理、常用实验设备与化学试剂、实验室质量保证与安全管理等相关内容。

本书在内容编排与组织上,力求体现系统性、完整性、实用性与新颖性的原则。在实验项目安排和实验装备设计上,结合现代水质科学与技术的发展,注重实验项目的可操作性、可设计性和开发创新性,重在培养学生独立分析与解决问题的能力。本书可以作为大专院校水务工程、给排水科学与工程和环境工程等相关专业本科生和研究生专业实验课程的教学用书,也可以作为给排水科学与工程、水务工程、环境工程等专业工程技术和研发人员的参考书。

本书共九章,由多位多年从事水质科学与工程教学科研工作的教师共同编写。第一章实验设计与数据处理,由张岩博士编写;第二章水力学实验技术,由李长平工程师编写,张英副教授审阅;第三章水处理微生物学实验技术,由郑晓英讲师编写;第四章水质化学分析实验技术,由郝瑞霞副教授编写;第五章水质仪器分析实验技术,由郝瑞霞副教授、张岩博士编写;第六章水处理实验技术,由吴珊副教授、曹相生博士编写;第七章室外给水管网实验技术,由吕鉴教授编写;第八章常用仪器、化学试剂、玻璃器皿,第九章实验室质量控制与安全管理,由郝瑞霞副教授编写。全书由郝瑞霞副教授、吕鉴教授主编,吴之丽教授主审。参加本书编写工作的还有王永胜、王俊安、曹可心、赵曼、段晓东、王俊娇等,在此对所有给予帮助和支持的同志一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者多提宝贵意见,使本书逐步臻于完善。

编 者

目 录

第一章 实验设计与数据处理	1
第一节 实验设计.....	1
第二节 单因素实验设计.....	3
第三节 多因素实验设计.....	7
第四节 实验误差分析.....	17
第五节 实验数据处理.....	23
第二章 水力学实验技术	49
第一节 水力学实验方法简介.....	49
第二节 水力学实验.....	59
实验一 静水压强实验.....	59
实验二 平面上的静水总压力实验.....	63
实验三 雷诺实验.....	65
实验四 虹吸原理实验.....	66
实验五 水击实验.....	67
实验六 流谱流线演示实验.....	69
实验七 流动显示实验.....	70
实验八 多媒体模拟实验.....	71
实验九 恒定总流能量方程实验.....	72
实验十 文丘里流量计率定实验.....	74
实验十一 动量方程实验.....	77
实验十二 沿程阻力实验.....	79
实验十三 局部阻力实验.....	82
实验十四 明渠非均匀流水面曲线实验.....	84
实验十五 离心泵性能实验.....	89
第三章 水处理微生物学实验技术	92
第一节 水处理微生物实验设备和操作技术.....	92
第二节 水处理微生物实验.....	100
实验一 显微镜的使用及细菌形态观察.....	100
实验二 革兰氏染色.....	101
实验三 培养基的制备和灭菌.....	103
实验四 微生物的纯种分离、培养及大肠菌群测定(一).....	104
实验五 细菌的计数.....	105
实验六 水中大肠菌群的测定(二).....	107
实验七 微生物特性菌群实验.....	109

实验八 活性污泥混合液耗氧速率的测定	109
第四章 水质化学分析实验技术	111
第一节 绪论	111
第二节 水质分析实验操作技术	116
第三节 水样的采集与保存	131
第四节 水样的预处理方法	134
第五节 水质分析实验	138
实验一 分析天平的称量练习	138
实验二 总不可滤残渣(悬浮物)和浊度的测定	142
实验三 滴定分析基本操作	144
实验四 水中碱度的测定(酸碱指示剂滴定法)	149
实验五 水中硬度的测定(络合滴定法)	152
实验六 水中 Cl^- 的测定(沉淀滴定法)	155
实验七 水中余氯的测定(氧化还原滴定法)	158
实验八 水中溶解氧的测定	160
实验九 水中高锰酸盐指数的测定	163
实验十 水中化学需氧量的测定(重铬酸钾法)	166
实验十一 水中生物化学需氧量的测定(碘量法)	170
实验十二 水中色度的测定(目视比色法)	175
实验十三 水中 pH 的测定(玻璃电极法)	177
第五章 水质仪器分析实验技术	179
第一节 现代仪器分析及其在水质分析中的应用	179
第二节 紫外-可见光吸收光谱实验技术	187
第三节 原子吸收光谱法实验技术	202
第四节 TOC/TN 测定仪及应用	218
第五节 分子荧光光谱法	224
第六节 色谱分离分析技术	230
第六章 水处理实验技术	256
第一节 概述	256
第二节 给水处理实验	258
实验一 混凝实验	258
实验二 过滤实验	264
实验三 离子交换软化实验	270
实验四 电渗析实验	276
实验五 给水处理系统实验(综合设计型)	281
第三节 排水处理实验	282
实验一 自由沉淀静态实验	282
实验二 曝气设备清水充氧性能实验	285
实验三 活性炭吸附实验	288

实验四 吸附动力学实验	291
实验五 活性污泥法处理系统实验	292
第七章 室外给水管网实验技术	295
第一节 室外给水管网仿真实验	295
第二节 室外给水管网实验技术参考资料	300
资料一 室外给水管网实验技术指导书	300
资料二 室外给水管网水力计算原理及解题步骤	302
资料三 室外给水管网仿真实验报告	308
第八章 常用仪器、化学试剂、玻璃器皿	312
第一节 常用仪器设备的使用与维护	312
第二节 分析用纯水	323
第三节 常用化学试剂与试液	327
第四节 常用玻璃器皿	336
第九章 实验室质量控制与安全管理	349
第一节 实验室质量保证与控制	349
第二节 实验室安全管理制度	353
附录	360
附表 1 常用正交表	360
附表 2 离群数据分析判断表	366
附表 3 F 分布表	368
附表 4 相关系数检验表	369
附表 5 常用酸碱指示剂	370
附表 6 常用双组分混合 pH 指示剂	370
附表 7 常用的基准试剂	371
附表 8 基准物质的干燥条件	372
附表 9 常用试剂的干燥条件	372
附表 10 水样的保存技术	373
附表 11 常用的酸溶液和碱溶液的相对密度和浓度	375
附表 12 配制物质的量浓度时一些试剂的常用基本单元	376
附表 13 几种市售酸和氨水的近似密度和浓度	376
附表 14 不同温度下 1 000 mL 水 (或稀溶液) 换算到 20 °C 时的体积校准值	376
附表 15 水在 10 ~ 40 °C 间的 γ 值	377
附表 16 原子量表 (1981 年国际原子量表)	377
参考文献	378

第一章 实验设计与数据处理

水质工程学是给排水科学与工程、水务工程、环境工程专业的一门骨干专业课程，是建立在实验基础上的科学。许多水处理过程中的现象、规律、理论及水处理工程设计参数和运行操作方式的确定都需要通过实验来解决。

水质工程实验是水质工程的重要组成部分，是科研和工程技术人员解决水处理中各种问题的一个重要手段。一般通过实验研究可以解决以下问题：

(1) 找出影响实验结果的因素及各因素之间的主次关系，揭示水处理的基本规律，为水处理问题的解决提供理论依据；

(2) 确定水处理方法中的主要影响因素及其相互间的关系，使水处理方法及水处理设施在最佳环境下实施，达到高效、合理、节能的目的，从而减少投资和运行费用；

(3) 通过实验研究，确定研究对象的主要参数与数量关系，建构数学模型（或建立经验公式），以解决工程实际问题并为水处理工程的优化设计、优化控制及开发新的水处理技术和设施提供可靠的依据。

实验设计与数据处理是解决水处理实际研究过程的重要环节，也是水处理工作者必须要掌握的一门技能和方法，实验设计的好坏，数据处理的正确与否，将直接影响实验研究对象内在规律的反映，对实验的预期目标将产生重要的影响。因此，除了应该要有严谨的科学态度和求知精神，进行好实验设计和数据处理，也是十分必要的。

本章将从实验设计、单因素实验设计、多因素实验设计、实验误差分析和实验数据处理等方面对实验设计和数据处理加以阐述。

第一节 实验设计

实验设计是解决水处理问题不可或缺的必要手段，实验设计的目的在于选择一种对所研究的特定问题的最有效最合理的实验安排，以使用最少的人力、物力和时间获得满足要求的实验结果。

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。它对于减少实验次数，节省原材料，较快得到有用信息是非常有效的。由于优化实验设计法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，并得到了广泛的应用。优化实验设计打破了传统均分和对分安排实验等方法，其中单因素的0.618法和分数法（菲波那契数列法）、分批实验法、多因素的正交实验设计法、从好点出发法、平行线法等在国内已广泛地应用

于科学实验上，取得了很好的效果。

实验设计在水处理中具有十分重要的作用，它是水处理工作者必须掌握的技能和方法。我们有必要在进行实验设计时，对实验设计的一些基本概念有所了解。

(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，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，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即称为因素。例如，在水中投入适量的消毒剂可降低水中的细菌含量，因此水中投加的消毒剂即作为分析的实验因素，简称其为因素。因素可根据能否人为控制分为两种：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，暂时还不能人为地加以调节和控制，如气温，叫做不可控因素。在实验设计中，一般只考虑可控因素。因此，凡没有特别说明的，提到的因素均是指可控因素。

(5) 水平——因素的各种变化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，就叫它是几个水平的因素。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叫定量因素，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，就可与通常的定量因素一样对待。

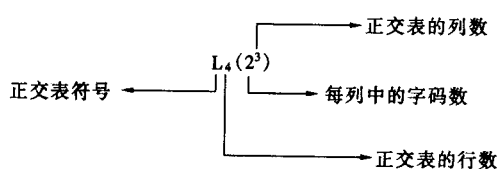


图 1-1 正交表记号示意图

(6) 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，并对数据进行统计分析的一种特殊表格。正交表都以统一形式的记号来表示，常用的正交表有 $L_4(2^3)$ 、 $L_3(2^7)$ 、 $L_9(3^4)$ 、 $L_8(4 \times 2^4)$ 、 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 等。正交表 $L_4(2^3)$

如图 1-1 和表 1-1 所示。

表 1-1 $L_4(2^3)$ 正交表

水 平		列 号			实验结果 (评价指标) x_i
		1	2	3	
实验号	1	1	1	1	x_1
	2	1	2	2	x_2
	3	2	1	2	x_3
	4	2	2	1	x_4

第二节 单因素实验设计

对于只有一个影响因素的实验,或在实验安排时只考虑多个影响因素中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。在单因素实验设计中,要紧紧抓住以下三个问题:①如何选择实验方案来安排实验;②找出最优实验点;③确定指标。本节主要介绍单因素优化实验设计的主要方法:均分法、对分法、0.618法、分数法(菲波那契数列法)和分批实验法。

一、均分法和分法

(一) 均分法

均分法实验设计的做法是:首先要根据经验确定实验范围。设实验范围为 $[a, b]$,如果要做 n 次实验,就将实验范围 $[a, b]$ 分成 $n+1$ 份,然后在各个分点上做实验,如图1-2所示。

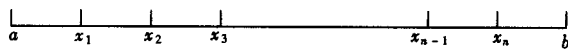


图 1-2 均分法实验点

其中,

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

把 n 次实验结果进行比较,选择所需要的最好的结果,与此相对应的实验点即为 n 次实验点中的最优实验点。

均分法是一种比较传统的实验方法,它适用于需要同时安排或一个接一个安排的实验情况,缺点是安排的实验次数较多,耗时耗资。

(二) 对分法

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

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

第一次实验点安排在 $[a, b]$ 的中点 $x_1 = \frac{a+b}{2}$ 。若第一次实验结果表明 x_1 取大了,则丢去大于 x_1 的一半,第二次实验点取在 $[a, x_1]$ 的中点 $x_2 = \frac{a+x_1}{2}$;若第一次实验结果表明 x_1 取小了,则丢去小于 x_1 的一半,第二次实验点取在 $[x_1, b]$ 的中点 $x_2 = \frac{x_1+b}{2}$ 。

采用对分法,每次都去掉实验范围的一半,且取点方便。它适用于做一次实验,根据结果就可以确定下次实验方法的情况。

例如,确定消毒时加氯量的实验,可以采用对分法。

二、0.618 法

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较差，这样的目标函数称为单峰函数。如图 1-3 所示为一个下单峰函数。

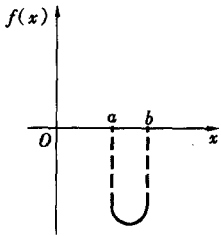


图 1-3 下单峰函数

0.618 法也称为黄金分割法，它适用于目标函数为单峰函数的情况。其具体做法如下：选择实验范围 $[a, b]$ ，第一次实验点 x_1 选在实验范围的 0.618 位置处，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，也就是实验点选在实验范围的 0.382 位置处，即

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

两次的实验点 x_1 和 x_2 如图 1-4 所示。

设 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 表示 x_1 和 x_2 两点的实验结果，且 $f(x)$ 的值越大，效果越好。

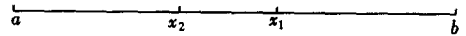


图 1-4 0.618 法的第一、第二实验点的分布

(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，而保留实验范围 $[x_2, b]$ ，并在此范围内继续做实验；在范围 $[x_2, b]$ 内利用式 (1-3) 得新点 x_3 ，即

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

如图 1-5 所示，在实验点 x_3 安排一次新的实验。

(2) 如果 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 差，根据“留好去坏”的原则，则去掉实验范围 $(x_1, b]$ 而保留实验范围 $[a, x_1]$ ，并在此范围内继续做实验；在范围 $[a, x_1]$ 内利用式 (1-4) 得新点 x_3 如下：

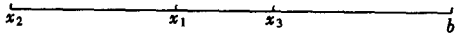


图 1-5 (1) 中的第三个实验点 x_3

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

如图 1-6 所示，在实验点 x_3 安排一次新的实验。

(3) 如果 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 的实验效果基本一样，则去掉两端的实验范围 $[a, x_2]$ 和 $(x_1, b]$ ，在实验范围 $[x_1, x_2]$ 内重新做实验。在剩余实验范围 $[x_1, x_2]$ 内利用式 (1-3) 和式 (1-4) 计算两个新的实验点 x_3 和 x_4 ，即



图 1-6 (2) 中的第三个实验点 x_3

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

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

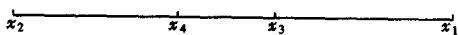


图 1-7 (3) 中的新实验点 x_3 和 x_4

如图 1-7 所示，在 x_3 和 x_4 处安排两次新的实验。

根据单峰函数的基本性质，应用上述三种方法都能存好去坏，不会出现将最优点去掉的情况。无论上述三种情况出现哪一种，在新的实验范围内都有两个可以进行比较的实验点的实验结果。仍然按照“留好去坏”的原则，再去

掉实验范围的一段或两段，这样反复进行下去，直到找出满意的实验点，得到比较好的实验结果为止；或者实验范围已经很小了，继续做下去实验结果差别不大，也可停止实验。

例如：为了给某种性质的水消毒，需要投加一种消毒剂，已知其最佳投放量在1 500 g与2 500 g之间的某一点，现在要通过实验找到它。

按照0.618法选点，先在实验范围[1 500, 2 500]的0.618处做第一个实验，这一点的投加量由式(1-3)得

$$x_1 = [1\ 500 + 0.618 \times (2\ 500 - 1\ 500)]g = 2\ 168\ g$$

再在实验范围的0.382处做第二次实验，这一点的投加量由式(1-4)得

$$x_2 = [1\ 500 + 0.382 \times (2\ 500 - 1\ 500)]g = 1\ 882\ g$$

第一、第二次实验的投加量情况如图1-8所示。

比较两次的实验结果，如果 x_1 点比 x_2 点的效果好，就去掉1 882 g以下的部分，然后在留下的部分[1 882, 2 500]范围再用式(1-3)找出第三个实验点 x_3 ，在 x_3 点做第三次实验，这一点的投加量为

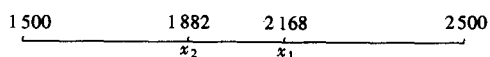


图 1-8 第一、第二次投加量

$$x_3 = [1\ 882 + 0.618 \times (2\ 500 - 1\ 882)]g = 2\ 264\ g$$

如图1-9所示。

如果仍然是 x_1 点比 x_3 点好，就去掉2 264 g以上的部分，在留下的部分[1 882, 2 264]范围内按式(1-4)计算得出第四个实验点 x_4 ，在 x_4 点做第四次实验，这一点的投加量为

$$x_4 = [1\ 882 + 0.382 \times (2\ 264 - 1\ 882)]g = 2\ 028\ g$$

如图1-10所示。

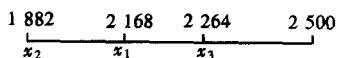


图 1-9 第三次实验点的投加量

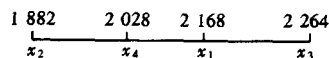


图 1-10 第四次实验点的投加量

如果 x_4 点比 x_1 点好，则去掉2 168 g以上的部分(2 168, 2 264]，在留下的部分[1 882, 2 168]范围内继续按照同样的方法做下去，如此反复直到找到最佳点。

总之，应用0.618法，每次都能去掉实验范围的0.382，能够以较少的实验次数找出最佳点。

三、分数法

分数法也称为菲波那契数列法，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，或者由于某些原因实验范围由一些不连续的、间隔不等的点组成或实验点只能取某些特定值的情况下，采用分数法比较好。它与0.618法相似也是适用于单峰函数的方法。例如，如果只能做一次实验，就在1/2处做，其精确度为1/2，也就是这一点与实际最佳点的最大可能距离为1/2；如果只能做两次实验，第一次实验在2/3处做，第二次实验在1/3处做，其精确度为1/3；如果能做三次实验，则第一次在3/5处做实验，第二次在2/5处做实验，第三次在1/5或4/5处做实验，精确度为

1/5, ..., 第 n 次实验就在实验范围内 F_n/F_{n+1} 处做, 其精确度为 $1/F_{n+1}$, 见表 1-2。

表 1-2 中的 F_{n-2} 、 F_{n-1} 、 F_n 和 F_{n+1} 叫做“菲波那契数”, 它们是满足下列关系的数, 即 F_n 在 $F_0 = F_1 = 1$ 时符合下述递推公式。

$F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ ($n \geq 2$) 即从第三项开始, 每一项都是它前面的两项之和, 写出来就是表 1-3 所示的情景。

表 1-2 分数法实验点位置与相应精确度

项 目	2	3	4	5	...	$n-1$	n	...
等分实验范围的份数	3	5	8	13	...	$F_{n-1} + F_{n-2}$	F_{n+1}	...
第一次实验点的位置	2/3	3/5	5/8	8/13	...	$\frac{F_{n-1}}{F_{n-1} + F_{n-2}}$	F_n/F_{n+1}	...
精 确 度	1/3	1/5	1/8	1/13	...	$\frac{1}{F_{n-1} + F_{n-2}}$	$1/F_{n+1}$...

表 1-3 等分实验范围的份数 F_n

F_0	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	...
1	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89	...

因此, 表 1-2 中第三行各分数, 从分数 2/3 开始, 以后的每一个分数, 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的和, 依此方法不难写出所需要的第一次实验点的位置。

如果实验范围为 $[a, b]$, 分数法的各实验位置可用下列公式求得第一个实验点 x_1 和新实验点 x_2 , 即

$$x_1 = a + \frac{F_n}{F_{n+1}}(b - a) \quad (1-5)$$

$$x_2 = a + (b - x_m) \quad (1-6)$$

其中 x_m 为中数, 即已实验的实验点数值。式 (1-5) 和式 (1-6) 可由图 1-11 所示推出。



图 1-11 分数法实验点位置示意图

【例 1-1】某污水处理厂用 $FeCl_3$ 来改善污泥的脱水性能, 根据初步调查投药量在 200 mg/L 以下, 要求通过 4 次实验确定出最佳投药量。

其计算方法如下:

(1) 根据式 (1-5) 可得到第一个实验点的位置为

$$x_1 = \left[0 + \frac{5}{8}(200 - 0) \right] \text{mg/L} = 125 \text{mg/L}$$

(2) 根据式 (1-6) 可得到第二个实验点的位置为

$$x_2 = [0 + (200 - 125)] \text{mg/L} = 75 \text{mg/L}$$

(3) 如果 x_1 点比 x_2 点好, 则在 $[75, 125]$ 内找第三点, 去掉 $[0, 75)$ 部分, 则由式

(1-6) 得第三个实验点位置为

$$x_3 = [75 + (200 - 125)] \text{ mg/L} = 150 \text{ mg/L}$$

(4) 容易看出 x_3 点与 x_1 点的结果是一样的, 此时可采用对分法进行第四次实验, 即 $\frac{125 + 150}{2} \text{ mg/L} = 137.5 \text{ mg/L}$ 为最佳投药量。

四、分批实验法

当完成实验需要较长的时间, 或者测试一次要花费很大代价, 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。分批实验法可以分为均匀分批实验法和比例分割实验法。对于均匀分批实验法而言, 它是将每批实验均匀地安排在实验范围内的实验方法。例如, 每批要做 4 个实验, 可以将实验范围 $[a, b]$ 分为 5 等分, 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 点好, 则去除掉小于 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 个分点上实验, 这样一直做下去, 就可以找到最佳点。对于每批要做 4 个实验的情况, 用均匀分批实验法, 第一批实验后范围缩小为 $2/5$, 以后每批实验后都能缩小为前次余下的 $1/3$, 由图 1-12 所示容易看出。

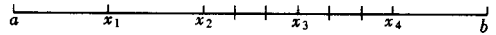


图 1-12 均匀分批实验法示意图

第三节 多因素实验设计

多因素实验就是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问题。

在科学实验和研究的过程中, 遇到的问题往往都比较复杂, 它们一般都包含了许多影响因素, 每个因素中又往往有多个水平, 它们之间又可能互相交织、互相作用, 情况错综复杂。要解决问题, 往往需要做大量的实验。例如, 某工业废水欲采用厌氧消化处理, 经研究分析, 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 4 种不同的水平 (如消化时控制的温度可为 20、25、30、35 $^{\circ}\text{C}$ 4 个水平), 它们之间可能有 $4^3 = 64$ 种不同的组合, 也就是可能要经过 64 次实验才能找出最佳的实验点。这样既耗时又耗资, 有时甚至是不可能做到的。由此可见, 多因素的实验存在着突出的矛盾:

- (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内在规律之间的矛盾。

为解决第一个矛盾, 就需要对实验进行合理的安排, 挑选少数几个具有代表性的实验做; 为解决第二个矛盾, 就应当对所选定的几个实验的实验结果进行科学的分析。

如何合理地安排多因素实验? 如何对多因素实验结果进行科学的分析? 本节将分别介绍双因素实验设计和正交实验设计。

一、双因素实验设计

对于双因素问题，往往利用降维法来解决，即把两个因素变成一个因素的方法：先固定第一个因素，做第二个因素的实验，之后再固定第二个因素做第一个因素的实验。以下介绍从好点出发法和平行线法的双因素实验设计。

(一) 从好点出发法

这种方法是先把一个因素，例如 x 固定在实验范围的某一点 x_1 (如 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，用单因素实验方法对因素 x 进行实验，得到最佳点 $A_2(x_2, y_1)$ 。如果 $x_2 < x_1$ ，由于 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，在剩余的实验范围内，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，就能较好地找到所需要的最佳点。这种实验法的过程如图 1-13 所示。

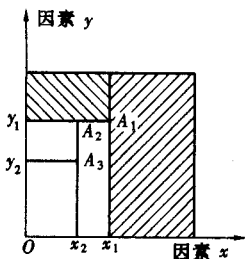


图 1-13 从好点出发法示意图

(二) 平行线法

当双因素问题的两个因素中有一个因素不易改变时，适合采用平行线法。具体的操作方法如下：

设因素 x 不易调整，把 x 先固定在其实验范围的 0.5 (或 0.618) 处，过该点做平行于 y 轴的直线，并用单因素方法找出另一因素 y 的最佳点 A_1 。再把因素 x 固定在 0.25 处，用单因素法找出 y 的最佳点 A_2 。比较 A_1 和 A_2 ，如果 A_1 比 A_2 好，则沿直线 $x = 0.25$ 将左边的部分去掉，然后在剩下的范围内再用对分法找出因素 x 的第三点 0.625。第三次实验将因素 x 固定在 0.625 处，用单因素法找出因素 y 的最佳点 A_3 。如果 A_1 比 A_3 好，则又可以把直线右边的部分去掉。这样一直继续下去，就可以找到满意的实验结果，如图 1-14 所示。

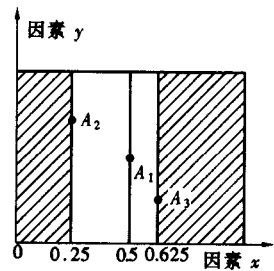


图 1-14 平行线法示意图

二、正交实验设计

正交实验设计，就是利用事先已经制好的特殊表格——正交表来安排多因素实验，并用统计方法进行数据分析的一种方法。它简便易行，而且计算表格化，并能较好地解决如上所述的多因素实验中存在的两个突出问题，对多因素问题的解决往往能得到事半功倍的效果。

(一) 用正交表安排多因素实验的步骤

(1) 明确实验目的，确定实验评价指标。即根据水处理工程实践明确实验要解决的问题，同时，要结合工程实际选用能定量、定性表达的突出指标作为实验分析的评价指标。指标可能是一个或多个。

(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, 不可能对每个因素都进行考察, 因此要根据已有的专业知识和相关文献资料以及实际情况, 固定一些因素于最佳条件下, 排除一些次要因素, 挑选主要因素。例如, 对于不可控因素, 由于无法测出因素的数值, 所以看不出不同水平的差别, 也就无法判断出该因素的作用, 因此不能将其列为被考察的因素。对于可控因素, 应当挑选那些对指标可能影响较大、但又没有把握的因素来进行考察, 特别是不能将重要因素固定而不加以考察。

对于选出的因素, 可以根据经验定出它们的实验范围, 在该范围内选出每个因素的水平, 即确定水平的个数和各个水平的数量。

(3) 选用正交表。常用的正交表有几十种, 可以经过综合分析后灵活选用, 但一般要视因素及水平的数量、有无重点因素需加以详细考察、实验的工作量大小和允许的条件综合分析而定。实际安排实验时, 挑选因素、水平和选用正交表等步骤往往是结合进行的。接着根据以上选择的因素及水平的取值和正交表, 即可以制定一张反映实验所需考察研究的因素和各因素的水平因素水平表。

(4) 确定实验方案。根据因素水平表及所选用的正交表, 确定实验的方案。

①因素顺序上列: 按照因素水平表中固定下来的因素次序, 顺序地放到正交表的纵列上, 每列放一种;

②水平对号入座: 因素上列后, 把相应的水平按因素水平表所确定的关系对号入座;

③确定实验条件: 正交表在因素顺序上列、水平对号入座后, 表中的每一横行即代表所要进行的实验的一种条件, 横行数则代表实验的次数。

(5) 按照正交表中每一横行所规定的条件进行实验。实验过程中, 要严格操作, 准确记录实验数据, 分析整理出每组条件下的评价指标。

(二) 实验结果的直观分析

通过实验获得大量的实验数据后, 如何科学地分析这些数据, 从中得到正确的结论, 是实验设计法不可分割的一个组成部分。

正交实验设计法的数据分析的目的就是要解决以下问题: 所挑选的因素中, 哪些因素影响大些, 哪些因素影响小些, 以及各因素对实验目的影响的主次关系如何; 各影响因素中, 哪个水平能得到满意的结果, 从而找到最佳的生产、管理、运行条件。

要较好地解决这些问题, 需要对数据进行分析整理, 才能得出正确的实验结论。直观分析法是一种常用的分析实验结果方法, 以正交表 $L_4(2^3)$ 为例, 其中各数字以符号 $L_n(f^m)$ 表示, 其具体操作步骤如下:

(1) 填写实验评价指标。表 1-4 是采用直观分析法时的实验结果分析表示例。实验结束后, 将各组的实验数据分析处理后, 求出相应的评价指标 x_i , 并填入正交表的实验结果栏内。

(2) 计算各列的各水平效应值之和 K_{mf} 、均值 \bar{K}_{mf} 和极差 R_m 值。

K_{mf} —— m 列中 f 号的水平相应指标值之和;

\bar{K}_{mf} —— m 列的 f 号水平的效应平均值, 有

$$\bar{K}_{mf} = \frac{K_{mf}}{m \text{ 列的 } f \text{ 号水平的重复次数}} \quad (1-7)$$

R_m —— m 列中 K_f 的极大值与极小值之差。

表 1-4 正交表 $L_4(2^3)$ 的实验结果直观分析

水 平		列 号			实验结果 (评价指标) x_i
		1	2	3	
实验号	1	1	1	1	x_1
	2	1	2	2	x_2
	3	2	1	2	x_3
	4	2	2	1	x_4
K_1					$\sum_{i=1}^n x_i$ (其中 $n =$ 实验次数)
K_2					
\bar{K}_1					—
\bar{K}_2					
$R = \bar{K}_1 - \bar{K}_2$ (极 差)					—

(3) 比较各因素的极差 R 值, 根据它的大小就可排出因素的主次关系顺序。这在直观上较易理解, 就是对实验结果影响大的一定是主要因素。所谓影响大, 就是这一因素的不同水平所对应的指标间的差异大, 反之, 就是次要因素。

应该注意, 实验分析所得的因素的主次、水平的优劣, 都是相对于某一具体实验而言的。在一次实验中是主要因素, 在另一次实验中, 由于实验条件变了, 就可能成为次要因素。反过来, 原来的次要因素, 也可能由于条件的变化而转化为主要因素。

(4) 比较同一因素下各种水平的效应值 \bar{K}_{mf} , 能使指标达到满意的值 (最大或最小值) 为较理想的水平值。这样就可以确定最佳生产运行条件。

(5) 作因素和指标的关系图, 即以各因素的水平值为横坐标, 各因素水平所对应的均值 \bar{K}_{mf} 为纵坐标, 在直角坐标系上绘图, 可以直观地反映出在其他因素基本上是相同变化的条件下, 该因素与指标的关系。

(三) 正交实验分析举例

【例 1-2】自吸式射流曝气设备是一种污水生物处理所用的新型曝气设备, 为了研制设备的结构尺寸、运行条件与充氧性能的关系, 拟用正交实验法进行清水充氧实验。

实验是在 $1.6\text{ m} \times 1.6\text{ m} \times 7.0\text{ m}$ 的钢板池内进行, 喷嘴直径 $d = 20\text{ mm}$ (整个实验中的一部分)。

1. 确定实验方案并实验

(1) 实验目的。找出影响曝气装置曝气充氧性能的主要因素并确定理想的设备结构尺寸和运行条件。

(2) 挑选因素。影响充氧性能的因素较多, 根据有关文献资料及经验, 对射流器本身结构主要考察两个: 一个是射流器的长径比, 即混合阶段的长度 L 与其直径 D 之比 L/D ; 另一个是射流器的面积比, 即混合阶段的断面面积与喷嘴面积之比

$$m = F_2/F_1 = D^2/d^2$$

对射流器的运行条件, 主要考察喷嘴的工作压力 p 和曝气水深 H 。