

主编 王爱丽 刘歆瑜

水处理 实验技术



水处理实验技术

主 审 张秀玲 李洪亮 辛炳炜 陈 强
主 编 王爱丽 刘歆瑜
副主编 王 芳 王文强 李春辉

西南交通大学出版社
· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

水处理实验技术 / 王爱丽, 刘歆瑜主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2018.8
ISBN 978-7-5643-6325-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 180200 号

水处理实验技术

主 编 / 王爱丽 刘歆瑜 责任编辑 / 牛 君
封面设计 / 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)
发行部电话: 028-87600564 028-87600533
网址: <http://www.xnjdcbs.com>
印刷: 成都蓉军广告印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm× 260 mm
印张 9 字数 192 千
版次 2018 年 8 月第 1 版 印次 2018 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-6325-3
定价 26.00 元

课件咨询电话: 028-87600533
图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

“水处理实验技术”是高等学校环境工程、给排水工程等专业的必修课程，是“水污染控制工程”课程教学的重要组成部分。本课程教学可以加深学生对水处理技术基本原理的系统理解；培养学生设计和组织水处理实验、水处理技术应用方案的初步能力，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、处理实验数据以及指导实际技术应用的基本能力。

党的“十九”大明确提出“加快水污染防治，实施流域环境和近岸海域综合治理”。本教材紧扣时代要求，落实国家战略，教材内容根据环境工程类专业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”，依托2015年教育部人文社会科学研究专项任务项目（工程科技人才培养研究）——新建本科校企“双螺旋递进式”培养工程人才机制研究（15JDGC021）研究项目，结合编者在教学、科研工作中的体会以及我国水污染控制的实际需要编写而成。全书内容主要包括概论、实验设计、误差与实验数据处理、废水的物理及物理化学方法实验和废水的生物化学方法实验五章。本书的编写重视经典理论的传承和新技术、新工艺的引进，实验包含混凝沉淀、自由沉淀、絮凝沉淀、成层沉淀、折点加氯、离子交换软化、过滤、紫外-双氧水脱色、活性炭吸附、Fenton氧化、曝气充氧、活性污泥性质、污泥比阻、SBR、氧化沟共16项实验内容，兼顾了化学、物理、物理化学和生物化学的各种主要理论和工艺技术。力求做到实验目的明确、原理清晰、步骤简明。另外，本书将水处理实验中涉及的重要分析化学实验附于书后（附录B-H），便于学生理解和查验，起到事半功倍之效。

本书由王爱丽、刘歆瑜主编。王芳、王文强等参加了部分工作，本教材插图由王芳绘制。本书由德州学院张秀玲教授、李洪亮教授、辛炳炜教授以及兰州大学陈强教授等主审。此外，本书在编写过程中得到了德州市环境类相关企业的支持，并有多从事污水处理工作的上实环境（德州）污水处理有限公司高级工程师刘强、中海环境科技（上海）股份有限公司工程师寇英卫和中国科学院青岛生物能源与过程研究所副研究员杨艳丽参与了教材的编写工作；在教材编写过程中还得到了化学化工学院其他老师的支持与帮助，在此表示衷心感谢。

本书适合作为高等院校相关专业师生的实验教学参考书，也可供从事环境类相关学科的研究生、科研工作人员、工程设计人员以及专业技术人员参考。

由于编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2018年3月

目 录

第一章 概 论	1
第二章 实验设计	4
第一节 实验设计的基本概念	4
第二节 单因素优化实验设计	5
第三节 多因素正交实验设计	10
习 题	21
第三章 误差与实验数据处理	23
第四章 废水的物理及物理化学方法实验	34
实验一 混凝沉淀实验	34
实验二 颗粒自由沉淀实验	41
实验三 絮凝沉淀实验	48
实验四 阳离子树脂交换容量测定实验	54
实验五 离子交换软化实验	57
实验六 折点加氯消毒实验	62
实验七 过滤实验	66
实验八 间歇式活性炭吸附实验	70
实验九 紫外-双氧水脱色实验	74
实验十 Fenton 氧化实验	76
第五章 废水的生物化学方法实验	79
实验一 清水充氧(曝气)实验	79
实验二 活性污泥性质测定实验	85
实验三 SBR 实验	90
实验四 氧化沟实验	95
实验五 污泥比阻测定实验	103
实验六 成层沉淀实验	109
习 题	116
参考文献	122
附 录	123
附录 A 常用正交表	123

附录 B	氢氧化钠溶液浓度的标定	128
附录 C	自来水总硬度的测定	129
附录 D	余氯标准比色溶液的配制	130
附录 E	氨氮的测定——纳氏试剂分光光度法	132
附录 F	CO ₂ D 的测定——快速消解法	134
附录 G	色度的测定——稀释倍数法	136
附录 H	各种温度下饱和溶解氧对照表	137

第一章 概论

一、实验目的和任务

“水处理实验技术”是环境工程专业的专业必修课，是水处理教学的重要组成部分，是培养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。

二、实验教学基本要求

本课程的教学环节以学生动手操作实验为主，辅以必要的课堂讲授、自学、现场指导，质疑和综合考查等。通过上述基本教学步骤，要求学生掌握水处理实验基本的实验技术，验证和巩固专业理论知识，为今后从事环境工程专业的科研、工程设计和技术开发工作奠定良好的实践基础。

- (1) 掌握各种常规水处理仪器设备的原理和使用方法。
- (2) 了解各种水处理实验的基本原理。
- (3) 学会整理、分析实验结果和编写实验报告。
- (4) 实验前要求学生预习实验指导书，做到充分准备后方能参加实验。

三、实验室安全常识

在实验室里，安全是非常重要的，它常常潜藏着诸如发生爆炸、着火、中毒、灼伤、割伤、触电等事故的危险性。

1. 安全用电常识

违章用电常常可能造成人身伤亡、火灾、损坏仪器设备等严重事故。水处理实验室使用电器较多，特别要注意安全用电。为了保障人身安全，一定要遵守实验室安全规则。

(1) 防止触电

- ① 不用潮湿的手接触电器。
- ② 电源裸露部分应有绝缘装置（例如电线接头处应裹上绝缘胶布）。
- ③ 所有电器的金属外壳都应保护接地。
- ④ 实验时，应先连接好电路再接通电源。实验结束时，先切断电源再拆线路。
- ⑤ 修理或安装电器时，应先切断电源。
- ⑥ 不能用试电笔去试高压电。使用高压电源应有专门的防护措施。
- ⑦ 如有人触电，应迅速切断电源，然后进行抢救。

（2）防止引起火灾

- ① 使用的保险丝要与实验室允许的用电量相符。
- ② 电线的安全通电量应大于用电功率。
- ③ 室内若有氢气、煤气等易燃易爆气体，应避免产生电火花。继电器工作和开关电闸时，易产生电火花，要特别小心。电器接触点（如电插头）接触不良时，应及时修理或更换。
- ④ 如遇电线起火，立即切断电源，用沙或二氧化碳、四氯化碳灭火器灭火，禁止用水或泡沫灭火器等导电液体灭火。

（3）防止短路

- ① 线路中各接点应牢固，电路元件两端接头不要互相接触，以防短路。
- ② 电线、电器不要被水淋湿或浸在导电液体中，例如，实验室加热用的灯泡接口不要浸在水中。

（4）电器仪表的安全使用

- ① 在使用前，先了解电器仪表要求使用的电源是交流电还是直流电，是三相电还是单相电，以及电压的大小（380 V、220 V、110 V 或 6 V）。弄清电器功率是否符合要求及直流电器仪表的正、负极。
- ② 仪表量程应大于待测量。待测量大小不明时，应从最大量程开始测量。
- ③ 实验之前要检查线路连接是否正确。经教师检查同意后方可接通电源。
- ④ 在电器仪表使用过程中，如发现有不正常声响，局部升温或嗅到绝缘漆过热产生的焦味，应立即切断电源，并报告教师进行检查。

2. 使用化学药品的安全防护

（1）防毒

- ① 实验前，应了解所用药品的毒性及防护措施。
- ② 操作有毒气体（如 H_2S 、 Cl_2 、 Br_2 、 NO_2 、浓 HCl 和 HF 等）应在通风橱内进行。
- ③ 苯、四氯化碳、乙醚、硝基苯等的蒸气会引起中毒。它们虽有特殊气味，但久嗅会使人嗅觉减弱，所以应在通风良好的情况下使用。
- ④ 有些药品（如苯、有机溶剂、汞等）能透过皮肤进入人体，应避免与皮肤接触。
- ⑤ 氰化物、高汞盐[HgCl_2 、 $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 等]、可溶性钡盐（ BaCl_2 ）、重金属盐（如镉、铅盐）、三氧化二砷等剧毒药品，应妥善保管，使用时要特别小心。

⑥ 禁止在实验室内喝水、吃东西。饮食用具不要带进实验室，以防毒物污染。离开实验室及饭前要洗净双手

(2) 防爆

可燃气体与空气混合，当两者比例达到爆炸极限时，受到热源（如电火花）的诱发，就会引起爆炸。

- ① 使用可燃性气体时，要防止气体逸出，室内通风要良好。
- ② 操作大量可燃性气体时，严禁同时使用明火，还要防止发生电火花及其他撞击火花。
- ③ 有些药品如高氯酸盐、过氧化物等受震和受热都易引起爆炸，使用时要特别小心。
- ④ 严禁将强氧化剂和强还原剂放在一起。
- ⑤ 久藏的乙醚使用前应除去其中可能产生的过氧化物。
- ⑥ 进行容易引起爆炸的实验，应有防爆措施。

(3) 防火

① 许多有机溶剂如乙醚、丙酮、乙醇、苯等非常容易燃烧，大量使用时室内不能有明火、电火花或静电放电。实验室内不可存放过多这类药品，用后要及时回收处理，不可倒入下水道，以免聚集引起火灾。

② 有些物质如磷、金属钠、钾、电石及金属氢化物等，在空气中易氧化自燃。还有一些金属如铁、锌、铝等粉末，比表面积大，也易在空气中氧化自燃。这些物质要隔绝空气保存，使用时要特别小心。

实验室如果着火不要惊慌，应根据情况进行灭火。常用的灭火剂有：水、沙、二氧化碳灭火器、四氯化碳灭火器、泡沫灭火器和干粉灭火器等，可根据起火的原因选择使用。以下几种情况不能用水灭火：

- a. 金属钠、钾、镁、铝粉、电石、过氧化钠着火，应用干沙灭火。
- b. 密度比水小的易燃液体，如汽油、苯、丙酮等着火，可用泡沫灭火器。
- c. 有灼烧的金属或熔融物的地方着火，应用干沙或干粉灭火器。
- d. 电器设备或带电系统着火，可用二氧化碳灭火器或四氯化碳灭火器。
- e. 强酸、强碱、强氧化剂、溴、磷、钠、钾、苯酚、冰醋酸等都会腐蚀皮肤，注意防止溅入眼内。液氧、液氮等的低温也会严重灼伤皮肤，使用时要小心。万一灼伤应及时治疗。

第二章 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：

(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，是值得研究的一个问题。

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研人员重视，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的方法，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应用于科学实验，取得了很好的效果。本章将重点介绍这些内容。

第一节 实验设计的基本概念

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，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

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药物，当实验目的是求最佳投药量时，水样中剩余浊度即可作为实验指标。

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中的浊度，因此水中投加的混凝剂即可作为分析的实验因素。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，叫作可控因素；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，叫作不可控因素。在实验设计中，一般只考虑可控因素。因此，今后说到因素，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作因素的水平。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，叫作定性因素。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 $A(\text{因素}) \times B(\text{因素})$ 。

第二节 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：

(1) 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，实验范围就由 a 到 b 的线段表示，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 $a < x < b$ (图 2-1)。

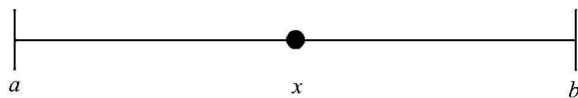


图 2-1 单因素实验范围

(2) 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。

(3) 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。

一、均分法

均分法的做法如下: 如果要做 n 次实验, 就把实验范围等分成 $n+1$ 份, 在各个分点上做实验。如图 2-2。

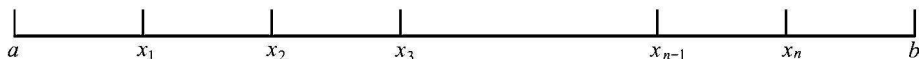


图 2-2 均分法实验点

实验点 x_i 的计算公式为

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

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。

二、对分法

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

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

采用这种方法, 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, 它只适用于每做一次实验, 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，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。

三、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；缺点是要每次实验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 2-3）。

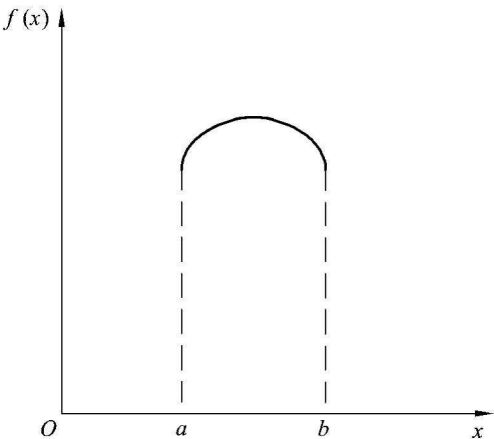


图 2-3 上单峰函数

0.618 法适用于目标函数为单峰函数的情形。其做法如下：

（1）确定实验范围（在一般情况下，通过预实验或其他先验信息，确定了实验范围 $[a, b]$ ）；

（2）选实验点（这一点与前述均分、对分法的不同处在于它是按 0.618、0.382 的特殊位置定点的，一次可得出两个实验点 x_1, x_2 的实验结果）（图 2-4），即

$$x_1 = a + 0.618(b - a) \tag{2-3}$$

$$x_2 = a + 0.382(b - a) \tag{2-4}$$

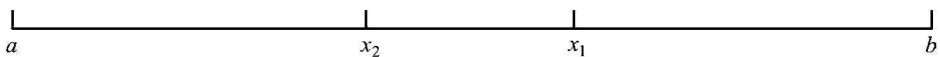


图 2-4 0.618 第 1、2 个试验点分布

(3) 根据“留好去坏”的原则对实验结果进行比较，留下好点，从坏点处将实验范围去掉，从而缩小实验范围。设 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 表示 x_1 、 x_2 两点的实验结果， $f(x)$ 值越大，效果越好。分几种情况讨论。

① 若 $f(x_1) > f(x_2)$ ，即 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 好，则根据“留好去坏”的原则，去掉实验范围 $[a, x_2]$ 部分，在 $[x_2, b]$ 内继续实验。见图 2-5。

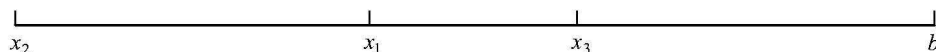


图 2-5 ①时第 3 个实验点 x_3

若去掉实验范围的左边区间，则将新试验点排在新实验范围的 0.618 位置上，另一个试验点在新范围的 0.382 位置上，但这一点恰巧在旧区间已试的实验点上。

$$x_3 = x_2 + 0.618(b - x_2) \quad (2-5)$$

$$x_4 = x_2 + 0.382(b - x_2) \quad (2-6)$$

而 $\frac{|x_2 x_1|}{|x_2 b|} = \frac{0.236}{0.618} = 0.382$ (已试)

所以 $x_4 = x_1$

即除第一次要取两个试验点外，以后每次只取一个试验点，另一个试验点在已试点上(不做)。

同理，比较两个结果，去坏留好，进一步缩小范围，进一步做实验，最后找出最佳点。

② 若 $f(x_2) > f(x_1)$ ，即 $f(x_2)$ 比 $f(x_1)$ 好，则根据“留好去坏”的原则，去掉实验范围的 $[x_1, b]$ ，在剩余范围 $[a, x_1]$ 内继续实验。见图 2-6。

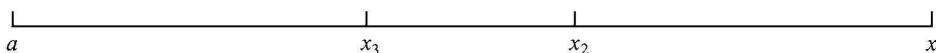


图 2-6 ②时第 3 个实验点 x_3

若去掉实验范围的右区间，则新点安排在新实验范围的 0.382 处，已试点一定在新区间的 0.618 处。

$$x_3 = a + 0.382(x_1 - a) \quad (\text{新实验点 } x_3) \quad (2-7)$$

③ 若 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 实验效果一样，去掉两端，在剩余范围 $[x_1, x_2]$ 内继续实验。两个新实验点：

$$x_3 = x_2 + 0.618(x_1 - x_2) \quad (2-8)$$

$$x_4 = x_2 + 0.382(x_1 - x_2) \quad (2-9)$$

④ 在新实验范围内按 0.618、0.382 的特殊位置再次安排实验点，重复上述过程，直至得到满意结果，找出最佳点。

四、分数法

1. 分数法的概念

分数法又称菲波那契数列法，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。其基本思想和 0.618 法是一致的，主要不同点是：0.618 法每次都按同一比例常数 0.618 来缩短区间，而分数法每次都是按不同的比例来缩短区间的，它是按菲波那契数列产生的分数序列为比例来缩短区间的。

13 世纪，意大利人 Fibonacci 曾经考虑过这样一串数：

$$\begin{cases} F_0 = F_1 = 1 \\ F_{n+1} = F_n + F_{n-1}, n \geq 2 \end{cases} \quad (2-10)$$

即从第 3 项起，每一项都是它前两项之和，称为 Fibonacci 数列 $\{F_n\}$ 。

这个整数序列写出来就是：1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, ...

2. 利用分数法进行单因素优化实验设计

(1) 所有可能进行的实验总次数 $m = F_n - 1$ 时，即 m 正好与菲波那契数列中某数减 1 相一致时。则前两个实验点分别放在 F_{n-1} 和 F_{n-2} 位置上。

例如，通过某种污泥的消化实验确定其较佳投配率 P ，实验范围为 2% ~ 13%，以变化 1% 为一个实验点，则可能实验总次数为 12 次，符合 $12 = 13 - 1 = F_6 - 1$ 。即 $m = F_n - 1$ 的关系，第一个实验点为 $F_{n-1} = F_5 = 8$ 。即放在第 8 个实验点处，如表 2-1 所示，投配率为 9%。

第二个实验点为 $F_{n-2} = F_4 = 5$ ，即第 5 个实验点，投配率为 6%。

实验后，比较两个不同投配率的结果，根据产气率、有机物的分解率，若污泥投配率 6% 优于 9%，根据“留好去坏”的原则，去掉 9% 以上的部分（反之，则去掉 6% 以下的部分），重新安排实验。

此时实验范围为 8 左侧的部分，可能实验次数 $m = 7$ 符合 $8 - 1 = 7$ ， $m = F_n - 1$ ， $F_n = 8$ ，故 $n = 5$ 。第 1 个实验点为 $F_{n-1} = F_4 = 5$ ， $P = 6\%$ 。

该点已实验，第 2 个实验点为 $F_{n-2} = F_3 = 3$ ， $P = 4\%$ （或利用在该实验范围内与已有实验点的对称关系找出第 2 个实验点，如在 1 ~ 7 之间与第 5 点对称的点为第 3 点，相对应的投配率 $P = 4\%$ ）。比较投配率为 4% 和 6% 两个实验的结果，并按上述步骤重复进行，如此进行下去，则对可能的 $F_6 - 1 = 13 - 1 = 12$ 次实验，只要 $n - 1 = 6 - 1 = 5$ 次实验，就能找出最优点。

表 2-1 分数法第一种情况安排实验

可能实验次序		1	2 3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	
--------	--	---	-----	--	---	---	---	---	---	---	----	----	----	--

F_n 数列	F_0	F_1	F_2	F_3		F_4			F_5					F_6
相应投配率/%		2	3 4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	
实验次序			x_4	x_3	x_5	x_2			x_1					

(2) 可能进行的实验总次数 m 符合下列关系式： $F_{n-1}-1 < m < F_n-1$

此时，可在实验范围两端增加虚点，人为使实验个数达到 F_n-1 ，使其符合第一种情况，而后安排实验。在虚点上，不要真正做实验，而应判断虚点实验效果比其他实验点都差，实验继续下去，可得到最优值。

例如，混凝沉淀实验中，要从 5 种投药量中筛选出较佳投药量，利用分数法如下安排实验。

由斐波那契数列可知：

$m=5$ ， $F_4-1(4) < m(5) < F_5-1(7)$ ，属于分数法的第二种类型。

首先需增加虚点，使实验总次数增加到 $F_5-1(7)$ 次，如表 2-2。

则第 1 个实验点为 $F_{n-1}=5$ ，投药量为 2.0 mg/L，第 2 个实验点为 $F_{n-2}=3$ ，投药量为 1.0 mg/L。经过比较后，投药量 2.0 mg/L 结果较理想，根据“留好去坏”的原则，舍掉 1.0 以下的实验点，由图可知，第 3 个实验点应安排在实验范围 4~7 内 5 的对称点 6 处，即投药量为 3.0 mg/L。比较结果后投药量 3.0 mg/L 优于 2.0 mg/L，则舍掉 5 点以下数据，在 6~7 范围内根据对称点选取第 4 个实验点为虚点 7，投药量为 0 mg/L，因此最佳投药量为 3.0 mg/L。

表 2-2 分数法第二种情况安排实验

可能实验次序	1 2			3	4	5	6	7	
F_n 数列	F_0	F_1	F_2	F_3		F_4			F_5
相应投药量/(mg/L)		0	0.5 1.0		1.3 2.0		3.0	0	
实验次序				x_2		x_1	x_3		

第三节 多因素正交实验设计

科学实验中考察的因素往往很多，而每个因素的水平数往往也多，此时要全面地进行实验，实验次数就相当多。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。要做这么多实验，既费时又费力，而有时甚至是不可能的。由此可见，多因素的实验存在两个突出的问题：

- 第一是全面实验的次数与实际可行的实验次数之间的矛盾；
- 第二是实际所做的少数实验与全面掌握内在规律的要求之间的矛盾。

为解决第一个矛盾，就需要我们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，我们需要对所挑选的几个实验的实验结果进行科学的分析。

我们把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称为多因素实验。

如何合理地安排多因素实验？又如何对多因素实验结果进行科学的分析？目前应用的方法较多，而正交实验设计就是处理多因素实验的一种科学方法，它能帮助我们在实验前借助于事先已制好的正交表科学地设计实验方案，从而挑选出少量具有代表性的实验做，实验后经过简单的表格运算，分清各因素在实验中的主次作用并找出较好的运行方案，得到正确的分析结果。因此，正交实验在各个领域得到了广泛应用。

一、正交实验设计

正交实验设计，就是利用事先制好的特殊表格——正交表来安排多因素实验，并进行数据分析的一种方法。它不仅简单易行，计算表格化，而且科学地解决了上述两个矛盾。例如，要进行 3 因素 2 水平的一个实验，各因素分别用大写字母 A 、 B 、 C 表示，各因素的水平分别用 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 表示。这样，实验点就可用因素的水平组合表示。实验的目的是要从所有可能的水平组合中，找出一个最佳水平组合。怎样进行实验呢？一种办法是进行全面实验，即每个因素各水平的所有组合都做实验。共需做 $2^3 = 8$ 次实验，这 8 次实验分别是 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_1C_2$ 、 $A_1B_2C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_2B_1C_1$ 、 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_2$ 。为直观起见，将它们表示在图 2-7 中。

图 2-7 的正六面体的任意两个平行平面代表同一个因素的两个不同水平。比较这 8 次实验的结果，就可找出最佳实验条件。

进行全面实验对实验项目的内在规律揭示得比较清楚，但实验次数多，特别是当因素及因素的水平数较多时，实验量很大，例如，6 个因素，每个因素 5 个水平的全面实验的次数为 $5^6 = 15625$ 次，实际上如此大量的实验是无法进行的。因此，在因素较多时，如何做到既减少实验次数，又能较全面地揭示内在规律，这就需要用科学的方法进行合理的安排。

为了减少实验次数，一个简便的办法是采用简单对比法，即每次变化一个因素而固定其他因素进行实验。对 3 因素 2 水平的一个实验，简单比较法的具体做法如下：