



全国高等院校环境科学与工程统编教材

环境工程实验

HUANJING GONGCHENG SHIYAN

(第二版)

王 琼 尹奇德 主编



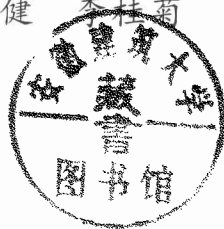
华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

环境工程实验

(第二版)

主 编	王 琼	尹奇德			
副主编	胡将军	周康群	李 燕	杨宗政	
参 编	依成武	卢俊平	周广柱	牛晓霞	
	黄忠臣	尹令实	朱 健	李桂菊	



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书对环境工程实验技术进行了全面介绍,内容包括环境工程实验的教学目的与要求、实验设计、误差分析与实验数据处理、实验样本的采集与保存、水处理实验、大气污染控制实验、固体废物处理与处置实验、环境噪声控制实验和污染土壤修复实验,以及相关指标分析等方面。

本书可作为高等院校专业实验教材供环境类专业学生使用,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

环境工程实验/王琼,尹奇德主编. —2版. —武汉:华中科技大学出版社,2018.1

全国高等院校环境科学与工程统编教材

ISBN 978-7-5680-3657-3

I. ①环… II. ①王… ②尹… 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(2018)第 014302 号

环境工程实验(第二版)

王 琼 尹奇德 主编

Huanjing Gongcheng Shiyan

策划编辑:王新华

责任编辑: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:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:19.75

字 数:513千字

版 次:2018年1月第2版第1次印刷

定 价:42.00元



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

全国高等院校环境科学与工程统编教材

作者所在院校

南开大学	中山大学	中国地质大学	东南大学
湖南大学	重庆大学	四川大学	东华大学
武汉大学	中国矿业大学	华东理工大学	中国人民大学
厦门大学	华中科技大学	中国海洋大学	北京交通大学
北京理工大学	大连民族学院	成都信息工程大学	河北理工大学
北京科技大学	东北大学	华东交通大学	华北电力大学
北京建筑大学	江苏大学	南昌大学	广西师范大学
天津工业大学	常州大学	景德镇陶瓷大学	桂林电子科技大学
天津科技大学	扬州大学	长春工业大学	桂林理工大学
天津理工大学	中南大学	东北农业大学	仲恺农业工程学院
西北工业大学	长沙理工大学	哈尔滨理工大学	华南师范大学
西北大学	南华大学	河南大学	嘉应学院
西安理工大学	华中师范大学	河南工业大学	茂名学院
西安工程大学	华中农业大学	河南理工大学	浙江工商大学
西安科技大学	武汉理工大学	河南农业大学	浙江农林大学
长安大学	中南民族大学	湖南科技大学	太原理工大学
中国石油大学(华东)	湖北大学	洛阳理工学院	兰州理工大学
山东科技大学	长江大学	河南城建学院	石河子大学
青岛农业大学	江汉大学	韶关学院	内蒙古大学
山东农业大学	福建师范大学	郑州大学	内蒙古科技大学
聊城大学	西南交通大学	郑州轻工业学院	内蒙古农业大学
泰山医学院	成都理工大学	河北大学	中南林业科技大学

第二版前言

环境工程实验是环境工程学科的重要组成部分，是科研和工程技术人员解决环境污染治理中各种问题的重要手段。许多污染现象的解释，污染治理技术、处理设备的设计参数和操作运行方式的确定，都需要通过实验解决。例如，污水处理中混凝沉淀所用药剂种类的选择和生产运行条件的确定、热解焚烧技术处理固体废物时工艺参数的确定等，都需要通过实验测定，然后才能较合理地进行工程设计。

本书按照教育部高等学校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编写，内容包括实验设计与数据处理、实验样本的采集与保存、水处理实验、大气污染控制实验、固体废物处理与处置实验、环境噪声控制实验和污染土壤修复实验，以及相关指标分析等方面。为加强学生科研创新能力的培养，在一般的检测性、验证性实验的基础上，增加了一些设计性、研究性实验，如实验标题中标注有“*”的实验。

本书由王琼、尹奇德主编。参加编写工作的有：长沙理工大学王琼、尹奇德、尹令实，武汉大学胡将军，仲恺农业工程学院周康群，中国矿业大学李燕，天津科技大学杨宗政、李桂菊，江苏大学依成武，内蒙古农业大学卢俊平，山东科技大学周广柱，郑州轻工业学院牛晓霞，北京建筑大学黄忠臣，中南林业科技大学朱健。编写过程中，周聪、赵文玉、蒋朝晖、刘志华、宋剑飞、杨晓焱、晏永祥、黄灵芝、刘春华、曾经、杨敏等参与了录入、绘图、校对等工作。衷心感谢湖南大学曾光明教授、中南林业科技大学王平教授的审阅和悉心指导。本书的编写参考了一些专家、学者的相关文献资料，在此表示诚挚的感谢。

本书可作为高等院校专业实验教材供环境类专业学生使用，也可供环境工程领域科研和工程技术人员参考。选用本书作教材的教师如欲获得与本书配套的教学资源，包括多媒体教学课件、教案、讲稿、习题答案、授课计划以及全套实验室装备设计安装调试服务等，请与作者联系（电子信箱：7570534@qq.com；电话 0731-85258733）。

编 者

目 录

第 1 章 环境工程实验的教学目的与要求	(1)
1.1 实验的教学目的	(1)
1.2 实验的基本程序	(1)
1.3 实验的教学要求	(2)
1.4 设计性、研究性实验	(2)
第 2 章 实验设计	(5)
2.1 实验设计简介	(5)
2.1.1 实验设计的目的	(5)
2.1.2 实验设计的几个基本概念	(6)
2.1.3 实验设计的应用	(7)
2.1.4 实验设计的步骤	(7)
2.2 单因素实验设计	(8)
2.2.1 均分法和对分法	(8)
2.2.2 0.618 法	(9)
2.2.3 分数法和分批实验法	(11)
2.3 双因素实验设计	(13)
2.3.1 从好点出发法	(13)
2.3.2 平行线法	(13)
2.4 多因素正交实验设计	(14)
2.4.1 正交表与正交实验方案设计	(14)
2.4.2 正交实验分析举例	(17)
第 3 章 误差分析与实验数据处理	(20)
3.1 误差分析	(20)
3.1.1 真值与平均值	(20)
3.1.2 误差与误差的分类	(21)
3.1.3 准确度与精密度	(23)
3.1.4 误差分析	(24)
3.2 实验数据整理	(25)
3.2.1 有效数字及其运算	(25)
3.2.2 可疑观测值的取舍	(26)
3.3 实验数据处理	(27)
3.3.1 方差分析	(27)
3.3.2 实验数据的表示法	(38)
第 4 章 实验样本的采集与保存	(49)
4.1 水样的采集与保存	(49)
4.1.1 水样的采集	(49)

4.1.2 水样的保存	(51)
4.2 气体样本的采集与保存	(61)
4.2.1 气体样本的采集	(61)
4.2.2 气体样本的保存	(66)
4.3 固体样本的采集与保存	(66)
4.3.1 固体样本的采集	(66)
4.3.2 固体样本的保存	(70)
第5章 水处理实验及指标分析	(72)
5.1 常用指标及分析方法	(72)
5.1.1 表征酸碱性的指标	(72)
5.1.2 表征感官性状的指标	(74)
5.1.3 表征有机物含量的指标	(75)
5.1.4 气体类指标	(79)
5.1.5 某些特定物质指标	(80)
5.2 水处理实验	(81)
5.2.1 混凝实验	(81)
5.2.2 自由沉淀实验	(87)
5.2.3 絮凝沉淀实验	(91)
5.2.4 成层沉淀实验	(95)
5.2.5 原水颗粒分析实验	(99)
5.2.6 过滤实验	(101)
5.2.7 酸性废水中和实验	(105)
5.2.8 气浮实验	(108)
5.2.9 活性炭吸附实验	(112)
5.2.10 离子交换实验	(116)
5.2.11 加氯消毒实验	(121)
5.2.12 臭氧消毒实验	(124)
5.2.13 膜分离实验	(128)
5.2.14 电渗析实验	(131)
5.2.15 曝气设备充氧性能的测定	(136)
5.2.16 工业污水可生化性实验	(142)
5.2.17 活性污泥性质的测定	(147)
5.2.18 活性污泥法动力学系数的测定	(149)
5.2.19 完全混合曝气池处理污水实验	(153)
5.2.20 间歇式活性污泥法实验	(156)
5.2.21 高负荷生物滤池实验	(158)
5.2.22 生物转盘实验	(161)
5.2.23 厌氧消化实验	(165)
5.2.24 污泥比阻的测定	(171)
5.2.25 自来水深度处理实验	(176)

5.2.26 城市污水深度处理及回用技术与研究	(179)
* 5.2.27 工业废水处理实验与研究	(180)
第6章 大气污染控制实验及指标分析	(182)
6.1 常用指标及分析方法	(182)
6.1.1 颗粒物浓度	(182)
6.1.2 二氧化硫浓度	(183)
6.1.3 甲醛浓度	(184)
6.2 大气污染物监测	(185)
6.2.1 大气中总悬浮颗粒物的测定	(185)
6.2.2 气体中可吸入颗粒物的测定	(188)
6.2.3 气体中 SO_2 的测定	(191)
6.2.4 气体中 NO_x 的测定	(194)
6.3 粉尘物理性质的测定	(196)
6.3.1 粉尘真密度测定	(196)
6.3.2 粉尘比电阻的测定	(199)
6.3.3 粉尘分散度测定	(201)
6.4 除尘器性能的实验	(206)
6.4.1 电除尘器电晕放电特性实验	(206)
6.4.2 旋风除尘器性能测定	(209)
6.4.3 袋式除尘器性能测定	(215)
* 6.4.4 文丘里洗涤器性能实验	(221)
6.5 气态污染物控制实验	(226)
6.5.1 碱液吸收法净化气体中的 SO_2	(226)
6.5.2 活性炭吸附法净化气体中的 NO_x	(231)
6.5.3 活性炭吸附法净化 VOCs 废气	(235)
6.5.4 机动车尾气的测定	(238)
第7章 固体废物处理与处置实验及指标分析	(243)
7.1 常用指标及分析方法	(243)
7.1.1 物理组成	(243)
7.1.2 含水率	(243)
7.1.3 挥发性物质与灰分	(243)
7.1.4 元素分析	(244)
7.1.5 热值	(244)
7.1.6 容重与孔隙率	(244)
7.1.7 耗氧速率	(245)
7.2 固体废物处理与处置实验	(245)
7.2.1 有机固体废物热值测定	(245)
7.2.2 固体废物的风力分选实验	(248)
7.2.3 固体废物的重介质分选实验	(252)
7.2.4 好氧堆肥模拟实验	(254)

7.2.5 工业废渣渗滤模型实验	(256)
7.2.6 生活垃圾的渗滤实验及渗滤液的处理方案设计	(257)
7.2.7 浸出毒性鉴别实验	(259)
7.2.8 热解焚烧条件实验	(260)
7.3 固体废物资源化、减量化和无害化技术研究实验	(262)
7.3.1 污泥浓缩实验	(262)
7.3.2 污泥压滤实验	(265)
* 7.3.3 废旧轮胎热解资源化研究实验	(268)
* 7.3.4 矿化垃圾等固体废物资源化工艺与机理的实验与研究	(269)
第8章 环境噪声控制实验	(271)
8.1 概述	(271)
8.2 环境噪声测量与控制实验	(271)
8.2.1 城市区域环境噪声测量	(271)
8.2.2 城市道路交通噪声测量	(274)
8.2.3 工业企业噪声排放测量	(276)
8.2.4 设备辐射噪声频谱的现场测量	(278)
8.2.5 材料吸声性能的实验室测量	(281)
第9章 污染土壤修复实验	(284)
9.1 概述	(284)
9.2 土壤中污染物检测及修复实验	(285)
9.2.1 土壤中总铬、水溶性六价铬提取及测定	(285)
9.2.2 土壤铬还原菌的分离、筛选和鉴定	(286)
9.2.3 有机磷农药污染土壤的热脱附	(289)
附录	(293)
附录 A 常用正交实验表	(293)
附录 B F 分布表	(301)
附录 C 相关系数检验表	(303)
参考文献	(304)

第1章 环境工程实验的教学目的与要求

环境工程是建立在实验基础上的学科。许多污染现象的解释,污染治理技术、处理设备的设计参数和操作运行方式的确定,都需要通过实验解决。例如,污水处理中混凝沉淀所用药剂种类的选择和生产运行条件的确定,以及采用热解焚烧技术处理固体废物时工艺参数的确定等,都需要通过实验测定,然后才能较合理地进行工程设计。

环境工程实验是环境工程学科的重要组成部分,是科研和工程技术人员解决环境污染治理中各种问题的重要手段。通过实验研究,可以解决下述问题。

- (1) 掌握污染物在自然界的迁移转化规律,为环境保护提供依据。
- (2) 掌握污染治理过程中污染物去除的基本规律,以改进和提高现有的处理技术及设备。
- (3) 开发新的污染治理技术和设备。
- (4) 实现污染治理设备的优化设计和优化控制。
- (5) 解决污染治理技术开发中的放大问题。

1.1 实验的教学目的

实验教学的宗旨是使学生理论联系实际,实验教学是培养学生观察问题、分析问题和解决问题能力的一个重要方面。本课程的教学目的有以下几方面。

- (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,并初步掌握环境工程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、如何运用实验结果验证已有的概念和理论等。

1.2 实验的基本程序

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

- (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。

- (2) 设计实验方案。

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、实验装置、实验步骤、测试项目和测试方法等内容。

- (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 定期整理分析实验数据。

实验数据的可靠性验证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、测试方法和实验方向等方面的问题,及时解决,使实验工作能较顺利地进行。

(4) 实验小结。

通过系统分析实验数据,对实验结果进行评价。实验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实验结果是否可用于改进已有的工艺设备和操作运行条件或设计新的处理设备;⑤当实验数据不合理时,应分析原因,提出新的实验方案。

1.3 实验的教学要求

实验的教学要求一般有以下几个方面。

(1) 课前预习。

为完成好每个实验,学生在课前必须认真阅读实验教材,清楚地了解实验项目的目的要求、实验原理和实验内容,写出简明的预习提纲。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实验注意事项;④实验记录表格。

(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。

(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表。实验结束后,要将实验设备和仪器仪表恢复原状,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,养成良好的学习、工作习惯。

(4) 实验数据处理。

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

(5) 编写实验报告。

编写实验报告是实验教学必不可少的环节,这一环节的训练可为学生今后写好科学论文或科研报告打下基础。实验报告包括:①实验目的;②实验原理;③实验装置和方法;④实验数据及其整理结果;⑤实验结果讨论。

1.4 设计性、研究性实验

环境类学科是综合性很强的学科,然而长期以来,环境工程实验的教材形成了一种传统的模式,它仅指出实验的目的要求、阐明实验的基本原理、描述实验的仪器设备并介绍实验的方法和步骤。学生阅读了这样的教材后,只要按部就班地在实验室已安排好的仪器设备上进行调试、测量、记录,并进行适当的数据处理,就可以得出结果,完成实验。这样的实验教材,对于让学生初步学习如何进行实验、学会基本仪器的使用、加深对理论的了解,都是有益的,也是必要的。但仅有这样的实验教材是不够的。它在一定程度上限制了学生的主动性与积极性,难以激发学生独立思考的兴趣和激情,因而不利于创新人才的培养。

本教程在一般的检测性、验证性实验的基础上,增加了大量设计性、研究性实验。对于设计性、研究性实验,要求学生通过查阅有关书籍、文献资料,了解和掌握与课题有关的国内外技术状况、发展动态,并在此基础上,根据实验课题要求和实验室条件,提出具体的实验方案设计,包括实验工艺技术路线、实验条件要求、实验计划进度等。这种实验一般要花费较多的时间,而且往往不是一帆风顺的,却是培养学生独立从事科学研究工作能力,特别是创新能力所必需的。通过这样的实验,学生能深入理解环境科学与工程原理,提高自学能力、动手能力和设计能力,激发创新精神。

设计性、研究性实验的研究报告应包括:①课题的调研;②实验方案的设计;③实验过程的描述;④实验结果的分析讨论;⑤实验结论;⑥参考文献。

设计性、研究性实验使学生经历“三个全面”的过程,即全面分析研究问题的过程、实验技能得到全面锻炼的过程、综合能力得到全面提升的过程。具体的培养方式和要求有以下几方面。

(1) 实验题目和内容。

实验题目的设计是设计性、研究性实验的关键。实验题目要体现内容新、难度适中和可操作性强的原则。内容要结合学科的发展,使学生能体会到学科发展的最新动态;难度适中体现在适合本科生的实际水平,使学生有信心、有能力完成,并得到相应的锻炼;可操作性是要求实验题目与实验室的条件、指导教师的研究方向相一致,避免出现实验过程失控的现象。

实验内容要以环境科技的发展方向、承担的研究项目和现有基础为依托,并结合本科生创新人才的培养要求而确定。开设设计性、研究性实验,每个实验课题宜在一个大题目下,设若干分题,当参加实验的学生较多时,可以避免出现题目重复的现象,确保实验质量,同时也有利于实验难度和可操作性的控制。

(2) 实验方案的讨论与确定。

与学生进行实验方案的讨论是设计性、研究性实验的另一关键点。本科生不同于研究生,提出的实验方案会出现很多方面不合理的问题,需要指导老师予以具体分析,积极引导,协助确定一个切实可行的实验方案。同时,实验方案的讨论也是对学生发现问题、分析问题和创新能力的重要培养锻炼过程。

(3) 实验目标与要求。

① 独立查阅与检索文献。学生应在了解实验背景、目的及基本内容后,学习和掌握文献资料的查阅、检索和应用,独立进行文献查阅与检索工作,完成实验方案的设计。

② 自主进行实验研究。在巩固实验操作技能的基础上,学习实验研究技术。在指导教师的辅助与引导下,自主完成实验装置的装配、分析测定试剂的配制与仪器准备;自主运行实验装置,掌握实验数据记录表格的设计、数据整理与分析方法;在指导教师的督导下,学习并实施相关大型分析仪器的分析操作。

③ 科学分析与推导。要求学生学习和初步掌握对实验数据的科学分析与推演方式。掌握依据实验结果推演到结论的思维过程,巩固所学的基础知识和相关专业知识,培养和提高科学研究能力。

④ 创新思维和提高。通过整个实验研究过程,培养和锻炼发现问题、分析问题和解决问题的综合能力,使学生的主观能动性、创新思维和能力得到激发和提高。

(4) 教学过程。

① 查阅资料,提出实验方案。这一过程要求学生通过查阅有关书籍、文献资料,了解和掌握与课题有关的国内外技术状况、发展动态,并在此基础上,根据实验课题要求和实验室条件,

提出具体的书面实验方案设计,包括实验工艺技术路线与实验装置、实验条件要求、测试项目和测试方法、实验计划进度等。

② 方案的讨论与确定。指导教师在对实验方案审议的基础上,与学生开展讨论。由学生介绍实验方案,指导教师根据可行性、实验室条件等因素对方案进行修正,使之具有可操作性,在尊重学生思路和实验要求的前提下,确定实验方案。

③ 开展实验。按确定的实验方案,在实验室由学生自己动手准备必要的实验材料、搭建实验装置,开展具体的实验和测试工作。指导教师负责现场指导,解答学生实验中遇到的难题,启发学生深入思考,创造必要的实验条件,如分析条件、必要的设备材料等。

④ 实验总结。由学生自主对实验数据进行分析、总结,指导教师负责指导和答疑,使学生分析问题的能力得到锻炼和提高,最终按要求编写出实验研究报告。

(5) 注意事项。

① 实验时数、人数。与验证性、演示性等传统实验不同,设计性、研究性实验要经过资料查阅、方案讨论、实验操作和总结等阶段。因此,需要足够的实验时间来保证开放性实验教学的质量。实验时间宜大于 36 学时。为确保在实验过程中学生得到独立的锻炼,一个子课题的实验人数以 3~5 为宜。

② 实验条件。设计性、研究性实验课题方向较多、内容较新,实验过程中所需要的实验装备种类较多,先进性要求也较高,创造较好的实验条件是综合、开放性实验开设成功的重要方面。同时,在学生设计实验方案之前,指导教师应将实验条件告知学生,避免出现实验方案与实验条件脱节,挫伤学生实验积极性的现象。

对于工艺性实验,为避免学生在分析测试上耗费过多的时间,在有限的时间内达到实验目的,在实验条件上需要创造较好的实验分析条件,包括提供部分已配制好的分析试剂等。

第2章 实验设计

2.1 实验设计简介

2.1.1 实验设计的目的

实验设计的目的是选择一种对所研究的特定问题最有效的实验安排,以使用最少的人力、物力和时间获得满足要求的实验结果。广义地说,它包括明确实验目的、确定测定参数、确定需要控制或改变的条件、选择实验方法和测试仪器、确定测量精度要求、设计实验方案和数据处理步骤等。

实验设计是实验研究过程的重要环节,通过实验设计,可以将实验安排在最有效的范围内,以保证通过较少的实验步骤得到预期的实验结果。例如,在进行生化需氧量(BOD)的测定时,为了能全面地描述废水有机污染的情况,往往需要估计最终生化需氧量(BOD_0 或 L_0)和生化反应速率常数 k_1 ,完成这一实验需对BOD进行大量的、较长时间(约20 d)的测定,既费时又费钱,此时若有较合理的实验设计,就可能以较少的时间得到较正确的结果。表2-1是三种不同的实验设计得到的结果。图2-1和图2-2所示为实验得到的BOD曲线。从上述图、表中可以看出,30个测试点的一组实验设计是不合适的,它不能给出满意的参数估算值,原因在于BOD变化为一级反应模型。因此,如果要使实验曲线与实测数据拟合得好些,就要同时调整 k_1 和 L_0 。由图2-2可以看到,如果只调整 k_1 ,会使 L_0 值变化很大,但模型对前30个数据的拟合情况无显著差异,也就是说,两组截然不同的参数,前30个点的拟合情况差别不大。可见在这种实验设计条件下,在一定的实验误差范围内,虽然两个实验者所得的结果都是对的,但结论可能相差很大。20 d、59次观测的结果虽然好,但需要大量人力与物力。而20 d、12次观测的实验安排(表2-1中第4天6次,第20天6次)测试次数最少,且其参数估算值结果与59次观测所得结果接近。这个例子说明,只要实验设计合理,不必进行大量观测便可得到精确的参数估算值,使实验的工作量显著减少。如果实验点安排不好(如全部安排在早期),虽然得到的参数估算值高度相关,但实验不能达到预期目的。此外,即使实验观测的次数完全相同,如果实验点的安排不同,所得结果也可能截然不同。因此,正确的实验设计不仅可以节省人力、物力和时间,并且是得到可信的实验结果的重要保证。

表 2-1 三种 BOD 实验设计所得结果

实 验 安 排	参数估算值		参数的协方差
	k_1/d^{-1}	$L_0/(\text{mg/L})$	
20 d、59 次观测	0.22	10 100	-0.85
0~5 d、30 次观测	0.19	11 440	-0.998 9
第 4 天 6 次,第 20 天 6 次	0.22	10 190	-0.63

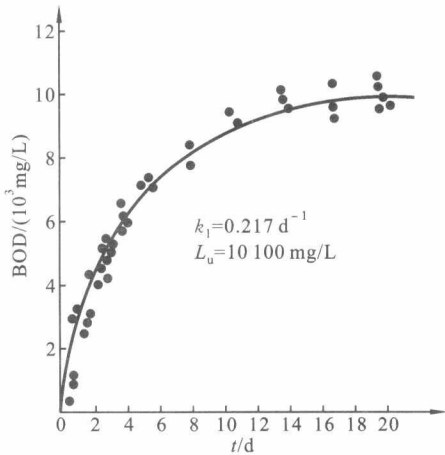


图 2-1 20 d、59 次观测的 BOD 曲线

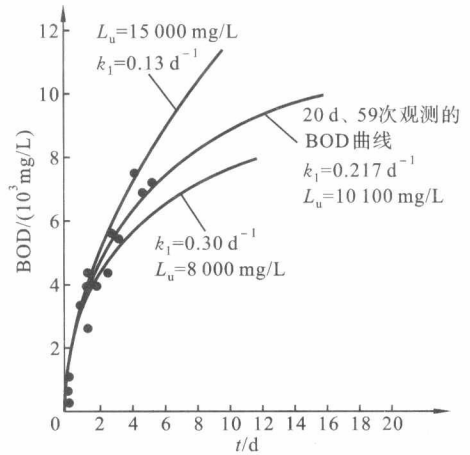


图 2-2 5 d、30 次观测的 BOD 曲线

2.1.2 实验设计的几个基本概念

实验设计常涉及以下几个基本概念。

(1) 实验方法。

通过做实验获得大量的自变量与因变量一一对应的数据,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 值,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。

对指标有影响的条件称为因素。有一类因素,在实验中可以人为地加以调节和控制,称为可控因素。例如,在用碱液吸收法净化气体中的 SO_2 的实验中,吸收液的流量和气体的流量可以通过控制阀调节,属于可控因素。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,称为不可控因素。例如,气温、风对沉淀效率的影响都属于不可控因素。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。在实验中,影响因素通常不止一个,但往往不是对所有的因素都加以考察。固定在某一状态上,只考察一个因素,这种实验称为单因素实验;考察两个因素的实验称为双因素实验;考察两个以上因素的实验称为多因素实验。

(5) 水平。

因素的各种变化状态称为因素的水平。某个因素在实验中需要考察它的几种状态,就称为它是几个水平的因素。例如,在污泥厌氧消化实验时要考察的温度因素,可选择为 25°C 、 30°C 、 35°C ,这里的 25°C 、 30°C 、 35°C 就是温度因素的 3 个水平。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,称为定量因素(如温度);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,就可与定量因素一样对待。

2.1.3 实验设计的应用

在生产和科学研究中,实验设计方法已得到广泛应用。概括地说,包括以下三方面的应用。

(1) 在生产过程中,人们为了达到优质、高产、低耗等目的,常需要对有关因素的最佳点进行选择,一般是通过实验来寻找这个最佳点。实验的方法很多,这就需要通过实验设计,合理安排实验点,才能迅速找到最佳点。例如,混凝剂是水污染控制常用的化学药剂,其投加量因具体情况不同而异,因此,常需要多次实验确定最佳投药量,此时便可以通过实验设计来减少实验的工作量。

(2) 估算数学模型中的参数时,在实验前,若通过实验设计合理安排实验点、确定变量及其变化范围等,可以较少的时间获得较精确的参数。例如,已知 BOD 一级反应模型 $y = L_0(1 - 10^{-k_1 t/t_0})$, 要估计 k_1 和 L_0 。由于 $\left(\frac{dy}{dt}\right)_{t=0} = k_1 L_0$, 说明在反应的前期,参数 k_1 和 L_0 相关性很好,所以,如果在 t 靠近 0 的小范围内进行实验,就难以得到正确的 k_1 和 L_0 , 因为在此范围内, k_1 的任何偏差都会由 L_0 的变化而得到补偿,故只有通过正确的实验设计,将实验安排在较大的时间范围内进行,才能较精确地获得 k_1 和 L_0 的值。

(3) 当可以用几种形式描述某一过程的数学模型时,常需要通过实验来确定哪一种是比较恰当的模型(即竞争模型的筛选),此时也需要通过实验设计来保证实验能提供可靠的信息,以便正确地进行模型筛选。例如,判断某化学反应是按 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 进行,还是按 $A \rightarrow B \rightleftharpoons C$ 进行时,要做许多实验。根据这两种反应的动力学特征, B 的浓度与时间 t 的关系分别为图 2-3 所示的两条曲线。从图中可以看出,要区分表示这两种不同反应机理的数学模型,应该观测反应后期 B 的浓度变化,在均匀的时间间隔内进行实验是没有必要的。如果把实验安排在前期,用所得到的数据进行鉴别,则无法达到筛选模型的目的。这个例子说明,实验设计对于模型筛选是十分重要的,如果实验点位置选取得不好,即使实验数据很多,数据很精确,也得不到预期的实验目的。相反,选择适当的实验点位置后,即使测试精度稍差些,或者数据少一些,也能达到预期的实验目的。

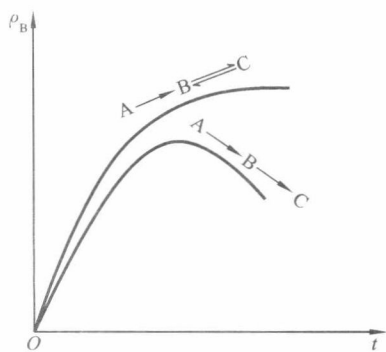


图 2-3 ρ_B 与 t 的关系

2.1.4 实验设计的步骤

实验方案设计包括以下几个步骤。

(1) 明确实验目的,确定指标。

研究对象需要解决的问题,一般不止一个。例如,在进行混凝效果的研究时,要解决的问题有最佳投药量、最佳 pH 值和水流速度梯度。不可能通过一次实验把这些问题都解决,因此,实验前应首先确定这次实验的目的究竟是解决哪一个或者哪几个主要问题,然后确定相应

的指标。

(2) 挑选因素。

在明确实验目的和确定指标后,要分析研究影响指标的因素,从所有的影响因素中排除那些影响不大或者已经掌握的因素,让它们固定在某一状态上,挑选那些对指标可能有较大影响的因素来进行考察。例如,在进行 BOD 模型的参数估计时,影响因素有温度、菌种数、硝化作用及时间等,通常是把温度和菌种数控制在一定状态上,并排除硝化作用的干扰,只通过考察 BOD 随时间的变化来估计参数。又如,气体中 SO_2 的吸收净化实验中,不同的吸收剂、吸收剂浓度、气体流速、吸收液流量等因素均会影响吸收效果,可在以往实验的基础上,控制吸收剂浓度和吸收剂流量在一定的水平,考察不同种类吸收剂和气体流速对吸收效果的影响。

(3) 选定实验设计方法。

因素选定后,可根据研究对象的具体情况决定选用哪一种实验设计方法。例如,对于单因素问题,应选用单因素实验设计法;对于三个以上因素的问题,可以用正交实验设计法;若要进行模型筛选或确定已知模型的参数,可采用序贯实验设计法。

(4) 实验安排。

上述问题都解决后,便可以进行实验点位置的安排,开展具体的实验工作。

下面仅介绍单因素实验设计、双因素实验设计及正交实验设计的部分基本方法,原理部分可根据需要参阅有关书籍。

2.2 单因素实验设计

单因素实验是指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。在单因素实验设计中,主要任务是如何选择实验方案,从而安排实验,找出最优实验点,使实验的结果(指标)最好。

下面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、分数法和分批实验法。

2.2.1 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,在各个分点上做实验,如图 2-4 所示。



图 2-4 均分法实验点

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

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 次实验中的最优点。

均分法是一种比较传统的实验方法。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。