

高等学校教材



水污染
控制工程
实验

同济大学 章非娟 主编

SHUIWURAN KONGZHI GONGCHENG SHIYAN

高等学校教材

水污染控制工程实验

章非娟 张玉先 俞庭康 合编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书介绍了广泛应用于水污染控制中的一些重要的水处理实验技术。主要内容包
括两部分,第一部分是实验方案的优化设计、误差与实验数据处理、水样的采集与保存
等;第二部分较详细地介绍了21个水污染控制实验项目。具体内容包括实验目的、实验
原理、实验装置、实验步骤和实验数据整理方法等。

本书可作为高等工科院校环境工程专业和给水排水工程专业的教学用书,也可供
从事给水排水和环境保护工作的科研、设计及管理人员参考。

高等学校教材

水污染控制工程实验

章非娟 张玉先 俞庭康 合编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

江苏吴江伟业印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 8.875 字数 210,000

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数 0,001—2,650

ISBN 7-04-000713-4/K·83

定价 2.00元

前 言

本书是高等工科院校环境工程专业《水污染控制工程》课程的配套教材，是根据国家教委所属环境工程教材编审委员会制定的《水污染控制工程实验》教学基本要求编写的。

本书的初稿于1981年完成，原名《水处理实验技术》。几年来，根据我们科研和教学实践的体会，参考国内外有关资料，作了多次的修改和补充，现又根据环境工程专业的需要编写成实验教材。实验项目的选择，是以《水污染控制工程实验》和《水处理实验技术》课程要求的内容为依据，同时考虑到本教材还用作环境工程专业硕士研究生的《水处理实验技术》课程的教材，以及科研设计人员进行科学研究方面的实际需要，因此编入部分较复杂的实验，可供选用。在实验装置设计和实验方法等方面，力求做到简单易行，但又不失实验项目的实用性、正确性和科学性。教材内容包括：(1)总论——实验设计、误差与实验数据处理、水样的采集与保存；(2)物理方法水处理实验；(3)化学方法水处理实验；(4)生物方法水处理实验；(5)物理化学方法水处理实验。

本书的总论、实验三、四、五、七、八、九、十、十一、十二、十三、十五由章非娟编写，实验一、二、六、十六、十七、十八、二十、二十一、由张玉先编写，实验十四、十九由俞庭康编写。在本书编写工作中，得到同济大学严煦世教授的指导和帮助。此外，还得到刘锦珠、欧阳明老师和沈燕云同志的帮助，在此表示感谢。

由于我们水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

1987年9月

目 录

总论	1
一、水污染控制工程实验的教学目的和要求	1
二、实验设计	4
(一) 实验设计简介	4
(二) 单因素试验设计	9
(三) 双因素试验设计	13
(四) 正交试验设计	14
三、误差与实验数据处理	22
(一) 误差的基本概念	23
(二) 实验数据处理	34
四、水样的采集与保存	49
实验一 混凝实验	55
实验二 自由沉淀实验	67
实验三 絮凝沉淀实验	76
实验四 成层沉淀实验	84
实验五 压力溶气气浮实验	92
实验六 过滤实验	101
实验七 处理设备流动特性测定	110
实验八 曝气设备充氧能力的测定	125
实验九 活性污泥法动力学系数的测定	137
实验十 生物滤池实验	145
实验十一 好氧稳定塘实验	154
实验十二 厌氧消化实验	160
实验十三 工业污水可生化性实验	168
实验十四 污泥比阻的测定	176

实验十五	酸性废水过滤中和实验	186
实验十六	消毒实验(折点加氯)	191
实验十七	活性炭吸附实验	197
实验十八	离子交换实验	205
实验十九	离子交换膜隔膜电解法实验	215
实验二十	电渗析实验	221
实验二十一	冷却塔测试实验	227
附录	.....	238
一、	国际制(SI)单位及单位换算	238
二、	常用正交表	241
三、	重要元素原子量表	244
四、	几种酸、氨水的近似比重和浓度	245
五、	各种压力温度下水的溶解氧饱和浓度	245
六、	相关系数检验表	247
七、	生活饮用水卫生标准(TJ20—76)	248
八、	地面水水质卫生要求(TJ36—79)	249
九、	地面水中有害物质的最高允许浓度(TJ36—79)	249
十、	几项主要水质指标的分析方法	251
参考文献	.....	273

总 论

一、水污染控制工程实验的教学目的和要求

水污染控制工程是环境保护专业的一门重要学科，是建立在实验基础上的科学。许多水处理方法、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，采用塔式生物滤池处理某种工业废水时，需要通过试验测定负荷率、回流比、滤池高度等工艺参数才能较合理地进行工程设计。

水污染控制工程实验是水污染控制工程的重要组成部分，是科研和工程技术人员解决水和污水处理中各种问题的一个重要手段。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，为水环境保护提供依据。
2. 掌握污水处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. 开发新的水处理技术和设备。
4. 实现水处理设备的优化设计和优化控制。
5. 解决水处理技术开发中的放大问题。

(一) 实验的教学目的

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，并初步掌握水污染控制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。

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:

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、装置、步骤、计划、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,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) 通过实验掌握了那些新的知识;

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) 实验结果是否可用以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。

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。

(二) 实验的教学要求

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)实验中应注意事项;(4)准备好实验记录表格。

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。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,养成良好的工作学习习惯。

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。

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学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)实验装置和方法；(4)实验数据和数据整理结果；(5)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。

二、实验设计

(一) 实验设计简介

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。从广义来说，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、确定量测精度要求、实验方案设计和数据处理步骤等。实验设计是实验研究过程的重要环节，通过实验设计可以使我们的实验安排在最有效的范围内，以保证通过较少的实验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)和生化反应速度常数 K_1 ，完成这一实验需对 BOD 进行大量的、较长时间的(约 20 天)测定，既费时又费钱，此时如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(总-1)是三种不同的实验设计得到的结果。图总-1，图总-2 是实验得到的 BOD 曲线。从上述图、表中可以看出，30 个测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 是一级反应模型，因此，如果要使实验曲线与实测数据拟合得好些，要同时调整 K_1 和 L_0 。由图总-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 个数据的拟合情况却无显著差异，也就是说，两组截然不

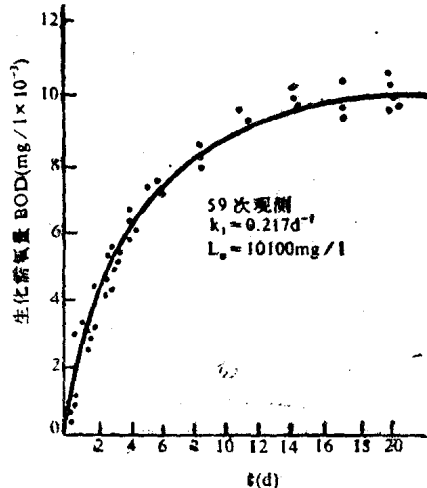
同的参数,其前30个点的拟合情况差别不大。可见在这种实验设计条件下,在一定的实验误差范围内,虽然两个实验者所得的结果都是对的,但结论可能相差很大。20天59次观测的结果虽然好,但需要大量人力与物力。而20天12次观测的实验安排(图总-1中第4天6个点,第20天6个点)测试次数最少,而其参数估算结果与59次观测所得结果相接近。这个例子说明,只要实验设计合理,不必进行大量观测便可得到精确的参数估算值,使实验的工作量显著地减少。如果实验点安排不好(例如,全部安排在早期),虽

表总-1 三种BOD实验设计所得结果

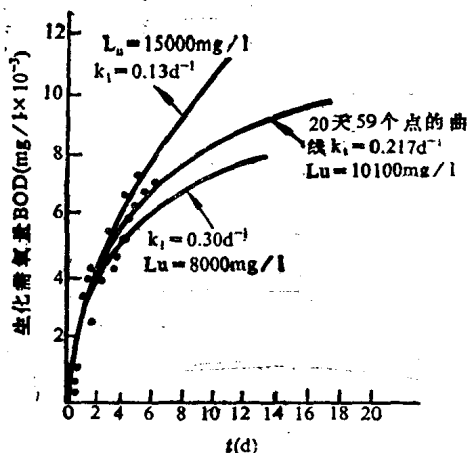
实验安排	参数估算值		参数的均方差
	K_1	L_0	
20天59次观测	0.22	10100	-0.85
30次观测,0-5天	0.19	11440	-0.9989
第4天6次,第20天6次	0.22	10190	-0.63

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。

在生产和科学研究中,实验设计方法已得到



图总-1 20天59次观测的BOD曲线



图总-2 5天30次观测的BOD曲线

广泛应用。概括地说，包括三方面的应用。

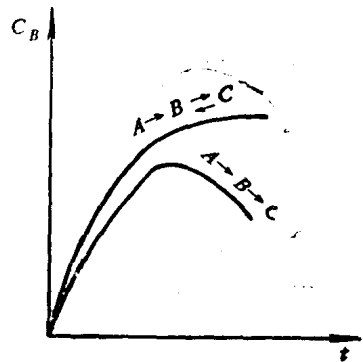
(1) 在生产过程中，人们为了达到优质、高产、低消耗等目的，常需要对有关因素的最佳点进行选择，一般是通过试验来寻找这个最佳点。试验的方法很多，为能迅速地找到最佳点，这就需要通过实验设计，合理安排实验点，

才能最迅速找到最佳点。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，在试验前，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，可以使我们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 $Y = L_u(1 - 10^{-K_1 t})$ ，要估计 K_1 和 L_u 。由于 $\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = K_1 L_u$ ，说明在反应的前期，参数 K_1 和 L_u 相关性很好，所以，如果在 t 靠近零的小范围内进行试验，就难以得到正确的 K_1 和 L_u ，因为在此范围内， K_1 的任何偏差都会由于 L_u 的变化而得补偿（见图总-2），因此，只有通过正确地实验设计，把试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_u 。

(3) 当可以用几种型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向我们提供可靠的信息，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。根据这两种反应动力学特征， B 的浓度与时间 t 的关系分别为图总-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，也能达到实验目的。



图总-3 C_B 与 t 的关系

实验设计的方法很多，有单因素试验设计、双因素试验设计、正交试验设计、析因分析试验设计、序贯实验设计等。各种试验设计方法的目的和出发点不同，因此，在进行实验设计时，应根据研究对象的具体情况决定采用哪一种方法。

在生产过程和科学研究中，对试验指标有影响的条件，通常称为因素。有一类因素，在实验中可以人为地加以调节和控制，叫做可控因素。例如，混凝试验中的投药量和 pH 值是可以人为控制的，属于可控因素。另一类因素，由于技术、设备和自然条件的限制，暂时还不能人为控制的，叫做不可控因素。例如，气温、风对沉淀效率的影响都是不可控因素。实验方案设计一般只适用于可控因素。下面说到因素，凡没有特别说明的，都是指可控因素。在试验中，影响因素通常不止一个，但我们往往不是对所有的因素都加

以考察。有的因素在长期实践中已经比较清楚,可暂时不考察,固定在某一状态上,只考察一个因素,这种考察一个因素的试验,叫做单因素试验。考察两个因素的试验称双因素试验。考察两个以上因素的试验称多因素试验。

在试验设计中用来衡量试验效果好坏所采用的标准称为试验指标,或简称指标。例如,在进行地面水的混凝试验时,为了确定最佳投药量和最佳 pH 值,选定浑浊度作为评定比较各次试验效果好坏的标准,即浊度是混凝试验的指标。

进行试验方案设计的步骤如下:

1. 明确试验目的、确定试验指标

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问题、最佳 pH 值问题和水流速度梯度问题。我们不可能通过一次试验把所有这些问题都解决,因此,试验前应首先确定这次试验的目的究竟是解决哪一个或者哪几个主要问题,然后确定相应的试验指标。

2. 挑选因素

在明确试验目的和确定试验指标后,要分析研究影响试验指标的因素,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,挑选那些对试验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。

3. 选定试验设计方法

因素选定后,可根据研究对象的具体情况决定选用哪一种试验设计方法。例如,对于单因素问题,应选用单因素试验设计法;三个以上因素的问题,可以用正交试验设计法;若要进行模型筛选

或确定已知模型的参数估计,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安排,开展具体的实验工作。

下面我们仅介绍单因素试验设计、双因素试验设计及正交试验设计法的部分基本方法,原理部分可根据需要参阅有关书籍。

(二) 单因素试验设计

单因素试验设计方法有 0.618 法(黄金分割法)、分数法、对分法、分批试验法、爬山法和抛物线法等。前三种方法可以用较少的试验次数迅速找到最佳点,适用于一次只能出一个试验结果的问题。对分法效果最好,每做一个实验就可以去掉试验范围的一半。分数法应用较广,因为它还可以应用于实验点只能取整数或某特定数的情况,以及限制试验次数和精确度的情况。分批试验法适用于一次可以同时得出许多个试验结果的问题。爬山法适用于研究对象不适宜或者不易大幅度调整的问题。

下面介绍对分法、分数法和分批试验法。

1. 对分法

采用对分法时,首先要根据经验确定试验范围。设试验范围在 $a-b$ 之间,第一次试验点安排在 (a, b) 的中点 x_1 ($x_1 = \frac{a+b}{2}$),若试验结果表明 x_1 取大了,则丢去大于 x_1 的一半,第二次试验点安排在 (a, x_1) 的中点 x_2 ($x_2 = \frac{a+x_1}{2}$)。如果第一次试验结果表明 x_1 取小了,便丢去小于 x_1 的一半,第二次试验点就取在 (x_1, b) 的中点。这个方法的优点是每做一次试验便可以去掉一半,且取点方便。适用于预先已经了解所考察因素对指标的影响规律,能够从一个试验的结果直接分析出该因素的值是取大了或取小了的情况。

例如,确定消毒时加氯量的试验,可以采用对分法。

2. 分数法

分数法又叫菲波那契数列法,它是利用菲波那契数列进行单因素优化试验设计的一种方法。当实验点只能取整数,或者限制试验次数的情况下,采用分数法较好。例如,如果只能做一次试验时,就在 $\frac{1}{2}$ 处做,其精确度为 $\frac{1}{2}$,即这一点与实际最佳点的最大可能距离为 $\frac{1}{2}$ 。如果只能做两次试验,第一次试验在 $\frac{2}{3}$ 处做,第二次在 $\frac{1}{3}$ 处做,其精确度为 $\frac{1}{3}$ 。如果能做三次试验,则第一次在 $\frac{3}{5}$ 处做试验,第二次在 $\frac{2}{5}$ 处做,第三次在 $\frac{1}{5}$ 或 $\frac{4}{5}$ 处做,其精确度为 $\frac{1}{5}$ ……,做几次试验就在试验范围内 $\frac{F_n}{F_{n+1}}$ 处做,其精度为 $\frac{1}{F_{n+1}}$ 。如表总-2 所示。

表总-2 分数法试验点位置与精确度

试验次数	2	3	4	5	6	7	...	n	...	...
等分试验范围的份数	3	5	8	13	21	34	...	F_{n+1}	...	...
第一次试验点的位置	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{8}{13}$	$\frac{13}{21}$	$\frac{21}{34}$	...	$\frac{F_n}{F_{n+1}}$	...	...
精确度	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{21}$	$\frac{1}{34}$	...	$\frac{1}{F_{n+1}}$	...	...

表中的 F_n 及 F_{n+1} 叫“菲波那契数”,它们可由下列递推式确定:

$$F_0 = F_1 = 1 \quad F_K = F_{K-1} + F_{K-2} \quad (K=2, 3, 4 \dots)$$

由此得 $F_2 = F_1 + F_0 = 2$, $F_3 = F_2 + F_1 = 3$, $F_4 = F_3 + F_2 = 5 \dots$
 $F_{n+1} = F_n + F_{n-1} \dots$

因此,表总-2 第三行中各分数,从分数 $\frac{2}{3}$ 开始,以后的每一分数,其分子都是前一分数的分母,而其分母都是等于前一分数的分子与分母之和,照此方法不难写出所需要的第一次试验点位置。

分数法各试验点的位置,可用下列公式求得:

$$\text{第一个试验点} = (\text{大数} - \text{小数}) \times \frac{F_n}{F_{n+1}} + \text{小数} \quad (\text{总-1})$$

$$\text{新试验点} = (\text{大数} - \text{中数}) + \text{小数} \quad (\text{总-2})$$

式中:中数——已试的试验点数值。

上述两式推导如下:首先由于第一个试验点 x_1 取在试验范围内的 $\frac{F_n}{F_{n+1}}$ 处,所以 x_1 与试验范围左端点(小数)的距离等于试验范围总长度的 $\frac{F_n}{F_{n+1}}$ 倍,即

第一试验点 - 小数 = [大数(右端点) - 小数] $\times \frac{F_n}{F_{n+1}}$ 移项后,即得式(总-1)。

又由于新试点 (x_2, x_3, \dots) 安排在余下范围内与已试点相对称的点上,因此,不仅新试点到余下范围的中点的距离等于已试点到中点的距离,而且新试点到左端点的距离也等于已试点到右端点的距离(图总-4),即

新试点 - 左端点 = 右端点 - 已试点
移项后即得式(总-2)。



图总-4 分数法试验点位置示意图。

下面以一具体例子说明分数法的应用。

某污水厂准备投加三氯化铁来改善污泥的脱水性能,根据初