

多因素试验正交选优法

俭 济 斌 编

科学出版社

1-1.73
415

多因素试验正交选优法

俭 济 斌 編

1975.5.15
1975.5.15

科 学 出 版 社

内 容 简 介

在生产斗争和科学实验中,为了提高质量、增加产量或降低成本,经常要做多因素试验。正交表方法是安排多因素试验条件的一种重要方法,对试验结果进行表格化的计算。内容简单,使用方便,通常用不多的试验次数就能找到当前技术、工艺前提下的好条件。大量事例说明,它能协助多快好省地完成试验,有时甚至起到突出的作用。

除了方法的基本内容以外,这本普及册子较多地谈到分批做试验的问题。另外,还讨论了选用表、农业品种试验、误差处理、多指标评分等问题。

读者对象:广大工农兵、干部和科技工作者。

多因素试验正交选优法

俭 济 斌 编

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1976 年 3 月第一次印刷 印张: 3

印数: 0001—45,200 字数: 62,000

统一书号: 13031·410

本社书号: 619·13—1

定价: 0.25 元

前 言

毛主席教导我们：“人的正确思想，只能从社会实践中来，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。”“放手发动群众，一切经过试验。”完成一项试验，可能涉及到器材设备、原料供应、控制技术、操作经验、理论认识、测试化验以及安全等主要环节。此外，还有一个节约试验次数、缩短时间以及提高试验效果的问题。围绕这一问题，有两个同数学方法有关的环节：（1）试验前安排方案，计划一下在哪些条件下做试验。要考察哪几种因素（如温度、压力、时间、速度、原料、配比等）？每次试验中，对这些因素挑选在什么位置做试验？（2）试验后对结果分析计算，取得正确的认识，决定下一步怎样行动。

为了改革旧工艺或者研制新产品，经常要做多因素试验。正交表方法是安排多因素试验的一种科学方法。它通过一种规格化的表，即正交表，来安排多因素试验的条件。由于通过它定出的试验条件在考察的范围内代表性强，所以能做到有计划、有步骤地开展试验。试验后，对结果进行表格化的计算，简单清楚，能较快地抓住主要因素，为进一步安排试验提供有份量的依据。通常，用很少的试验次数就能找到产生好结果的条件。应用时几乎不要求物质上的代价。可以在不增加人力、设备与投资的情况下，达到优质、高产、低消耗的目的，是挖掘潜力的一种有效方法。结合着设备的改造，将会取得更大的进展。

大量实践证明：利用正交表能多快好省地完成试验，对于一部分项目，甚至起到突出的作用。我们可以举几个例子说明这个问题。某厂为确定高温点焊胶配方，一年之内做了近 900 次试验，各项指标都没有过关。利用正交表，一个星期仅做 16 个试验，就找到了较好的配方，使这些指标超过或达到部定标准。武汉化工研究所电视组研制大屏幕电视机的油膜，经过两年，产率只有百分之三十几。试用正交表，三星期，经过三批 13 次试验，产率就达到 81.3%。无锡酶制剂厂为提高淀粉酶的活率，一九七三年前九个月作小型试验，进展不大。后来用正交表仅六天时间共作 16 次试验，就达到了一九七四年底要求的指标。无锡化工研究所研制三醋酸纤维素，经过近三年的摸索，克服了种种困难，进行了上百次反复试验，透明度仅达 14—15 厘米，没有达到国家标准规定的 20 厘米。用正交表在一星期内做 16 次试验，好条件的透明度达到 37 厘米，经生产证明，成效显著。北京第二制药厂五车间为提高长效磺胺精制成品的质量，过去用单因素轮换法作了一百几十次试验，达到出口标准的优品率仅为 22%。后来用正交表，先做 8 次小试验，再做 4 次生产试验，两批共 12 次，一九七四年七月的优品率提高到 97.8%。这些例子，都说明，在同一个单位、同样设备、同样材料和人员的情况下，没有用正交表以前，时间长、进度小，改用正交表后显著提高了效果。

有些项目，如激光、污水去汞、萤光粉等，不同的单位对同样的课题做了试验，采用正交表的单位明显地加快了进度和提高了效果。还有一批短期内赶超国外水平的项目，如南京电瓷厂的钢化玻璃绝缘子，北京制药工业研究所的痛可宁，北京医学院的 D-阿拉伯糖，北京化工三厂助剂研究所的抗氧剂 1076，北京化工厂的彩蓝萤光粉等。

正交表内容简单，容易为广大工农兵掌握运用。许多地区和单位反映，这种方法有利于发动群众，集中群众的智慧。例如，北京市第二轻工业局先后办过多次正交表学习班，绝大多数是初中或不到初中文化程度的工人师傅，经过两天或三天时间，回厂做出了不少

项目。无线电唱机厂家属连一位小学二年文化程度的老工人,参加学习班后,回到家属连做重锤煮蓝的试验,经过九次试验,取得了可喜的成果(参看§1例2)。北京第二制药厂,不到半年时间,多数生产工人学过这一方法,在生产上集体应用,效果显著。天津制药厂家属服务队利用正交表,在生产上见成效的项目已有“制服溴老虎”等八项。石家庄市办学习班后,时间不长,许多单位就作出了很多成果。类似上面的例子,还有不少,限于篇幅,不多介绍了。

正交表应用范围很宽,工业中如化工、轻工、纺织、铸造、机械、矿冶、电讯、印刷、建材等;支农工业如化肥、农药、农机等;农业,医药卫生,交通,城建,国防,计算,自然科学等行业中都有广泛的应用。实际上,就是没有用过的行业,只要找多因素的好条件,常有用到的机会。从理论上讲,已有足够的科学根据来说明这种方法为什么效率高。它具有均衡分散和整齐可比的特点(参看§5)。所谓“均衡分散”,指的是在多因素的范围中先撒一个稀网,侦察一下大致情况。再利用正交表内部结构的整齐性,看出有苗头的地区,然后在这些地区逐批加密试验,着重搜索。由于每批试验能充分利用前面试验提供的认识,所以能安排得合理有效(参看§4)。正交表是逐批撒网的得力工具,用少量的次数,就能找出当前技术、工艺前提下的好条件。

由于我们水平有限,经验不足,本书介绍的材料中肯定有许多不适当和不正确之处,恳切欢迎广大读者批评指正,共同推动这方面工作前进。

编 者

中国科学院数学研究所

目 录

甲、使用方法

§ 1. 试验的安排和计算	(1)
§ 2. 两位级	(7)
§ 3. 多位级、混合位级	(12)
§ 4. 试验的分批	(16)
§ 5. 小结	(20)
§ 6. 选用适当的表	(21)
§ 7. 许多品种的试验	(24)
§ 8. 正交表方法的意义和作用	(25)
§ 9. 误差和重复	(27)
§ 10. 其它	(28)

乙、常用正交表

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、 $L_{18}(6^1 \times 3^8)$	(33)
九、 $L_{15}(2^1 \times 3^7)$	(33)
十、 $L_8(4^1 \times 2^4)$	(33)
十一、 $L_{16}(4^5)$	(33)
十二、 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$	(34)
十三、 $L_{16}(4^1 \times 2^{12})$	(34)
十四、 $L_{16}(4^3 \times 2^6)$	(34)
十五、 $L_{16}(4^2 \times 2^9)$	(34)
十六、 $L_{32}(4^9 \times 2^4)$	(35)
十七、关于 $L_{32}(4^1 \times 2^{28})$, $L_{32}(4^2 \times 2^{25})$, ..., $L_{32}(4^8 \times 2^7)$	(35)
十八、 $L_{25}(5^9)$	(36)
十九、 $L_{12}(3^1 \times 2^4)$	(36)
二十、 $L_{12}(6^1 \times 2^2)$	(36)
二十一、 $L_{24}(3^1 \times 2^{18})$	(37)
二十二、关于 $L_{24}(3^1 \times 4^1 \times 2^{13})$, $L_{24}(6^1 \times 2^{15})$, $L_{24}(6^1 \times 4^1 \times 2^{12})$	(37)
二十三、 $L_{36}(2^3 \times 3^{10})$	(38)
二十四、关于 $L_{36}(4^1 \times 3^{10})$, $L_{36}(2^2 \times 6^1 \times 3^9)$, $L_{36}(2^1 \times 6^2 \times 3^5)$, $L_{36}(6^3 \times 3^3)$	(38)
二十五、 $L_{16}(8^1 \times 2^8)$	(39)

二十六、关于 $L_{24}(12^1 \times 2^{12})$	(39)
二十七、关于 $L_{32}(16^1 \times 2^{16})$	(39)
二十八、关于 $L_{27}(9^1 \times 3^9)$	(39)
二十九、关于 $L_{36}(12^1 \times 3^9)$ 和 $L_{36}(18^1 \times 2^2)$	(39)
丙、练习	(40)

甲、使用 方 法

§ 1. 试验的安排和计算

先看一个简单的例子。

例 1 缩短球磨的时间

南京陶瓷厂随着生产的发展,球磨设备不够用,釉料生产跟不上需要。厂党委组织了领导干部、老工人、技术人员三结合的试验组,为了缩短球磨时间,在釉料球磨机上用正交表做试验。

(一) 安排试验方案

(1) 确定因素。在球磨生产的有关因素中,考察投料量 A 、球石量 B 和水重 C 三种因素,通过试验不同的用量,来挑选合理的工艺条件。其它因素,如转速,由于不易改变,采用通常的固定转速。

(2) 选择三种因素的试验用量,制订因素和位级表。试验的规模小,每种因素只选试两种用量。因素的试验用量或试验对象(如原料品种、操作方式等)叫做位级(或水平),两个位级同两种用量的对应关系如下:

因 素	投 料 量 A	球 石 量 B	水 重 C
位 级 1	$A_1=0.6$ 吨	$B_1=3900$ 斤	$C_1=800$ 斤
位 级 2	$A_2=0.5$ 吨	$B_2=3700$ 斤	$C_2=900$ 斤

(这里不是说,要按照表中两个横行的条件做试验。)

(3) 选用正交表 $L_4(2^3)$ 。在部分乙的常用正交表中,第一表 $L_4(2^3)$ 有 3 个纵列和 4 个横行(即下表中括号前的数码部分)。三个纵列最多能排下三种因素。每列有两个数码“1”和两个“2”,分别代表位级 1 和位级 2。4 个横行是要试验的 4 种条件。

$L_4(2^3) \rightarrow$ 正交表试验号数(位级个数列数)。

本例是三种因素,各分两个位级,可以套用这张表。

(4) 确定试验条件。如下表所示,先把投料量、球石量、水重放到第 1、2、3 列,从前到后每列上放一种因素。再根据因素位级表,把每列的数码“1”和“2”分别换成这列因素的位级 1 和位级 2。例如第 1 列,因素是投料量,把第 1 列的数码“1”换成“0.6 吨”,把“2”换成“0.5”吨,等等。三种因素的试验用量写在下表中位级数码后面的括号内。

试验号	因素列号	投料量 A	球石量 B	水重 C	16小时后通过 200目的筛余
		1	2	3	
1		1 (0.6吨)	1 (3900斤)	1 (800斤)	0.040%
2		2 (0.5吨)	1 (3900斤)	2 (900斤)	0.033%
3		1 (0.6吨)	2 (3700斤)	2 (900斤)	0.011%
4		2 (0.5吨)	2 (3700斤)	1 (800斤)	0.030%

看四个横行,决定要试验的四种条件。如第3号试验的条件是:投料0.6吨,放球石3700斤,加水900斤,等。完成了排方案的环节。(这种步骤虽然简单,但很有用。当因素增多时,作用更大。)

(二) 试验结果

按照计划好的四种条件,在球磨机上各试验一次。考核的指标是球磨的细度。球磨16小时后,通过200目的筛子,看剩余的部分占多少。筛余越少越好,四次筛余记在上表条件的右边,以第3号条件的0.011%最好,满足了生产要求。同原来球磨需要36小时相比,现工效提高到 $\frac{36}{16}=2.25$ 倍。(假如不用正交表挑选条件,四次试验的进展通常不会这样大。)

以上是球磨试验的基本情况。为了详细讨论,下面补充一些次要的环节,初读时可以跳过不看。

在(一.2)中选择因素的试验用量之前,可以先估计一下合理用量所在的范围。本例三种因素合理配合的用量,根据经验和理论,分别在下列范围内:投料量 A 的合理值在0.4吨到0.7吨之间;球石量 B ,3500—4100斤;水重 C ,700—1000斤。用量范围的大小,一般可稍放宽,以不漏掉合理用量为原则。

两个用量取在范围内什么位置?对于多数情形,可以取在把范围三等分的两个数量上。本例的因素位级表就是这样取定的。哪个位级数码对应哪个用量,事先可任意规定。如本例的投料量,位级1是0.6吨,位级2是0.5吨。也可以反过来,把位级1取成0.5吨而把位级2取成0.6吨。无论取哪一种,一旦对应好并开始使用之后,就不许改变了。

三种因素,各分两个位级,配合完全,共有 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_1C_2$ 、 $A_1B_2C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_2B_1C_1$ 、 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_2$ 八种组合条件。(一.4)中用正交表,仅仅是从其中挑出四种条件 $A_1B_1C_1$ 、 $A_2B_1C_2$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_2B_2C_1$,作为代表先做试验。根据四次试验的情况,结合后面(三)中的计算,可以看出没有试验过的四种条件 $A_1B_1C_2$ 、 $A_2B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_2$ 中,有一部分条件的球磨效果不会很好。省下这部分试验,就减少了浪费。事实上,8个条件各试一次,浪费的次数并不算多。现在,主要是通过这个例子来说明正交表的用法和性质。当因素或位级的数目增多时,正交表的作用就很大了。

(三) 计算与展望

为了寻找更好的条件,以及安排好下一批试验,可进行下表中的计算。

试验号	因素	投料量 A(吨)	球石量 B(斤)	水重 C(斤)	筛余
	列号	1	2	3	(%)
1		1 (0.6)	1 (3900)	1 (800)	0.040
2		2 (0.5)	1	2 (900)	0.033
3		1	2 (3700)	2	0.011
4		2	2	1	0.030
I = 位级 1 两次筛余之和		0.051	0.073	0.070	I + II = 0.114 = 总和
II = 位级 2 两次筛余之和		0.063	0.041	0.044	
极差 R = I、II 中, 大数 - 小数		0.012	0.032	0.026	

(1) 算出每种因素各个位级的筛余之和。如投料量的位级 1 出现在第 1、3 号试验中, 筛余之和 $I = 0.040 + 0.011 = 0.051$; 位级 2 出现在第 2、4 号试验中, 筛余之和 $II = 0.033 + 0.030 = 0.063$ 。球石量的 I 是第 1、2 号筛余之和, II 是第 3、4 号筛余之和。对于水重, I 是 1、4 号之和, II 是 2、3 号之和。

为了避免 I、II 两行有计算差错, 对每列验证一下

$$I + II = 0.114\% = \text{四次筛余的总和}$$

是否成立。倘若不成立, 就找出差错, 改正过来。

比较 I、II 的大小, 筛余之和小的位级较好。由表中看出, 投料量是位级 1 的 0.6 吨较好, 球石量是 3700 斤较好, 水重是 900 斤较好。把三个好位级结合到一起, $A_1B_2C_2$ 称作 8 种组合中的可能好组合, 后面(四)中利用它来安排下一批试验。

(2) 极差 R 的计算。对于每列因素, 在 I、II 两数中, 用大数减去小数, 等于极差 R。若 $I = II$, 则 $R = 0$ 。投料量的 $I = 0.051$, $II = 0.063$, 则

$$\text{极差 } R = 0.063 - 0.051 = 0.012.$$

类似地算出

$$\text{球石量的 } R = 0.073 - 0.041 = 0.032,$$

$$\text{水重的 } R = 0.070 - 0.044 = 0.026.$$

比较三个极差的大小。极差大意味着两个位级造成的差别大, 是重要因素。极差小的因素是不重要的因素。本例中, 球石量是主要因素, 水重是次要因素, 投料量是第三因素。因素的主次只是一种相对的提法, 对于舍弃不重要的因素, 保留主要因素并着重考察, 有参考的意义。

(四) 下一批的计划

(1) 补做一次试验。如果生产上等着急用, 短期内安排不下多做试验; 这时, 可优先把首批 $L_4(2^3)$ 的可能好组合接着试验一次。

本例中, 可能好组合 $A_1B_2C_2$ 是首批 L_4 的第 3 号条件, 已做过试验, 筛余在四次中最好。它往往是 8 个组合中的最好组合, 值得重复试验一次。一方面, 核实好条件的球磨效果; 另一面, 通过重复看出试验误差的大小。

另一类项目, 如部分丙的练习(1), 可能好组合 $A_1B_2C_1$ 在首批 $L_4(2^3)$ 中不出现, 没有试验过。这时, 应优先补试这个条件。试验后, 若效果真有提高, 则它往往是 8 个组合中的最好组合, 可先交付生产使用。若试验后的效果比不上首批 L_4 的好条件, 那么, 这项现象比较复杂, 可能有新的提高潜力。一方面, 生产上先用 L_4 的好条件; 另一面, 为了不漏掉可能的提高, 做到心中有数, 有机会时还应改试其它的条件。

(2) 做五次试验,继续探索。为了加快试验进度,除了首批的可能好组合以外,同时以它为中心,用 L_4 表再安排四次条件。本例的可能好组合是: 球石量 $B_2=3700$ 斤, 水重 $C_2=800$ 斤, 投料量 $A_1=0.6$ 吨。围绕着它,制订新的因素位级表如下:

因 素	球石量 B (斤)	水 重 C (斤)	投料量 A (吨)
位 级 1	3800	750	0.65
位 级 2	3600	850	0.55

用 $L_4(2^3)$ 表定四次条件。加上首批的可能好组合,同时做五次试验。通常,会有进一步的提高。

(3) 应用前不再试验。象农业试验,上一年完成后,下一年推广应用之前安排不下第二批试验。遇到这类情形,可将首批的最好条件交付生产应用,同时作第二批试验。

(4) 当试验误差不清楚或者不很小时,可重复试验已知的较好条件,核实效果,了解误差。

再看一个三位级的例子。

例 2 改进重锤煮蓝的质量

北京无线电唱机厂的重锤煮蓝在家属连生产。过去,由于没有摸清规律,废品率很高。为了改进生产,一位小学两年文化的老工人和家属工一起,用正交表做试验。

(一) 安排方案

(1) 制订因素和位级表。考察苛性钠、亚硝酸钠、水和温度共四种因素。每种因素的三个用量如下:

因 素	苛性钠 A (两)	亚硝酸钠 B (两)	水 C (两)	温度 D (°C)
位级 1	1	2	8	140
位级 2	1.5	4	10	160
位级 3	2	5	6	180

(2) 用 $L_9(3^4)$ 表确定试验条件。第六表 $L_9(3^4)$ 有 4 个纵列和 9 个横行。4 列最多能考察 4 种因素。每列有三种数码“1”、“2”、“3”(各出现三次),分别代表三个位级。本例是四种因素,各分三个位级,可以套用这张表。把 4 种因素分别放到 4 列上,如下表所示。然后,按照因素位级表,把各列的位级数码换成因素的用量。这时,9 个横行就是要试验的 9 个条件。如第 6 号试验,是用苛性钠 2 两、亚硝酸钠 4 两与水 8 两的配方,以及用 160°C 的温度煮蓝。完成了排方案的环节。这环节手续简单,但很有用,配合着具体实验,往往能起很好的作用。对此应给予足够的重视,不要放过很容易到手的正交表效果。

试验号	因素列号	苛性钠 A (两)	亚硝酸钠 B (两)	水 C (两)	温度 D (°C)	质量评分
		1	2	3	4	
1		1 (1)	1 (2)	3 (6)	2 (160)	8
2		2 (1.5)	1	1 (8)	1 (140)	1
3		3 (2)	1	2 (10)	3 (180)	1
4		1	2 (4)	2	1	2
5		2	2	3	3	4
6		3	2	1	2	8
7		1	3 (5)	1	3	5
8		2	3	2	2	7
9		3	3	3	1	1
I = 位级 1 三次评分之和		15	10	14	4	I + II + III = 37 = 总和
II = 位级 2 三次评分之和		12	14	10	23	
III = 位级 3 三次评分之和		10	13	13	10	
极差 R = I、II、III 中，最大数 - 最小数		5	4	4	19	

(二) 试验结果

每种条件做一锅试验，每锅结果按煮蓝的质量评分，质量好的评分高。九锅的评分记在上表中条件的右边，其中以第 1 与第 6 号条件的得分最高，都是 8 分，配方分别为 1:2:6 两与 2:4:8 两，温度都是 160°C；煮蓝的质量全部是上等品。

(三) 计算与分析

(1) 算出每列因素各个位级的三次得分之和。如第 3 列的水，

I = 位级 1 三次评分之和

= 第 2、6、7 号评分之和 = 1 + 8 + 5 = 14 分，

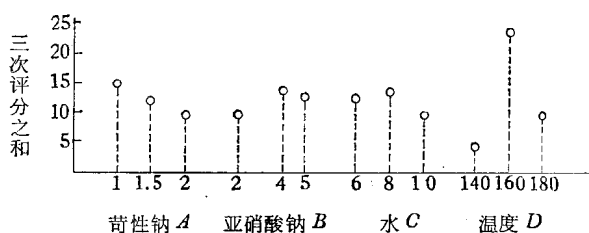
II = 第 3、4、8 号评分之和 = 1 + 2 + 7 = 10 分，

III = 第 1、5、9 号评分之和 = 8 + 4 + 1 = 13 分。

类似地算出另外三列的 I、II、III。为了避免做这些加法时发生差错，对每列验证一下

I + II + III = 37 = 九次评分的总和

是否成立。倘若不成立，立刻找出差错，改正过来。对于 3 个或 3 个以上的位级，一般应该画出各个用量与试验结果之和的关系图。位级的位置不要按照位级数码、而应按照实际的用量由小到大顺次排好，从图形上看看试验结果的变化趋势。本例中，四种因素的趋势图放在右边。



(2) 计算极差 R 。对每一列,从 I、II、III 中挑出最大数减最小数,等于极差 R 。如第 4 列温度: I = 4, II = 23, III = 10, 最大数是 23, 最小数是 4, 极差 $R = 23 - 4 = 19$ 分。四个极差记在表中最下一行。极差大意味着三个位级造成的差别大,是重要的因素;极差小是不重要的因素。

(3) 比较和观察。比较四个极差,以温度的 19 最大,前三列的 5、4、4 都很小。从这种线索出发,仔细观察趋势图,看出温度是最重要的因素,而配方三种成分的影响都不大。温度中,又以 $D_2 = 160^\circ\text{C}$ 最好,第 1、6、8 三号试验的质量都很好;三次高温 180°C , 质量下降很多;三次低温 140°C , 质量更差。这些,试验前并不认识,是正交表试验后的重要收获。

(四) 投产效果

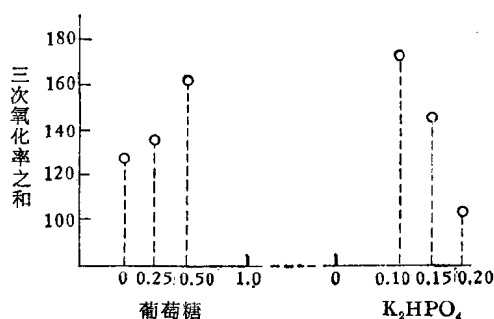
试验前,由于没有掌握规律,质量不稳定,废品率接近 80%。当出现废品时,经常在药品用量的多少上发生争论。有时候,也能煮一锅成品,但下几次重复不出来。每月本厂一万多件的任务需要 14 天左右的时间,经过这批试验,发现主要问题不在药量的多少上,而在于温度的掌握。应该用 160°C , 用 140°C 和 180°C 都不行。有了这种认识,把温度定为: 140°C 下锅,烧到 $160-170^\circ\text{C}$ 出锅,溶液用 2:4:6 两的习惯配方,再试验一次,结果很好。以后就用这个条件作为生产条件。长时期来,无论谁操作,不但颜色光泽都好,而且质量稳定、废品极少。本厂每月的任务,只要 3 天就能完成,成本大大降低。此外,还大胆承担了一些外厂交来的此类大零件的加工任务,受到了好评。

(五) 下一批的计划 (初读时可跳过不看)

四种因素,各分三个位级,配合完全,共有 $3^4 = 81$ 个组合条件。用 L_9 表是从其中挑出 9 个代表做试验。对每列因素,在评分之和 I、II、III 中,找出和数最高的位级。由表中看出,四种因素的位级,分别是 $A_1 = 1$ 两、 $B_2 = 4$ 两、 $C_1 = 8$ 两、 $D_2 = 160^\circ\text{C}$ 较好。把它们结合到一起, $A_1B_2C_1D_2$ 称作是 81 个组合中的可能好组合。这批煮蓝试验,由于找到了关键因素是温度,用 $D_2 = 160^\circ\text{C}$ 已经满足生产需要。就是说,仅仅做 9 个代表的试验,便解决了问题。没有利用可能好组合 $A_1B_2C_1D_2$ 来安排第二批试验。

但是,对于许多其它项目,做完 L_9 后,应该继续试验,寻找更好的条件。可从第 (四) 步的计算结果出发,观察每种因素 I、II、III 的趋势图,结合着实验现象的经验与知识,估计一下好条件的大致位置。

优先注意一件事,就是要检查一下每种因素的三个用量是否都偏到一边去了。有时候,如 §4 例 5 第二批 L_9 试验的葡萄糖 D 和 K_2HPO_4 C , 氧化率之和的趋势图如左下。



氧化率是越高越好,葡萄糖的三个高度逐步上升,极差 $R = 34$ 并不小。这意味着,当用量增加时,氧化率还能提高,也就是说,原来的三个用量都选低了。下批试验,若单纯为了氧化率,就不局限在三个位级中挑出较好的位级 $D_1 = 0.5\%$, 可把葡萄糖的新位级取在 $D_4 = 1.0\%$ 。 K_2HPO_4 的三个高度逐步下降, $R = 71$ 更大,意味着原来的三个位级都选高了。下批试验,不局限在三个位级中挑较好位级 $C_1 = 0.10\%$, 可把新位级取成 $C_4 = 0$ 或很低的用量。(实验工作者后来取消了 K_2HPO_4 , 即取

$C_4=0$, 实际效果很好。)发现首批中有用量选偏的因素,是认识上的重要收获。另外两种因素:脲素 B 的极差 93 最大,也是重要因素; CaCO_3 A 的极差 16 很小。它们的用量范围没有选偏,分别采用较好的位级 $B_1=1.2\%$ 和 $A_3=0.4\%$ 。把这些好位级结合在一起, $D_4C_4B_1A_3$ 称作是大范围的 可能好组合。围绕着它安排下一批试验,由于因素 C 、 D 中把不准的用量改成了好用量,常有显著程度的提高。

若首批 L_9 中,各种因素的用量范围都没有选偏,则仍然看重 81 个组合中的可能好组合。两种情况统一地称作“可能好组合”。

(1) 对可能好组合做一次试验。若可能好组合在首批 L_9 中出现,而且效果在 9 次中最好。那么,它在 81 个组合中的名次相当领先,值得重复试验一次。

通常(像煮蓝试验那样)可能好组合在首批 L_9 中不出现。遇到这种情形,由于它比首批 L_9 的好条件经常有改进的可能性,所以应该补试这个条件。试验后,若效果真有提高,可先交付生产采用。若效果比不上首批 L_9 的好条件,则淘汰不用,但意味着实验现象有些复杂。

(2) 五次试验,继续探索。通常,可在首批四种因素中,取消极差 R 最小的一种,保留考察三种重要的因素。具体用量则以可能好组合的用量为主,以首批好条件的用量为辅;围绕着这些用量,三种因素各取两个位级。用 $L_4(2^3)$ 定出四次条件,加上可能好组合,共做五次试验。通过第二批的撒网,取得进一步的提高,并看出提高的方向。

(3) 若生产上等着推广应用,时间紧,等不到把第二批试验做完,则先用首批的好条件。即令它经常比不上可能好组合,但后者未经实践证实,万一不行,推广的损失太大。在应用首批好条件的同时,试验有希望的新条件。

(4) 验证试验。对现有的好条件做重复试验,核实效果,了解误差。

(六) 附注

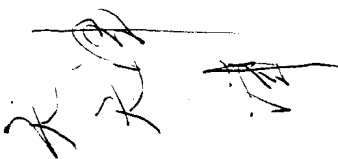
三种因素,各分三个位级,也可套用正交表 $L_9(3^4)$ 。这时,可把三种因素放到前三列,每列上放一种。第 4 列没有因素(在试验条件上不起作用),可以取消不用。除开这一条外,其它步骤和四种因素的用法基本上相同。

§ 2. 两 位 级

两位级的正交表适应于试验次数少或者允许多分批(参看 § 4)的项目。在多分批的试验中,特别当试验误差不大时,首批可先分两个位级,因后面批能改试新的位级,联合起来,还是多个位级。在后批试验中,由于充分利用前面试验取得的认识,所以位级能选得比较准。这种途径,特别能节省次数与提高效果。

不超过三种因素,可用正交表 $L_4(2^3)$ 。例 1 的球磨试验是用这张表的一例,已经讨论过。不超过七种因素,可用第二表 $L_8(2^7)$ 。[对于四种因素,以能用上第六表 $L_9(3^4)$ 为好。对于五种因素,以能用上第十表 $L_8(4^1 \times 2^4)$ 为好。] $L_8(2^7)$ 共有 7 列、8 行。每列有四个数码“1”和四个“2”,分别代表位级 1 和位级 2。7 列中挑出两列,拿一列的两个数码同另一列的两个数码配合齐全,共有四种位级对子(1,1)、(1,2)、(2,1)、(2,2)。重要的性质是:任意两列(共有 21 种挑法)中,四种位级对子各出现两次,这种性质叫做正交性。8 个横行代表着要试验的 8 次条件。

下面看一个做两批正交试验的实例。



例 3 改进 2.4-二硝基苯肼的工艺

2.4-二硝基苯肼是一种试剂产品,用于检验醛酮色层分析及肝功能试验中。北京化工厂多年来是采用 2.4-二硝基氯代苯(以下简称氯代苯)与醋酸肼在乙醇溶剂中合成的工艺。不仅需要先制造醋酸肼(工序较繁杂),并且所得之产品还需要大量后处理工作。就是这样,产品还是经常不合格,很难完成内销及出口任务。

经过反复试验,观察反应现象,分析产品不合格的原因,决定改用以下新工艺,即采用水合肼与氯代苯直接在乙醇作溶剂的条件下合成,小试验结果无需后处理就得到合格产品。但产率不高,只有 45%。为了稳定工艺,提高产率,用正交表作了两批小试验,找到了较佳工艺条件。经小试验和大生产的考验,证明采用新工艺不仅节约原料,提高产率,并且质量得到根本改进,达到出口标准。

(一) 第一批正交试验

(1) 因素和位级表。为了降低成本,提高收率,经集体讨论,决定首批用 $L_8(2^7)$ 作以下六因素两位级的条件试验:

因 素	乙醇用量 A	水合肼用量 B	温 度 C	时 间 D	水合肼浓度品种 E	搅拌速度 F
位级 1	200 ml	理论量的 2 倍	迴流	4 小时	精品	中快
位级 2	0 ml	理论量的 1.2 倍	60°C	2 小时	粗品	快速

正交试验前,工人师傅作成功小样时,在反应中途,曾加了 200 ml 的乙醇,为了考察这 200 ml 乙醇能否省下,对乙醇用量排了 200 ml 和 0 ml 两个位级。水合肼的用量,相对于主料氯代苯来说,应该超过理论量,但应超过多少呢?经讨论,排了 1.2 倍和 2 倍两个位级。水合肼的浓度品种分精品和粗品两个位级。我们看出不同的位级可以是原料的不同用量(如 A 、 B),希望试验后能节约用量或提高效果;可以是不同的操作方法(如 C 、 D 、 F),希望提高工效;或不同的原料品种(如 E),为了挑选品种或在其它项目中取代进口品;等等。

(2) 试验计划。把 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 六种因素顺次放在 $L_8(2^7)$ 的前六列上面,然后去掉第 7 列(如果是五种因素就放在前五列上,然后去掉后两列;如果是七种因素,则放满)。这样,使得剩下的 L_8 ,每列对应于一个因素,每列中的数码“1”和“2”对应于该因素的位级 1 和位级 2(例如第一列中的“1”表示加乙醇 200 ml,“2”表示不加乙醇)。只要将它的每一横行看成一个试验条件(如第一行对应的试验条件为 $A_1B_1C_1D_2E_2F_1$,即加乙醇 200 ml,水合肼用量为理论量的 2 倍,迴流温度,反应时间 2 小时,用粗品水合肼,搅拌速度为“中快”),就得到首批八个试验的试验计划。

下表中列出了试验计划,试验结果,以及对结果进行的计算。按照排列的方法,六种因素两个位级,配合齐全,共有 $2^6=64$ 个组合条件。通过正交表 L_8 ,是从其中选了有规则的 8 个代表来做试验。这 8 个试验同时考察了六种因素,并且满足以下两条: 1. 任何一种因素的任何一位级都作了四次试验。 2. 任何两种因素的任何一位级对子同时出现在两次试验中。因此这 8 个试验条件均衡地分散到全体 64 个组合条件之中,所以对它

们有较强的代表性。

(3) 试验结果。对各次试验的产品,考核产率、外形、熔点、含量、溶解度共五项指标。关于产率一项,过去和这批用的原料,都是精制氯代苯。它由未经处理的工业氯代苯加工制成。在精制过程中,不但可能发生危险,而且要损失氯代苯 30%。这里,为了同下批正交试验用工业氯代苯的产率相互比较,已经把精制氯代苯的产率乘过 70%,都折算成按工业氯代苯的产率。(如第 1 号试验用精制氯代苯的产率原来是 80%,折算成工业氯代苯的产率为 $80\% \times 70\% = 56\%$,其它类推。)

8 次试验的结果向我们提供了两类收获。第一类是拿到手的成果。在本例中,以第 2 号条件的产率 65% 最高,其次是第 5 号的 63%,都比这批试验前的 45% 提高不少。关于外形一项:第 2 号和第 7 号出现紫色外形,是报废的产品;其它六号条件都是桔黄色的合格品。关于熔点、含量与溶解度三项指标,8 次产品全部合格。假如没有漏掉另外的重要因素,用量的范围又没有大的出入,那么,8 次的最好结果在全体可能结果中还是相当好的。对好条件应做重复试验,把它们核实肯定下来以及了解试验误差(参看 § 9)。大量事例说明,这种现实的好成果往往已经起到很大的作用。对此应给予足够的重视,不要放过很容易得到的这种正交表效果。[第二类收获在(5)中介绍。]

试 验 计 划							试 验 结 果			
试 验 号	因 素 列 号	乙醇用量 <i>A</i>	水 合 肼 用 量 <i>B</i>	温 度 <i>C</i>	时 间 <i>D</i>	水 合 肼 浓 度 <i>E</i>	搅拌速度 <i>F</i>	产率 (%)	外形	熔点, 含量, 溶解度
		1	2	3	4	5	6			
1		1 (200 ml)	1 (2 倍)	1 (迴流)	2 (2 小时)	2 (粗品)	1 (中快)	56	合格	合 格
2		2 (0 ml)	1	2 (60 °C)	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 次产率之和		215	244	201	207	213	205	I + II = 总和 = 425		
II = 位级 2 四 次产率之和		210	181	224	218	212	220			
极差 <i>R</i> = I、II 中, 大数 - 小数		5	63	23	11	1	15			

(4) 两次验证试验。上述 8 个试验中,第 2 号和第 7 号的外形是紫色的不合格品。特别是第 2 号的产率还最高。将此两号试验重作一次,产率保持不变,奇怪的是在外形上又得到桔黄色的合格品。因此,我们认为还有影响外形的重要因素未被注意和考察。经过调查研究,知道出现紫色外形是此产品多年来一直未解决的老问题。工人师傅把作这两号试验的前后两次具体情况进行具体分析,后来推测,影响外形的重要因素可能是加料速度,决定在下批试验中考察。

(5) 产率的计算和展望。试验的第二类收获是在认识和展望上的收获。尽管 8 次试验的代表性强,但应认识到,8 个条件在全体可能条件(远不止 2^6 个,因为许多因素还可以

取其它的位级)中所占的比例是非常小的,所以还有提高的可能。此外,产率高的第2号和第5号都是用的含50%的精品水合肼,相对于含20%的粗品水合肼来说,它不仅成本高,而且不易找到。因此希望找更好的条件。以下介绍 L_8 的计算方法,找出主要因素及好的位级,为进一步安排试验提供有效的依据。

由于正交表具有整齐可比性,因此可以用以下的简单方法计算各列的极差 R 。比较极差的大小,可以估出主要因素和次要因素。第1列的因素为乙醇用量,它的位级1对应于第1、3、5、7号试验,产率之和 $I = 56 + 54 + 63 + 42 = 215\%$;位级2对应于第2、4、6、8号试验,产率之和 $II = 65 + 43 + 60 + 42 = 210\%$ 。极差 $R = I、II$ 中,大数-小数 $= 215 - 210 = 5\%$,即乙醇的两个位级在产率之和上的差别(由于其它五种因素在第1、3、5、7号试验及第2、4、6、8号试验中均为位级1、位级2各出现两次,因此它们的不同位级对产率的影响在 R 中差不多抵消了)。现在, I 比 II 大, $R = 5\%$,表示位级1比位级2好,但好得不多(也可能是试验误差造成的)。类似地计算其它五种因素的极差,记在上表最下面一行中。比较极差的大小,可以看出:第2列因素 B 为首要因素, B_1 比 B_2 好得多。对重要因素应详加考察,本着有苗头处着重加密的原则,水合肼用量第二批试验应在 B_1 (理论量2倍)的周围继续研究。第1列因素乙醇用量 A 和第5列因素水合肼浓度品种 E 的极差都很小,就是说 A_1 和 A_2 、 E_1 和 E_2 差别不大,对于次要因素应以节约方便为宜,我们决定: A 取不加乙醇的 A_2 , E 取粗品水合肼 E_2 ,以降低成本。另外,温度 C 的极差 $= 23$,看来 60°C 比迴流温度要好一些,但在试验过程中发现 60°C 不易掌握,因此决定采用 $60\sim 70^\circ\text{C}$ 之间。对于因素 F ,极差 $= 15$, F_2 比 F_1 好,决定采用快速搅拌 F_2 。最后,对于因素 D ,它的极差 $= 11$,位级2比位级1好,操作起来也是2小时的位级2比4小时的位级1方便得多,我们愿意采用。但是,下批试验中,其它因素的位级有了变化,为了慎重起见,再比较一下2小时和4小时这两个位级。

(二) 第二批正交试验

根据前面的试验情况、计算结果及分析讨论,决定用工业氯代苯和粗品水合肼做原料、采用 $60\sim 70^\circ\text{C}$ 之间的温度和快速搅拌、中途不加乙醇,用 $L_4(2^3)$ 作以下三因素两位级的条件试验。

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

现将试验计划、试验结果列入下页表。

四次试验的外形,快速加料的第1、4号试验均出现紫色不合格品,而慢速加料的第2、3号试验均出现桔黄色的合格品。另外两种因素的每个位级,紫色和桔黄色都出现,这说明它们对于外形不起决定性的影响。由此得出结论,即影响外形的重要因素是加料速度,应采用慢速加料。由产率的计算中看出:水合肼用量是2.3倍比1.7倍好,加料速度是慢比快好,时间还是2小时比4小时好。第二批试验的产率普遍比第一批要高,第二批