

水质工程

实验技术

艾翠玲 邵享文 编著

SHUIZHI
GONGCHENG
SHIYAN JISHU



化学工业出版社

水质工程

实验技术

艾翠玲 邵享文 编著

SHUIZHI

GONGCHENG

SHIYAN JISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

本实验教材是作者在多年水质工程技术研究和实验教学经验总结的基础上完成的。全书共分为五章,内容主要包括实验设计、实验数据的分析处理、水样的采集与保存方法、水质分析基础实验、水质工程实验等。

本书可作为高等学校给水排水工程、环境工程、环境科学等专业实验课的教材,也可供相关领域的工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

水质工程实验技术/艾翠玲,邵享文编著. —北京:
化学工业出版社, 2011. 8
ISBN 978-7-122-11946-9

I. 水… II. ①艾…②邵… III. 水质-水处理-
实验-教材 IV. TU991. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 147675 号

责任编辑:刘兴春

文字编辑:荣世芳

责任校对:宋 夏

装帧设计:张 辉

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 15 字数 318 千字 2011 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

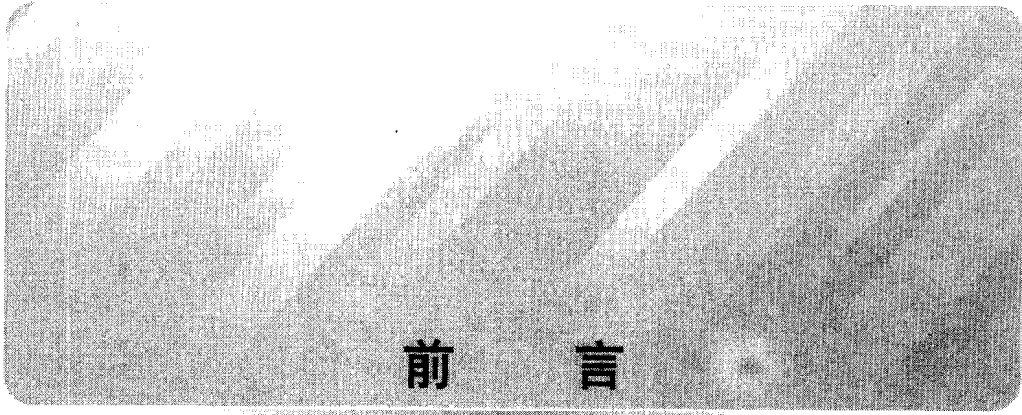
购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

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: 38.00 元

版权所有 违者必究



前 言

《水质工程实验技术》是给水排水工程、环境工程、环境科学等专业一门重要的必修课，是培养学生实验研究能力和动手能力的重要手段。通过本课程的学习，可加深学生对水质工程实验基本理论的理解，培养学生科学地设计和组织实验方案的初步能力，培养学生进行水质工程实验的一般技能以及使用仪器、设备和测试工具的基本能力，训练学生分析与处理实验数据的基本技能。

本实验教材是作者在多年水质工程技术研究和实验教学经验总结的基础上完成的。内容包括实验基础理论和实验技术两部分，其中实验基础理论包括实验设计和实验数据的分析处理；实验技术包括水样的采集与保存方法、水质分析基础实验和水质工程实验。本书在编排上尽量做到由浅入深，在实验项目设计上具有较强的完整性、实用性、独立性、系统性、正确性和科学性。

邵亨文参与了绪论、第一章和第四章中实验 4-12~实验 4-16 的编著；蔡丽云参与了第二章和第四章中实验 4-1~实验 4-11 的编著；郭锐敏参与了第三章和第四章中实验 4-17~实验 4-19 以及第五章中实验 5-1~实验 5-4 的编著；韩云红参与了第五章中实验 5-5~实验 5-11 的编著；何新宇参与了第五章中实验 5-12~实验 5-18 的编著；侯宁宁参与了第五章中实验 5-19~实验 5-22 以及附录的编著。邵亨文对本书的审校做了大量的工作。本书在编著过程中参考了大量文献资料，在此一并表示感谢！

限于学术水平和实践经验，书中不当之处在所难免，敬请专家和读者给予批评指正。

编著者
2011 年 4 月

目 录

绪论	1
一、水质工程实验的作用	1
二、水质工程实验过程	2
第一章 实验设计	5
第一节 实验设计的几个基本概念	6
第二节 单因素优化实验设计	6
一、均分法和对分法	7
二、黄金分割法	8
三、分数法	9
四、分批实验法	11
第三节 多因素正交实验设计	11
一、正交实验设计	11
二、多指标的正交实验及直观分析	19
第二章 实验数据分析处理	24
第一节 实验误差分析	24
一、测量值及误差	24
二、直接测量值误差分析	26
三、间接测量值误差分析	27
四、测量仪器精度的选择	29
第二节 实验数据整理	30
一、有效数字及其运算规则	30

二、实验数据整理	31
三、实验数据中可疑数据的取舍	32
四、实验数据整理计算举例	34
第三节 数据处理	36
一、单因素方差分析	36
二、正交实验方差分析	40
三、实验成果的表示法	47
四、回归分析	53
第三章 水样的采集与保存	67
第一节 水样的采集	67
一、环境水样的采集	67
二、废水样品的采集	71
第二节 水样的保存	73
第三节 样品的管理	76
第四章 水质分析基础实验	77
实验 4-1 水中色度、浊度、pH 值的测定	77
实验 4-2 水中总不可滤残渣的测定	80
实验 4-3 水中 Cr^{6+} 的测定	81
实验 4-4 水中铁的测定	83
实验 4-5 水中溶解氧的测定	86
实验 4-6 水中氨氮的测定	89
实验 4-7 水中亚硝酸盐氮的测定	91
实验 4-8 水中硝酸盐氮的测定	95
实验 4-9 水中凯氏氮的测定	98
实验 4-10 水中总氮的测定	100
实验 4-11 水中磷的测定	102
实验 4-12 水中氯离子的测定	104
实验 4-13 水中硫酸盐的测定	107
实验 4-14 水中余氯的测定	108
实验 4-15 水中 COD 的测定	110
实验 4-16 水中 BOD_5 的测定	113
实验 4-17 水中矿物油的测定	118
实验 4-18 水中挥发酚的测定	120
实验 4-19 水中阴离子洗涤剂测定	123

第五章 水质工程实验 127

实验 5-1 显微镜的使用与活性污泥微生物形态的观察 127

实验 5-2 微生物对含碳化合物的分解和利用 131

实验 5-3 微生物对含氮化合物的分解和利用 134

实验 5-4 活性污泥混合液耗氧速率的测定 137

实验 5-5 总大肠菌群数的测定实验 138

实验 5-6 混凝沉淀实验 140

实验 5-7 过滤实验 146

实验 5-8 消毒实验 157

实验 5-9 污泥比阻测定实验 161

实验 5-10 活性污泥性能的测定 165

实验 5-11 氧总转移系数的测定实验 168

实验 5-12 污水充氧修正系数 α 、 β 值测定实验 174

实验 5-13 完全混合式活性污泥法处理系统的观测与运行 177

实验 5-14 曝气池中环境因素的监测和菌胶团中生物相的观察 182

实验 5-15 SBR 法实验 186

实验 5-16 加压溶气气浮实验 189

实验 5-17 膜生物反应器 (MBR) 实验 192

实验 5-18 吸附动力学实验 196

实验 5-19 塔式生物滤池实验 197

实验 5-20 生物转盘实验 200

实验 5-21 污泥好氧消化 203

实验 5-22 臭氧氧化法处理污水实验 210

 附：臭氧浓度的测定 212

附录 214

附录 1 常用正交实验表 214

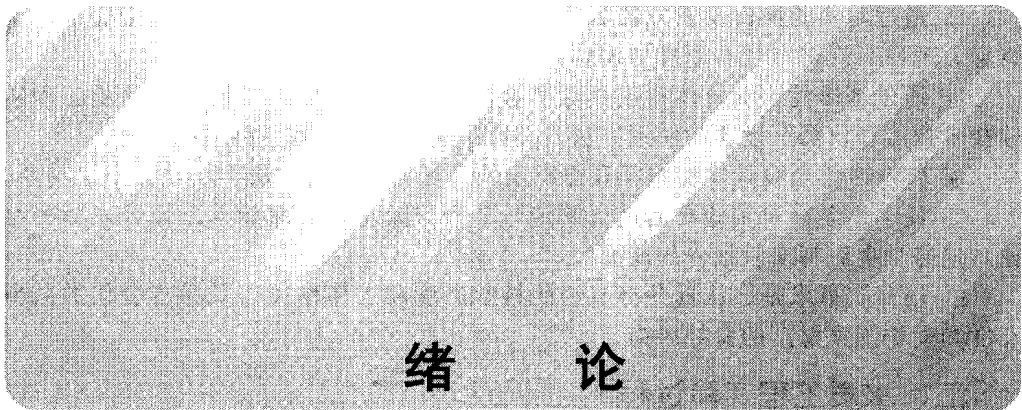
附录 2 离群数据分析判断表 221

附录 3 F 分布表 223

附录 4 相关系数检验表 224

附录 5 废水生物处理过程中常见的微生物 225

参考文献 232



绪 论

一、水质工程实验的作用

自然科学除数学外，几乎都可以说是实验科学，离不开实验技术。实验不仅用来检验理论正确与否，而且大量的客观规律、科学理论的发现与确立又都是从科学实验中总结出来的，因此实验技术是科学研究的重要手段之一。

水质工程学本身就不是一个纯理论型学科，因而实验技术更为重要，不仅一些现象、规律、理论，而且工程设计和运行管理中的很多问题也都离不开实验。例如，给水处理工程中的混凝沉淀，其药剂种类的选择及生产运行适宜条件的确定；又如废水处理工程中活性污泥系统沉淀池的设计，其污泥沉速与极限固体通量等重要设计参数都要通过实验测定，才能正确地选择。同时，水质工程实验可用于指导理论规律的研究，改进现有工艺、设备以及新的工艺、新设备。因此在学习给水排水工程、环境类学科有关专业课程的同时，必须有意识地加强《水质工程实验技术》课程的学习，注意培养自己独立解决工程实践中一些实验技术问题的能力。

水质工程实验是对给水排水工程、环境类学科本科专业水质工程学理论课程中重要知识点和规律的实验诠释。

水质工程实验技术突出基础性、综合性和创新性。通过基础性实验操作训练，使学生掌握基本的实验技能和简单的仪器、设备及测量工具的使用方法；同时通过对直观实验现象的观察、分析，使学生在感性认识的基础上对专业基础技术知识的基本概念与规律能更准确地理解并加以巩固。在此基础上，再通过专业的综合性和创新性实验操作训练，贴近生产和工程实践应用，使学生掌握开展科学研究的最基本方法和步骤的实验技能，培养学生进行实验设计和实验成果整理的综合分析问题、解决问题的能力。

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。水质工程实验技术课的教学目的与任务如下。

① 从专业基础技术入手，逐步深入专业理论学习，增强综合性，使学生逐步从感性认识提升到理性分析和认识。

② 通过对实验操作及现象的观察、实验结果的分析,加深对水质工程学基本概念、现象、规律与基本原理的理解。

③ 通过基础性、综合性和创新性实验操作训练,使学生掌握一般水质工程实验技术技能和仪器、设备的使用方法,具有一定解决实验技术问题的能力。

④ 使学生学会设计实验方案和组织实验、实施实验的方法。

⑤ 使学生学会对实验数据进行测定、分析与处理,从而能得出切合实际的结论,培养学生编写实验报告的能力。

⑥ 培养实事求是、认真勤俭节约的科学态度和工作作风以及融洽合作的共事态度和爱护国家财产的良好风尚。

二、水质工程实验过程

水质工程实验过程一般分为实验准备工作、实验操作过程、实验数据分析与处理 3 个步骤。

1. 实验准备工作

实验前的准备工作,不仅关系到实验的进度,而且直接影响实验的质量和成果。其准备工作大致如下。

(1) 理论准备工作 主要包括 3 个方面。

① 搞清实验原理和实验目的。实验前搞清实验目的及实验原理,才能更好地指导实验、进行实验并得到满意的结果。例如,在研制生化处理中使用曝气设备时,当搞清充氧原理和实验目的后,就可以通过清水充氧实验分析产品的优缺点、存在的问题和改进方向,以期得到一个较佳的新产品及适宜的运行条件。

② 进行实验方案的优化设计。如何以最小代价迅速圆满地得到正确的实验结论,关键在于实验方案的设计。所以在掌握实验原理和实验目的之后,要利用所学实验设计的知识及专业知识进行实验方案设计,从而正确地编排实验内容,指导实验。

③ 查阅有关文献资料。了解当前技术发展情况,掌握研究现状。

(2) 实验设备、测试仪器的准备 设备、仪器是完成实验必不可少的工具。水质工程学问题的复杂性以及当前测试设备、仪器还不够完备,给水质工程实验技术带来了一定的困难。

① 一般设备、仪器的准备。为了保证实验顺利进行并有足够的精度,对所使用的设备、仪器要求做到:事先熟悉其性能、使用条件,并正确地选择仪器的精度;检查设备、仪器的完好度;记录各种必要的参数;某些易损易耗的设备、仪表要有备用品。

② 专用实验设备的准备。为了进行某项实验而选用专用设备时,必须注意这些设备的可靠性、使用条件和性能。当某些专用设备和某种工艺流程所需各种构筑物需自己设计加工时,除了从理论上符合要求外,还要考虑到实验条件与今后生产运行条件的一致性,以使实验成果具有良好的使用价值。在没有运行前,一般要先经清水调试修改至正常运行为止。

(3) 测试步骤与记录表格的准备

① 步骤。整个实验分几步或几个工况完成, 每一步或每一工况操作的内容、解决的问题、使用的设备、仪表、取样与化验项目、观察与记录内容、人员分工、注意事项、要求等, 都要做到测试人员心中有数。

② 记录表格。设计记录表格是一项重要的工作, 实验前应认真地设计出各种测试所需的记录表格。对于某些新开实验则应根据实验过程中发现的问题, 随时进行修改、调整。要求记录表格正规化, 便于记录、便于整理。其内容包括: 参加人员, 测试条件, 仪器设备名称、型号、精度, 观察现象, 测试原始数据等。

(4) 人员分工 水质工程实验一般均需多人同时配合进行, 因此要事先共同制定出实验方案, 使每一个参加测试的人员对实验原理、目的、测试步骤从整体上做到心中有数, 同时每人分工负责各项工作, 如操作、取样、化验、观察、记录等, 以便使实验有条不紊、准确无误地进行。

2. 实验操作过程

(1) 仪器设备的安装与调试 使用各种仪器、设备进行实验时, 必须满足仪器、设备的正常运行要求。安装调试后要认真检查, 确认一切符合要求后方能开始实验, 否则事倍功半, 这一点特别要引起足够的重视。一般要注意, 仪器设备安装位置应便于观察、读数和记录。条件允许时, 最好通过试做以达到对整个实验的了解并检查全部准备工作。

(2) 实验 在上述各项工作结束后, 即可进入实验阶段, 按人员分工分别完成各项工作。

① 取样与分析。取样一定要注意要求, 例如时间、地点、高度等, 以便能正确地取出所需样品, 提供分析。样品分析一般可参照水质分析要求进行。

② 观察。实验中某些现象只能通过肉眼观察并加以描述, 因此要求观察时一定要集中精力, 排除外界干扰, 边观察, 边记录, 用图与文字加以描述。例如做悬浮物絮凝沉淀时, 对颗粒絮凝作用及絮凝体形成和凝聚变大、下沉过程的描述。

③ 记录。记录是实验中一项经常的工作, 记下的数据是今后整个实验计算、分析的依据, 是整个实验的宝贵资料。记录就是如实地记下测试中所需要的各种数据, 要求清楚、工整。一般要求如下。

记录要记在记录本或记录纸上, 不要随便乱记, 更不得记后再整理抄写而丢掉原始记录。记错改动不得乱涂, 而应打叉后重写, 以便今后分析时参考。

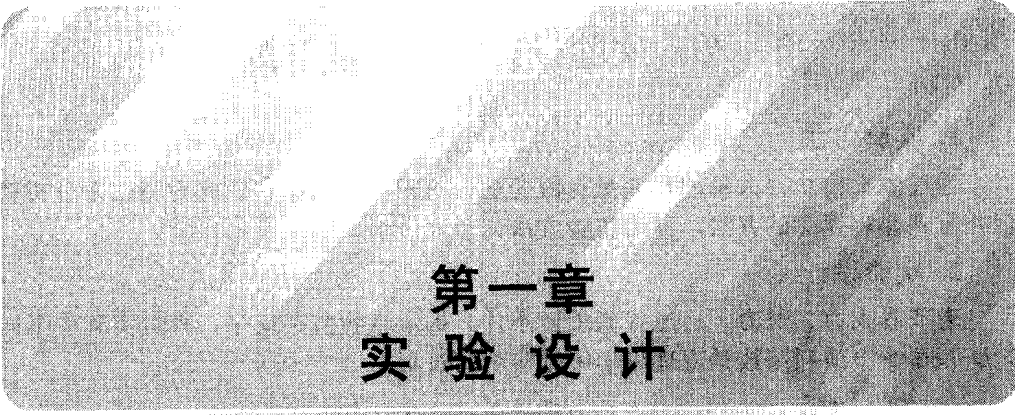
记录的内容要尽可能地详尽。一般分为: 一般性内容, 如实验日期、时间、地点、气温等; 与实验有关的内容, 如实验组号、参加人员、实验条件、测试仪器名称、型号、精度等; 实验原始数据, 即由仪表或其他测试方法所得, 未经任何运算的数值。读出后马上记录, 不要过后追记, 尽可能减少差错; 实验中所发现的问题及观测到的一些现象或某些特殊现象等, 也应随时详细记录。

总之, 记录不要怕多、怕麻烦, 避免由于实验前对其规律认识还不透彻、记录内容考虑不周, 实验后进行分析、计算时发现缺这少那又后悔莫及, 造成不可弥补的损失。

3. 实验数据分析处理与实验报告

(1) 实验数据的分析处理 是整个实验过程中的一个重要部分。实验过程中应随时进行数据整理分析,一方面可以看出实验效果是否能达到预期目的,另一方面又可以随时发现问题,修改实验方案,指导下一步实验的进行。整个实验结束后,要对数据进行分析处理,从而确定因素主次、最佳生产运行条件、建立经验式、给出事物内在规律等。其内容大致分为实验数据的误差分析,有效数字的取舍,实验数据的分析整理,实验数据的处理。

(2) 实验报告 是对整个实验的全面总结,是整个实验的宝贵资料。要求全篇报告文字通顺、字迹端正、图表整齐、结果正确、讨论认真。一般报告由以下几部分组成:a. 实验名称;b. 实验目的;c. 实验原理;d. 实验装置仪表;e. 实验数据及分析处理;f. 结论;g. 问题讨论。



第一章 实验设计

水质工程学是给水排水工程、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。

水质工程实验技术是水质工程的重要组成部分，是解决水处理中各种问题必不可少的一个重要手段，通过实验可以解决以下问题。

① 找出影响实验结果的因素及各因素的主次关系，为水质工程中的方法揭示内在规律，建立理论基础。

② 寻找各因素的最佳量，以使水质工程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，建立起经验公式，以解决工程实际中的问题并为水质工程的优化设计、优化控制及开发新的水处理技术和设施提供可靠的依据等。

在实验安排中，如果实验设计得好，实验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，实验次数再多，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，是很值得研究的一个问题。

优化实验设计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、合理地安排实验，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必要的。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，其中单因素的均分法、对分法、黄金分割法和分数法以及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，取得了很好的效果。

第一节 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——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

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，为了降低浑浊度需向水中投加混凝剂，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，在水中投加适量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，叫做不可控因素。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做因素的水平。某个因素在实验中需考察它的几种状态，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，不能用数量来表示。凡是不能用数量表示水平的因素，叫做定性因素。在多因素实验中，经常会遇到定性因素。对定性因素，只要对各水平规定具体含义，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，一般考虑以下三方面的内容。

首先，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（图 1-1），实验范围就用由 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 1-1 单因素实验范围

其次，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价指标。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），就要确定评价实验结果好坏的标准。

最后，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、黄金分割法、分数法和分批实验法。

一、均分法和对分法

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，在各个分点上作实验，见图 1-2。

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

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 次实验中的最优点。

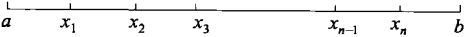


图 1-2 均分法实验点

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；缺点是实验次数较多，代价较大。

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

$$x = \frac{a+b}{2} \tag{1-2}$$

用这种方法，每次可取掉实验范围的一半，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 $x = \frac{a+b}{2}$ ，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。

对分法的优点是每次实验可以将实验范围缩小一半，缺点是要求每次实验要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。

二、黄金分割法

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差，将这样的目标函数称为单峰函数。图 1-3 所示为一个上单峰函数。

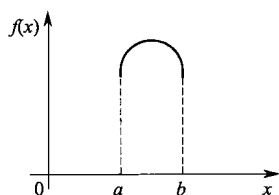


图 1-3 上单峰函数

黄金分割法适用于目标函数为单峰函数的情形。所谓黄金分割指的是把长为 L 的线段分为两部分，使其中一部分对于全部之比等于 $\omega = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.6180339887\cdots$ ，它的三位有效近似值就是 0.618，所以黄金分割法又称为 0.618 法。

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

$$x_1 = a + 0.618(b - a) \quad (1-3)$$

第二次实验点选在在第一点 x_1 的对称点 x_2 处，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 与 x_2



两点的实验结果，且 $f(x)$ 值越大，效果越好。

图 1-4 0.618 法第 1、2 个实验点分布

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，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 $(x_1, b]$ 部分，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，上述三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 $[x_2, b]$ 上用公式(1-3) 计算新的实验点 x_3

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

如图 1-5 所示，在实验点 x_3 安排一次新的实验。

在第二种情况下，在剩余实验范围 $[a, x_1]$ 上用公式(1-4) 计算新的实验点 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。



图 1-5 情况①时第 3 个实验点 x_3

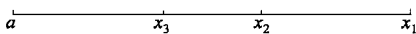


图 1-6 情况②时第 3 个实验点 x_3

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

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

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

在 x_3 、 x_4 安排两次新的实验。

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 次实验，这一点的加入量可由公式(1-3) 计算出来。

$$x_1 = 1000 + 0.618(2000 - 1000) = 1618g$$

再在实验范围的 0.382 处做第 2 次实验，这一点的加入量可由公式(1-4)

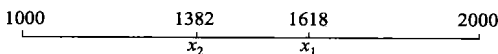


图 1-7 降低水中浊度

第一、第二次实验加药量

算出，如图 1-7 所示。

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

比较两次实验结果，如果 x_1 点较 x_2 点好，则去掉 1382g 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，在这一点的加入量为 1764g，如图 1-8 所示。

如果仍然是 x_1 点好，则去掉 1764g 以右的一段，在留下部分按式(1-4) 计算得出第四个实验点 x_4 ，在点 x_4 做第 4 次实验，这一点的加入量为 1528g，如图 1-9 所示。

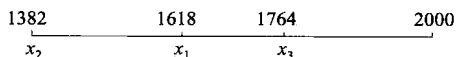


图 1-8 降低水中浊度第三次实验加药量

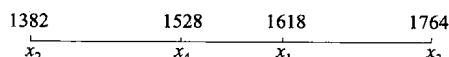


图 1-9 降低水中浊度第四次实验加药量

如果这一点比 x_1 点好，则去掉 1618～1764g 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，实验范围就缩小了。在新的实验范围内，再用式(1-3)、式(1-4) 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。

三、分分数法

分分数法又叫斐波那契数列法，它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。

根据斐波那契数列： $F_0=1, F_1=1, \dots, F_n=F_{n-1}+F_{n-2} (n\geq 2)$ （即从第3项起，每一项都是它前面两项之和），可得到以下数列：

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, ...

分数法适用于实验点只能取整数或限制实验次数的情况，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。例如，如果只能做1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2次实验，第1次实验在2/3处做，第2次实验在1/3处做，其精确度为1/3；如果能做3次实验，则第1次实验在3/5处做，第2次实验在2/5处做，第3次实验在1/5或4/5处做，其精确度为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1-1。

表 1-1 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	...	$\frac{1}{F_{n-1}+F_{n-2}}$	$1/F_{n+1}$	...



图 1-10 分数法实验点位置示意图

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1个实验点 x_1 和新实验点 x_2 。

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

$$x_2 = a + (b - x_m) \tag{1-6}$$

其中 x_m 为中数，即已实验的实验点数值。式(1-5)、式(1-6)可由图1-10所示推出。

【例1-1】某污水厂设备投加 FeCl_3 来改善污泥的脱水性能，根据初步调查，投药量在160mg/L以下，要求通过4次实验确定最佳投药量。

解：具体计算方法如下：

根据式(1-5)得到第1个实验点位置： $0 + \frac{5}{8}(160-0) = 100\text{mg/L}$

根据式(1-6)得到第2个实验点位置： $0 + (160-100) = 60\text{mg/L}$

假定第1点比第2点好，所以在(60,160)之间找第3点，去掉(0,60)的一段，即 $60 + (160-100) = 120\text{mg/L}$ 。

第3点与第1点结果一样，此时可用“对分法”进行第4次实验，即在 $(100+120)/2 = 110\text{mg/L}$ 处进行实验，得到的效果最好。