

NONGJI

# 农机试验设计

shiyan sheji

◎ 韩长杰 主编



中国农业科学技术出版社

NONGJI

# 农机 试验设计

shiyan sheji

◎ 韩长杰 主编



中国农业科学技术出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

农机试验设计 / 韩长杰主编. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-5116-3471-9

I. ①农… II. ①韩… III. ①农业机械-试验设计 IV. ①S22-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 003372 号

**责任编辑** 姚 欢

**责任校对** 贾海霞

**出 版 者** 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

**电 话** (010)82106638(编辑室) (010)82109702(发行部)

(010)82109709(读者服务部)

**传 真** (010)82106650

**网 址** <http://www.castp.cn>

**经 销 者** 各地新华书店

**印 刷 者** 北京建宏印刷有限公司

**开 本** 710mm×1 000mm 1/16

**印 张** 10.5

**字 数** 250 千字

**版 次** 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

**定 价** 39.00 元

❖ 版权所有 · 翻印必究 ❖

# 《农机试验设计》

## 编委会

主 编：韩长杰

副主编：张 静 郭 辉

参编人员：董远德 袁盼盼 周 军 靳 伟

朱兴亮 姜彦武 刘希光 徐 阳

主 审：杨宛章

# 目 录

绪言 .....	(1)
1 农机试验的正交试验设计法 .....	(3)
1.1 农机正交试验设计的基本方法和极差分析 .....	(3)
1.1.1 正交表 .....	(3)
1.1.2 正交试验设计的基本方法 .....	(4)
1.1.3 应用实例 .....	(9)
1.2 有交互作用的正交试验设计 .....	(10)
1.2.1 交互作用的概念 .....	(10)
1.2.2 考虑交互作用的试验设计 .....	(12)
1.2.3 试验结果的极差分析 .....	(14)
1.3 因素水平数不等的正交设计 .....	(15)
1.3.1 直接选用混合型正交表——并列法 .....	(15)
1.3.2 拟水平法 .....	(17)
1.4 多指标试验的分析 .....	(19)
1.4.1 综合平衡法 .....	(19)
1.4.2 综合加权评分法 .....	(21)
1.5 实例分析 .....	(23)
1.6 思考题 .....	(27)
2 试验数据的结构 .....	(28)
2.1 试验数据的结构式 .....	(28)
2.1.1 单因素重复试验的数据结构式 .....	(28)
2.1.2 双因素试验的数据结构式 .....	(29)
2.2 用数据结构式说明几个问题 .....	(32)
2.2.1 说明正交设计极差分析的利弊 .....	(32)
2.2.2 说明正交试验设计空白列可以估计误差 .....	(32)
2.2.3 估计试验结果的理论值 .....	(33)
2.2.4 利用试验数据的给构式补偿缺失数据 .....	(37)
2.3 思考题 .....	(38)

<b>3 农机试验的区组设计</b>	(39)
3.1 区组和区组设计	(39)
3.2 农机非田间试验的区组设计	(40)
3.3 农机田间试验的区组设计	(42)
3.3.1 试验地在一个方向有变化的区组设计	(43)
3.3.2 试验地在两个方向上有变化的区组设计	(49)
3.4 思考题	(53)
<b>4 方差分析</b>	(54)
4.1 单因素试验的方差分析	(54)
4.1.1 试验误差的总估计	(55)
4.1.2 因素水平变动而引起试验数据波动的估计	(56)
4.1.3 试验数据的总波动	(57)
4.1.4 自由度和平均偏差平方和	(58)
4.1.5 $F$ 比和显著性检验	(59)
4.2 正交试验的方差分析	(60)
4.2.1 无交互作用情况	(61)
4.2.2 有交互作用的情况	(62)
4.2.3 有重复试验的情况	(63)
4.3 不等水平正交试验的方差分析	(67)
4.3.1 混合型正交表试验的方差分析	(67)
4.3.2 拟水平法正交试验的方差分析	(69)
4.4 思考题	(71)
<b>5 回归设计</b>	(73)
5.1 回归设计的基本概念	(73)
5.1.1 多项式回归	(73)
5.1.2 多元线性回归	(74)
5.1.3 由被动变主动	(78)
5.1.4 因子水平的编码	(78)
5.2 一次回归正交设计	(79)
5.2.1 一次回归正交设计	(79)
5.2.2 数据分析	(81)
5.2.3 零水平处的失拟检验	(86)
5.2.4 含交互作用的模型	(88)
5.2.5 快速登高法	(89)

5.2.6 一次回归正交设计的旋转性 .....	(94)
5.3 二次回归的中心组合设计 .....	(94)
5.3.1 中心组合设计方案 .....	(94)
5.3.2 中心组合设计方案的特点 .....	(95)
5.4 二次回归正交设计 .....	(95)
5.4.1 二次中心组合设计的结构矩阵 $X$ 与系数矩阵 .....	(96)
5.4.2 正交性的实现 .....	(97)
5.4.3 统计分析 .....	(99)
5.5 二次回归旋转设计 .....	(105)
5.5.1 旋转性条件与非退化条件 .....	(105)
5.5.2 二次旋转设计 .....	(108)
5.5.3 二次回归正交旋转设计 .....	(110)
5.5.4 二次回归通用旋转设计 .....	(111)
5.5.5 数据分析 .....	(112)
6 均匀设计 .....	(119)
6.1 均匀设计的概念及特点 .....	(119)
6.2 均匀设计与均匀设计表 .....	(119)
6.2.1 均匀设计 .....	(119)
6.2.2 均匀设计表 .....	(119)
6.2.3 均匀设计表的使用 .....	(120)
6.2.4 均匀性的度量 .....	(121)
6.2.5 均匀设计及数据分析 .....	(123)
7 Excel 在试验设计中的应用实例 .....	(127)
7.1 单因子的方差分析 .....	(127)
7.2 双因子的方差分析 .....	(129)
7.3 多因子的方差分析 .....	(131)
7.4 回归分析 .....	(135)
7.4.1 单因子回归分析与方差分析 .....	(135)
7.4.2 双因子回归分析与方差分析 .....	(138)
参考文献 .....	(141)
附录 1 常用术语解释 .....	(142)
附录 2 常用正交表 .....	(143)
附录 3 $F$ 分布临界值表 .....	(156)

# 绪 言

试验设计是近代迅速发展起来的一个应用数学的分支。从 20 世纪 20 年代费希尔 (R. A. Fisher) 在农业生产中使用试验设计方法以来, 试验设计方法已经得到广泛的发展, 统计学家们发现了很多非常有效的试验设计技术。20 世纪 50 年代, 日本统计学家田口玄一将试验设计中应用最广的正交设计表格化, 为试验设计更广泛使用作出了巨大贡献。

对于任何一种新工艺、新材料和新品种的产生以及任何一项科研成果的获得, 往往要经过多次反复地试验研究工作。凡要做试验, 就存在着如何安排试验和如何分析试验结果的问题。试验安排的好, 既可减少试验次数, 缩短时间, 避免盲目性, 又能得到有效的结果; 试验安排的不好, 即使做了大量试验, 仍得不到满意的结果, 反而造成人力、物力和时间的浪费, 因此对试验必须进行合理设计。要使一项试验设计合理有效, 必须在安排试验时尽量减少试验误差和试验次数, 且便于对试验结果 (即指标值) 进行统计分析。

《农机试验设计》就是讲述如何科学地、合理地编制试验方案, 如何对其试验结果进行统计分析, 从而使农机试验工作省时省力。由于农业机械的服务对象和工作环境的特殊性, 具有以下特点: 一是影响试验结果的不可控制因素多而复杂, 且变动大; 二是试验受季节制约, 因而试验时期一般都很短, 而又要安排重复试验; 三是试验消耗人力、物力大。因此在农机试验研究中推广应用试验设计方法, 具有特别重要的意义。

例如, 研究某收割机切割器的性能, 考察的试验结果是割茬高度。试验选择的参数和状态如下表 0-1 所列。

表 0-1 某收割机切割器性能试验

参数	机速 (m/s)	曲柄转速 ( $r/min$ )	割刀类型	割刀状态	作物湿度
试验状态	1	450	I 型	锐	15%
	1.2	500	II 型	一般	20%
	1.5	550	小刀片	钝	25%

试验中共考察 5 个参数, 每个参数有 3 种状态。将每个参数取一种状态进行组合, 组成一种试验条件, 这样全面组合共得 243 种试验条件。要弄清切割器的

性能，就要测得每种试验条件下的割茬高度，然后进行数据的分析比较，才能了解其性能。一共有 243 种试验条件，这些试验条件都要逐一地在田间进行，而田间试验要受到土壤情况、气候等自然条件的影响。为了使试验结果具有可比性，必须使这 243 次试验都在相同的土壤情况、气候等条件下进行，要满足这个要求实际上是很难做到的。另外，要完成这 243 次试验，所需的人力和财力是很大的。因此要以尽可能少的试验来获得较全面的足够多的信息。

综上所述，如何能以最少的试验次数来获得足够的有效数据，并对其进行科学的统计分析，从而得出比较可靠的结论？如何能在不均一的试验条件下，对试验结果作出正确的判断？这正是本书所要讲述的内容之一。

《农机试验设计》的内容十分丰富，应用非常广泛，鉴于当今在生产和科研中使用最多的是正交试验设计、区组设计、回归设计、均匀设计等，本书主要对以上常用方法进行介绍，并且以实用为原则，着重讲述其原理和方法，并通过农机试验的实例加以说明。而对于数学原理的理论论证，乃至很多公式的严格数学推导，本书不详加论述。

# 1 农机试验的正交试验设计法

## 1.1 农机正交试验设计的基本方法和极差分析

正交试验设计，就是应用数学工作者编制的正交表来编排多因素试验，并应用数理统计理论来分析试验数据，从而以较少的试验次数，得到全面信息的一种方法。

### 1.1.1 正交表

正交表的种类很多，它是正交试验法的基本工具，已制成不同规格供选用（详见附表）。

正交表的通用符号： $L_n(t^q)$

$L$ ——正交表的代号；

$n$ ——用该表可安排试验条件的数目；

$q$ ——用该表最多可能安排因素的数目；

$t$ ——每个因素可以取的水平数目；

$t^q$ ——全面试验搭配试验条件的数目。

$n$ 、 $t$ 、 $q$  都对应有具体数字。将通用符号代以具体数字成为各种正交表的代号： $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 、 $L_{16}(2^{15})$ 、 $L_9(3^4)$ 、 $L_{27}(3^{13})$  等。

每 1 个表号都对应 1 个表格。最简单的正交表是  $L_4(2^3)$  表，如表 1-1 所示。

表 1-1  $L_4(2^3)$  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

下标  $n=4$  表示这个表有 4 横行，每行是一种试验条件，应用该表共要做 4 种不同条件的试验，它们分别由试验号 1~4 表示；括号内的指数  $q=3$  表示该表

有 3 个纵列，最多可安排 3 个因素；括号中底数  $t=2$  表示每个因素可取 2 个水平。

在试验号右面的一组字码，表示该号试验条件由不同因素水平具体组成。如第 2 号试验由 1、2、2 组成，即由第一因素的一水平，第二因素的二水平，第三因素的二水平组合成一组试验条件。

任何一张正交表都有下列两个特点。

(1) 每 1 列中，不同的字码出现的次数相等。如表  $L_4(2^3)$  中，字码“1”和“2”各出现 2 次。

(2) 任意 2 列中，将同一横行的两个字码看成有序数对时（即左边的数放在前，右边的数放在后，按这一次序排出的数对），则必然组成完全有序数对，而且每种数对出现的次数相等。如表  $L_4(2^3)$  中第 1、3 列组成一个完全有序数对：(1, 1)、(2, 2)、(1, 2)、(2, 1)，其中每种数对均出现一次。

正交表的“正交”二字是从几何学中 2 个向量正交的定义借用过来的，这里表示均衡的意思。正交表中每列所包括的字码种数相同时，称为同水平正交表，如  $L_4(2^3)$ 、 $L_9(3^4)$  等。正交表中每列所包含的字码种数不相同，称为混合水平正交表，如  $L_8(4^1 \times 2^4)$ 、 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$  等。用  $L_{16}(4^4 \times 2^3)$  表可安排 4 个四水平因素和 3 个二水平因素，共需做 16 种不同组合的试验。

## 1.1.2 正交试验设计的基本方法

### 1.1.2.1 试验方案的设计

如何设计试验方案是正交试验法的关键之一，现通过实例来说明。

**例 1-1** 在 5HN - 1.5 暖风粮食烘干机的研究中，为了提高单位时间的粮食脱水率，降低烘干耗电量，对烘干机的导向管的结构参数进行试验研究。我们假设因素之间没有交互作用。

正交试验方案的设计步骤如下。

(1) 明确试验目的，确定试验指标：该例试验目的是提高单位时间的粮食脱水率，降低烘干耗电量，所以确定试验指标是耗电量 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )，指一次性干燥 500kg 粮食的耗电量。

(2) 选因素、定水平：指标确定后，再确定影响试验指标的因素及水平。对耗电量有影响的导向管结构参数有：导向管直径 (mm)，导向管长度 (mm)，管开孔率 (%)。因此可以确定 3 个因素 ( $A$ ：导向管直径， $B$ ：导向管长度， $C$ ：导向管开孔率)。又根据已掌握的资料和经验，决定对 3 个因素各考察两个状态。即各为 2 个水平 ( $A_1$ ：190mm、 $A_2$ ：210mm； $B_1$ ：3 020mm、 $B_2$ ：3 500mm； $C_1$ ：0.6%、 $C_2$ ：0.9%)。具体列出因素、水平表如表 1-2 所示。

## 1 农机试验的正交试验设计法

表 1-2 粮食烘干机械试验的因素水平

因素 水平	A 导向管直径 (mm)	B 导向管长度 (mm)	C 管开孔率 (%)
1	190	3 020	0.6
2	210	3 500	0.9

(3) 选择合适的正交表：根据该例是选定 3 个二水平因素，又不考虑交互作用，因此可选用最简单的表。一般尽可能选用较小的正交表，以减少试验工作量。

(4) 确定试验方案表：先作表头设计。即把要考察的因素分别排到正交表的各列上，各列号改成各因素符号。再将表中的各列字码换成对应因素的一水平、二水平，得到如表 1-3 所示的试验方案表。

表 1-3 烘干机试验方案

因素 水平	A 直径 (mm) (1)	B 长度 (mm) (2)	C 开孔率 (%) (3)	指标耗电量 (kW·h) $y_i$
1	$A_1$ 190 (1)	$B_1$ 3 020 (1)	$C_1$ 0.6 (1)	
2	$A_1$ 190 (1)	$B_2$ 3 500 (2)	$C_2$ 0.9 (2)	
3	$A_2$ 210 (2)	$B_1$ 3 020 (1)	$C_2$ 0.9 (2)	
4	$A_2$ 210 (2)	$B_2$ 3 500 (2)	$C_1$ 0.6 (1)	

试验方案表具体给出了 4 个组合处理方案，即第 1 号试验条件为导向管直径 190mm，导向管长度 3 020 mm，管开孔率 0.6%；第 2 号试验条件为导向管直径 190mm，导向管长度 3 500 mm，管开孔率 0.9%……试验方案确定后，要严格按照试验号后面规定的试验条件进行试验，试验后将试验结果填在试验指标栏内。须指出两点：①试验号是某种试验条件的代号，而不是试验顺序。所以可以按照号码顺序进行试验，也可以打乱这个顺序，随机地进行试验。为了减少外界条件所引起的误差，应尽可能将试验顺序随机化。②试验号的数目与试验次数是 2 个概念。在无重复试验的情况下，试验次数等于试验号数。在有重复试验的情况下，试验次数等于试验号数乘以重复次数。为了减少随机误差对试验指标的影响，一般将每号试验至少重复 1 次，用它们的均值作为指标值。

从这个试验方案里我们可看出按正交表安排试验有以下几个特点。

(1) 在任一列中每个因素的各个水平，在试验中出现的次数相同（本例各出现两次）。

(2) 在任意 2 列间, 同一横行的任意两因素的不同水平所有可能搭配组合都出现了, 且出现次数相等 (本例各出现一次)。

(3) 当因素  $A$  取  $A_1$  时:  $A_1B_1C_1$ ——试验点 1、 $A_1B_2C_2$ ——试验点 2,  $B$ 、 $C$  两因素的 2 个水平都出现了, 且各出现一次; 当因素  $A$  取  $A_2$  时:  $A_2B_1C_2$ ——试验点 3、 $A_2B_2C_1$ ——试验点 4,  $B$ 、 $C$  两因素的 2 个水平也都出现了, 且也各出现一次。这样来看  $A$  因素由  $A_1$  变化到  $A_2$  时, 其他因素  $B$  和  $C$  对指标的影响是相等的。因此比较这两组数的差异, 可以认为主要是由  $A$  因素的不同水平变化造成的。同样, 对因素  $B$  和  $C$  也有类似的情况。这就是所谓正交试验法的综合可比性。

(4) 这是一种 3 个二水平因素的试验, 全面试验有 8 种组合, 可用一立方体表示所做试验的范围。每个因素的水平都用立方体的相应平面表示。见图 1-1。左、右两平面表示  $A_1$ 、 $A_2$ , 上、下两平面表示  $B_2$ 、 $B_1$ , 前、后两平面表示  $C_1$ 、 $C_2$ , 各平面形成的 8 个顶点, 表示 8 个全面组合试验条件。按正交表来编排试验只需做 4 次, 这 4 个试验点的分布特点是每个面上都有 2 个对角点, 每个点在每个平面上都独立占有 2 个边。显然这 4 个点在立方体上是均衡分布的, 使每个试验点都有很强的代表性。正因为这种试验安排法有这些特点, 才能做到试验次数少, 而信息不少, 达到用部分组合试验条件的试验代表全面试验的效果。

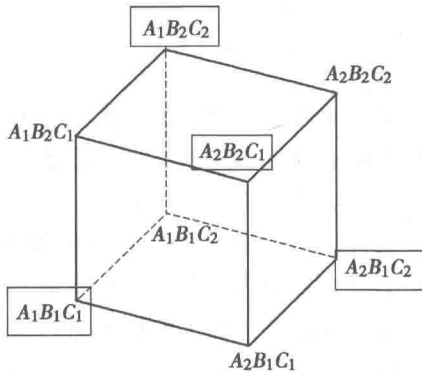


图 1-1 3 个二水平因素全面试验立方体

### 1.1.2.2 试验结果的极差分析

经过试验测得全部试验数据后, 如何科学地分析这些数据, 从中得出正确的结论, 这是正交设计法的另一重要内容。下面介绍一种综合比较的极差分析法, 也称直观分析法。

通过对试验结果的分析, 要解决 4 个问题。

- (1) 确定因素的主次, 即被考察的因素中各个因素对指标影响的大小情况。
- (2) 分清水平的优劣, 即各因素哪个水平对试验指标影响最大。
- (3) 初选较优生产条件 (或较优设计方案)。
- (4) 展望进一步试验方向并确定最优生产条件。

先分析各因素的不同水平对试验指标的影响。以  $A$  因素为例: 如果从 4 个试验结果数据中直接比较  $A_1$  和  $A_2$  的优劣是不行的, 因为这 4 个试验的组合条件中除  $A$  因素外,  $B$ 、 $C$  因素的水平组合没有相同的, 所以没有比较的基础。但把这 4 个试验数据适当组合相加后, 就可利用正交试验法所特有的综合可比性, 对  $A$  因素的 2 个水平对指标影响的大小进行比较。将 4 个试验数据分成两组,  $A$  因素一水平的两次试验为 I 组,  $A$  因素二水平的两次试验为 II 组。然后把每组的两次试验结果相加起来, 这时便会发现: 在 I 组的指标和中, 仅是  $A$  因素的  $A_1$  水平出现 2 次,  $B$ 、 $C$  两因素的各水平  $B_1$ 、 $B_2$  和  $C_1$ 、 $C_2$  均出现 1 次的影响; 在 II 组的指标和中, 仅是  $A$  因素的  $A_2$  水平出现两次,  $B$ 、 $C$  两因素各水平  $B_1$ 、 $B_2$  和  $C_1$ 、 $C_2$  均出现 1 次的影响。对于条件  $A_1$  下的 2 次试验和  $A_2$  条件下的两次试验, 虽然其他条件 ( $B$ 、 $C$ ) 在变动, 搭配情况并不相同, 但在  $B$ 、 $C$  两因素没有交互作用的条件下, 这种变动是“平等”的。因此, 如果每组把 2 次试验结果加起来, 即 (见表 1-4):

表 1-4 烘干机试验方案与结果分析

因素 试验号	$A$ 管直径 (mm) (1)	$B$ 管长度 (mm) (2)	$C$ 管开孔率 (%) (3)	试验指标 $y_i$ 耗电量 (kW·h)
1	1 (190)	1 (3 020)	1 (0.6)	4.15
2	1 (190)	2 (3 500)	2 (0.9)	3.70
3	2 (210)	1 (3 020)	2 (0.9)	3.20
4	2 (210)	2 (3 500)	1 (0.6)	3.50
$K_{j1}$	7.85	5.35	7.65	$\sum_{i=1}^4 y_i = 14.55$ 主次因素 $A$ 、 $C$ 、 $B$ 较优方案 $A_2 C_2 B_2$
$K_{j2}$	6.70	5.20	6.90	
$k_{j1}$	3.93	3.68	3.83	
$k_{j2}$	3.35	3.60	3.45	
$R_j$	0.58	0.08	0.38	

$$\text{第 I 组 } K_{A1} = y_1 + y_2 = 4.15 + 3.70 = 7.85$$

$$\text{第 II 组 } K_{A2} = y_3 + y_4 = 3.20 + 3.50 = 6.70$$

然后对两组进行比较,若  $A$  因素 2 个水平对应指标之和  $K_{A_1}$ 、 $K_{A_2}$  之间有差异,则说明此差异是  $A$  因素的不同水平对指标产生的影响。所以  $K_{A_1}$ 、 $K_{A_2}$  或它们的平均值  $k_{A_1} = \frac{K_{A_1}}{2}$ 、 $k_{A_2} = \frac{K_{A_2}}{2}$  的大小,反映了  $A$  因素的 2 个水平对指标的影响程度。由于  $K_{A_1} = 7.85 > K_{A_2} = 6.70$  或  $k_{A_1} = 3.93 > k_{A_2} = 3.35$ , 从题意整体上看,导向管长度、开孔率的条件都一样,只有直径不一样,因此平均耗电量的差异  $k_{A_1} - k_{A_2} = 3.93 - 3.35 = 0.58 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 说明了导向管直径 210mm 比 190mm 好,即  $A$  因素取二水平较为有利,它可以使耗电量下降  $0.58 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

上述分析方法也适用于其他因素,如果试验指标的数值越大(或越小)越好,则  $k_{j_1}$ 、 $k_{j_2} \dots$  中,数值最大者(或最小者)所对应的水平就是该因素的最优水平。本例分析确定  $B$ 、 $C$  因素的最优水平分别为  $B_2$ 、 $C_2$ 。其次分析因素的主次。一个因素对试验指标的影响大,则这个因素就是主要的,所谓影响大,就是说这个因素的水平变动引起试验指标的数值波动大。试验指标波动的大小可用因素极差的大小表示。极差,就是某因素的各水平对应指标和的平均值的最大者与最小者之差。某因素的极差大,则反映该因素的水平变动时,试验指标的波动幅度大,该因素对指标的影响大,因而显得重要。所以根据极差的大小,能确定因素的主次。本例中  $R_A = |k_{A_1} - k_{A_2}| = |3.93 - 3.35| = 0.58$ ,  $R_B = 0.08$ ,  $R_C = 0.38$ ,  $R_A > R_C > R_B$ 。于是因素的主次的排列顺序是:  $A$ 、 $C$ 、 $B$ 。

以上各项分析计算都可在正交表上进行。如表 1-4。具体地说,就是在正交表下面增加  $K_{j_1}$ 、 $K_{j_2}$ 、 $k_{j_1}$ 、 $k_{j_2}$  和  $R$  各行,按表分别计算出各列的  $K$ 、 $k$ 、 $R$  的值,便可分析得出结论,十分方便。

确定了因素主次和水平优劣之后,初选较优生产条件(或较优设计方案)就容易解决了。对于主要因素,应该选取最优水平。对于次要因素可选取较好水平,也可选取有利于节约成本或便于操作等方面考虑的适当水平。本例初选较优设计方案为  $A_2C_2B_2$ 。由于因素  $B$  的  $R_B$  相当小,说明  $B$  因素的水平变动对指标值的影响很小,考虑到缩短长度有利于节约成本,也可以选取  $B_1$ ,将  $A_2C_2B_1$  作为较优设计方案。实际上这就是第 3 号试验条件,  $y_3 = 3.20 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 确实是个较好的设计方案。在实践中常常把预测的较优设计方案  $A_2B_2C_2$  与试验中的较优设计方案  $A_2B_1C_2$  进行对比试验,以校核所预测的较优设计方案是否可信,最后确定选用的较优设计方案。从数据分析初选的较优设计方案  $A_2B_2C_2$ , 并没有包括在已做的 4 个试验之内。可见,用正交试验设计法既可减少试验次数,又不会丢失信息。

从以上分析中初步看出,长度变化对试验指标影响不大,暂可固定为  $B_2$  水平,而导向管直径增大及开孔率增大,耗电量有明显降低的趋势。所以可在其较

优水平附近进一步试验。因素水平情况如表 1-5 所示。

表 1-5 因素水平

因素 水平	A 导向管直径 (mm)	B 导向管开孔率 (%)
1	200	0.8
2	230	1.1

通过选用  $L_4(2^3)$  表试验, 可能找到所展望的比  $A_2B_2C_2$  更好的设计方案。最后再经过校核试验确定出最优设计方案。

### 1.1.3 应用实例

**例 1-2** 某农药厂为提高一种农药收率而进行试验:

(1) 明确试验目的, 确定试验指标: 该例试验目的是为了提提高农药的收率。所以试验指标是收率 (%)。

(2) 选因素、定水平: 根据农药厂生产这种农药的实际经验, 影响农药收率的因素有 4 个, 每个因素都选 2 个水平, 其因素水平如表 1-6。

表 1-6 因素水平

因素 水平	A 反应温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	B 反应时间 (h)	C 配比 (某两种原料之比)	D 真空度 (10Pa)
1	60	2.5	1.1/1	500
2	80	3.5	1.2/1	600

(3) 选择合适的正交表: 该例选定 4 个二水平因素, 假设不考虑交互作用, 可选用  $L_8(2^7)$  正交表。

(4) 确定试验方案表: 先作表头设计, 在  $L_8(2^7)$  表头的第 1、2、4、7 列上, 分别写上因素 A、B、C、D, 见表 1-7。这样设计表头的原因将在下节说明。再将表  $L_8(2^7)$  的各因素列中的字码“1”和“2”换成对应因素的一水平、二水平, 便得到表 1-7 的试验方案表。

(5) 按随机化顺序进行试验: 测得试验结果。

(6) 分析试验数据, 选较优生产条件: 计算分析见表 1-7 中下部分。

表 1-7 试验方案与结果计算分析

列 试验号	号	1 (A)	2 (B)	3	4 (C)	5	6	7 (D)	试验指标 $y_i$	简化数据
										$y'_i = y - 91$
1		1 (60°)	1 (2.5)	1	1 (1.1/1)	1	1	1 (500)	86	-5
2		1	1	1	2 (1.2/1)	2	2	2 (600)	95	4
3		1	2 (3.5)	2	1	1	2	2	91	0
4		1	2	2	2	2	1	1	94	3
5		2 (80°)	1	2	1	2	1	2	91	0
6		2	1	2	2	1	2	1	96	5
7		2	2	1	1	2	2	1	83	-8
8		2	2	1	2	1	1	2	88	-3
$k_{j1}$		0.5	1.0	-3.0	-3.25	-0.75	-1.25	-1.25	$\sum y'_i = -4$ 较优生产条件为 $C_2B_1A_1D_2$	
$k_{j2}$		-1.5	-2.0	2.0	2.25	-0.25	0.25	0.25		
$R_j$		2.0	3.0	5.0	5.5	0.5	1.5	1.5		

表 1-7 对试验指标值进行了简化，使得计算简便，又不影响分析结果。根据各因素的极差大小： $R_C > R_B > R_A > R_D$ ，确定因素的主次排列顺序为 C、B、A、D。由于试验指标收率为越大越好，所以取  $k_{j1}$  和  $k_{j2}$  中较大值的相应水平为各因素的最优水平。综合初选较优生产条件为  $C_2B_1A_1D_2$ 。

关于空白列的问题，在例 1-2 进行表头设计时，3、5、6 列没有安排因素。一般将没有安排因素的列称为空白列。空白列不涉及因素的水平改变问题，其极差应该为 0，但实际上有的空白列极差不等于 0，如  $R_3 = 5$ 。怎样分析这种现象呢？①如果  $R_{空}$  值较小（本例  $R_6 = 1.5$ ），可将  $R_{空}$  大致作为试验误差界限，用来判断各试验因素是否对指标有影响。如果某试验因素的极差大于  $R_{空}$ ，说明该因素对试验指标有影响，如果该因素的极差小于或等于  $R_{空}$ ，说明该因素对试验指标无影响，其极差是由于试验误差所引起。②如果  $R_{空}$  值较大，必须考虑还有不可忽略的原因对试验指标有较大的影响，重新分析较优生产条件。本例中  $R_3$  比  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_D$  都大，如何进一步分析详见下节。

## 1.2 有交互作用的正交试验设计

### 1.2.1 交互作用的概念

一般在实际试验中，不仅各个因素单独起作用，而且因素之间会互相促进或互相制约来影响某一指标，这种联合作用叫作交互作用。