

环境工程

实验技术

宁平 陈茂生 主编

云南大学出版社

本书受“云南省教育厅高校学术著作出版基金”资助

环境工程实验技术

● 宁 平 陈茂生 主编

云南大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程实验技术/宁平, 陈茂生编. —昆明: 云南大学出版社, 2003

ISBN 7-81068-557-0

I. 环... II. ①宁...②陈... III. 环境工程—实验—高等学校—教材 IV. X5-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 092810 号

环境工程实验技术

主 编: 宁 平 陈茂生

责任编辑: 张丽华 朱光辉

责任校对: 何传玉 段建堂

封面设计: 金 梅

出版发行: 云南大学出版社 (云南大学校内)

地 址: 云南省昆明市翠湖北路 2 号云南大学英华园 (邮编: 650091)

发行电话: 0871-5033244

网 址: [Http://www.ynup.com](http://www.ynup.com)

E-mail: market@ynup.com

印 装: 云南地质矿产局印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 15

字 数: 356 千

版 次: 2003 年 10 月第 1 版

印 次: 2003 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 0001 ~ 600

书 号: ISBN 7-81068-557-0/X·2

定 价: 20 元

前 言

本教材是根据国家教育部高等工科院校环境工程专业教材编审委员会审定的《环境工程原理》《水污染控制工程实验》《大气污染控制工程实验》教材基本要求编写的，是《环境工程原理》《水污染控制工程》《大气污染控制工程》课程的专业实验配套教材。

编者根据多年的科研和教学实践体会，参考国内外有关最新资料和兄弟院校的实验教材，并将其具有代表性的较为成熟的实验项目经修改充实后，列入本教材。为了使不同条件的院校在选择实验项目时具有一定的灵活性，每一类实验都编有一定数量的能够达到相同目的和要求的实验项目，在选择实验项目时可兼顾到多种类型，使学生能够达到较宽的实验技能训练。

全书由宁平和陈茂生担任主编，参加编写人员有：宁平（第一、四章）、陈茂生（第二、三章），邓春玲、王剑虹参加本书的校阅工作，全书由陈建中审定。在本书编写过程中，昆明理工大学环境科学与工程学院研究生陈玉保、胡学伟、黄建洪、唐晓龙和江喆等参与了各章节的图文处理及校阅，为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。由于我们水平有限，经验不足，难免存在缺点、错误，敬请读者批评指正。

本书可作为高等工科院校环境工程专业实验教材，也可供有关科技人员参考。

目 录

前 言	(1)
第一章 总 论	(1)
第一节 环境污染控制工程实验课程的目的和要求	(1)
第二节 实验设计	(1)
第三节 实验数据处理与误差	(12)
第二章 环境工程原理基础实验	(18)
第一节 比重测量	(18)
第二节 压力测量	(20)
第三节 温度测量	(24)
第四节 离心泵功率的测量	(29)
第五节 流体流动形态的观察与测定	(31)
第六节 流体机械能转换实验	(33)
第七节 离心泵特性曲线的测定	(35)
第八节 固体流态化实验	(38)
第九节 板框压滤机过滤常数的测定	(40)
第十节 传热膜系数和传热系数的测定	(43)
第十一节 吸收系数的测定	(47)
第十二节 干燥实验	(51)
第三章 水污染控制工程实验	(55)
第一节 处理设备流动特性测定	(55)
第二节 生物滤池实验	(64)
第三节 好氧稳定塘实验	(70)
第四节 厌氧消化实验	(74)
第五节 工业污水可生化性实验	(79)
第六节 污泥比阻的测定	(84)
第七节 吸附实验	(90)
第八节 离子交换实验	(97)
第九节 电渗析实验	(106)
第十节 废水静置沉降	(109)
第十一节 化学混凝	(111)
第四章 大气污染控制工程实验	(114)
第一节 粉尘粒径分布测定	(114)
第二节 粉尘比电阻的测定	(119)

第三节	旋风除尘器性能测定	(122)
第四节	袋式除尘器性能测定	(128)
第五节	湿式文丘里除尘器性能测定	(137)
第六节	电除尘器除尘效率测定	(143)
第七节	电除尘器伏安特性测定	(148)
第八节	碱液吸收气体中二氧化硫	(152)
第九节	冷凝——吸收法治理高浓度有机废气	(158)
第十节	活性炭吸附低浓度含苯废气	(163)
第十一节	吸附法净化工业酸气	(167)
第十二节	催化燃烧法净化废气中苯系污染物	(172)
第十三节	亚铵法回收低浓度二氧化硫	(176)
第十四节	液相催化氧化法净化低浓度二氧化硫	(178)
第十五节	野外照相法测定大气扩散参数	(182)
第十六节	环境风洞中照相法测定大气扩散参数	(187)
第十七节	不同粗糙度下风速和湍强随高度的变化规律	(195)
附录一	地表水环境质量标准(节选)	(197)
附录二	污水综合排放标准	(199)
附录三	环境空气质量标准	(207)
附录四	大气污染物综合排放标准(GB16297-1996)	(210)
附录五	国际制CSP单位及单位换算	(222)
附录六	常用元素原子量表	(228)
附录七	各种压力温度下水的溶解氧饱和浓度	(230)

第一章 总 论

第一节 环境污染控制工程实验课程的目的和要求

一、教学目的

环境污染控制工程实验课是环境工程专业的一门实践性必修课，它的基本任务是：通过实验使学生掌握本课程的基本实验方法、实验手段及操作技能；学会正确使用各种测试仪器和实验设备；掌握正确的实验数据处理方法；培养学生运用所学理论进行科学研究、分析问题和解决问题的能力；通过理论与实践的结合，巩固和加深对所学基本原理的理解，并在某些方面得到充实和提高；最终树立求真的科学态度和严谨的科研作风。

二、基本要求

1. 掌握实验所用仪器设备的基本原理以及实验的操作方法；
2. 能独立进行实验的全过程，包括装配和调节实验装置，观察实验现象，记录和处理实验数据，综合分析实验结果，最后做出正确的结论；
3. 实验过程中要求学生具有实事求是的科学态度，忠于所观察到的实验现象，养成严肃、认真、细致、整洁的良好实验习惯。

第二节 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_u 或 L_u ）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（约 20 天）的测定，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 1-2-1 是三种不同的实验设计得到的结果。图 1-2-1、图 1-2-2 是实验得到的 BOD 曲线。

表 1-2-1 三种 BOD 实验设计所得结果

实验安排	参数估算值		参数的均方差
	K_1	L_u	
20 天 59 次观测	0.22	10 100	-0.85
30 次观测, 0~5 天	0.19	11 440	-0.998 9
第 4 天 6 次, 第 20 天 6 次	0.22	10 190	-0.63

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和得好些, 要同时调整 K_1 和 L_u 。由图 1-2-2 可以看到, 如果只调整 K_1 , 会使 L_u 值变化很大, 但模型对前 30 个数据的拟和情况却无显著差异, 也就是说, 两组截然不同的参数, 其前 30 个点的拟和情况差别不大。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 1-2-1 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,

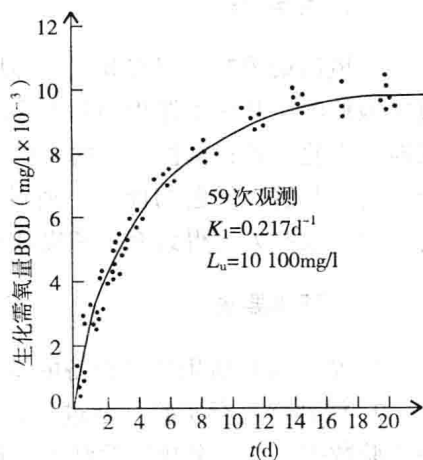


图 1-2-1 20 天 50 次观测的 BOD 曲线

参数 K_1 和 L_0 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_0 , 因为在此范围内, K_1 的任何偏差都会由于 L_0 的变化而得到补偿 (见图 1-2-2)。因此, 只有通过正确的实验设计, 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_0 。

(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 1-2-3 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。

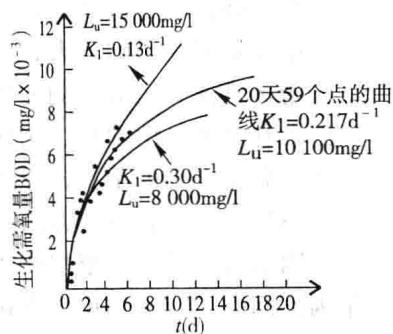


图 1-2-2 5 天 30 次观测的 BOD 曲线

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。

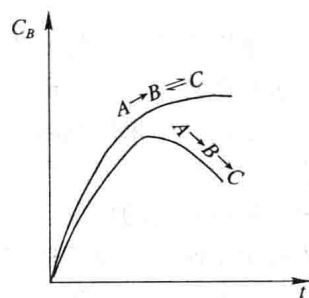


图 1-2-3 C_B 与 t 的关系

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, 可选定浊度作为评定比较各次试验效果好坏的标准, 则浊度就是混凝试验的指标。

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 $a \sim b$ 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,则丢弃大于 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,便丢弃小于 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 $1/2$ 处做，其精确度为 $1/2$ ，即这一点与实际最佳点的最大可能距离为 $1/2$ 。如果只能做两次试验，第一次试验在 $2/3$ 处做，第二次在 $1/3$ 处做，其精确度为 $1/3$ 。如果能做三次试验，则第一次在 $3/5$ 处做，第二次在 $2/5$ 处做，第三次在 $1/5$ 或 $4/5$ 处做，其精确度为 $1/5$ 。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 1-2-2 所示。

表 1-2-2 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 1-2-2 第三行中各分数，从分数 $2/3$ 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：

$$\text{第一个试验点} = (\text{大数} - \text{小数}) \times \frac{F_n}{F_{n+1}} + \text{小数} \quad (1-2-1)$$

$$\text{新试验点} = (\text{大数} - \text{中数}) + \text{小数} \quad (1-2-2)$$

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：

$$\text{第一试验点} - \text{小数} = [\text{大数} (\text{右端点}) - \text{小数}] \times \frac{F_n}{F_{n+1}}, \text{移项后，即得式 } 1-2-1。$$

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 1-2-4），即：

$$\text{新试点} - \text{左端点} = \text{右端点} - \text{已试点}$$

移项后即得式 1-2-2。

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，根据初步调查投药量在 160mg/l 以下，要求通过四次试验确定出最佳投药量。具体计算方法如下：

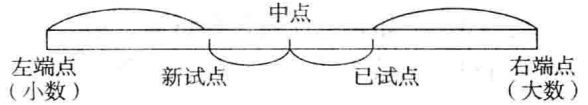


图 1-2-4 分数法试验点位置示意图

①根据式 1-2-1 可得到第一个试验点位置：

$$(160 - 0) \times \frac{5}{8} + 0 = 100 \text{ (mg/l)}$$

②根据式 1-2-2 得到第二个试验点位置：

$$(160 - 100) + 0 = 60 \text{ (mg/l)}$$

③假定第一点比第二点好，所以在 60~160 之间找第三点，丢弃 60~0 的一段，即：

$$(160 - 100) + 60 = 120 \text{ (mg/l)}$$

④第三点与第一点结果一样，此时可用“对分法”进行第四次试验，即在 $(100 + 120) / 2 = 110\text{mg/l}$ 处进行试验得到的效果最好。

(3) 分批试验法

当完成试验需要较长的时间，或者测试一次要花很大代价，而每次同时测试几个样品和测试一个样品所花的时间、人力或费用相近时，采用分批试验法较好。分批试验法又可分为均匀分批试验法和比例分割试验法。这里仅介绍均匀分批试验法。这种方法对每批试验均匀地安排在试验范围内。例如，每批要做四个试验，我们可以先将试验范围 (a, b) 均分为 5 份，在其四个分点 x_1, x_2, x_3, x_4 处做四个试验，将四个试验样品同时进行测试分析，如果 x_3 好，则去掉小于 x_2 和大于 x_4 的部分，留下 (x_2, x_4) 范围。然后将留下部分再分成 6 份，在未做过试验的四个分点试验，这样一直做下去，就能找到最佳点。对于每批要做四个试验的情况，用这种方法，第一批试验后范围缩小 $2/5$ ，以后每批试验后都能缩小为前次余下的 $1/3$ (见图 1-2-5)。



图 1-2-5 分批试验法示意图

例如，测定某种有毒物质进入生化处理构筑物的最大允许浓度时，可以用这种方法。

三、双因素试验设计

对于双因素问题，往往采取把两个因素变成一个因素的办法（即降维法）来解决，也就是先固定第一个因素，做第二个因素的试验，然后固定第二个因素再做第一个因素的试验。这里介绍两种双因素试验设计。

(1) 从好点出发法

这种方法是先把一个因素，例如 x 固定在试验范围内的某一点 x_1 (0.618 点处或其他点处)，然后用单因素试验设计对另一因素 y 进行试验，得到最佳试验点 $A_1(x_1, y_1)$ ，

再把因素 y 固定在好点 y_1 处, 用单因素方法对因素 x 进行试验, 得到最佳点 $A_2(x_2, y_1)$ 。若 $x_2 < x_1$, 因为 A_2 比 A_1 好, 可以去掉大于 x_1 的部分, 如果 $x_2 > x_1$, 则去掉小于 x_1 的部分。然后, 在剩下的试验范围内, 再从好点 A_2 出发, 把 x 固定在 x_2 处, 对因素 y 进行试验, 得到最佳试验点 $A_3(x_2, y_2)$, 于是再沿直线 $y = y_1$ 把不包含 A_3 的部分范围去掉, 这样继续下去, 能较好地找到需要的最佳点 (见图 1-2-6)。

这个方法的特点是对某一因素进行试验选择最佳点时, 另一个因素都是固定在上次试验结果的好点上 (除第一次外)。

(2) 平行线法

如果双因素问题的两个因素中有一个因素不易改变时, 宜采用平行线法。具体方法如下:

设因素 y 不易调整, 我们就把 y 先固定在其试验范围的 0.5 (或 0.618) 处, 过该点做平行于 ox 的直线, 并用单因素方法找出另一因素 x 的最佳点 A_1 。再把因素 y 固定在 0.25 处, 用单因素法找出因素 x 的最佳点 A_2 。比较 A_1 和 A_2 , 若 A_1 比 A_2 好, 则沿直线 $y = 0.25$ 将下面的部分去掉, 然后在剩下的范围内再用对分法找出因素 y 的第三点 0.625, 第三次试验将因素 y 固定在 0.625 处, 用单因素法找出因素 x 的最佳点 A_3 , 若 A_1 比 A_3 好, 则又可将直线 $y = 0.625$ 以上的部分去掉。这样一直做下去, 就可以找到满意的结果 (见图 1-2-7)。

例如, 混凝效果与混凝剂的投加量、pH 值、水流速度梯度三因素有关。根据经验分析, 主要的影响因素是投药量和 pH 值, 因此, 可以根据经验把水流速度梯度固定在某一水平上, 然后, 用双因素试验设计法选择试验点进行试验。

四、正交试验设计

在生产和科学研究中遇到的问题, 一般都比较复杂的, 包含多种因素, 且各个因素又有不同的状态, 它们往往互相交织、错综复杂。要解决这类问题, 常常要做大量试验。例如, 某工业废水欲采用厌氧消化处理, 经过分析研究后, 决定考察三个因素 (如温度、时间、负荷率), 而每个因素又可能有三种不同的状态 (如温度因素为 25°C 、 30°C 、 35°C 等三个水平), 它们之间可能有 $3^3 = 27$ 种不同的组合, 也就是说, 要经过 27 次试验后才能知道哪一种组合最好。显然, 这种全面进行实验的方法, 非但费时费钱, 有时甚至是不可能的。对于这样的一个问题, 如果我们采用正交设计法安排试验, 只要经过 9 次试验便能得到满意的结果。对于多因素问题, 采用正交试验设计可以达到事半功倍的结果, 这是因为我们可以通过正交设计合理地挑选和安排试验点, 较好地解决多因素试验中的两个突出问题: 全面实验的

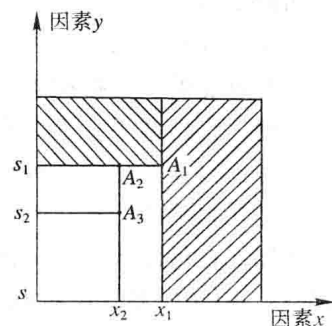


图 1-2-6 从好点出发法示意图

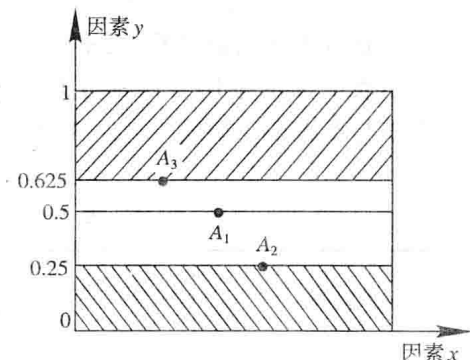


图 1-2-7 平行线法示意图

次数与实际可行的试验次数之间的矛盾；实际所做的少数试验与要求掌握的事物的内在规律之间的矛盾。

正交试验设计法是一种研究多因素试验问题的数学方法。它主要是使用正交表这一工具从所有可能的试验搭配中挑选出若干必需的试验，然后再用统计分析法对试验结果进行综合处理，得出结果。下面先介绍两个有关的概念：

水平：因素变化的各种状态叫因素的水平。某个因素在试验中需要考察它几种状态，就叫它是几水平的因素。因素在试验中所处状态（即水平）的变化，可能引起指标发生变化。例如，在污泥厌氧消化试验时要考察三个因素：温度、泥龄和负荷率，温度因素选择为 25℃、30℃、35℃三种状态，这里的 25℃、30℃、35℃就是温度因素的三个水平。因素的水平有的能用数量表示（如温度），有的则不能用数量表示。例如，在采用不同混凝剂进行印染废水脱色试验时，要研究哪种混凝剂较好，在这里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，叫做定性因素。在多因素试验中，有时会遇到定性因素。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。

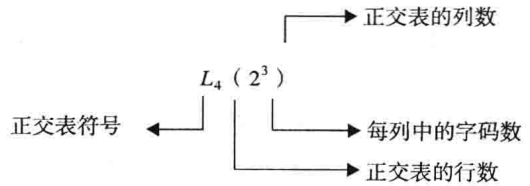


图 1-2-8 正交表记号示意图

正交表：用正交设计法安排试验都要用正交表。它是正交试验设计法中合理安排试验，以及对数据进行统计分析的工具。正交表都以统一形式的记号来表示。如 $L_4(2^3)$ (图 1-2-8)，字母 L 代表正交表， L 右下角的数字“4”表示正交表有 4 行，即要安排 4 次试验，括号内的指数“3”表示表中有 3 列，即最多可以考察 3 个因素，括号内的底数“2”表示表中每列有 1、2 两种数据，即安排试验时，被考察的因素有两种水平 1 与 2，称为 1 水平与 2 水平，如表 1-2-3 所示。

表 1-2-3 $L_4(2^3)$ 正交表

试验号	列 号		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

如果被考察各因素的水平不同时，应采用混合型正交表，其表示方式略有不同。如 $L_8(4 \times 2^4)$ ，它表示有 8 行（即要做 8 次试验）5 列（即有 5 个因素），而括号内的第一项“4”表示被考察的第一个因素是 4 水平，在正交表中位于第一列，这一列由 1、2、3、4 四种数字组成。括号内第二项的指数“4”表示另外还有 4 个考察因素，底数“2”表示后

4个因素是2水平,即后4列由1、2两种数字组成。用 $L_8(4 \times 2^4)$ 安排试验时,最多可以考察一个具有五因素的问题,其中一因素为4水平,另四因素为2水平,共要做8次试验。

(1) 正交设计法安排多因素试验的步骤

①明确试验目的,确定试验指标。

②挑因素选水平,列出因素水平表。

影响试验结果的因素很多,但是,我们不是对每个因素都进行考察。例如,对于不可控因素,由于无法测出因素的数值,因而看不出不同水平的差别,难以判断该因素的作用,所以不能列为被考察的因素。对于可控因素则应挑选那些对指标可能影响较大,但又没有把握的因素来进行考察,特别注意不能把重要因素固定(即固定在某一状态上不进行考察)。

对于选出的因素,可以根据经验定出它们的试验范围,在此范围内选出每个因素的水平,即确定水平的个数和各个水平的数量。因素水平选定后,便可列成因素水平表。例如,某污水厂进行污泥厌氧消化试验,经分析后决定对温度、泥龄、投配率等三因素进行考察,并确定了各因素均为2水平和每个水平的数值。此时可以列出因素水平表(见表1-2-4)。

表 1-2-4 污泥厌氧消化试验因素水平表

水 平	因 素		
	温度 (°C)	泥龄 (d)	污泥投配率 (%)
1	25	5	5
2	35	10	8

③选用正交表。

常用的正交表有几十个,究竟选用哪个正交表,需要综合分析后决定,一般是根据因素和水平的多少、试验工作量大小和允许条件而定。实际安排试验时,挑选因素、水平和选用正交表等步骤有时是结合进行的。例如试验目的,选好四个因素,如果每个因素取4个水平,则需要 $L_{16}(4^4)$ 正交表,要做16次试验。但是由于时间和经费上的原因,希望减少试验次数,因此,改为每个因素3个水平,则改用 $L_9(3^4)$ 正交表,做9次试验就够了。

④表头设计。

表头设计就是根据试验要求,确定各因素在正交表中的位置,如表1-2-5所示。

表 1-2-5 污泥厌氧消化试验的表头

因 素	温 度	泥 龄	污泥投配率
列号	1	2	3

⑤列出试验方案。

根据表头设计,从 $L_4(2^3)$ 正交表(表 1-2-6)中把 1、2、3 列的 1 和 2 换成表 1-2-4 所给的相应的水平,即得试验方案表(表 1-2-7)。

表 1-2-6 $L_4(2^3)$ 表

试验号	列 号		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

表 1-2-7 污泥厌氧消化试验方案表

试验号	因素(列号)			试验指标:产气量 (l/kgCOD)
	A 温度(°C) (1)	B 泥龄(d) (2)	C 污泥投配率(%) (3)	
1	25(1)	5(1)	5(1)	
2	25(1)	10(2)	8(2)	
3	35(2)	5(1)	8(2)	
4	35(2)	10(2)	5(1)	

(2) 试验结果的分析——直观分析法

通过试验获得大量试验数据后,如何科学地分析这些数据,从中得到正确的结论,是试验设计法不可分割的组成部分。

正交试验设计法的数据分析是要解决:

①挑选的因素中,哪些因素影响大些,哪些影响小些,各因素对试验目的影响的主次关系如何;

②各影响因素中,哪个水平能得到满意的结果,从而找到最佳的管理运行条件。

直观分析法是一种常用的分析试验结果的方法,其具体步骤如下:

①填写试验指标。

表 1-2-8 是采用直观分析法时的试验结果分析表示例。试验结束后,应归纳各组试验数据,填入表 1-2-8 中的“试验结果”栏中,并找出试验中结果最好的一个,计算试验指标的总和填入表内。

表 1-2-8 $L_4(2^3)$ 表的试验结果分析

试 验 号	列 号			试验结果 (试验指标)
	1	2	3	
1	1	1	1	x_1
2	1	2	2	x_2
3	2	1	2	x_3
4	2	2	1	x_4
K_1				$\sum_{i=1}^n x$ ($n =$ 试验次数)
K_2				
\bar{K}_1				
\bar{K}_2				
R				

例如：将前叙某污水厂厌氧消化试验所取得的 4 次产气量结果填入表 1-2-9 中，找出第 3 号试验的产气量最高 (8 17L/kgCOD)，它的试验条件是 $A_2B_1C_2$ 。并将产气量的总和 2 854 ($2\ 854 = 627 + 682 + 817 + 729$) 也填入表内。

表 1-2-9 厌氧消化试验结果分析

试 验 号	因素 (列号)			试验指标: 产气量 (L/kgCOD)
	A	B	C	
	温度 (°C) (1)	泥龄 (d) (2)	污泥投配率 (%) (3)	
1	25 (1)	5 (1)	5 (1)	627
2	25 (1)	10 (2)	8 (2)	682
3	35 (2)	5 (1)	8 (2)	817
4	35 (2)	10 (2)	5 (1)	728
K_1	1 309	1 444	1 355	2 854
K_2	1 545	1 410	1 499	
\bar{K}_1	654.5	722	677.5	
\bar{K}_2	77 205	705	749.5	
R	118	17	72	

②计算各列的 K_i 、 \bar{K}_i 和 R 值，并填入表 1-2-8 中。

K_i (第 m 列) = 第 m 列中数字与“ i ”对应的指标值之和

$$\bar{K}_i \text{ (第 } m \text{ 列)} = \frac{K_i \text{ (第 } m \text{ 列)}}{\text{第 } m \text{ 列中 } i \text{ 水平的重复次数}}$$

R (第 m 列) = 第 m 列的 \bar{K}_1 、 \bar{K}_2 、 \dots 中最大值减去最小值之差

R 称为极差。极差是衡量数据波动大小的重要指标，极差越大的因素越重要。