



全国高等院校环境科学与工程统编教材

水处理综合实验技术

SHUI CHULI ZONGHE SHIYAN JISHU

章北平 陆谢娟 任拥政 主编
金儒霖 主审



华中科技大学出版社

水处理综合实验技术

主 编	章北平	陆谢娟	任拥政		
参 编	吴晓晖	张翔凌	罗 凡	左椒兰	王宗平
	杨 群	解清杰	周爱姣	刘礼祥	刘正乾
	高 兰	熊思江	崔玉红	黄冠山	付四立
主 审	金儒霖				

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书是华中科技大学“教学质量工程”精品教材资助项目。全书内容主要包括实验设计与数据处理、水处理常规实验和水处理综合实验三大部分,主要阐述实验设计的基本理论、水处理实验的基本操作及综合实验的自主创新,对提高学生的实践能力、科研创新能力大有裨益。

全书理论与实践相结合,及时反映和应用科研成果中的新技术,内容丰富,图文并茂,适合于高等学校给排水科学与工程、环境工程等专业师生使用,亦可供从事本专业的工程技术人员或科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水处理综合实验技术/章北平 陆谢娟 任拥政 主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2011.1

ISBN 978-7-5609-6701-1

I. 水… II. ①章… ②陆… ③任… III. 水处理-高等学校-教材 IV. TU991.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 212471 号

水处理综合实验技术

章北平 陆谢娟 任拥政 主编

策划编辑:王新华

责任编辑:张鑫锐

封面设计:潘 群

责任校对:祝 菲

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉正风图文照排中心

印 刷:湖北万隆印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.25

字 数:267千字

版 次:2011年1月第1版第1次印刷

定 价:18.00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

前 言

水环境污染和水资源危机日益加剧,水污染控制的新技术和新方法应运而生,水处理实验技术也发挥着重要作用。给水排水工程专业培养和训练学生的综合素质和实践能力,不仅要求学生具有坚实的理论基础,而且要让其掌握实验操作技能,具备解决专业实际问题和科研创新的能力。基于此,本书在国家“985”学科建设平台的基础上,介绍了水处理实验中的传统基础实验,编写了水和特种水处理综合设计实验,编入了实验设计、误差分析与处理等相关内容。

本书是华中科技大学市政工程系老师们多年教学与科研工作的结晶,书中汇集了许多科研和实验资料,对培养学生的实验操作能力与科研创新能力颇有裨益。

本书内容包括实验设计与数据处理、水处理基础实验技术、水和特种水处理综合设计实验。其中水处理基础实验技术包括 14 个传统的基础理论实验;水处理综合设计实验包括给水处理综合实验设计 4 个,污水综合设计实验 6 个;特种水处理综合设计实验(设计研究型实验) 10 个。综合设计实验体现了从污水处理到纯净水净化的设计理念,不仅要求学生完成单一的装置实验,而且要进行该装置的自主设计实验,还要根据不同原水水质指标进行不同装置组合实验,使出水达到相应的标准。

本书由华中科技大学章北平教授主编。其中第一章由任拥政老师、陆谢娟老师和吴晓晖老师编写;第二章实验十三由武汉理工大学张翔凌老师编写,其余实验由华中科技大学环境科学与工程学院市政工程系老师编写;第三章实验由华中科技大学环境科学与工程学院市政工程系老师编写,其中第一节的实验一由罗凡老师编写,实验二由左椒兰老师编写,实验三由陆谢娟老师编写,实验四由王宗平老师编写,第二节的实验一由杨群老师编写,实验二由解清杰老师编写,实验三由周爱姣老师编写,实验四由刘礼祥博士编写,实验五、实验六由任拥政老师编写;第四章实验一、实验五与实验六由章北平老师编写,实验二由任拥政老师编写,实验三、实验七由吴晓晖老师编写,实验四由刘正乾老师编写,实验八由高兰博士编写,实验九由熊思江博士编写,实验十由崔玉红老师编写。此外华中科技大学环境科学与工程学院中心实验室的皇冠山老师、付四立老师等参加了部分编写工作。

本书由华中科技大学金儒霖教授主审。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,欢迎广大读者给予批评指正。

编 者

2010 年 12 月

目 录

第一章 实验设计与数据处理	(1)
第一节 实验设计的几个基本概念	(1)
第二节 单因素实验优化设计	(2)
第三节 多因素实验设计	(6)
第四节 实验误差分析	(12)
第五节 实验数据处理	(16)
第二章 水处理基础实验技术	(47)
实验一 离心泵性能实验	(47)
实验二 混凝实验	(52)
实验三 自由沉降实验	(56)
实验四 滤料筛分级配实验	(58)
实验五 过滤与反冲洗实验	(60)
实验六 离子交换软化实验	(62)
实验七 气浮实验	(65)
实验八 SCD 和 FCD 在线监控实验	(68)
实验九 清水充氧实验	(70)
实验十 污水充氧修正系数 α 、 β 测定实验	(72)
实验十一 成层沉淀实验	(73)
实验十二 酸性废水过滤中和实验	(76)
实验十三 活性污泥性能测定实验	(77)
实验十四 纳滤和反渗透及水质在线监测实验	(80)
第三章 水处理综合设计实验	(82)
第一节 给水处理综合设计实验	(82)
实验一 折板、涡流絮凝池实验	(84)
实验二 浮沉池实验	(86)
实验三 翻板滤池实验	(88)
实验四 活性炭吸附滤池实验	(91)
第二节 污水处理综合设计实验	(93)
实验一 管式絮凝沉淀器实验	(95)
实验二 UASB 反应器运行参数的确定实验	(99)
实验三 Carrousel DenitIR A ² /O 氧化沟系统实验	(101)
实验四 CIBR 同步脱氮除磷实验	(103)
实验五 充氧波形潜流人工湿地实验	(105)

实验六 虹吸式屋面雨水排水系统模拟实验·····	(108)
第四章 特种水处理综合设计实验·····	(111)
实验一 冶金综合废水回用实验·····	(111)
实验二 造纸废水物化-生化实验·····	(115)
实验三 Fenton 试剂催化氧化-混凝法处理焦化废水实验·····	(117)
实验四 Fenton 法处理化工废水实验·····	(120)
实验五 印染废水处理实验·····	(122)
实验六 制革废水处理实验·····	(124)
实验七 光催化氧化处理农药废水实验·····	(127)
实验八 养殖废水处理实验·····	(129)
实验九 加压溶气气浮法处理含油废水实验·····	(132)
实验十 有机废水臭氧氧化实验·····	(134)
附录·····	(138)
附录 A 常用正交实验表·····	(138)
附录 B 离群数据分析判断表·····	(148)
附录 C F 分布表·····	(152)
附录 D 相关系数检验表·····	(154)
附录 E 氧在蒸馏水中的溶解度(饱和度)·····	(155)
参考文献·····	(156)

第一章 实验设计与数据处理

第一节 实验设计的几个基本概念

实验设计是解决水处理问题不可或缺的必要手段,实验设计的目的在于选择一种对所研究的特定问题的最有效最合理的实验安排,以使用最少的人力、物力和时间获得满足要求的实验结果。

优化实验设计,就是一种在实验进行之前,根据实验中的不同问题,利用数学原理,科学地安排实验,以求迅速找到最佳方案的科学实验方法。它对于减少实验次数,节省原材料与较快得到有用信息是非常重要的。由于通过优化实验设计提供了科学安排实验的方法,因此,近年来优化实验设计越来越被科技人员重视,并得到广泛应用。优化实验设计打破了传统均分和对分安排实验等方法,其中单因素的 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、平行线法等在国外已广泛地应用于科学实验上,取得了很好的效果。

实验设计在水处理中具有重要的作用,它是水处理工作者必须掌握的技能和方法。因此,在进行实验设计时,有必要先对实验设计的一些基本概念有所了解。

(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,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,天然水中存在大量胶体颗粒,使水混浊,为了降低浊度需往水中投加混凝剂,当实验目的是求最佳投药量时,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,在水中投入适量的混凝剂可降低水的浊度,因此水中投加的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,由于自然条件和设备等条件的限制,暂时还不能人为调节。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,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,有几种混凝剂可以降低水的浊度,要研究哪种混凝剂较好,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,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 $A(\text{因素}) \times B(\text{因素})$ 。

第二节 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,其他因素及量保持不变的实验,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,是实验前要考虑的重要问题。

在安排单因素实验时,一般考虑三方面的内容。



图 1-1 单因素实验范围

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(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 $a <$

$x < b$ 。

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。

一、均分法与对分法

(一) 均分法

均分法具体做法如下, 如果要做 n 次实验, 就把实验范围按式(1-1)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; 其缺点是实验次数较多。

(二) 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, 要求投加碱量调整 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。

二、0.618 法

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要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。

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。

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

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

第二次实验点选在第一点 x_1 的对称点 x_2 上,即实验范围的 0.382 位置上。

$$x_2 = a + 0.382(b - a) \quad (1-4)$$



图 1-4 0.618 法第 1, 2 个实验点分布

实验点 x_1, x_2 如图 1-4 所示。

设 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 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,同样根据“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



图 1-6 $f(x_1)$ 比 $f(x_2)$ 差时第 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。

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 。

$$x_3 = x_2 + 0.618(x_1 - x_2)$$

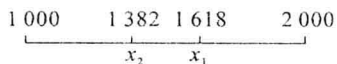
$$x_4 = x_2 + 0.382(x_1 - x_2)$$

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 1 000 g 到 2 000 g 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。

$$x_1 = 1\,000 + 0.618 \times (2\,000 - 1\,000) = 1\,618 \text{ (g)}$$



再在实验范围的 0.382 处做第二个实验,这一点的加入量可由公式(1-4)计算出,如图 1-7 所示。

图 1-7 降低水的浊度第 1、2 次实验加药量

$$x_2 = 1\,000 + 0.382 \times (2\,000 - 1\,000) = 1\,382 \text{ (g)}$$

比较两次实验结果,如果点 x_1 比点 x_2 好,则去掉 1 382 g 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 1 764 g,如图 1-8 所示。

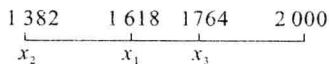


图 1-8 降低水的浊度第三次实验加药量

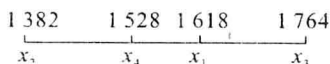


图 1-9 降低水中浊度第四次实验加药量

如果仍然是点 x_1 好,则去掉 1 764 到 2 000 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 1 528 g,如图 1-9 所示。

如果这一点比点 x_1 好,则去掉 1 618 到 1 764 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。

三、分数法

(一) 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

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

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。

(二) 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,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,如图 1-10 所示。

可能实验 次序	12 123456789101112												
F_n 数列	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4			F_5	F_6				
	1	1	2	3	5			8	13				
相应投配率/(%)	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
实验次序	x_4		x_3	x_5	x_2			x_1					

图 1-10 分数法第一种情况实验安排

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%~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%。

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 $8 - 1 = 7$, $m = F_n - 1$, $F_n = 8$,故 $n = 5$ 。第一个实验点为

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

该点已实验,第二个实验点为

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

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 $n - 1 = 6 - 1 = 5$ 次实验,就能找出最优值。

(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,而应直接判断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,

$$m=5, \quad F_5-1=8-1=7$$

$$F_{n-1}-1=F_4-1=5-1=4$$

$4 < m < 7$, 符合 $F_{n-1}-1 < m < F_n-1$, 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	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	
	1	1	2	3	5	8	
相应投药量/(mg/L)		0.0	0.5	1.0	1.3	2.0	3.0 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

则第一个实验点为 $F_{n-1}=5$, 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 4~7 内 F_5 的对称点 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,投药量为 0.0 mg/L,因此最佳投药量为 3.0 mg/L。

第三节 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 °C 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,从而挑选出少量具有代表性的实验做,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得到事半功倍的效果。

(一) 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,顺序地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。

(二) 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据,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目的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,其中各数字以符号 $L_m(f^m)$ 表示,如表 1-1 所示。

直观分析法的具体步骤如下。

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_3
	4	2	2	1	y_4
K_1					
K_2					
$\bar{K}_1$					
$\bar{K}_2$					
$R = \bar{K}_1 - \bar{K}_2$					
极差					

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

K_{mf} 为列中 f 号的水平相应指标值之和。

$$\bar{K}_{mf} = \frac{K_{mf}}{m \text{ 列的 } f \text{ 号水平的重复次数}} \quad (1-5)$$

R_m 为列中 K_f 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。这就从直观上很容易理解,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) 作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。

(三) 正交实验分析举例

【例 1-1】 根据华中科技大学主持的国家“十五”863 课题“城市污水生物/生态处理技术与示范”中自响应节能生物反应器的兼性生化反应模式的研究内容,在室温下进行实验研究。首先进行 3 因素 3 水平的正交实验,得出典型工况的运行参数和最佳运行工况。在正交实验的同时观察实验出现的各种现象,并进行工况与影响因素的分析。

解 1) 确定实验方案并实验

(1) 实验目的。找出影响自响应节能生物反应器中的兼性生化反应模式的主要因素并确定典型工况的运行参数和最佳运行工况。

(2) 挑选因素。影响该反应器工作的因素主要有以下几种:①反应池的水力停留时间

(HRT);②混合液悬浮固体浓度(MLSS);③进水浓度;④水温;⑤溶解氧(DO)与氧化还原电位(ORP);⑥pH 值、酸碱度。

根据有关文献及经验分析,主要考察以下 3 个因素:①反应池水力停留时间(HRT);②MLSS;③进水浓度。

(3) 确定各因素的水平。为了减少实验次数而又便于说明问题,每个因素选用 3 个水平,分析结果见表 1-2。

表 1-2 实验因素及水平表

水 平	因 素		
	HRT/h	MLSS/(mg/L)	进水有机物浓度/(mg/L)
	A	B	C
水平 1	4	4 000	100
水平 2	8	5 500	180
水平 3	12	7 000	260

(4) 确定实验评价指标。本次实验以 COD 的去除率为评价指标最为合适。COD 的去除率计算方法如下:

$$\eta=\frac{\text{COD}_{\text{进水}}-\text{COD}_{\text{出水}}}{\text{COD}_{\text{进水}}}\times 100\%$$

(5) 选择合适的正交表。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

(6) 确定实验方案。根据正交实验设计的要求,随机选择如下。

A_1 :8 h; A_2 :4 h; A_3 :12 h。

B_1 :4 000 mg/L; B_2 :7 000 mg/L; B_3 :5 500 mg/L。

C_1 :100 mg/L; C_2 :180 mg/L; C_3 :260 mg/L。

本正交实验安排如表 1-4 所示。

表 1-4 实验计划表

实验号	HRT/h	MLSS/(mg/L)	进水有机物浓度/(mg/L)
	A	B	C
1	A ₁ (8)	B ₁ (4 000)	C ₁ (100)
2	A ₁ (8)	B ₂ (7 000)	C ₂ (180)
3	A ₁ (8)	B ₃ (5 500)	C ₃ (260)
4	A ₂ (4)	B ₁ (4 000)	C ₂ (180)
5	A ₂ (4)	B ₂ (7 000)	C ₃ (260)
6	A ₂ (4)	B ₃ (5 500)	C ₁ (100)
7	A ₃ (12)	B ₁ (4 000)	C ₃ (260)
8	A ₃ (12)	B ₂ (7 000)	C ₁ (100)
9	A ₃ (12)	B ₃ (5 500)	C ₂ (180)

2) 实验结果及直观分析

实验结果见表 1-5。

表 1-5 正交实验数据结果表

实验号	HRT/h	MLSS/(mg/L)	进水有机物浓度/(mg/L)	混合液温度/℃	COD _{进水} /(mg/L)	COD _{出水} /(mg/L)	去除率
1	A ₃ (12)	B ₂ (7 000)	C ₁ (100)	27.1	106.51	50.31	0.528
2	A ₁ (8)	B ₂ (7 000)	C ₂ (180)	25.2	173.41	64.51	0.628
3	A ₂ (4)	B ₂ (7 000)	C ₃ (260)	24.0	292.49	140.62	0.519
4	A ₃ (12)	B ₃ (5 500)	C ₂ (180)	22.1	189.56	52.06	0.725
5	A ₁ (8)	B ₃ (5 500)	C ₃ (260)	24.5	261.20	78.36	0.700
6	A ₂ (4)	B ₃ (5 500)	C ₁ (100)	21.5	107.35	58.55	0.455
7	A ₂ (4)	B ₁ (4 000)	C ₂ (180)	16.4	188.49	114.60	0.392
8	A ₁ (8)	B ₁ (4 000)	C ₁ (100)	13.3	104.41	54.29	0.480
9	A ₃ (12)	B ₁ (4 000)	C ₃ (260)	11.9	250.80	155.39	0.380

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 (8)	B ₁ (4 000)	C ₁ (100)	D ₁	0.480
2	A ₁ (8)	B ₂ (7 000)	C ₂ (180)	D ₂	0.628

续表

实验号	列 号				
	A	B	C	D	数据 y
	1	2	3	4	
水 平					
3	A ₁ (8)	B ₃ (5 500)	C ₃ (260)	D ₃	0.700
4	A ₂ (4)	B ₁ (4 000)	C ₂ (180)	D ₃	0.392
5	A ₂ (4)	B ₂ (7 000)	C ₃ (260)	D ₁	0.519
6	A ₂ (4)	B ₃ (5 500)	C ₁ (100)	D ₂	0.455
7	A ₃ (12)	B ₁ (4 000)	C ₃ (260)	D ₂	0.380
8	A ₃ (12)	B ₂ (7 000)	C ₁ (100)	D ₃	0.528
9	A ₃ (12)	B ₃ (5 500)	C ₂ (180)	D ₁	0.725
M_1	1.808	1.252	1.463	1.713	
M_2	1.366	1.675	1.745	1.464	
M_3	1.633	1.880	1.599	1.620	
m_1	0.603	0.417	0.488	0.571	
m_2	0.455	0.558	0.582	0.488	
m_3	0.544	0.627	0.533	0.540	
R_j	0.148	0.210	0.094	0.083	

计算各列的 M 、 m 和极差 R 值。如计算水力停留时间(HRT)这一列的因素时,各水平的 M 值如下。

第一个水平

$$M_1 = 0.480 + 0.628 + 0.700 = 1.808$$

第二个水平

$$M_2 = 0.392 + 0.519 + 0.455 = 1.366$$

第三个水平

$$M_3 = 0.380 + 0.528 + 0.725 = 1.633$$

其均值 m 分别为

$$m_1 = 1.808/3 = 0.603$$

$$m_2 = 1.366/3 = 0.455$$

$$m_3 = 1.633/3 = 0.544$$

$$R_j = 0.603 - 0.455 = 0.148$$

以此分别计算 MLSS、进水有机物浓度。

(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
此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com