


21世纪应用型高等院校示范性实验教材

主 编 韩照祥

# 环境工程实验技术


HUANJIINGGONGCHENGSHIYANJISHU

 南京大学出版社

21世纪应用型高等院校示范性实验教材

# 环境工程实验技术

主 编 韩照祥  
副主编 许兴友 钱保华  
编 者 祝春水 徐国想  
伏广龙 韩桂泉  
王学松 陈文宾  
赵宇侠

 南京大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

环境工程实验技术/韩照祥主编. —南京:南京大学出版社, 2006. 12

21世纪应用型高等院校示范性实验教材

ISBN 978-7-305-04845-6

I. 环... II. 韩... 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(2006)第145053号

出版者 南京大学出版社  
社 址 南京市汉口路22号 邮 编 210093  
网 址 <http://press.nju.edu.cn>  
出版人 左 健  
丛 书 名 21世纪应用型高等院校示范性实验教材  
书 名 环境工程实验技术  
主 编 韩照祥  
责任编辑 王兆先 编辑热线 025-83597141  
照 排 南京南琳图文制作有限公司  
印 刷 阜宁人民印刷有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 13 字数 313千  
版 次 2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷  
印 数 1~4000  
ISBN 978-7-305-04845-6  
定 价 22.00元  
发行热线 025-83592169 025-83592317  
电子邮件 [sales@press.nju.edu.cn](mailto:sales@press.nju.edu.cn)(销售部)  
[nupress1@public1.ptt.js.cn](mailto:nupress1@public1.ptt.js.cn)

·版权所有,侵权必究

·凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购  
图书销售部门联系调换

# 序

进入新世纪,随着社会经济的发展,各行各业对人才的需求呈现出多元化的特点,对应用型人才的需求也显得十分迫切,因此我国高等教育的建设面临着重大的改革。就目前形势看,大多数的理、工科大学,高等职业技术学院,部分本科院校办的二级学院以及近年来部分由专科升格为本科层次的院校,都把办学层次定位在培养应用型人才这个平台上,甚至部分定位在研究型的知名大学,也转为培养应用型人才。

应用型人才是能将理论和实践结合得很好的人才,为此培养应用型人才需理论教学与实践教学并行,尤其要重视实践教学。

针对这一现状及需求,教育部启动了国家级实验教学示范中心的评审,江苏省教育厅高教处下达了《关于启动江苏省高等学校基础课实验教学示范中心建设工作的通知》,形成国家级、省级实验教学示范体系,意在促进优质实验教学资源的整合、优化、共享,着力提高大学生的学习能力、实践能力和创新能力。基础课教学实验室是高等学校重要的实践教学场所,开展高等学校实验教学示范中心建设,是进一步加强教学资源建设,深化实验教学改革,提高教学质量的重要举措。

我们很高兴地看到很多相关高等院校已经行动起来,除了对实验中心的硬件设施进行了调整、添置外,对近几年使用的实验教材也进行了修改和补充,并不断改革创新,使其有利于学生创新能力培养和自主训练。其内容涵盖基本实验、综合设计实验、研究创新实验,同时注重传统实验与现代实验的结合,与科研、工程和社会应用实践密切联系。实验教材的出版是创建实验教学示范中心的重要成果之一。为此南京大学出版社在为“示范中心”出版实验教材方面予以全面配合,并启动“21世纪应用型高等院校示范性实验教材”项目。该系列教材旨在整合、优化实验教学资源,帮助示范中心实现其示范作用,并希望能够为更多的实验中心参考、使用。

教学改革是一个长期的探索过程,该系列实验教材作为一个阶段性成果,提供给同行们评议和作为进一步改革的新起点。希望国内广大的教师和同学能够给予批评指正。

孙尔康

2006年3月

# 前 言

实验教学是高等教育中一个重要的教学环节,是提高学生创新精神和实践能力的重要途径。

环境工程专业是一个以理学与工学学科的基础理论与专业知识为基础,专业口径宽,多学科交叉的新兴专业。培养能从事于环境污染控制、环境监测与评价、环境规划与管理等方面的工程设计、科学研究与管理的高级工程技术人才。因此,环境工程专业的定位要求学生必须具备较强的实验动手技能。

“环境工程专业实验”是高等学校环境工程专业的必修课程。本教材可以加深学生对水污染控制工程、大气污染控制工程和固体废物处理工程的基本原理的理解;培养学生设计和组织实验方案的初步能力,培养学生进行环境工程专业实验的一般技能及使用实验仪器、设备的基本能力,培养学生分析实验数据与处理数据的基本能力。

本书内容包括九章共四十个实验。其中,第一章、第二章,实验一、二由许兴友教授组织编写,第三章、实验三、四、五由徐国想副教授编写,实验七、八由钱保华老师编写,实验十、十一、十二、十四由赵宇侠老师编写,实验九、十六、十七由伏广龙老师编写,实验二十五、二十六、二十七由韩桂泉老师编写,实验二十八、二十九、三十、三十一由韩照祥副教授编写,实验三十四、三十五、三十六、三十七由王学松老师编写,实验三十八、三十九、四十由陈文宾老师编写,实验六、十三、十五、十八至二十四、三十二、三十三以及附录由祝春水老师负责编写。

在本书的编写过程中得到了武汉理工大学彭长琪教授的关心和支持,感谢彭教授为本书提供了大量的素材。

出于内容的完整性考虑,有些实验项目的内容较多,所需实验时间较长,因此,教师可根据实际情况,合理取舍内容,顺利完成实验工作。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2006年5月

# 目 录

<b>第一章 试验设计</b> .....	( 1 )
§ 1-1 实验设计方法.....	( 1 )
§ 1-2 正交试验分析举例.....	( 10 )
<b>第二章 误差分析与实验数据处理</b> .....	( 16 )
§ 2-1 误差分析.....	( 16 )
§ 2-2 实验数据处理.....	( 22 )
<b>第三章 实验室常识</b> .....	( 35 )
§ 3-1 实验室基本常识.....	( 35 )
§ 3-2 注意的问题与基本操作.....	( 44 )
<b>第四章 水污染控制实验</b> .....	( 50 )
实验一 自由沉淀实验.....	( 50 )
实验二 混凝实验.....	( 55 )
实验三 气浮实验.....	( 59 )
实验四 活性炭吸附实验.....	( 65 )
实验五 过滤与反冲洗实验.....	( 68 )
实验六 曝气设备充氧能力的测定.....	( 73 )
实验七 污泥比阻测定.....	( 78 )
实验八 离子交换实验.....	( 83 )
实验九 污水中油的测定.....	( 87 )
实验十 酸性废水过滤中和及吹脱实验.....	( 90 )
实验十一 生物滤池实验.....	( 93 )
实验十二 污泥厌氧消化实验.....	( 97 )
实验十三 折点加氯消毒实验.....	( 103 )
实验十四 臭氧消毒实验.....	( 107 )
实验十五 电渗析除盐实验.....	( 110 )
<b>第五章 大气污染控制工程实验</b> .....	( 116 )
实验十六 环境空气中总悬浮颗粒物的测定.....	( 116 )
实验十七 粉尘粒径分布.....	( 118 )
实验十八 旋风除尘器性能测定.....	( 122 )
实验十九 喷雾干燥法烟气脱硫.....	( 125 )
实验二十 室内空气甲醛、氨含量测定.....	( 128 )

实验二十一 海水吸收烟气中二氧化硫实验·····	(134)
<b>第六章 固体废物处理实验</b> ·····	(139)
实验二十二 工业废渣渗沥模型实验·····	(139)
实验二十三 有害废物的固化处理·····	(140)
实验二十四 废塑料的热分解·····	(143)
<b>第七章 噪声控制工程实验</b> ·····	(146)
实验二十五 吸声系数的测量·····	(146)
实验二十六 道路交通噪声的测量·····	(148)
实验二十七 道路声屏障插入损失的测量·····	(150)
<b>第八章 环境生态学实验</b> ·····	(153)
实验二十八 生命表的编制·····	(153)
实验二十九 生物的耐受性实验·····	(156)
实验三十 草履虫种群的 logistic 增长·····	(159)
实验三十一 硝酸土的 LD <sub>50</sub> 的测定·····	(162)
<b>第九章 综合设计性及拓展性实验</b> ·····	(165)
实验三十二 工业污水可生化实验·····	(165)
实验三十三 过氧化氢-铁盐法处理标牌废水试验·····	(170)
实验三十四 土壤阳离子交换容量的测定·····	(173)
实验三十五 底泥对苯酚的吸附测定·····	(175)
实验三十六 沉积物中铁、锰形态分析·····	(177)
实验三十七 土壤中农药残留测定·····	(179)
实验三十八 对硝基苯基重氮氨基偶氮苯光度法测定微量汞·····	(181)
实验三十九 三甲氧基苯基荧光酮分光光度法测定锡·····	(183)
实验四十 二溴羟基卟啉光度法测定微量汞·····	(185)
<b>附 录</b> ·····	(189)
一、计量单位——常用 SI 词头·····	(189)
二、常见酸及氨水的近似相对密度和浓度·····	(189)
三、常用正交表·····	(190)
四、各种压力温度下的溶解氧饱和浓度·····	(193)
五、相关系数检验表·····	(194)
六、一个大气压不同温度下测定空气中甲醛(氨)时的标准体积 V <sub>0</sub> (L)·····	(195)
七、甲醛显色温度与显色时间和稳定时间的关系·····	(196)
八、臭氧测定方法·····	(196)
九、水中硬度的测定(络合滴定法)·····	(197)
<b>参考文献</b> ·····	(200)

# 第一章 试验设计

## § 1-1 实验设计方法

实验是研究者在各个研究领域进行的,通常是要发现关于一个特定过程或系统的某些事情。从字义上说,一个实验是一个试验。一个设计的实验是一个试验或一系列试验,它对过程或系统的输入变量作一些有目的的改变,以使能够观察到和识别出引起输出响应变化的缘由。

试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。从广义上说,它包括明确实验目的、确定实验参数、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、实验方案设计和数据处理步骤等。

试验设计是实验研究过程的重要环节,通过试验设计可以使我们的试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。

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,这就需要通过试验设计、合理安排试验点,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,因此常需要多次试验确定最佳投药量,此时便可以通过试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,若通过试验设计合理安排实验点、确定变量及其变化范围等,可以以较少的时间获得较精确的参数。

(3) 当可以用几种型式描述某一过程的数学模型时,常需要通过试验来确定哪一种是比较恰当的模型,此时也需要通过试验设计来保证实验提供可靠的信息。

例如,判断某化学反应是按  $A \rightarrow B \rightarrow C$  进行,还是按  $A \rightarrow B \leftrightarrow C$  进行时,要做很多实验。根据这两种反应动力学特征,B 的浓度与时间的关系分别为图 1-1-1 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试验是没有必要的。如果把试验安排在前期,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,试验设计对于模型筛选是十分重要的,

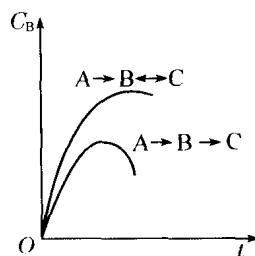


图 1-1-1  $C_B$  与  $t$  的关系



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。

试验设计的方法很多,有单因素试验、双因素试验、三因素试验、部分析因试验、正交试验等。各种试验设计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。

## 一、单因素试验设计

虽然通常我们研究的指标会受到诸多因素的影响,但是我们常常可以根据已有的专业知识在诸多因素中挑选出对指标影响最大的因素,考察该因素对指标的影响,而使其他因素保持不变。我们把这种只考察一个因素对指标影响的试验称为单因素试验。单因素试验优化设计就是用尽可能少的试验次数最快的找到某一因素的最优值。这种试验优化设计方法我们通常称为单因素优选法。

单因素试验设计方法有 0.618 法、二分法、分数法、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,每做一个试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,以及限制实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实验结果的问题。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。

下面介绍黄金分割法、分数法、对分法和分批试验法。

### 1. 0.618 法

0.618 法也叫做黄金分割法。0.618 是  $w = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.618\ 033\ 988\ 7\dots$  的四位有效近似值。设在区间内的指标有最佳值,则有界区间称为含优区间。黄金分割法就是在  $x_1 = a + (b-a)w$  处做一次试验,再在  $x_1$  的对称点  $x_2 = b - (b-a)w = a + (b-a)w^2$  处做一次试验,比较试验结果  $y_1 = f(x_1)$  和  $y_2 = f(x_2)$ 。如果  $y_1 = f(x_1)$  好于  $y_2 = f(x_2)$ ,则去掉  $(a, x_2)$ ,在留下的范围  $(x_2, b)$  中已有了一个试验点  $x_1$ ,然后再用上述求对称点的方法求出的对称点做第三次试验。同理近似表示,如果  $y_2 = f(x_2)$  好于  $y_1 = f(x_1)$ ,则去掉  $(x_1, b)$ ,在留下的范围  $(a, x_1)$  中做上述试验。用这样的方法一直做到结果满意为止。

### 2. 分数法

0.618 033 988 7... 可以用一批渐进分数  $\frac{3}{5}$ ,



图 1-1-2 黄金分割法

$\frac{5}{8}, \frac{8}{13}, \frac{13}{21}, \frac{21}{34}, \frac{34}{55}, \frac{55}{89}, \dots$  近似表示。这批渐进分

数的构成规律是非波那契数列  $1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, \dots$  相邻两数的商。菲波那契数列一般表达式是

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} \right] (n=0, 1, 2, \dots)$$

不难看出  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F_n}{F_{n+1}} = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.618\dots$  ( $n$  为试验次数)

因此,当试验点只能取整数,不可能是 0.618 的倍数时,或者限制试验总次数时,我们可

以用上述渐进分数来代替 0.618 安排试验点,这种方法称为分数法。

分数法试验点位置与精确度如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 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	2/3	3/5	5/8	8/13	13/21	21/34	...	$F_n/F_{n+1}$	...
精确度	1/3	1/5	1/8	1/13	1/21	1/34	...	$1/F_{n+1}$	...

分数法各试验点的位置,可用下列公式求得:

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

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

式中 中数— 已试验的试验点数值。

例如:某污水厂准备投加  $\text{FeCl}_3$  改善污泥的脱水性能,根据初步调查投药量在 160 mg/L 以下,要求通过 4 次试验确定最佳投药量。具体计算方法如下:

① 根据(1-1-1)式可得到第一个试验点位置:

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

② 根据(1-1-2)式可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,舍弃 0~60 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  $\frac{100+120}{2} =$

110(mg/L)处进行试验得到的效果最好。

在应用分数法选优时,常常会遇到试验范围中分数不够分数法中分母数的情况。此时可以增设虚点或缩短试验范围以使试验分数与分数法中相近的分数的分母相符。

例如:选择电阻来调试电器。共有电阻值为 0.5 k $\Omega$ , 1.0 k $\Omega$ , 1.3 k $\Omega$ , 2.0 k $\Omega$ , 3.0 k $\Omega$ , 5.0 k $\Omega$ , 5.5 k $\Omega$  的七种电阻,现用分数法来进行优选。

为使试验点适于分数法的某一分母值,在两端增加虚点(0)和(8),然后在 0~8 之间运用分数法。第一个试验点选在分数 5/8 点,即(5)点,阻值 3 k $\Omega$  处,第二个试验点选在(5)的对称点(3)点上,阻值 1.3 k $\Omega$  处, ..., 如此做下去,就可较快找到优选点,见表 1-1-2。

表 1-1-2 电阻选择试验结果

阻值(k $\Omega$ )		0.5	1.0	1.3	2.0	3.0	5.0	5.5	
排列	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
试验号				2		1			

### 3. 对分法

上面介绍的两种方法都必须先做两个试验进行比较后才能确定下一个试验范围,但在有些情况下我们只要经过一个试验即可将试验范围缩小。例如,在确定铸件浇注后的打箱时间时,只要不出现裂纹和变形,我们希望打箱时间越早越好。当我们在试验范围内取一点做试验后,如果不出现裂纹和变形,我们便可去掉比试验点长的时间范围,而在留下的范围

里进行进一步试验;反之,则去掉比试验点短的时间范围。这里具备了两个条件,一是我们有一个客观标准:铸件不能出现裂纹和变形;二是我们掌握着经验总结出的客观规律——打箱越早越容易出现变形和裂纹。

当具备上述两个条件时,我们便可采用对分法。对分法就是总是在含优区间的中点安排试验,根据中点的试验结果确定取舍哪一部分,而后在新含优区间的中点再进行试验,如此循环直至获得满意结果为止。

对分法也叫平分法。

确定消毒时加氯量的实验,可以利用对分法。

#### 4. 分批试验法

前面介绍的方法属于序贯试验法,即是根据前面的试验结果再安排后面的试验,其优点是总试验次数很少。但是,在有些情况下做完一个试验要较长时间才能得到试验结果,这样采用序贯试验法要很长时间才能最终完成试验。另外,在有些试验中,做一个试验的费用和做几个试验的费用相差无几,此时我们也希望同时做几个试验以节省费用。有时为了提高试验结果的可比性,也要求在同一条件下同时完成若干个试验。在上述这些情况下,就要采用分批试验法。

分批试验法可分为均分分批试验法和比例分割分批试验法两种。

##### (1) 均分分批试验法

分批试验法就是每批试验均匀地安排在试验范围内。例如,每批做4个试验,我们可以将试验范围均匀地分为5份,在其4个分点 $x_1, x_2, x_3, x_4$ 处做4个试验。然后同时比较4个试验结果,如果 $x_3$ 好,则去掉小于 $x_2$ 和大于 $x_4$ 的部分。然后在留下的 $(x_2, x_4)$ 范围内再均分6等份,在未做过试验的4个分点上再做4个试验,这样进行下去,就可获得最佳点。用这个方法第一批试验后范围缩小为 $2/5$ ,以后每批试验后都缩小为前次范围的 $1/3$ 。

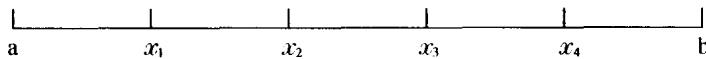


图 1-1-3 分批试验法示意图

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,可以采用这种方法。

##### (2) 比例分割分批试验法

这种方法是将试验点按比例安排在试验范围内。当每批做偶数个试验时,我们可采用上面介绍的均分分批法安排试验。当每批做奇数个实验时,可采用以下方法:

设每批做 $2n+1$ 个试验,首先把含优区间分为 $2n+2$ 份,并使其相邻两段长度分别为 $a$ 和 $b(a>b)$ ,见图1-1-4。

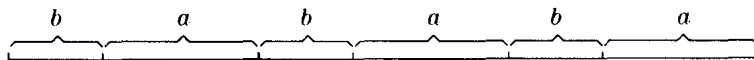


图 1-1-4 比例分割法第一批试验点示意图(试验次数为奇数时)

第一批试验就安排在 $2n+1$ 个分点上。根据第一批试验结果,在好点左右分别留下一个 $a$ 区和 $b$ 区。然后把新含优区间 $a+b$ 中的 $a$ 段分成 $2n+2$ 份,使相邻两段为 $a_1$ 和 $b_1(a_1$

$> b_1$ ), 并使  $a_1 = b$ , 令

$$\frac{b}{a} = \frac{b_1}{a_1} = \lambda$$

$\lambda$  可推得为

$$\lambda = \frac{1}{2} \left( -1 + \sqrt{\frac{n+5}{n+1}} \right) \tag{1-1-3}$$

则  $b = \lambda a$  (1-1-4)

式中  $\lambda$  可由 (1-1-3) 式根据每批试验次数求出。例如, 若每批做 3 个试验, 则  $n=1$ , 由 (1-1-3) 式,  $\lambda=0.366$ , 若每批做 5 个试验, 则  $n=2$ ,  $\lambda=0.264$ 。

用上述方法安排试验, 一直进行下去, 直到得到满意结果为止, 见图 1-1-5。

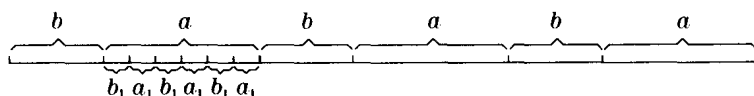


图 1-1-5 比例分割法第二批试验点示意图(试验次数为奇数时)

## 二、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

这种方法是先把第一个因素, 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, 得到最佳实验点  $A_1(x_1, y_1)$ ; 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  $A_3(x_2, y_2)$ , 于是再沿着直线  $y=y_1$  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 1-1-6)。

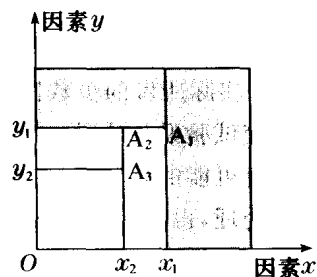


图 1-1-6 从好点出发法示意图

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, 把  $y$  先固定在其试验范围的 0.5(或 0.618) 处, 过该点作平行于  $x$  轴的直线, 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 1-1-7)。

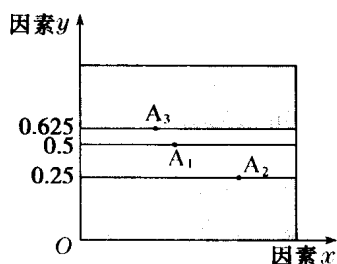


图 1-1-7 平行线法示意图

例如, 混凝效果与混凝剂的投加量、pH、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, 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。

### 三、正交试验设计

在生产和科学研究中遇到的问题, 一般都是比较复杂的, 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, 常常需要做大量试验。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 3 个因素(如温度、时间、负荷率), 而每个因素又可能有 3 种不同的状态(如温度因素为  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  等 3 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, 不但费时费钱, 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效果, 这是因为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:

- (1) 全面试验的次数与实际可行的试验次数之间的矛盾;
- (2) 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, 然后再用统计分析方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。

(1) 水平 因素(因子)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的几种状态, 这些状态就叫水平。因素在试验中所处的状态(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中要考察 3 个因素: 温度、泥龄和负荷率。温度因素为  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  就是温度因素的 3 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实验时, 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。在多因素实验中, 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。

(2) 正交表 用正交设计法安排实验都要用正交表。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。正交表都以同一形式的记号来表示。

如  $L_4(2^3)$ :

其中 3——表示此表中列的数目(最多可安排的因子数);

2——表示因子的水平数;

4——表示此表中行的数目(试验次数)。

$L_4(2^3)$ 正交表如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3  $L_4(2^3)$  正交表

实验号	列 号		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

如果被考察的各因素水平不同,应采用混合型正交表,其表示方式略有不同。

如  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ ;

其中 2——表示有 1 个因素是 2 水平的;

7——表示有 7 个因素是 3 水平的。

$L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 的数字告诉我们,用它来安排试验,做 18 个试验最多可以考察 1 个 2 水平因素和 7 个 3 水平因素。

在行数为  $m^n$  型的正交表中( $m, n$  是正整数),试验次数(行数) =  $\sum_{列} (\text{每列水平数} - 1) + 1$ 。

如  $L_8(2^7), 8 = 7 \times (2 - 1) + 1$

$L_{27}(3^{13}), 27 = 13 \times (3 - 1) + 1$

$L_{16}(4^1 \times 2^{12}), 16 = (4 - 1) + 12 \times (2 - 1) + 1$

在行数为非  $m^n$  型的正交表中,试验次数(行数)  $\geq \sum_{列} (\text{每列水平数} - 1) + 1$

如  $L_{18}(2^1 \times 3^7), 18 > (2 - 1) + 7 \times (3 - 1) + 1 = 16$

利用上述关系式可以从所要考察的因素水平数来决定最低的试验次数,进而选择合适的正交表。比如要考察 5 个 3 水平因子及 1 个 2 水平因子,则起码的试验次数为:

$$5 \times (3 - 1) + 1 \times (2 - 1) + 1 = 12 (\text{次})$$

这就是说,要在行数不小于 12,既有 2 水平列又有 3 水平列的正交表中选择  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  适合。

正交表具有两条性质:① 每一列中各数字出现的次数一样多;② 任何两列所构成的各有序数对出现的次数都一样多。所以,称之为正交表。

### 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。影响试验成果的因素很多,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 1-1-4。

表 1-1-4 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,需要综合分析后确定,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,根据试验目的,选好 4 个因素,如果每个因素取 4 个水平,则需用  $L_{13}(4^1)$  正交表,要做 13 次实验。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  $L_9(3^1)$  正交表,做 9 次实验就够了。

### (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 1-1-5 所示。

表 1-1-5 污泥厌氧消化试验的表头

因素	温度(°C)	泥龄(d)	污泥投配率(%)
水平	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 1-1-3)中把 1,2,3 列中的“1”和“2”换成表 1-1-5 所给的相应的水平,即得试验方案,如表 1-1-6 所示。

表 1-1-6 污泥厌氧消化试验方案表

实验号	水平组合	因 素(列 号)			实验指标: 产气量(L/kgCOD)
		A 温度(°C) (1)	B 泥龄(d) (2)	C 污泥投配率(%) (3)	
1	$A_1 B_1 C_1$	25(1)	5(1)	5(1)	
2	$A_1 B_2 C_2$	25(1)	10(2)	8(2)	
3	$A_2 B_1 C_2$	35(2)	5(1)	8(2)	
4	$A_2 B_2 C_1$	35(2)	10(2)	5(1)	

## 2. 试验结果的分析——直观分析法

通过试验获得大量实验数据后,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,各因素对实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 1-1-7 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 1-1-7 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。

例如,将上述某污水厂厌氧消化试验所取得的 4 次产气量结果填入表 1-1-7 中,发现第 3 号试验的产气量最高(817 L/kgCOD),它的试验条件是  $A_2B_1C_2$ ,并将产气量的总和 2854(2854=627+682+817+728)也填入表内。

表 1-1-7 厌氧消化试验结果分析

实验号	水平组合	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	$A_1B_1C_1$	25(1)	5(1)	5(1)	627
2	$A_1B_2C_2$	25(1)	10(2)	8(2)	682
3	$A_2B_1C_2$	35(2)	5(1)	8(2)	817
4	$A_2B_2C_1$	35(2)	10(2)	5(1)	728
$K_1$		1309	1444	1355	2854
$K_2$		1545	1410	1499	
$\bar{K}_1$		654.5	722	677.5	
$\bar{K}_2$		772.5	705	749.5	
$R =  \bar{K}_1 - \bar{K}_2 $		118	17	72	

(2) 计算各列的  $K_i$ ,  $\bar{K}_i$  和  $R$  值,并填入表 1-1-7。

$K_i$ (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。

例如,表 1-1-7 的第 1 列中与(1),(2)相应的试验指标分别为“627”,“682”和“817”,“728”,所以

$$K_1(\text{第 1 列}) = 627 + 682 = 1309(\text{L/kgCOD})$$

$$K_2(\text{第 1 列}) = 817 + 728 = 1545(\text{L/kgCOD})$$

表 1-1-7 中第 1 列的水平(1)和(2)的重复次数均为 2,所以

$$\bar{K}_1(\text{第 1 列}) = K_1(\text{第 1 列}) \div 2 = 1309 \div 2 = 654.5(\text{L/kgCOD})$$

$$\bar{K}_2(\text{第 1 列}) = K_2(\text{第 1 列}) \div 2 = 1545 \div 2 = 772.5(\text{L/kgCOD})$$

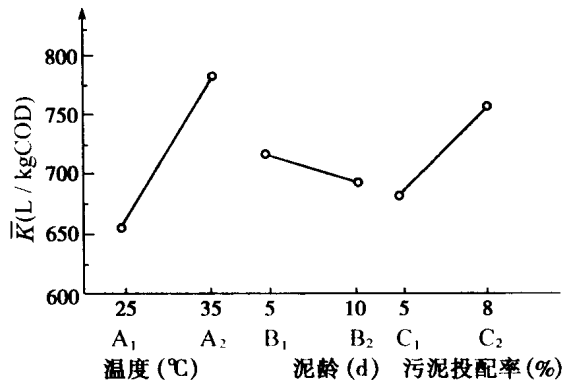
$$R(\text{第 1 列}) = 772.5 - 654.5 = 118(\text{L/kgCOD})$$

(3) 作因素与指标的关系图。以指标  $\bar{K}$  为纵坐标,因素水平为横坐标作图。该图反映了在其他因素基本上是相同变化的条件下,该因素与指标的关系。

例如,表 1-1-7 中所列的  $\bar{K}$  与 A,B,C 三因素的关系可绘得图 1-1-8。从图 1-1-8 可以很直观地看出三因素中,对产气量影响最大的是温度,影响最小的是泥龄。

(4) 比较各因素的极差  $R$ ,排出因素的主次顺序。例如,根据表 1-1-7,厌氧消化过程



图 1-1-8  $\bar{K}$  与 A, B, C 三因素的关系

中影响产气量大小的三因素的主次顺序是：

温度 → 污泥投配率 → 泥龄

应该注意，试验分析得到的因素主次、水平优劣，都是相对于某具体条件而言，在一次实验中是主要因素；在另一次试验中，由于条件变了，就可能成为次要因素。反过来，原来次要的因素，也可能由于条件的变化而转化为主要因素。

(5) 选取较好的水平组。从表 1-1-7 可见，4 个实验中产气量最高的操作条件是 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>，通过计算分析找出的好的操作条件也是 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>。因此，可以认为 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub> 是一组好的操作条件。如果计算分析结果与按试验安排进行实验后得到的结果不一致时，应将各自得到的好的操作条件再各做二次试验加以验证，最后确定哪一组操作条件最好。

## § 1-2 正交试验分析举例

【例 1-1】污水生物处理所用曝气设备，不仅关系到处理厂基建投资，还关系到运行费用，因而国外均在研制新型高效节能的曝气设备。自吸式射流曝气设备是一种新型设备，为了研制设备构造尺寸、运行条件与充氧性能关系，拟用正交试验法进行清水充氧试验。

试验是在 1.6 m × 1.6 m × 7.0 m 的钢板池内进行的，喷嘴直径  $d = 20$  mm (整个试验中的一部分)。

### 1. 试验方案确定及试验

#### (1) 试验目的

试验是为了找出影响曝气充氧性能的主要因素及确定较理想的结构尺寸和运行条件。

#### (2) 挑选因素

影响充氧的因素较多，根据有关文献资料及经验，对射流器本身结构主要考察二个：一个射流器的长、径比，即混合段的长度  $L$  与其直径  $D$  之比  $L/D$ ；另一个是射流器的面积比，即混合段的断面面积与喷嘴面积之比

$$m = \frac{F_2}{F_1} = \frac{D^2}{d^2}$$

对射流器运行条件，主要考察喷嘴工作压力  $p$  和曝气水深  $H$ 。

#### (3) 确定各因素的水平