

# 电 视 讲 座

# 正 交 试 验 法

北京大学数学系试验设计组 编

科学普及出版社

## 内 容 提 要

生产和科研都要做大量的多因素试验。正交试验法就是从多因素试验中选择最优或较优方案的一种有效方法；而且它将在为实现四个现代化服务的过程中，越来越显示其重要作用。为了使正交试验法得到更好的推广和利用，将其摄制成电视片，并在中央电视台电视讲座中播放。本书就是配合这个电视讲座的基本教材，可供广大的工农兵、干部、技术人员和知识青年学习参考。

## 电 视 讲 座

### 正 交 试 验 法

北京大学数学系试验设计组 编

•

科学普及出版社 出版（北京西郊友谊宾馆）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂排版

海淀草桥印刷厂印刷

•

开本：787×1092毫米<sup>1</sup>/<sub>16</sub>印张：24字数：61千字

1979年3月第一版 1982年11月第三次印刷

印数：135,001—205,000 定价：0.24元

统一书号：13051·1006 本社书号：0006

## 前 言

在生产和科研项目中，为了改革工艺或试制新产品，经常要做许多多因素试验。如何安排多因素试验，是一个很值得研究的问题。试验安排得好，既可减少试验次数、缩短时间和避免盲目性，又能迅速得到有效的结果；试验安排得不好，试验次数既多，结果还不一定满意。“正交试验法”是研究与处理多因素试验的一种科学方法，它在实际经验与理论认识的基础上，利用一种现成的规格化的表——“正交表”，科学地挑选试验条件，合理安排试验。这个方法的优点是：能在很多的试验条件中，选出代表性强的少数次条件，并能通过少数次的试验，找到较好的生产条件，即最优或较优的方案。

正交试验法在国外已得到广泛的应用。例如，在日本，正交试验法的应用已达到家喻户晓的程度，并在经济发展中起了重大的作用。在我国，正交法理论工作有了进展，应用效率有了提高，也取得不少可喜的成果。但是应用的规模，比之国外还有不小差距。为了使正交试验法更好地为实现四个现代化服务，必须进一步大力普及和推广这种有效的科学实验手段。

中央电视台决定摄制《正交试验法》电视片，并在电视讲座中播放。本书就是配合这个电视讲座的基本教材。通过电视广播和学习，读者和听者有什么意见，希望告诉我们。

编 者

1973年11月

# 目 录

## 前言

### 第一节 关于正交表..... 1

§ 1-1  $L_8(2^7)$ 和 $L_4(2^3)$ ..... 1

§ 1-2  $L_9(3^4)$ ..... 1

§ 1-3  $L_{12}(6^1 \times 3^2)$ 和 $L_8(4^1 \times 2^4)$ ..... 2

### 第二节 几个实例 ..... 3

§ 2-1 2, 4-二硝基苯肼的工艺改革..... 3

一、制定因素位级表..... 3

二、确定试验方案..... 4

三、试验结果的分析..... 5

四、直接看和算一算的关系..... 7

五、第二批撒小网..... 7

§ 2-2 晶体退火工艺的改进 ..... 9

一、确定试验方案, 分析试验结果..... 9

二、画趋势图..... 11

三、可能好配合..... 11

四、第二批撒小网..... 12

五、正交法效率高的原因..... 13

§ 2-3  $V_0$ 二步发酵的配方试验 ..... 13

一、确定试验方案, 分析试验结果..... 13

二、展望配方..... 16

三、正交表 $L_{18}(6^1 \times 3^2)$ 的特点 ..... 16

§ 2-4 污水云锌去镉的试验 ..... 16

一、确定试验方案..... 17

二、试验结果的分析, 综合评分..... 17

§ 2-5 五张常用正交表的比较 ..... 19

一、同位级的还是混合位级的..... 19

二、基本上三位级的还是基本上二位级的..... 19

### 第三节 小结 ..... 20

§ 3-1 一般步骤 ..... 20

§ 3-2 关于挑因素 ..... 20

§ 3-3 选择合用的正交表及其它 ..... 21

§ 3-4 均衡分散性和整齐可比性 ..... 22

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 第四节 灵活运用 .....                                                                                                             | 23 |
| § 4-1 活动位级简介 .....                                                                                                         | 23 |
| § 4-2 活动位级在试制双异质结激光器中的应用 .....                                                                                             | 25 |
| § 4-3 位级个数的调整(拟位级和后备位级) .....                                                                                              | 28 |
| § 4-4 复合因素 .....                                                                                                           | 29 |
| 附 常用正交表 .....                                                                                                              | 30 |
| 一、 $L_4(2^3)$ .....                                                                                                        | 30 |
| 二、 $L_8(2^7)$ .....                                                                                                        | 30 |
| 三、 $L_{16}(2^{15})$ .....                                                                                                  | 30 |
| 四、 $L_{32}(2^{31})$ .....                                                                                                  | 31 |
| 五、 $L_{12}(2^{11})$ .....                                                                                                  | 32 |
| 六、 $L_9(3^4)$ .....                                                                                                        | 32 |
| 七、 $L_{27}(3^{13})$ .....                                                                                                  | 32 |
| 八、 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$ .....                                                                                          | 33 |
| 九、 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ .....                                                                                          | 33 |
| 十、 $L_8(4^1 \times 2^4)$ .....                                                                                             | 33 |
| 十一、 $L_{16}(4^6)$ .....                                                                                                    | 33 |
| 十二、 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$ .....                                                                                         | 34 |
| 十三、 $L_{16}(4^3 \times 2^6)$ .....                                                                                         | 34 |
| 十四、 $L_{16}(4^2 \times 2^9)$ .....                                                                                         | 34 |
| 十五、 $L_{16}(4^1 \times 2^{12})$ .....                                                                                      | 34 |
| 十六、 $L_{32}(4^9 \times 2^4)$ .....                                                                                         | 35 |
| 十七、关于 $L_{32}(4^1 \times 2^{26})$ , $L_{32}(4^2 \times 2^{25})$ , ..., $L_{32}(4^8 \times 2^7)$ .....                      | 35 |
| 十八、 $L_{25}(5^5)$ .....                                                                                                    | 36 |
| 十九、 $L_{12}(3^1 \times 2^4)$ .....                                                                                         | 36 |
| 二十、 $L_{12}(6^1 \times 2^2)$ .....                                                                                         | 36 |
| 二十一、 $L_{24}(3^1 \times 2^{16})$ .....                                                                                     | 37 |
| 二十二、关于 $L_{24}(3^1 \times 4^1 \times 2^{13})$ , $L_{24}(6^1 \times 2^{14})$ , $L_{24}(6^1 \times 4^1 \times 2^{11})$ ..... | 37 |
| 二十三、 $L_{20}(5^1 \times 2^8)$ .....                                                                                        | 38 |
| 二十四、 $L_{18}(8^1 \times 2^8)$ .....                                                                                        | 38 |

# 第一节 关于正交表

正交表是已经制作好的规格化的表，是正交试验法的基本工具。现在，我们先来认识一下正交表。

## § 1-1 $L_8(2^7)$ 和 $L_4(2^3)$

| $L_4(2^3)$ |   |   |   | $L_8(2^7)$ |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|---|---|---|------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 列号<br>试验号  | 1 | 2 | 3 | 列号<br>试验号  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1          | 1 | 1 | 1 | 1          | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 2          | 2 | 1 | 2 | 2          | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 3          | 1 | 2 | 2 | 3          | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 4          | 2 | 2 | 1 | 4          | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 |
|            |   |   |   | 5          | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
|            |   |   |   | 6          | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
|            |   |   |   | 7          | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
|            |   |   |   | 8          | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |

$L_8(2^7)$ 有8个横行和7个纵列，由字码“1”和“2”组成。它有两个特点：

(1) 每纵列恰有四个“1”和四个“2”；

(2) 任意两个纵列，其横方向形成的八个数字对中，恰好(1,1)、(1,2)、(2,1)和(2,2)各出现两次。这就是说对于任意两个纵列，字码“1”、“2”间的搭配是均衡的。

$L_4(2^3)$ 跟 $L_8(2^7)$ 类似，也全由字码“1”和“2”组成；不同的是，它只有4个横行，3个纵列——它是最小的正交表。然而，它也具有类似的特点：

(1) 每纵列恰有两个“1”，两个“2”；

(2) 任意两个纵列，其横方向形成的四个数字对中，(1,1)、(1,2)、(2,1)和(2,2)各出现一次，即它们的搭配也是均衡的。

## § 1-2 $L_9(3^4)$

该表有9个横行、4个纵列。由字码“1”、“2”和“3”组成。它也具有前两张表类似的特点：

(1) 每纵列“1”、“2”和“3”出现的次数相同，都是三次；

(2) 任意两个纵列，其横方向形成的

| $L_9(3^4)$ |  |   |   |   |   |
|------------|--|---|---|---|---|
| 列号         |  | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 试验号        |  |   |   |   |   |
| 1          |  | 1 | 1 | 3 | 2 |
| 2          |  | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 3          |  | 3 | 1 | 3 | 3 |
| 4          |  | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 5          |  | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 6          |  | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 7          |  | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 8          |  | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 9          |  | 3 | 3 | 3 | 1 |

九个数字对中, (1,1)、(1,2)、(1,3)、(2,1)、(2,2)、(2,3)、(3,1)、(3,2)和(3,3)出现的次数相同,都是一次,即任意两列的字码“1”、“2”和“3”间的搭配是均衡的。

### § 1-3 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 和 $L_8(4^1 \times 2^4)$

| $L_{18}(6^1 \times 3^6)$ |    |   |   |   |   |   |   |
|--------------------------|----|---|---|---|---|---|---|
| 试验号                      | 列号 |   |   |   |   |   |   |
|                          | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1                        | 1  | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 2                        | 1  | 2 | 1 | · | 1 | 2 | 1 |
| 3                        | 1  | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4                        | 2  | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 5                        | 2  | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| 6                        | 2  | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 7                        | 3  | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8                        | 3  | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 9                        | 3  | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 10                       | 4  | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 11                       | 4  | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 12                       | 4  | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 13                       | 5  | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| 14                       | 5  | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 15                       | 5  | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 16                       | 6  | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 17                       | 6  | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 18                       | 6  | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 |

| $L_8(4^1 \times 2^4)$ |    |   |   |   |   |
|-----------------------|----|---|---|---|---|
| 试验号                   | 列号 |   |   |   |   |
|                       | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1                     | 1  | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 2                     | 3  | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 3                     | 2  | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 4                     | 4  | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 5                     | 1  | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 6                     | 3  | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7                     | 2  | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8                     | 4  | 2 | 1 | 2 | 1 |

$L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 有18个横行, 7个纵列。第一纵列由字码“1”、“2”、“3”、“4”、“5”和“6”组成, 而其余六列均由字码“1”、“2”和“3”组成。它仍有类似的两个特点:

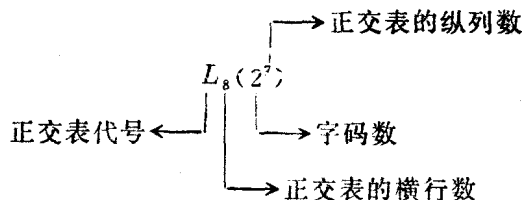
(1) 每个纵列中, 就各自的字码来说, 出现的次数是相同的;

(2) 任意两个纵列, 其横方向形成的十八个数字对中, 就各自的字码来说, 出现的次数亦相同, 即对任意两个纵列, 它们字

码间的搭配是均衡的。

至于 $L_8(4^1 \times 2^4)$ , 也仍有类似于上面的两个特点。

以上介绍的五张表, 是正交试验中最常用的几张表。它们都具有“搭配均衡”的特性, 这也就是正交表的“正交性”的含义。至于正交表记号所表示的意思如下图所示,



怎样利用正交表来安排与分析多因素试验呢? 在第二节中我们将用几个实例来详细说明。

## 第二节 几个实例

### § 2-1 2, 4-二硝基苯肼的工艺改革

**试验目的：**2, 4-二硝基苯肼是一种试剂产品。过去的工艺过程长、工作量大且产品经常不合格。北京化工厂改革了工艺，采用2, 4-二硝基氯代苯（以下简称氯代苯）与水合肼在乙醇作溶剂的条件下合成的新工艺。小试验已初步成功，但收率只有45%，希望用正交法找出好生产条件，达到提高生产的目的。

**考核指标：**产率（%）与外观（颜色）。

#### 一、制定因素位级表

影响试验结果的因素是多种多样的。通过分析矛盾，在集思广益的基础上，决定本试验需考察乙醇用量、水合肼用量、反应温度、反应时间、水合肼品种和搅拌速度六种因素。对于这六个要考察的因素，现分别按具体情况选出要考察、比较的条件——正交法中称之为位级。

因素A——乙醇用量

第一位级  $A_1 = 200$  毫升，第二位级  $A_2 = 0$  毫升（即不用乙醇）（挑选这个因素与相应的位级，是为了考察一下能否省下乙醇，砍掉中途加乙醇这道工序。）

因素B——水合肼用量

第一位级  $B_1 =$  理论量的2倍，第二位级  $B_2 =$  理论量的1.2倍。

（水合肼的用量应超过理论量，但应超过多少？心中无数。经过讨论，选了2倍和1.2倍两个位级来试一试。）

因素C——反应温度

第一位级  $C_1 =$  回流温度，第二位级  $C_2 = 60^\circ\text{C}$ （回流温度容易掌握，便于操作，但对反应是否有利呢？现另选一个  $60^\circ\text{C}$  跟它比较。）

因素D——反应时间

第一位级  $D_1 = 4$  小时，第二位级  $D_2 = 2$  小时。

因素E——水合肼纯度

第一位级  $E_1 =$  精品（浓度为50%），第二位级  $E_2 =$  粗品（浓度为20%）。

（考察这个因素是为了看看能否用粗品取代精品，以降低成本与保障原料的供应。）

因素F——搅拌速度

第一位级 = 中快速，第二位级 = 快速。

（考察本因素及反应时间D，是为了看看不同的操作方法对于产率和质量的影响。）

现把以上的讨论，综合成一张因素位级表：

| 因 素   | 乙醇用量A | 水合肼用量B   | 温 度 C | 时 间 D | 水合肼纯度E | 搅拌速度F |
|-------|-------|----------|-------|-------|--------|-------|
| 位 级 1 | 200毫升 | 理论量的2倍   | 回 流   | 4 小 时 | 精 品    | 中 快   |
| 位 级 2 | 0 毫升  | 理论量的1.2倍 | 60°C  | 2 小 时 | 粗 品    | 快 速   |

## 二、确定试验方案

表 $L_8(2^7)$ 最多能安排7个2位级的因素。本例有6个因素，可用该表来安排。具体过程如下：

1. 因素顺序上列：按照因素位级表中固定下来的六种因素的次序， $A$ （乙醇用量）、 $B$ （水合肼用量）、 $C$ （反应温度）、 $D$ （反应时间）、 $E$ （水合肼纯度）和 $F$ （搅拌速度），顺序地放到 $L_8(2^7)$ 前面的六个纵列上，每列上放一种。第7列没有放因素，那么，它在安排试验条件上不起作用，我们可抹掉它。

2. 位级对号入座：六种因素分别在各列上安置好以后，再来把相应的位级，按因素位级表所确定的关系，对号入座。具体来说：

第1列由 $A$ （乙醇用量）所占有，那么，在第1列的四个号码“1”的后面，都写上（200毫升），即因素位级表中因素 $A$ 的位级1所对应的具体用量 $A_1$ ；在第1列的四个号码“2”的后面都写上（0毫升），即 $A_2$ 。

第2列由 $B$ （水合肼用量）所占有，那么，在第2列的四个号码“1”的后面都写上（2倍），即因素 $B$ 的位级1对应的实际用量 $B_1$ =理论量的2倍；在第2列四个数码“2”的后面都写上（1.2倍），即因素 $B$ 的位级2对应的实际用量 $B_2$ =理论量的1.2倍。

第3、4、5和6列的填法也一样。这样就填得下面的表：

表 1

| 试验号 | 因素号 | 乙醇用量 $A$ | 水合肼用量 $B$ | 温度 $C$  | 时间 $D$ | 水合肼纯度 $E$ | 搅拌速度 $F$ |
|-----|-----|----------|-----------|---------|--------|-----------|----------|
|     |     | 1        | 2         | 3       | 4      | 5         | 6        |
| 1   |     | 1(200毫升) | 1(2倍)     | 1(回流)   | 2(2小时) | 2(粗品)     | 1(中快)    |
| 2   |     | 2(0毫升)   | 1(2)      | 2(60°C) | 2(2)   | 1(精品)     | 1(中快)    |
| 3   |     | 1(200)   | 2(1.2倍)   | 2(60)   | 2(2)   | 2(粗品)     | 2(快)     |
| 4   |     | 2(0)     | 2(1.2)    | 1(回流)   | 2(2)   | 1(精品)     | 2(快)     |
| 5   |     | 1(200)   | 1(2)      | 2(60)   | 1(4小时) | 1(精品)     | 2(快)     |
| 6   |     | 2(0)     | 1(2)      | 1(回流)   | 1(4)   | 2(粗品)     | 2(快)     |
| 7   |     | 1(200)   | 2(1.2)    | 1(回流)   | 1(4)   | 1(精品)     | 1(中快)    |
| 8   |     | 2(0)     | 2(1.2)    | 2(60)   | 1(4)   | 2(粗品)     | 1(中快)    |

3. 列出试验条件：表1是一张列好的试验方案表。表的每一横行代表要试验的一种条件。每种条件试验一次，该表共8个横行，因此要做8次试验。8次试验的具体条件如下：

第1号试验： $A_1B_1C_1D_2E_2F_1$ ，具体内容是

乙醇用量：200毫升；

水合肼用量：理论量的2倍；

反应温度：回流温度；

反应时间：2小时；

水合肼纯度：粗品；

搅拌速度：中快。

第3号试验： $A_1B_2C_2D_2E_2F_2$ ，具体内容是

乙醇用量：200毫升；

水合肼用量：理论量的1.2倍；

反应温度：60℃；

反应时间：2小时；

水合肼纯度：粗品；

搅拌速度：快速。

至于第2、4、5、6、7、8号试验的具体条件，读者可作为练习，自行排出。

到这里，完成了试验方案的制订工作。随后的任务是，按照方案中规定的每号条件严格操作，并记录下每号条件的试验结果。至于8个试验的顺序，并无硬性规定，看看怎么方便而定。对于没有参加正交表的因素，最好让它们保持良好固定状态；如果试验前已知其中某些因素的影响较小，也可以让它们停留在容易操作的自然状态。

### 三、试验结果的分析

本例的考察指标是产品的产率和颜色。八个试验的结果填在表1的右方，得表2。

表 2

| 试 验 计 划                |           |            |          |          |            |           | 试 验 结 果              |     |
|------------------------|-----------|------------|----------|----------|------------|-----------|----------------------|-----|
| 因 素<br>列 号<br>试 验 号    | 乙醇用量<br>A | 水合肼用量<br>B | 温 度<br>C | 时 间<br>D | 水合肼纯度<br>E | 搅拌速度<br>F | 产 率                  | 颜 色 |
|                        | 1         | 2          | 3        | 4        | 5          | 6         | (%)                  |     |
| 1                      | 1(200毫升)  | 1(2倍)      | 1(回流)    | 2(2小时)   | 2(粗品)      | 1(中快)     | 56                   | 合格  |
| 2                      | 2(0毫升)    | 1          | 2(60℃)   | 2        | 1(精品)      | 1         | 65                   | 紫色  |
| 3                      | 1         | 2(1.2倍)    | 2        | 2        | 2          | 2(快)      | 54                   | 合格  |
| 4                      | 2         | 2          | 1        | 2        | 1          | 2         | 43                   | 合格  |
| 5                      | 1         | 1          | 2        | 1(4小时)   | 1          | 2         | 63                   | 合格  |
| 6                      | 2         | 1          | 1        | 1        | 2          | 2         | 60                   | 合格  |
| 7                      | 1         | 2          | 1        | 1        | 1          | 1         | 42                   | 紫色  |
| 8                      | 2         | 2          | 2        | 1        | 2          | 1         | 42                   | 合格  |
| I = 位级1四次<br>产率之和      | 215       | 244        | 201      | 207      | 213        | 205       | I + II = 425<br>= 总和 |     |
| II = 位级2四次<br>产率之和     | 210       | 181        | 224      | 218      | 212        | 220       |                      |     |
| 极差 R = I、II<br>中,大数-小数 | 5         | 63         | 23       | 11       | 1          | 15        |                      |     |

怎样充分利用这八个试验的结果呢？

1. 直接看，可靠又冒尖

直接比较八个试验的产率，容易看出：

第2号试验的产率为65%，最高；其次是第5号试验，为63%。这些好效果，是通过

试验的实践直接得到的，比较可靠。

对于另一项指标——外观，第2号和第7号是紫色，颜色不合格；而第2号的产率还是最高。为弄清出现紫色的原因，对这两号条件又各重复做一次试验。结果是，产率依旧，奇怪的是，其颜色却得到桔黄色的合格品。这表明，对于产率，试验是比较准确的；对于颜色，还有重要因素没有列入要考察的因素，而又没有固定在某个状态。工人师傅对这两号试验的前后两种情况进行具体分析后推测，影响颜色的重要因素可能是加料速度，决定在下批试验中进一步考察。

## 2. 算一算，重要又简单

对于正交试验的数量结果，通过简单的计算，往往能由此找出更好的条件，也能粗略地估计一下哪些因素比较重要，以及各因素的好位级在什么地方。怎么算呢？

在表2每一列的下方，分别列出了I、II与极差R，它们的算法如下：

如第1列的因素是乙醇用量A。它的 $I = 215$ ，是由这一列四个位级1 ( $A_1$ )的产率加在一起得出的。第1列的数码“1”所相应的试验号是第1、3、5和7号，所以

$$(\text{产率和数}) I = ① + ③ + ⑤ + ⑦ = 56 + 54 + 63 + 42 = 215.$$

同样， $II = 210$ ，是由第1列中四个位级2 ( $A_2$ )的产率加在一起得出的，即

$$(\text{产率和数}) II = ② + ④ + ⑥ + ⑧ = 65 + 43 + 60 + 42 = 210.$$

其它五列的计算I、II的方法，跟第1列相同。

为了检查计算是否正确，对每列算得的I和II进行验证：

$$I + II = 425 (\text{即 } 8 \text{ 次试验产率的总合})?$$

倘若不等，要找出差错，把它改正。

至于各列的极差R，由各列I、II两数中，用大数减去小数即得。如：

$$\text{第1列乙醇用量的 } R = 215 - 210 = 5,$$

$$\text{第2列水合肼用量的 } R = 244 - 181 = 63.$$

怎样看待这些计算所得的结果呢？

首先，对于各列，比较其产率和数I和II的大小。如I比II大，则占有该列的因素的位级1，在产率上通常比位级2好；如II比I大，则占有该列的因素的位级2比位级1好。比如第4列的 $II = 218$ ，它比 $I = 207$ 大，这大致表明了时间因素以2位级为好，即反应时间2小时优于4小时。

极差R的大小用来衡量试验中相应因素作用的大小。极差大的因素，意味着它的两个位级对于产率所造成的差别比较大，通常是重要因素。而极差小的因素往往是不重要的因素。在本例中，第2列（水合肼用量B所占有）的 $R = 63$ ，比其它各列的极差大。它表明对产率来说，水合肼用量是重要因素，理论量的2倍比1.2倍明显地提高产率。要想再提高产率，可对水合肼用量详加考察，决定在第二批试验中进行。第3、6和4列的R分别是23、15和11，相对来说居中，表明反应温度、搅拌速度和反应时间是二等重要的因素，生产中可采用它们的好位级。第1列的 $R = 5$ ，第5列的 $R = 1$ ，极差值都很小，说明两个位级的产率差不多，因而这两个因素是次要因素。本着减少工序、节约原料、降低成本和保障供应的要求，选用了不加乙醇（砍掉这道工序） $A_2$ 和用粗品水合肼 $E_1$ 这两个位级。对于次要因素，选用哪个位级都可以，应根据节约方便的原则来选用。

现在按照R的大小，把因素的大致主次顺序，以及选用的位级排在下面，帮助大家看

得更清楚。

因素从主到次

| 水合肼用量   | 反应温度  | 搅拌速度  | 反应时间  | 乙醇用量  | 水合肼纯度 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $B_1$   | $C_2$ | $F_2$ | $D_2$ | $A_2$ | $E_2$ |
| 理论量 2 倍 | 60℃   | 快速    | 2 小时  | 0 毫升  | 粗品    |
| (不用)    |       |       |       |       |       |

#### 四、直接看和算一算的关系

怎样看待“直接看”与“算一算”的好条件呢？在本例中，正交试验向我们提供了“直接看”的好条件  $A_2B_1C_2D_2E_1F_1$  与“算一算”的好条件  $A_2B_1C_2D_2E_2F_2$ 。本例有六个两位级的因素，可产生  $2^6=64$  个试验条件，由正交表选出的八个条件是其中的一部分。然而，藉正交表的正交性，这 8 个条件均衡地分散在这 64 个条件中，它们的代表性很强。所以“直接看”的好条件  $A_2B_1C_2D_2E_1F_1$  的产率 65%，在全体 64 个条件中会是相当高的。大量实践表明，这种好结果，在生产上常能起到很大的作用。

但 8 个条件毕竟只占全体的八分之一，即使不改进位级，也还有继续提高的可能。

“算一算”的目的，就是为了展望一下更好的条件。对于大多数项目，“算一算”的好条件（当它不在已做过的 8 个条件中时），将会超过“直接看”的好条件。不过，对于少部分项目，“算一算”的好条件却比不上“直接看”的。由此可见，“算一算”的好条件（本例中为  $A_2B_1C_2D_2E_2F_2$ ），还只是一种可能好配合。

如果生产上急需，通常应优先补充试验“算一算”的好条件。经过验证，如果效果真有提高，就可将它交付生产上使用。倘若验证后的效果比不上“直接看”的好条件，就说明该试验的现象比较复杂。还有一种情况是，由于试验的时间较长，等不到验证试验的结果。对于这两种情况，生产上可先使用“直接看”的好条件，也可结合具体情况作些修改；而与此同时，另行安排试验，寻找更好的条件。

#### 五、第二批撒小网

在第一批试验的基础上，为弄清影响颜色的原因及进一步如何提高产率，决定再撒个小网。做第二批正交试验。

##### 1. 挑因素、选位级，制定因素位级表

根据上批试验的情况，以“算一算”的好条件为主，参考“直接看”的好条件以及对影响颜色的因素的分析猜测，决定挑出下面三个要考察的因素及相应的位级，安排第二批正交表，撒个小网。

因素 A —— 粗品水合肼的用量

第 1 位级  $A_1$  = 理论量的 1.7 倍，第 2 位级  $A_2$  = 理论量的 2.3 倍。

水合肼是上批试验中最重要的因素，应该详细考察。现决定在原好用量 2 倍的周围，再取 1.7 倍与 2.3 倍两个新用量继续试验。至于水合肼的品种，由上批试验的“算一算”，知道它的极差很小，这表明粗品和精品的差别很小；又由上批的“直接看”知道，用粗品的第 6 号试验效果是相当好的。且精品又贵又少，所以这批试验都用粗品。即水合肼纯度这个因素在这批试验中不再考察，而保持在良好的固定状态——粗品。

因素 B —— 反应时间

第 1 位级  $B_1$  = 2 小时，第 2 位级  $B_2$  = 4 小时。

因为其它因素与位级有了变化，又由于第一线同志对2小时很有兴趣，为慎重起见，再比较一次2小时和4小时这两个位级。

因素C——加料速度

$C_1 = \text{快}, C_2 = \text{慢}$

在追查出现紫色原因的验证试验后，猜想加料速度可能是影响颜色的重要原因，因此在这批试验中要重点地考察这个猜想。

综合以上，得因素位级表：

| 因 素   | 水 合 肼 用 量 | 时 间  | 加 料 速 度 |
|-------|-----------|------|---------|
| 位 级 1 | 1.7倍      | 2 小时 | 快       |
| 位 级 2 | 2.3倍      | 4 小时 | 慢       |

至于上批试验的其它因素，为了节约与方便，这一批决定砍掉中途“加乙醇”这道工序，用“快速搅拌”，“反应温度60℃”，虽然比回流好，但60℃难于控制，决定用60~70℃之间。另外，由于第一批试验效果很好，在第二批试验中，打算除去“精制主料氯代苯”这道危险工序，而一律采用工业氯代苯。

2. 利用正交表确定试验方案

$L_4(2^3)$ 是两位级的表，最多能安排3个两位级的因素，本批试验用它来安排是很合适的。

至于填表及确定试验方案的过程，即所谓“因素顺序上列”、“位级对号入座”及列出试验条件的过程已经介绍过，不再细述。现将试验计划与试验结果列于表3。

表 3

| 试 验 计 划              |         |                           |        |      | 试 验 结 果          |     |
|----------------------|---------|---------------------------|--------|------|------------------|-----|
| 试 验 号                | 因 素 列 号 | 水合肼用量 A    时间 B    加料速度 C |        |      | 产 率              | 颜 色 |
|                      |         | 1                         | 2      | 3    | (%)              | 色   |
| 1                    |         | 1(1.7倍)                   | 1(2小时) | 1(快) | 62               | 不合格 |
| 2                    |         | 2(2.3倍)                   | 1      | 2(慢) | 86               | 合 格 |
| 3                    |         | 1                         | 2(4小时) | 2    | 70               | 合 格 |
| 4                    |         | 2                         | 2      | 1    | 70               | 不合格 |
| Ⅰ = 位级 1 二次产率之和      |         | 132                       | 148    | 132  | Ⅰ + Ⅱ = 288 = 总和 |     |
| Ⅱ = 位级 2 二次产率之和      |         | 156                       | 140    | 156  |                  |     |
| 极差 R = Ⅰ、Ⅱ 中,大数 - 小数 |         | 24                        | 8      | 24   |                  |     |

3. 试验结果的分析

关于颜色，“快速加料”的第1、4号试验都出现紫色不合格品，而“慢速加料”的

第2、3号试验都出现桔黄色的合格品。另外两个因素的各个位级，紫色和桔黄色各出现一次，这说明它们对于颜色不起决定性的影响。由此看出，加料速度是影响颜色的重要因素，应该慢速加料。

关于产率：

直接看：第②号的86%最高（比第一批的好产率65%又提高了不少），试验条件是：水合肼用量为理论量的2.3倍；

反应时间为2小时；

慢速加料。

算一算

因素从主到次

|     | 水合肼用量 | 加料速度 | 时间  |
|-----|-------|------|-----|
| 好位级 | 2.3倍  | 慢    | 2小时 |

“算一算”的好条件和“直接看”的好条件一致。

最后顺便提一下投产效果。通过正交试验法，决定用下列工艺投产：用工业2,4-二硝基氯代苯与粗品水合肼在乙醇溶剂中合成；水合肼用量为理论量的2.3倍，反应时间为2小时，温度掌握在60~70°C之间，采用慢速加料与快速搅拌。效果是：平均产率超过80%，从未出现紫色外形，质量达到出口标准。总之，这是一个较优的方案，可以达到优质、高产、低消耗的目的。

## §2-2 晶体退火工艺的改进

**试验目的** 检查癌细胞，用到一种碘化钠晶体 $\phi 40$ ，要求应力越小越好，希望不超过2度。退火工艺是影响质量的一个重要环节。国营261厂经过30多炉试验，其它指标都已合格，只是应力未能低于7度。现在通过正交试验，希望能找到降低应力的工艺条件。

**考核指标：**应力（度）

### 一、确定试验方案，分析试验结果

#### 1. 挑因素、选位级，制定因素位级表

考察升温速度、恒温温度、恒温时间和降温速度共四个因素。每个因素取3个位级，因素位级表如下：

| 因 素   | 升温速度 A   | 恒温温度 B | 恒温时间 C | 降温速度 D  |
|-------|----------|--------|--------|---------|
| 位 级 1 | 30°C/小时  | 600°C  | 6 小时   | 1.5安培   |
| 位 级 2 | 50°C/小时  | 450°C  | 2 小时   | 1.7安培   |
| 位 级 3 | 100°C/小时 | 500°C  | 4 小时   | 15°C/小时 |

说明：关于升温速度A，除了原工艺的每小时50°C外，在它的周围看一个慢速升温“每小时30°C”和一个快速升温“每小时100°C”；关于恒温温度B，原工艺的恒温温度

600℃是从国外资料中借鉴的, 现在增添两个较低的温度500℃与450℃, 看看行不行? 关于恒温时间C, 原工艺为6小时, 现在看看缩短些是否更好? 关于降温速度D, 原工艺是通过1.5安培的电流降温, 现在加一个1.7安培的慢速降温。另外, 虽然过去的经验表明等速降温不好, 这次还是安排了一个每小时15℃的等速降温, 三个降温的位级, 都是下降到250℃后断电而自然降温。

2. 利用正交表, 确定试验方案 表 $L_9(3^4)$ 最多能安排四个三位级的因素, 本例有四个三位级的因素, 因此, 用 $L_9(3^4)$ 来安排试验, 正是恰到好处。

至于填表过程与试验条件的列出手续与上例同, 综合于表4中。

表 4

| 因<br>素<br>列<br>号                | 升温速度 A<br>(°C/小时) | 恒温温度 B<br>(°C) | 恒温时间 C<br>(小时) | 降温速度 D     | 应 力                           |
|---------------------------------|-------------------|----------------|----------------|------------|-------------------------------|
| 试<br>验<br>号                     | 1                 | 2              | 3              | 4          | (度)                           |
| 1                               | 1(30)             | 1(600)         | 3(4)           | 2(1.7安培)   | 6                             |
| 2                               | 2(50)             | 1              | 1(6)           | 1(1.5安培)   | 7                             |
| 3                               | 3(100)            | 1              | 2(2)           | 3(15°C/小时) | 15                            |
| 4                               | 1                 | 2(450)         | 2              | 1          | 8                             |
| 5                               | 2                 | 2              | 3              | 3          | 0.5                           |
| 6                               | 3                 | 2              | 1              | 2          | 7                             |
| 7                               | 1                 | 3(500)         | 1              | 3          | 1                             |
| 8                               | 2                 | 3              | 2              | 2          | 6                             |
| 9                               | 3                 | 3              | 3              | 1          | 15                            |
| I = 位级 1 三次应力之和                 | 15                | 28             | 15             | 28         | I + II + III<br>= 63.5度 = 总 和 |
| II = 位级 2 三次应力之和                | 13.5              | 15.5           | 29             | 19         |                               |
| III = 位级 3 三次应力之和               | 35                | 20             | 19.5           | 16.5       |                               |
| 极差 R = I、II、III 中,<br>最大数 - 最小数 | 21.5              | 12.5           | 14             | 11.5       |                               |

### 3. 试验结果的分析

每号条件做一炉试验, 应力结果记在表4相应条件的右边。

直接看 第5号试验 $A_2B_2C_3D_3$ 的0.5度最好, 第7号 $A_1B_3C_1D_3$ 的1度次之。这两号试验的具体条件是:

|     | 升温速度    | 恒温温度  | 恒温时间 | 降温速度    |
|-----|---------|-------|------|---------|
| 第5号 | 50°C/小时 | 450°C | 4小时  | 15°C/小时 |
| 第7号 | 30°C/小时 | 500°C | 6小时  | 15°C/小时 |

算一算

(1) 对于各因素列, 算出各个位级相应的三次应力之和。如第三列恒温时间:

1 = 位级 1 三次应力之和 = 第2、6、7号应力之和 = 7 + 7 + 1 = 15度;

Ⅱ = 第 3、4、8 号应力之和 =  $15 + 8 + 6 = 29$ 度;

Ⅲ = 第 1、5、9 号应力之和 =  $6 + 0.5 + 13 = 19.5$ 度。

同样, 算出另外三列的 I、Ⅱ和Ⅲ。为了避免做这些加法时发生差错, 对各列的 I、Ⅱ, Ⅲ, 用下列等式进行验证:

$$I + \text{Ⅱ} + \text{Ⅲ} = 63.5 \text{ (九次应力的总和) ?}$$

如不成立, 立刻找出差错, 改正过来。

对于每列, 比较各自 I、Ⅱ和Ⅲ的大小, 因为应力越小越好, 所以应力之和小的位级较好。第 1 列 (A 列) Ⅱ小, 故  $A_2$  较好; 第 2 列 (B 列) Ⅱ小, 故  $B_2$  较好; C 列 I 小, 故  $C_1$  较好; D 列 Ⅲ小, 故  $D_3$  较好。把这四个好位级结合在一起,  $A_2B_2C_1D_3$  称为全体配合 (本例有四个因素每个有三个位级, 因此全体配合有 81 个) 中关于应力的可能好配合。

(2) 计算各列的极差  $R$ 。

$R$  = 相应列的 I、Ⅱ、Ⅲ中的最大数 - 相应列的 I、Ⅱ、Ⅲ中的最小数。

如第 3 列恒温时间, 它的  $I = 15$ 、 $\text{Ⅱ} = 29$ 、 $\text{Ⅲ} = 19.5$ , 它们的最大数是 29, 最小数是 15。因此按公式

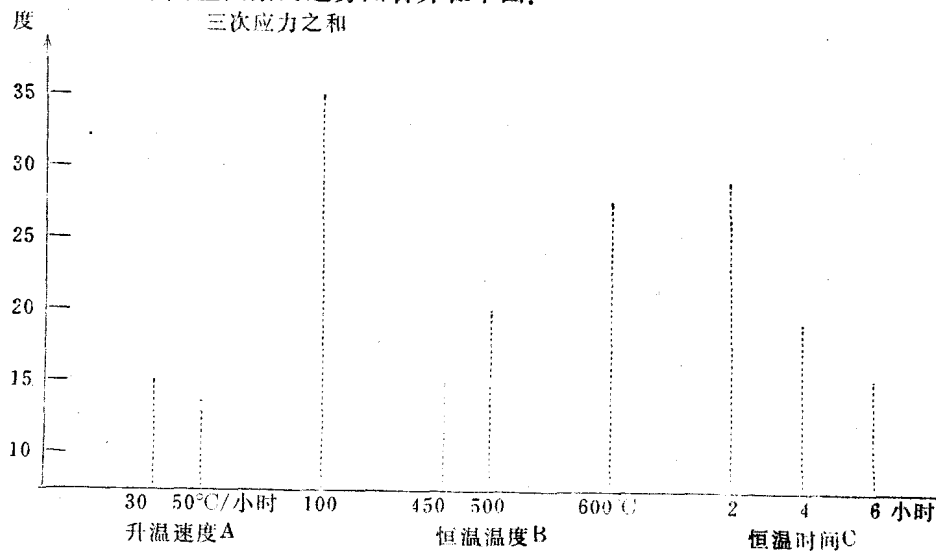
$$R = 29 - 15 = 14 \text{ 度。}$$

四个极差记在表 4 的最下一行。极差大的因素通常意味着该因素三个位级相应的应力差别大, 是重要因素; 极差小的因素是不重要的因素。

## 二、画趋势图

计算完极差后, 对于数量性位级的三位级因素, 应该画出用量与试验结果之和的关系图, 以便从图形上直接看出试验结果随各因素用量变化的大体关系。具体来说, 对于每个因素, 以实际用量 (而不是位级号码的大小) 作为横坐标, 试验结果之和作为纵坐标, 画出三个点, 得出该因素的趋势图。

本例中, 前三个定量因素的趋势图合并在下图:



## 三、可能好配合

1. 通过“算一算”得到  $A_2B_2C_1D_3$  为 81 个配合中的可能好配合。

## 2. 可能好位级与大范围的可能好配合

对于分两个位级的因素，能看出两个用量谁好谁差，但看不出继续提高效果的好用量的方向；对于分三个位级的因素，情况起了变化。请注意恒温温度 $B$ 的趋势图（见上图）。

恒温温度的三个高度逐步上升，一个合乎理想的猜测是，如温度继续下降，应力将还能降低。这意味着原来的三个位级都选高了，不仅国外资料中的 $600^{\circ}\text{C}$ 太高，就是最低的 $450^{\circ}\text{C}$ 也偏高了。下批试验中还应降低恒温温度，如能成功，则既省电，又缩短生产时间。因此，展望的好用量不停在 $B_2=450^{\circ}\text{C}$ ，而应取成 $B_4=400^{\circ}\text{C}$ 。

恒温时间的三个高度逐步下降。这也证实了过去“时间长应力低”的看法是正确的。但考虑到首批低应力已经降到 $0.5$ 度，更主要的是延长时间不利于节约电力和提高工效，因此展望的好用量取作 $C_3=4$ 小时。

发现有用量选偏的因素（在本例中是恒温温度 $B$ ），是认识上的重大收获。下批试验中把用量选准后，常能取得明显的进展。

升温速度的变化范围没有估偏，好位级是 $A_2=50^{\circ}\text{C}$ ；

降温温度的好位级是 $D_3=15^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。

最后，把展望的四个好位级结合到一起，得 $A_2B_4C_3D_3$ ，它称为大范围的可能好配合，或称为“算一算”的好条件。具体是：

|      |                                |
|------|--------------------------------|
| 升温速度 | $50^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ |
| 恒温温度 | $400^{\circ}\text{C}$          |
| 恒温时间 | 4 小时                           |
| 降温速度 | $15^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ |

注：过去的经验认为等速降温不好，这次为什么效果又很好呢？原因在于，过去用的恒温温度 $600^{\circ}\text{C}$ 太高，因而等速降温不高。如第3号试验，在恒温 $600^{\circ}\text{C}$ 的情况下，等速降温的应力还是最差。这次突破了国外资料记载，降低了恒温温度，等速降温又变成好办法了。由本例的讨论也清楚地看出，对于较复杂的情况，只有做多因素试验，才能找到产生好效果的条件。

## 四、第二批做小网

由恒温温度的趋势图看出，还有潜力。为进一步降低应力，决定再做第二批正交试验。

### 1. 制定因素位级表

关于升温温度，上批试验中，升温快的 $A_3=100^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，第3、6、9号试验应力都很坏，不能再用；速度慢的 $A_1=30^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，升温时间过长，不愿再用；所以在这批试验中，一律用 $50^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，不再试验其它速度。换句话说，在这批中，升温速度保持在良好的固定状态—— $50^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，而不再作为要考察的因素。另外三个因素，以算一算的好位级 $B_4$ 、 $C_3$ 、 $D_3$ 为主，即以大范围的可能好配合为主，参看“直接看”的好位级，各取两个位级。其因素位级表如下：

| 因 素   | 恒 温 温 度               | 恒 温 时 间 | 降 温 速 度                        |
|-------|-----------------------|---------|--------------------------------|
| 位 级 1 | $450^{\circ}\text{C}$ | 3 小时    | $15^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ |
| 位 级 2 | $400^{\circ}\text{C}$ | 5 小时    | $25^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ |

（降温速度的两个位级都是下降到 $250^{\circ}\text{C}$ 时停电，然后自然降温。）