



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

水处理工程实验

王学刚 郭亚丹 李泽兵 李文娟 主编



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

水处理工程实验

王学刚 郭亚丹 李泽兵 李文娟 主编

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本实验教材是作者在多年从事水处理技术研究和教学实践总结的基础上,并参考国内外有关资料编写而成的。主要内容包括:绪论,实验设计,误差与实验数据处理,基础性实验,综合应用性实验,附录。通过对本实验教材的学习及专业的综合性实验操作,可使学生加深对水处理工程实验基本理论的理解,掌握水处理工程实验方案设计与实验研究基本方法,以及提高学生分析与处理实验数据的基本技能。

本实验教材主要面向高等院校教学,可作为环境工程、环境科学、给排水科学与工程、水文与水资源工程等专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水处理工程实验/王学刚等主编. —北京:冶金工业出版社, 2016. 10

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7365-5

I. ①水… II. ①王… III. ①水处理—高等学校—教材 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 259152 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 卢 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 彭子赫

责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7365-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2016 年 10 月第 1 版, 2016 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 10 印张; 241 千字; 153 页

28.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

“水处理工程实验”是环境工程、环境科学和给排水科学与工程专业的实践性必修课，是水处理工程、给水工程、排水工程、特种废水处理等教学的重要组成部分。通过本课程的学习，使学生巩固和加深对水处理技术基本理论知识的理解，初步掌握有关水处理技术的基本实践方法、手段和操作技能，培养学生独立思考、分析问题和解决问题的能力，同时能有效提高学生动手实践能力和创新思维能力。

本实验教材内容是在参考国内外有关资料并结合多年科研和教学实践的基础上确定的。全书内容包括：绪论，实验设计，误差与实验数据处理，基础性实验，综合应用性实验，附录。本书主要面向高等院校教学，同时也可供生产和科学研究单位选用。

本实验教材的前言、绪论、第2章、实验3.1、3.2、3.5、3.6、3.7、3.8、3.9、3.10、3.11、4.3和附录由王学刚编写；第1章、实验4.2、4.4、4.6由郭亚丹编写；实验3.3、3.12、3.13、3.14、3.15由李泽兵编写；实验3.4、4.1由李文娟编写；实验4.5由李鹏编写。全书由王学刚负责统稿。在本书编写过程中，得到了东华理工大学环境工程专业老师的大力支持和帮助，同时参阅了大量专家学者的相关文献资料，在此一并表示感谢！

本教材得到了江西省“水处理工程精品课程”、“水处理工程精品资源共享课程”、“环境工程特色专业”和“环境工程专业综合改革试点”等质量工程建设项目资助。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016年8月

目 录

0 绪论	1
0.1 实验教学目的	1
0.2 实验教学程序	1
0.3 实验教学要求	2
0.4 实验室规则	3
0.5 实验室安全守则	3
0.6 实验室意外事故的处理	4
1 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
1.3 多因素正交实验设计	11
2 误差与实验数据处理	20
2.1 误差的基本概念	20
2.2 实验数据处理	29
3 基础性实验	40
3.1 混凝沉淀实验	40
3.2 沉淀实验	45
3.3 过滤与反冲洗实验	59
3.4 活性炭吸附实验	63
3.5 压力溶气气浮实验	68
3.6 酸性废水中和过滤吹脱实验	72
3.7 活性污泥性质的测定实验	75
3.8 曝气设备清水充氧性能的测定	78
3.9 污水可生化性能测定-瓦勃氏呼吸仪法	84
3.10 活性污泥吸附-降解性能测定实验	90
3.11 污泥比阻测定实验	92
3.12 厌氧消化实验	96
3.13 硝化实验	98
3.14 反硝化实验	101

3.15 好氧吸磷-厌氧释磷	103
4 综合应用性实验	106
4.1 自来水深度处理	106
4.2 光催化氧化染料废水实验设计	110
4.3 臭氧氧化法处理印染废水实验	112
4.4 还原法处理酸性含铜废水实验	115
4.5 电渗析除盐实验	117
4.6 光催化还原低浓度含铈废水实验	125
附录	128
附录1 氧在蒸馏水中的溶解度 (1 个大气压时)	128
附录2 相关系数显著性检验表	128
附录3 水样悬浮固体和浊度的测定	129
附录4 化学需氧量 (COD) 的测定	132
附录5 色度的测定	137
附录6 水中细菌总数和大肠菌群的检测	139
附录7 水中臭氧浓度的测定	146
附录8 水中铈含量测定方法 (亚钛还原钒酸铵滴定法)	147
附录9 地表水环境质量标准 (据 GB 3838—2002)	149
附录10 城镇污水处理厂污染物排放标准 (据 GB 18918—2002)	151
参考文献	153

0.1 实验教学目的

实验教学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:

- (1) 加深学生对基本概念的理解,巩固新的知识;
- (2) 使学生了解如何进行实验方案的设计,并初步掌握污水处理实验研究方法和基本测试技术;
- (3) 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。

0.2 实验教学程序

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

0.2.1 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。

0.2.2 实验设计

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、仪器装置、步骤、计划、测试项目和方法等内容。

0.2.3 实验研究

- (1) 根据设计好的实验方案进行实验,按时进行测试;
- (2) 收集实验数据;
- (3) 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:
 - 1) 通过实验掌握了哪些新的知识;

- 2) 是否解决了提出研究的问题;
- 3) 是否证明了文献中的某些论点;
- 4) 当实验数据不合理时, 应分析原因, 提出新的实验方案。

由于受课程学时等条件限制, 学生只能在已有的实验装置和规定的实验条件范围内进行实验, 并通过本课程的学习得到初步的培养和训练, 为今后从事实验研究和进行科学实验打好基础。

0.3 实验教学要求

0.3.1 课前预习

充分预习实验教材是保证做好实验的一个重要环节。为完成好每个实验, 学生在课前必须认真阅读实验教材, 应按每个实验中的要求进行, 应当搞清楚实验的目的、内容、有关原理、操作方法及注意事项等, 并初步估计每一反应的预期结果, 根据不同的实验及指导教师的要求做好预习报告 (若有需要, 某些实验内容可到实验室并在教师的指导下进行预习)。对于每个实验中的“实验前准备的思考题”, 预习时应认真思考。

预习提纲包括:

- (1) 实验目的和主要内容;
- (2) 需测试项目的测试方法;
- (3) 实验中应注意事项;
- (4) 准备好实验记录表格。

0.3.2 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。

0.3.3 实验操作

学生实验前应仔细检查实验设备、仪器、试剂等是否完整齐全。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设备恢复原状, 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。

0.3.4 实验数据处理

通过实验取得大量数据以后, 必须对数据作科学的整理分析, 去伪存真, 去粗取精, 以得到正确可靠的结论。

0.3.5 编写实验报告

将实验结果整理编写成一份实验报告, 是实验教学必不可少的组成部分。这一环节的

训练可为今后写好科研论文或科研报告打下基础。

实验报告包括下述内容:

- (1) 实验目的;
- (2) 实验原理;
- (3) 实验仪器、设备和试剂;
- (4) 实验步骤;
- (5) 实验数据整理和分析;
- (6) 实验结果讨论。

对于科研论文,最后还要列出参考文献。实验教学的实验报告,参考文献一项可省略。实验报告的重点放在实验数据处理和实验结果的讨论。

0.4 实验室规则

实验室规则有以下内容:

(1) 实验前要清点仪器,如果发现有破损或缺少,应立即报告教师,按规定手续到实验预备室补领。实验时仪器若有损坏,亦应按规定手续到实验预备室换取新仪器。未经教师同意,不得拿用别的位置上的仪器。

(2) 实验时应保持安静,思想集中,认真操作,仔细观察现象,如实记录结果,积极思考问题。

(3) 实验时应保持实验室和桌面清洁整齐。废纸屑、废液等应投入废液钵中,严禁投入或倒入水槽内,以防水槽和下水管道堵塞或腐蚀。

(4) 实验时要小心使用仪器和实验设备,注意节约水、电、药品。使用精密仪器时应严格按照操作规范进行,要谨慎细致。如果发现仪器有故障,应立即停止使用,及时报告指导教师。

(5) 药品应按需用量取用,从药品瓶中取出的药品,不应倒回原瓶中,以免带入杂质;取用药品后,应立即盖上瓶塞,以免搞错瓶塞,并随即将药品瓶放回原处。

(6) 实验完毕后应将玻璃仪器洗涤洁净,放回原处。清洁并整理好桌面,打扫干净水槽和地面,最后洗净双手。

(7) 实验结束后或离开实验室前,必须检查电插头或闸刀是否拉开,水龙头是否关闭等。实验室内的一切物品(仪器、药品和实验产物等)不得带离实验室。

0.5 实验室安全守则

化学药品中有很多是易燃、易爆炸、有腐蚀性或有毒的,所以在实验前应充分了解安全注意事项。在实验时,应在思想上十分重视安全问题,集中注意力,遵守操作规程,以避免事故的发生。

(1) 加热试管时,不要将试管口指向自己或别人,不要俯视正在加热的液体,以免液体溅出,受到伤害。

(2) 嗅闻气体时,应用手轻拂气体,扇向自己后再嗅。

(3) 使用酒精灯时, 应随用随点燃, 不用时盖上灯罩。不要用已点燃的酒精灯去点燃别的酒精灯, 以免酒精溢出而失火。

(4) 浓酸、浓碱具有强烈腐蚀性, 切勿溅在衣服、皮肤上, 尤其勿溅到眼睛上。稀释浓硫酸时, 应将浓硫酸慢慢倒入水中, 而不能将水向浓硫酸中倒, 以免迸溅。

(5) 乙醚、乙醇、丙酮、苯等有机易燃物质, 存放和使用时必须远离明火, 取用完毕后应立即盖紧瓶塞和瓶盖。

(6) 能产生有刺激性或有毒气体的实验, 应在通风橱内 (或通风处) 进行。

(7) 有毒药品 (如重铬酸钾、钡盐、铅盐、砷的化合物、汞的化合物等, 特别是氰化物) 不得进入口内或接触伤口。也不能将有毒药品随便倒入下水管道。

(8) 实验室内严禁饮食和吸烟。实验完毕, 应洗净双手后, 才可离开实验室。

0.6 实验室意外事故的处理

实验室意外事故的处理内容如下:

(1) 若因酒精、苯或乙醚等着火, 应立即用湿布或砂土等扑灭。若遇电气设备着火, 必须先切断电源, 再用泡沫式灭火器或四氯化碳类灭火器灭火 (实验室应备有灭火设备)。

(2) 遇有烫伤事故, 可用高锰酸钾溶液或苦味酸溶液洗灼伤处, 再涂上凡士林或烫伤油膏。

(3) 若在眼睛或皮肤上溅着强酸或强碱, 应立即用大量水冲洗, 然后相应地用碳酸氢钠溶液或硼酸溶液冲洗 (若溅在皮肤上, 还可涂上凡士林)。

(4) 若吸入氯、氯化氢等气体, 可立即吸入少量乙醇和乙醚混合蒸汽, 以便解毒; 若吸入硫化氢气体, 会感到不适或头晕, 应立即到室外呼吸新鲜空气。

(5) 被玻璃割伤时, 伤口内若有玻璃碎片, 须先挑出, 再行消毒、包扎。

(6) 遇有触电事故, 首先应切断电源, 然后在必要时, 进行人工呼吸。

(7) 对伤势较重者, 应立即送医院救治, 任何延误都可能使治疗复杂和困难。

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,得到满意的结论。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实验预期的目的,是很值得研究的一个问题。

优化实验设计,就是在实验进行之前,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

实验设计的几个基本概念内容如下:

(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。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) 实验指标。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,称做可控因素。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,称做不可控因素。在实验设计中,一般只考虑可控因素。因此,书中说到的因素,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称做因素的水平。某个因素在实验中需要考察它的几种状态，就称它是几水平的因素。

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，称做定性因素。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，否则称为因素间可有交互作用，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，一般考虑三个方面的内容：

(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，实验范围就用由 a 到 b 的线段表示（见图 1-1），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 $a < x < b$ 。

图 1-1 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。

1.2.1 均分法与对分法

1.2.1.1 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 1-2 所示。



图 1-2 均分法实验点

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

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。

均分法是一种古老的实验方法。其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。

1.2.1.2 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:

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

用对分法, 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。如图 1-3 所示为一个上单峰函数。

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 和 x_2 两点的实验结果, 且 $f(x)$ 值越大, 效果越好。

(1) 如果 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 好, 根据“留好去

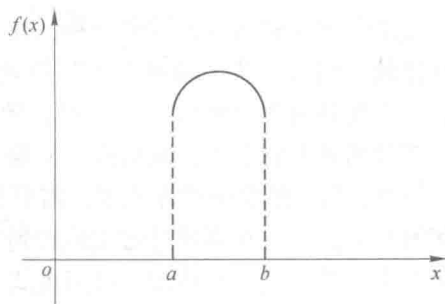


图 1-3 上单峰函数



图 1-4 0.618 法第 1、2 个试验点分布

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，用式 (1-3) 计算新的实验点 x_3 ：

$$x_3 = x_2 + 0.618(b - x_2) \quad (1-5)$$

如图 1-5 所示，在实验点 x_3 安排一次新的实验。

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

$$x_3 = a + 0.382(x_1 - a) \quad (1-6)$$

如图 1-6 所示，在实验点 x_3 安排一次新的实验。



图 1-5 在第一种情况时第 3 个实验点 x_3



图 1-6 在第二种情况时第 3 个实验点 x_3

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

$$x_3 = x_2 + 0.618(x_1 - x_2) \quad (1-7)$$

$$x_4 = x_2 + 0.382(x_1 - x_2) \quad (1-8)$$

在点 x_3 和 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 1000~2000g 之间的某一点，现在要通过做实验找到它，按照 0.618 法选点，先在实验范围的 0.618 处做第 1 个实验，这一点的加入量可由式 (1-3) 计算出来。

$$x_1 = 1000 + 0.618(2000 - 1000) = 1613g \quad (1-9)$$

再在实验范围的 0.382 处做第二次实验，

这一点的加入量可由式 (1-4) 计算出，如图 1-7 所示。



图 1-7 降低水中浑浊度第 1、2 次实验加药量

$$1000 + 0.382(2000 - 1000) = 1382g$$

比较两次实验结果，如果 x_1 点较 x_2 点好，

则去掉 1382 以下的部分，然后在留下部分再用式 (1-3) 找出第三个实验点 x_3 ，在点 x_3 做第 3 次实验，这一点的加入量为 1764g，如图 1-8 所示。

如果仍然是 x_1 点好, 则去掉 1764g 以上的一段, 在留下部分按式 (1-4) 计算得出第四实验点 x_4 , 在点 x_4 做第四次实验, 这一点的加入量为 1528g, 如图 1-9 所示。



图 1-8 降低水中浑浊度第 3 次实验加药量



图 1-9 降低水中浑浊度第 4 次实验加药量

如果这一点比 x_1 点好, 则去掉 1618 到 1764 这一段, 在留下部分按同样方法继续做下去, 如此重复最终即能找到最佳点。

总之, 0.618 法简便易行, 对每个实验范围都可计算出两个实验点进行比较, 好点留下, 从坏点处把实验范围切开, 丢掉短而不包括好点的一段, 实验范围就缩小。在新的实验范围内, 再用式 (1-3)、式 (1-4) 计算出两个实验点, 其中一个就是刚才留下的好点, 另一个是新的实验点。应用此法每次可以去掉实验范围的 0.382, 因此可以用较少的实验次数迅速找到最佳点。

1.2.3 分数法

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。

菲波那契数列是满足下列关系的数列, 即 F_n 在 $F_0 = F_1 = 1$ 时符合下述递推式。

$F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ ($n \geq 2$), 即从第 3 项起, 每一项都是它前面两项之和, 写出来就是:

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, \dots$$

相应的 F_n 为: $F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8, F_9 \dots$

分数法也是适合单峰函数的方法, 它和 0.618 法不同之处在于要求预先给出实验总次数。在实验点能取整数时, 或由于某种条件限制只能做几次实验时, 或由于某些原因, 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时, 利用分数法安排实验更为有利、方便。

利用分数法进行单因素优化实验设计。

设 $f(x)$ 是单峰函数, 现分两种情况研究如何利用菲波那契数列来安排实验。

(1) 所有可能进行的实验总次数 m 值, 正好是某一个 F_{n-1} 值时, 即可能的实验总次数 m 次, 正好与菲波那契数列中的某数减一相一致时。

此时, 前两个实验点, 分别放在实验范围的 F_{n-1} 和 F_{n-2} 的位置上, 也就是先在菲波那契数列上的第 F_{n-1} 和 F_{n-2} 点上做实验, 如图 1-10 所示。

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, 故第 1 个实验点为: $F_{n-1} = F_5 = 8$, 即放在 8 处或放在第 8 个实验点处, 如图 1-10 所示, 投配率为 9%。

同理第 2 个实验点为:

$$F_{n-2} = F_4 = 5$$

即第 5 个实验点投配率为 6%。

可能试验次序	123456789101112											
F_n	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4			F_5	F_6			
数列	1	1	2	3	5			8	13			
相应投配率/%	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
试验次序	x_4		x_3	x_5	x_2	x_1						

图 1-10 分数法第一种情况实验安排

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%, 则根据“留好去坏”的原则, 去掉 9% 以上的部分 (同理, 若 9% 优于 6% 时, 去掉 6% 以下部分) 重新安排实验。

此时实验范围如图中虚线左侧, 可能实验总次数 $m=7$ 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 点内与第 5 点相对称的点为第 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。

(2) 可能的实验总次数 m , 不符合上述关系, 而是符合

$$F_{n-1} - 1 < m < F_n - 1$$

在此条件下, 可在实验范围两端增加虚点, 人为地使实验的个数变成 F_{n-1} , 使其符合第一种情况, 而后安排实验。当实验被安排在增加的虚点上时, 不要真正做实验, 而应直接判定虚点的实验结果比其他实验点数效果都差, 实验继续做下去, 即可得到最优点。

例如, 在混凝沉淀中, 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。

由菲波那契数列可知,

$$\begin{array}{ccccccc}
 m = 5 & F_5 - 1 = 8 - 1 = 7 \\
 F_{n-1} - 1 = F_4 - 1 = 5 - 1 = 4 \\
 F_0 & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 \\
 1 & 1 & 2 & 3 & 5 & 8
 \end{array}$$

$4 < m(5) < 7$, 符合 $F_{n-1} < m < F_n - 1$, 故属于分数法的第二种类型。

首先要增加虚点, 使其实验总次数达到 7 次, 如图 1-11 所示。

则第 1 个实验点为 $F_{n-1}=5$, 投药量为 2.0mg/L, 第 2 个实验点为 $F_{n-2}=3$, 投药量为 1.0mg/L。经过比较后, 投药量 2.0mg/L, 效果较理想, 根据“留好去坏”的原则, 舍掉

可能试验次序	1 2 3 4 5 6 7							
F_n	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5		
数列	1	1	2	3	5	8		
相应投药	0		0.5	1.0	1.3	2.0	3.0	0
试验次序	x_2			x_1		x_3		

图 1-11 分数法第二种情况实验安排

1.0 以下的实验点。由图 1-11 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，即投加药量 3.0mg/L。比较结果后，投药量 3.0mg/L 优于 2.0mg/L 时，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 0mg/L，因此最佳投药量为 3mg/L。

1.3 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：

- (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，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。

1.3.1 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，要进行三因素二水平的一个实验，各因素分别用大写字母 A、B、C 表示，各因素的