

普通高等教育“十三五”土建类专业系列规划教材

给排水科学与工程专业水环境实验教程

主 编 张建锋
副主编 刘 伟
主 审 黄廷林



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十三五”土建类专业系列规划教材

给排水科学与工程专业水环境实验教程

主 编 张建锋
副主编 刘 伟
主 审 黄廷林



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

给排水科学与工程专业水环境实验教程/张建锋主编.
—西安:西安交通大学出版社,2017.10(2018.8重印)
ISBN 978-7-5693-0230-1

I. ①给… II. ①张… III. ①给排水系统-
实验-教材 IV. ①TU991-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 260749 号

书 名 给排水科学与工程专业水环境实验教程
主 编 张建锋
责任编辑 王建洪

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 西安日报社印务中心

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 11.875 字数 287 千字
版次印次 2017 年 11 月第 1 版 2018 年 8 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5693-0230-1
定 价 29.80 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82668133
读者信箱:xj_rwjg@126.com

版权所有 侵权必究



前言

为了适应“环境类大学科”的发展需要,推进环境类实验教学改革和发展,保障西安建筑科技大学给排水科学与工程专业“卓越工程师教育培养计划”的顺利实施,根据环境与市政工程学院环境类实验教学大纲,结合多年实验教学经验编辑成稿《给排水科学与工程专业水环境实验教程》。实验类型包括验证性实验、设计性实验和综合性实验,强调理论联系实践,并充分考虑专业理论教学的时序,注重专业知识应用的交叉融合,力求使本科生更好地理解 and 掌握理论知识。在专业实验部分,增设了具有较强工程实践与应用背景的拓展性实验内容,以配合“卓越工程师教育培养计划”实践的教学要求。

《给排水科学与工程专业水环境实验教程》对应的专业课程包括“水分析化学”“水力学”“泵与泵站”“水处理微生物学”“环境监测与评价”“水质工程学”等,主要面向给排水科学与工程专业学生在第二学年至第四学年的实验基础课和实验专业课,同时也可作为市政工程和环境工程水处理领域研究生开展实验研究的参考书。

本书内容包括:实验设计与数据处理、水分析化学实验基础知识、分析化学实验基本操作、水分析化学实验、工程流体力学和流体机械实验、水处理微生物学实验、环境监测与评价实验、水处理实验。本书由西安建筑科技大学环境与市政工程学院老师组织编写,张建锋担任主编,刘伟担任副主编。全书共分为11章,第1章由张建锋编写,第2~5章由蒋欣、文刚、朱维晃编写;第6章由杨成建、张志政编写;第7章由严双志、高湘编写;第8章由刘伟、刘永军编写;第9章由刘伟编写;第10~11章由张建锋、袁宏林编写。全书由张建锋、刘伟统稿,黄廷林主审。本书编写得到环境与市政工程学院环境类专业实验教学示范中心和给排水科学与工程专业教研室各位老师的积极支持和帮助,在此衷心感谢。

由于编写时间紧迫,本书涉及给排水科学与工程专业多门课程,书中不妥之处敬请批评指正。

编者

2017年9月



目 录

第 1 章 实验设计与数据处理	(1)
1.1 实验设计的基本概念	(1)
1.2 单因素实验优化设计	(2)
1.3 多因素实验设计	(7)
1.4 实验误差分析	(12)
1.5 实验数据处理	(16)
第 2 章 水分析化学实验基础知识	(48)
2.1 水分析化学实验用水	(48)
2.2 常用试剂的规格及试剂的使用	(49)
2.3 分析天平的使用	(50)
2.4 化学定量分析中的常用器皿及洗涤	(51)
2.5 实验室安全常识	(52)
2.6 实验数据的记录、处理和实验报告	(53)
第 3 章 分析化学实验基本操作	(55)
3.1 重量分析法基本操作	(55)
3.2 滴定分析基本操作	(57)
第 4 章 分析样品的采集及预处理	(61)
4.1 分析样品的采集	(61)
4.2 试样的分解	(63)
第 5 章 水分析化学实验	(66)
5.1 水中碱度的测定——酸碱滴定法	(66)
5.2 水中硬度的测定——络合滴定法	(68)
5.3 水中溶解氧的测定——氧化还原滴定法	(70)
5.4 水中余氯的测定——氧化还原滴定法	(73)
5.5 化学需氧量的测定——重铬酸钾法	(76)
5.6 水中微量铁的测定——邻菲罗啉分光光度法	(79)
第 6 章 工程流体力学和流体机械实验	(81)
6.1 流体力学实验基础知识	(81)
6.2 静水压力实验	(82)
6.3 伯努利方程式的验证	(85)

6.4	管路沿程阻力实验	(90)
6.5	明渠流动综合实验	(94)
第7章 水泵与水泵站实验(水泵性能实验)		(98)
第8章 水处理微生物学实验		(101)
8.1	培养基的配置与灭菌	(101)
8.2	普通光学显微镜的使用	(103)
8.3	微生物形态观察	(105)
8.4	滤膜法测定水中大肠菌群	(107)
8.5	活性污泥生物相观察及污泥沉降性能测定	(108)
8.6	活性污泥中细菌的纯种分离、培养和接种技术	(109)
8.7	细菌的革兰氏染色	(113)
8.8	微生物分子生物学检测技术	(114)
第9章 环境监测与评价实验		(118)
9.1	校园水质监测与评价——景观水的浊度和溶解氧测定	(118)
9.2	校园水质监测与评价——生活污水水质悬浮物、化学需氧量测定	(120)
第10章 水质工程学Ⅰ实验		(124)
10.1	混凝实验	(124)
10.2	颗粒自由沉淀实验	(126)
10.3	絮凝沉淀实验	(130)
10.4	过滤及反冲洗	(134)
10.5	树脂总交换容量和工作交换容量的测定	(137)
第11章 水质工程学Ⅱ实验		(141)
11.1	鼓风曝气系统中的充氧实验	(141)
11.2	污泥沉降比和污泥指数的测定实验	(145)
11.3	污泥比阻测定实验	(147)
11.4	生物转盘实验	(151)
11.5	酸性废水过滤中和实验	(153)
11.6	溶气浮上法处理废水实验	(155)
11.7	活性炭吸附实验	(157)
参考文献		(163)
实验须知		(165)
附录		(167)

第 1 章

实验设计与数据处理

1.1 实验设计的基本概念

实验是研究水处理技术、保证水处理设施或系统高效运行不可或缺的必要手段,实验设计的目的在于针对特定问题,分析确定最有效、最合理的实验步骤和流程,以期用最少的人力、物力和时间获得满足要求的实验结果。

优化实验设计,就是在特定的实验进行之前,根据实验的研究目标,利用数学工具科学合理地安排实验步骤,力求迅速找到最佳的研究结果。优化实验设计可以有效减少实验次数,节省原材料并较快得到有用信息,近年来在科学研究和工程实践中日益得到重视。从最初的传统均分和对分实验安排方法,发展演化出来的单因素 0.618 法和分数法(斐波那契数列法)、分批实验法、多因素的正交实验设计法、平行线法等实验设计理念,被世界各国的科研和工程技术人员广泛采用,取得了很好的效果。

实验设计的基本概念包括:

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,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

实验设计是指为节省人力、财力并迅速找到最佳条件,揭示事物内在规律,根据实验中不同的问题,在实验前利用数学原理科学编排实验的过程。

3. 指标

在实验设计中用来衡量或判断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,取自天然河流中的水含有大量悬浮物而呈现混浊,为了降低浊度满足使用要求一般需要向水中投加混凝剂,当实验目的是求得混凝剂的最佳投药量时,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,在水中投加适量的混凝剂可降低水的浊度,因此混凝剂即作为分析的实验因素,简称为因素。有一类因素,在实验中可以人为地加以调节和控制,如水质处理中的投药量,称为可控因素。另一类因素,由于自然环境和设备等条件的限制不能人为调节,如水质处理中的气温,称为不可控因素。在实验设计中,一般只考虑可控因素,因此本书中的因素凡未特别说明都指可控因素。

5. 水平

因素在实验中所处的不同状态或取值,可能引起指标的变化。因素变化的各种状态称为

因素的水平。某个因素在实验中需要考虑它的几种状态,就称为几个水平的因素。

因素的各个水平有的能用数量表示,有的不能用数量表示。例如,有几种混凝剂都可以降低水的浊度,要确定哪种混凝剂较好,几种混凝剂就表示混凝剂这个因素有几个水平,不能用数量表示。凡是不能用数量表示水平的因素,称为定性因素。在多因素实验中,经常会遇到定性因素。对于定性因素,只要对每个水平规定其具体含义,就可与通常的定量因素一样对待。

6. 因素间的交互作用

若实验中所考虑的各因素相互间没有影响,则称因素间没有交互作用,否则称因素间有交互作用,并记为 $A(\text{因素}) \times B(\text{因素})$ 。

1.2 单因素实验优化设计

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,其他因素及其取值保持不变的实验,称为单因素实验。如何选择实验方案来安排实验、找出最优实验点、使实验结果最好,是实施实验前要考虑的基本问题。

在安排单因素实验时,一般考虑三方面的内容。

首先,确定包括最优点的实验范围。设下限是 a ,上限是 b ,实验范围就用由 a 到 b 的线段表示(见图 1-1),并记作 $[a, b]$ 。若用 x 表示实验点,则写成 $a \leq x \leq b$,如果不考虑端点 a, b ,就记为 (a, b) 或 $a < x < b$ 。



图 1-1 单因素实验范围

然后,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 $y = f(x)$,则称 $f(x)$ 为指标函数(或目标函数)。根据实际问题,在因素的最优点上,已知指标函数 $f(x)$ 的最大值、最小值或满足某种规定的要求称为评定指标。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,就要确定评定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。

下面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、0.618 法和分数法。

1.2.1 均分法与对分法

1. 均分法

均分法具体做法如下,如果要做 n 次实验,就把实验范围等分为 $n+1$ 份,每份的实验范围为 i ,在各个分点上做实验,如图 1-2 所示。



图 1-2 均分法实验点

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

把 n 次实验结果进行比较,选择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。

均分法是一种原始的实验方法。这种方法的优点是只需把实验放在等分点上,实验可以同时安排,也可以一个接一个安排,缺点是实验次数较多。

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 $[a, b]$,则中点公式为

$$x = \frac{a+b}{2} \quad (1-2)$$

用这种方法,每次可去掉实验范围的一半,直到取得满意的结果为止。但是对分法是有条件限制的,它只适用于每做一次实验就能确定下次实验方向的情况。

如某酸性污水,要求投加碱调整 pH 值至 7~8。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 $x_1 = \frac{a+b}{2}$,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。

单因素优选法中,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能确定下次实验方向。有些实验不能满足这个要求,因此对分法的应用受到一定的限制。

1.2.2 0.618 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。

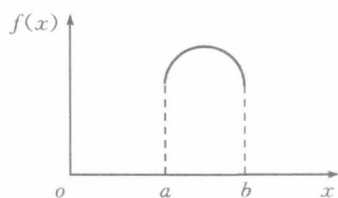


图 1-3 上单峰函数

0.618 法适用于目标函数为单峰函数的情形。具体做法如下: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

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

第二次实验点选在这一点 x_1 的对称点 x_2 上,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。



图 1-4 0.618 法第 1、2 个实验点分布

设 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 分别表示 x_1 与 x_2 两点的实验结果,且 $f(x)$ 的值越大越好。

(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,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 3 种做法都可使好点留下,将坏点去掉,不会发生最优点丢失的情况。

继续做实验,在 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 好的情况下,在剩余实验范围 $[x_2, b]$ 内用公式 (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。



图 1-5 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 好时第 3 个实验点 x_3

在 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 差的情况下,在剩余实验范围 $[a, x_1]$ 内用公式(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 1-6 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 差时第 3 个实验点 x_3

在 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 实验效果一样的情况下,剩余实验范围为 $[x_2, x_1]$,用公式(1-3)和公式(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 3 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,直到找到满意的实验点,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,就可以停止实验。

例如,为降低水的浊度,需加入一种药剂,已知其最佳加入量在 1000mg 到 2000mg 之间的一点,现在要通过实验找到它。按照 0.618 法选点,先在实验范围的 0.618 处做第一个实验,这一点的加入量可由公式(1-3)计算出来。

$$x_1 = 1000 + 0.618 \times (2000 - 1000) = 1618(\text{mg})$$

再在实验范围的 0.382 处做第二个实验,药剂的加入量可由公式(1-4)计算出来,如图 1-7 所示。



$$x_2 = 1000 + 0.382 \times (2000 - 1000) = 1382(\text{mg})$$

图 1-7 降低水的浊度第 1、2 次实验加药量

比较两次实验结果,如果点 x_1 比点 x_2 好,则去掉 1382mg 以下的部分,然后在留下部分再用公式(1-3)

找出第三个实验点 x_3 ,在点 x_3 做第三次实验,这一点的加入量为 1764mg,如图 1-8 所示。

如果仍然是点 x_1 好,则去掉 1764 到 2000 这一段,在留下的部分按公式(1-4)计算得出第四实验点 x_4 ,在点 x_4 做第四次实验,这一点的加入量为 1528mg,如图 1-9 所示。



图 1-8 降低水的浊度第 3 次实验加药量

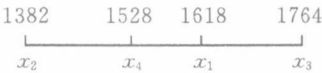


图 1-9 降低水的浊度第 4 次实验加药量

如果这一点比点 x_1 好,则去掉 1618 到 1764 这一段,在留下的部分按同样方法继续做下去,如此重复,最终即能得到最佳点。

总之,0.618 法简便易行,对每个实验范围都可以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,再用公式(1-3)、公式(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。

1.2.3 分数法

1. 分数法的概念

分数法又称为斐波那契数列法,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。

斐波那契数列是满足下列关系的数列,即 F_n 在 $F_0=F_1=1$ 时符合下述递推式

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} (n \geq 2)$$
 (1-5)

即从第 3 项起,每一项都是它前面两项和,写出来就是

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \dots$$

相应的 F_n 为 $F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, \dots$

分数法也是适用于单峰函数的方法。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,实验范围有一些不连续的、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。

2. 利用分数法进行单因素优化实验设计

设 $f(x)$ 是单峰函数,先分两种情况研究如何利用斐波那契数列来安排实验。

(1)所有可能进行的实验总次数 m 值,正好是某一个 F_n-1 值时,即可能的实验总次数 m 次,正好与斐波那契数列中的某数减 1 相一致时。

此时需要增加两个端点(虚点,不作实验),中间实验点个数为 F_n-1 ,中间实验点与端点实验点个数之和为 F_n+1 ,这时前两个实验点分别放在实验范围的 F_{n-1} 和 F_{n-2} 的位置上,也就是现在斐波那契数列上的第 F_{n-1} 和 F_{n-2} 点上做实验,比较这两个实验结果,从坏点把实验范围切开,留下包括好点的那一段,实验范围就缩小了。

例如,通过某种污泥的消化实验确定其最佳投配率 P ,实验范围为 $2\% \sim 13\%$,以变化 1% 为一个实验点,则可能的实验总次数为 12 次,符合 $12=13-1=F_6-1$,即 $m=F_n-1$ 的关系,故第一个实验点为

$$F_{n-1} = F_5 = 8$$

即放在 8 处或者说放在第 8 个实验点处,如图 1-10 所示,投配率为 9% 。

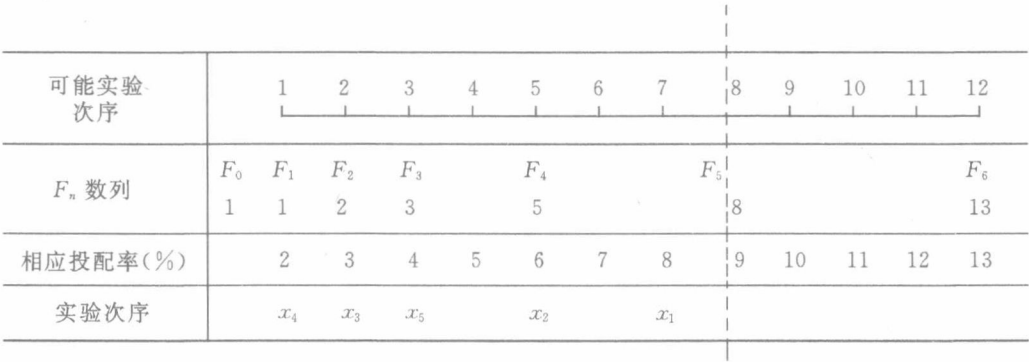


图 1-10 分数法第一种情况实验安排

同理第二个实验点为

$$F_{n-2} = F_4 = 5$$

即第 5 个实验点,投配率为 6%。

实验后,比较两个不同投配率的结果,根据产气率、有机物的分解率,若污泥投配率 6% 优于 9%,则根据“留好去坏”的原则,去掉 9% 以上的部分(同理,若 9% 优于 6% 时,去掉 6% 以下的部分)重新安排实验。

此时实验范围如图 1-10 中虚线左侧所示,可能实验总次数 $m = 7$,符合 $8 - 1 = 7$,根据 $m = F_n - 1, F_n = 8$,故 $n = 5$ 。第一个实验点为

$$F_{n-1} = F_4 = 5, P = 6\%$$

该点已实验,第二个实验点为

$$F_{n-2} = F_3 = 3, P = 4\%$$

或利用在该范围内与已有实验点的对称关系找出第 2 个实验点,如在 1~7 点内与第 5 点相对称的点为第 3 点,相对应的投配率 $P = 4\%$ 。

比较投配率为 4% 和 6% 两个实验的结果并按照上述步骤重复进行,如此进行下去,则对可能的 $F_6 - 1 = 13 - 1 = 12$ 次实验,只要进行 $n - 1 = 6 - 1 = 5$ 次实验,就能找出最优点。

(2)可能的实验总次数 m ,不符合上述关系,而是符合

$$F_{n-1} - 1 < m < F_n - 1$$

在此条件下,可在实验范围两端增加虚点,人为地使实验的个数变成 $F_n - 1$,使其符合第一种情况,而后安排实验。当实验被安排在增加的虚点上时,不要真正做实验,而应直接判定虚点的实验结果比其他实验点效果都差,实验继续做下去,即可得到最优点。

例如混凝沉淀中,要从 5 种投药量中,筛选出最佳投药量,利用分数法安排实验。

由斐波那契数列可知,

$$m = 5, F_n - 1 = F_5 - 1 = 8 - 1 = 7, F_{n-1} - 1 = F_4 - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$4 < m < 7, \text{符合 } F_{n-1} - 1 < m < F_n - 1, \text{故属于分数法的第二种情况。}$$

首先要增加虚点,使其实验总次数达到 7 次,如图 1-11 所示。

可能实验 次序	1234567						
F_n 数列	F_0 1	F_1 1	F_2 2	F_3 3	F_4 5	F_5 8	
相应投配率(%)	0	0.5	1.0	1.3	2.0	3.0	0
实验次序			x_2		x_1	x_3	

图 1-11 分数法第二种情况实验安排

第一个实验点为 $F_{n-1} = 5$,投药量为 2.0 mg/L,第 2 个实验点为 $F_{n-2} = 3$,投药量为 1.0 mg/L。经过比较后,投药量为 2.0 mg/L 时效果较理想,根据“留好去坏”的原则,舍掉 1.0 以下的实验点,由图 1-11 可知,第 3 个实验点应安排在实验范围 4~8 内的实验点 5 的对称实验点 6 处,即投药量为 3.0 mg/L。比较结果后投药量 3.0 mg/L 优于 2.0 mg/L 时,则舍掉 F_5 点以

下数据,在6~7范围内根据对称点选取第4个实验点为虚点7,其投药量为0 mg/L,因此最佳投药量为3.0mg/L。

1.3 多因素实验设计

多因素实验就是实验中需要考虑多个因素,而每个因素又要考虑多个水平的实验问题。

在科学实验和研究的过程中,遇到的问题往往都比较复杂,它们一般都包含了许多影响因素,每个因素又往往有多个水平,它们之间有可能互相交织、互相作用,情况错综复杂,要解决问题,往往需要做大量的实验。例如,某工业废水采用厌氧消化处理,经研究分析,决定考虑3个因素(如温度、时间、负荷率等),而每个因素又可能有4种不同的水平(如消化时控制的温度可为20℃、25℃、30℃、35℃等4个水平),它们之间可能有 $4^3=64$ 种不同的组合,也就是可能要经过64次实验才能找出最佳的实验点。这样既耗时又耗资,有时甚至是不可能做到的。由此可见,多因素的实验存在着如下突出的矛盾:

①全面实验的次数与实际可行的实验次数之间的矛盾。

②实际所做的少数实验与要求掌握的事物内在规律之间的矛盾。

为解决第一个矛盾,就需要对实验进行合理的安排,挑选少数几个具有代表性的实验做;为解决第二个矛盾,就应当对所选定的几个实验的实验结果进行科学的分析。

如何合理地安排多因素实验,又如何对多因素实验结果进行科学分析,目前应用的方法较多。而正交实验设计就是处理多因素实验的一种科学方法。它能有助于实验者在实验前借助事先已制好的正交表科学地设计实验方案,从而挑选出少量有代表性的实验,实验后经过简单的表格运算,分清各个因素在实验中的主次作用并找到较好的运行方案,得到正确的分析结果。因此,正交实验设计在各个领域得到了广泛应用。

正交实验设计,就是利用事先制好的特殊表格正交表来安排多因素实验,并用统计方法进行数据分析的一种方法。它简便易行,而且计算表格化,并能较好地解决如上所述的多因素实验中存在的两个突出问题,对多因素问题的解决往往能起到事半功倍的效果。

1. 用正交表安排多因素实验的步骤

(1)明确实验目的,确定评价指标。即根据水处理工程实际明确实验要解决的问题。同时,要结合工程实际选用能定量、定性表达的突出指标作为实验分析的评价指标,指标可能是一个或多个。

(2)挑选因素、水平,列出因素水平表。影响实验成果的因素很多,但是不可能对每个因素都进行考察,因此要根据已有的专业知识和相关文献资料以及实际情况,固定一些因素于最佳条件下。排除一些次要因素,挑选主要因素。例如,对于不可控因素,由于无法测出因素的数值,所以看不出不同水平的差别,也就无法判断出该因素的作用,因此不能将其列为被考察的因素。对于可控因素,应当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,特别是不能将重要因素固定而不加以考察。

(3)选择合适的正交表。常用的正交表有几十种,可以经过分析灵活运用,但一般要视因素及水平的数量、有无重点因素(需加以详细考察)、实验的工作量大小和允许的条件综合分析而定。实际安排实验时,挑选因素、水平和选用正交表等步骤往往是结合进行的。接着根据以上选择的因素及水平的取值和正交表,即可制定一张反映实验所需考察研究的因素和各因素

的水平因素水平表。

(4)确定实验方案,根据因素水平表及所选用的正交表,确定实验的方案。

①因素顺序上列:按照因素水平表固定下来的因素次序,按顺序放到正交表的纵列上,每列放一种。

②水平对号入座:因素顺序上列后,把相应的水平按因素水平表所确定的关系对号入座。

③确定实验条件:正交表在因素顺序上列、水平对号入座后,表中的每一横行即代表所要进行的实验的一种条件,横行数则代表实验的次数。

(5)按照正交表中每一横行所规定的条件进行实验。实验过程中,要严格操作。准确记录实验数据,分析整理出每组条件下的评价指标。

2. 实验结果的直观分析

通过实验获得大量的实验数据后,如何科学地分析这些数,从中得到正确的结论,是正交实验设计不可分割的一个组成部分。

正交实验设计的数据分析的日就是要解决以下问题:哪些因素影响大;哪些因素影响小;因素的主次关系如何;各影响因素中,哪个水平能得到满意的结果,从而找出最佳生产运行条件。

下面以正交表 $L_4(2^3)$ 为例,即做 4 次实验考察 3 个因素 2 个水平的结果,其中各数字与符号 $L_n(f^m)$ 对应,如表 1-1 所示。

表 1-1 $L_4(2^3)$ 正交表直观分析

水平		列号			实验结果 (评价指标) y_i
		1	2	3	
实验号	1	1	1	1	y_1
	2	1	2	2	y_2
	3	2	1	2	y_2
	4	2	2	1	y_2
K_1					
K_2					
$\bar{K}_1$					
$\bar{K}_2$					
$R = \bar{K}_1 - \bar{K}_2$					
极差					

直观分析法的具体步骤如下:

(1)填写评价指标。

将每组实验的数据分析处理后,求出相应的评价指标值 y_i ,并填入正交表的右栏实验结果内。

(2)计算各列(因素)的各水平效应值 K_{mf} 、均值 $\bar{K}_{mf}$ 及极差 R_m 值。

K_{mf} 为各列中 f 号的水平相应指标值之和, $\bar{K}_{mf}$ 为各列中同一水平指标平均值, R_m 为各列中 $\bar{K}_{mf}$ 的极大与极小值之差。

(3)比较各因素的极差 R 值,根据其大小,即可排出因素的主次关系。这就从直观上很易理解,对实验结果影响大的因素一定是主要因素。所谓影响大,就是这个因素的不同水平所对应的指标间的差异大,相反,则是次要因素。

(4)比较同一因素下各种水平的效应值 $\bar{K}_{mf}$,能使指标达到满意的值(最大值或最小值)为较为理想的水平值。这样就可以确定最佳生产运行条件。

(5)做因素和指标的关系图,即以各因素的水平值为横坐标,各因素水平所对应的均值 $\bar{K}_{mf}$ 为纵坐标,在直角坐标系上绘图,可以直观地反映出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。

3. 正交实验分析举例

【例 1-1】针对某水库低浊度原水进行直接过滤正交试验,投加药剂为聚合氯化铝,考察的因素包括混合速度梯度 G 值、混合时间、滤速和投药量。按照三个水平进行实验,确定因素的主次顺序和最优工况。

解:实验设计中确定的因素和水平见表 1-2。

表 1-2 实验因素及水平表

水平	因素			
	混合速度梯度 G (s^{-1})	滤速 (m/h)	混合时间 (s)	投药量 (mg/L)
	A	B	C	D
水平 1	400	10	10	9
水平 2	500	8	20	7
水平 3	600	6	30	5

实验评价指标为滤后水浊度,浊度越低处理效果越好。

根据以上所选择的因素和水平,确定选用 $L_9(3^4)$ 正交表,如表 1-3 所示。

表 1-3 $L_9(3^4)$ 正交表

实验号	列号			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

本正交实验安排如表 1-4 所示。

表 1-4 实验计划表

实验号	混合速度梯度 G (s^{-1})	滤速 (m/h)	混合时间 (s)	投药量 (mg/L)
	A	B	C	D
1	$A_1(400)$	$B_1(10)$	$C_1(10)$	$D_1(9)$
2	$A_1(400)$	$B_2(8)$	$C_2(20)$	$D_2(7)$
3	$A_1(400)$	$B_3(6)$	$C_3(30)$	$D_3(5)$
4	$A_2(500)$	$B_1(10)$	$C_2(20)$	$D_3(5)$
5	$A_2(500)$	$B_2(8)$	$C_3(30)$	$D_1(9)$
6	$A_2(500)$	$B_3(6)$	$C_1(10)$	$D_2(7)$
7	$A_3(600)$	$B_1(10)$	$C_3(30)$	$D_2(7)$
8	$A_3(600)$	$B_2(8)$	$C_1(10)$	$D_3(5)$
9	$A_3(600)$	$B_3(6)$	$C_2(20)$	$D_1(9)$

实验结果及分析见表 1-5。

表 1-5 正交实验数据结果表

实验号	混合速度梯度 G (s^{-1})	滤速 (m/h)	混合时间 (s)	投药量 (mg/L)	滤后水平均浊度 (NTU)
1	$A_1(400)$	$B_1(10)$	$C_1(10)$	$D_1(9)$	1.5
2	$A_1(400)$	$B_2(8)$	$C_2(20)$	$D_2(7)$	1.6
3	$A_1(400)$	$B_3(6)$	$C_3(30)$	$D_3(5)$	1.7
4	$A_2(500)$	$B_1(10)$	$C_2(20)$	$D_3(5)$	1.8
5	$A_2(500)$	$B_2(8)$	$C_3(30)$	$D_1(9)$	0.9
6	$A_2(500)$	$B_3(6)$	$C_1(10)$	$D_2(7)$	1.3
7	$A_3(600)$	$B_1(10)$	$C_3(30)$	$D_2(7)$	1.3
8	$A_3(600)$	$B_2(8)$	$C_1(10)$	$D_3(5)$	1.7
9	$A_3(600)$	$B_3(6)$	$C_2(20)$	$D_1(9)$	0.7

把实验结果代入正交实验表中计算,结果如表 1-6 所示。

表 1-6 正交实验表

实验号	列号				数据 y
	A	B	C	D	
	1	2	3	4	
水平					
1	$A_1(400)$	$B_1(10)$	$C_1(10)$	$D_1(9)$	1.5
2	$A_1(400)$	$B_2(8)$	$C_2(20)$	$D_2(7)$	1.6
3	$A_1(400)$	$B_3(6)$	$C_3(30)$	$D_3(5)$	1.7

续表 1-6

实验号	列号				数据 y
	A	B	C	D	
	1	2	3	4	
4	A ₂ (500)	B ₁ (10)	C ₂ (20)	D ₃ (5)	1.8
5	A ₂ (500)	B ₂ (8)	C ₃ (30)	D ₁ (9)	0.9
6	A ₂ (500)	B ₃ (6)	C ₁ (10)	D ₂ (7)	1.3
7	A ₃ (600)	B ₁ (10)	C ₃ (30)	D ₂ (7)	1.3
8	A ₃ (600)	B ₂ (8)	C ₁ (10)	D ₃ (5)	1.7
9	A ₃ (600)	B ₃ (6)	C ₂ (20)	D ₁ (9)	0.7
K ₁	4.8	4.6	4.5	3.1	
K ₂	4.0	4.2	4.1	4.2	
K ₃	3.7	3.7	3.9	5.2	
$\bar{K}_1$	1.60	1.53	1.50	1.03	
$\bar{K}_2$	1.33	1.40	1.37	1.40	
$\bar{K}_3$	1.23	1.23	1.30	1.73	
R	0.37	0.30	0.20	0.7	

计算各列的 K 、 $\bar{K}$ 和极差 R 值。如计算混合速度梯度 G 值这一列的因素时,各水平的 K 值如下:

第一个水平

$$K_1 = 1.5 + 1.6 + 1.7 = 4.8$$

第二个水平

$$K_2 = 1.8 + 0.9 + 1.3 = 4.0$$

第三个水平

$$K_3 = 1.3 + 1.7 + 0.7 = 3.7$$

其均值 $\bar{K}$ 分别为:

$$\bar{K}_1 = 4.8 / 3 = 1.60$$

$$\bar{K}_2 = 4.0 / 3 = 1.33$$

$$\bar{K}_3 = 3.7 / 3 = 1.23$$

$$R = 1.60 - 1.23 = 0.37$$

以此分别计算滤速、混合时间、加药量。

①因素重要性比较。

划分因素重要性的依据是极差。极差 R 的大小,反映了实验中各因素作用的大小。极差大,表明这个因素对指标的影响大,它的变化对结果影响很大;反之,极差 R 小,说明该因素是保守的,它的变化对结果影响小。

本实验中 $R_4 = 0.70 > R_1 = 0.37 > R_2 = 0.30 > R_3 = 0.20$,因此,各因素对指标影响作用的大小依次为 $D > A > B > C$,即投药量、 G 值、滤速、混合时间。