

正交试验法 在机械工业中的应用

廖永平 严肇宇 编

中国农业机械出版社

正交试验法在机械 工业中的应用

廖永平 编
严擎宇

中国农业机械出版社

正交试验法在机械工业中的应用

廖永平 严擎宇 编

●
中国农业机械出版社出版

北京市海淀区阜成路东钓鱼台乙七号

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

●
787×1092 32 开 4 1/2 印张 98千字

1984年9月北京第一版·1984年9月北京第一次印刷

印数：0,001—7,700 定价：0.78 元

统一书号：4216·14

前 言

在生产和科研工作中，为了试制新产品或改革工艺，经常要做许多多因素的试验。“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，科学地选择试验条件，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条件，以便通过次数较少的试验，找到较好的生产条件，即最优或较优的方案。

在我国，正交法理论的研究工作已有了很大进展，应用效率不断提高，取得了可喜的成果。但是随着四化建设的发展，这方面的工作还有进一步推广普及与提高的必要。本书通过数十个例子，其中主要是国内的例子，用来说明在机械工业的设计与工艺过程中如何应用正交试验法，以期对从事这方面工作的读者有所帮助与启发。

本书可供具有初中以上文化程度的工人、技术人员和科研工作者参考，亦可作为高等工业院校的教学参考书。

编 者

一九八二年八月

目 录

前言

第一章 正交试验法简述	1
§ 1 单因素轮换试验法和全面试验法	2
§ 2 正交试验法	5
§ 3 正交试验设计发展简史	20
第二章 正交试验法在设计过程中的应用	22
§ 1 性能指标可计算的产品的三次设计	23
§ 2 质量损失函数 $L(y)$	25
§ 3 惠斯登电桥的三次设计	29
§ 4 通过试验的产品参数设计方法	40
§ 5 正交试验法在寿命设计中的应用	46
第三章 正交试验法在工艺过程中的应用	49
§ 1 正交试验法在热加工过程中的应用	49
§ 2 正交试验法在冷加工过程中的应用	92
第四章 正交表的构造原理	111
§ 1 正交表的性质及其置换	112
§ 2 正交性原理的几何解释	113
§ 3 二位级正交表的构造	115
§ 4 三位级正交表的构造	119
§ 5 混合位级正交表的构造	124
参考文献	126
附录: 常用正交表	127

第一章 正交试验法简述

人们在从事生产的过程中，经常通过大量的科学试验来探索自然界的秘密，摸清利用自然资源进行工业生产的客观规律，让自然界蕴藏着的无限宝藏更好地为人类服务。

人们在搞科学试验时，总希望花费最少的人力、物力和财力，最快地取得优质、高产、低耗的良好效果。为了达到这个目的，人们都在寻求一种能够多快好省地进行科学试验的方法。衡量一个试验研究方法好与不好，是否科学合理的标准是什么？一般来说应当满足这样几个要求：

1. 尽量多考察一些影响试验结果的因素；
2. 尽可能减少试验的次数；
3. 尽快地分析出试验结果；
4. 尽快地得到比较满意的结果，即尽快地找出有关因素的较佳点或最佳点；
5. 较准确地得出试验结论。

过去许多科学家曾有过不少科学设想，但是由于受到当时科学技术发展水平的限制，除了缺乏试验的仪器、设备等测试手段以外，还因为没能找到一些比较科学合理的试验方法，因而使试验时间拖得很长，甚至归于失败。德国著名的医学家、化学家欧立希和日本学者泰佐次郎，共同发明制造了一种对梅毒病和其他螺旋体病有特效的药物，坚持试验了六百零六次才获得成功。如果当时能有一个比较科学合理的试验方法，那么该可以省去多少时间、人力、物力和财力的

浪费啊！

§ 1 单因素轮换试验法和全面试验法

搞科学试验，过去常用的方法有两种：一是单因素轮换试验法（简称单因素轮换法）；一是全面试验法。

什么叫单因素轮换试验法呢？举个简单的例子来说，开始搞机械加工时，我们不知道切削三要素（速度 v 、走刀量 s 、吃刀深度 t ）对机械加工表面质量有无影响？如果有影响，是三个因素都起作用，还是有的起作用，有的不起作用？如果全部都起作用，那么哪一个的作用最大？居第二位、第三位的又是哪个？如果是部分起作用，那么哪些因素起作用，哪些因素不起作用？为了弄清这些问题，就要做机械切削试验。试验应该怎么做？用什么方法来做呢？为了说明这些问题，就按切削速度 v 、走刀量 s 、吃刀深度 t （这些称为因素）分别选取两种水平：速度 v_1 与 v_2 、走刀量 s_1 与 s_2 、吃刀深度 t_1 与 t_2 （这里每个因素所选的两种水平称为位级）来进行试验。根据上述因素和位级可得到如表 1-1 的试验计划表。

表 1-1

因素 位级	切削速度 (v)	走刀量 (s)	吃刀深度 (t)
1	v_1	s_1	t_1
2	v_2	s_2	t_2

试验时，首先把切削速度 v 固定在 v_2 位级上，把走刀量 s 固定在 s_1 位级上，然后来比较吃刀深度 t 的两个位级 t_1 与 t_2 ，从中选出一个较优的吃刀深度，假设实验结果 t_2 比 t_1 好，吃刀深度就选定 t_2 。也就是说，要做如下两次试验：

$$(1) v_2 \ s_1 \ t_1$$

$$(2) v_2 \ s_1 \ \underline{t_2} \text{ (好结果)}$$

从中选定了 t_2 。

其次，固定切削速度 v_2 与吃刀深度 t_2 ，比较走刀量的两个位级 s_1 与 s_2 ，从中选出一个较优的走刀量，假定实验结果 s_2 比 s_1 好，于是走刀量就选 s_2 。也就是说，要做如下两次试验：

$$(3) v_2 \ s_1 \ t_2$$

$$(4) v_2 \ \underline{s_2} \ t_2 \text{ (好结果)}$$

最后，固定走刀量 s_2 与吃刀深度 t_2 ，比较切削速度的两个位级 v_1 与 v_2 ，从中选出一个较优的切削速度，假定实验结果 v_1 比 v_2 好，切削速度就改选为 v_1 。也就是说，这时要做如下两个试验：

$$(5) \underline{v_1} \ s_2 \ t_2 \text{ (好结果)}$$

$$(6) v_2 \ s_2 \ t_2 \ominus$$

通过这样几次试验，最后找到 $v_1 s_2 t_2$ 这个加工工艺条件对加工表面质量能起到较好的效果。这种固定其它因素，改变某个因素，从而考察变动的因素对试验结果影响大小的试验方法，就叫做单因素轮换法。

单因素轮换法的缺点是选择出来的“较优”生产工艺条件局限性很大。因为参加试验的各种影响因素本来都是在变化的，却要人为地让它们始终固定在某个水平上，这样就很可能把这些影响因素之间的许多好的搭配方案扼杀了。比如，在上例中，只做了 $v_2 s_1 t_1$ ， $v_2 s_2 t_2$ ， $v_2 s_1 t_2$ 与 $v_1 s_2 t_2$ 这4个配合的试验，还有4个配合 $v_1 s_1 t_1$ ， $v_2 s_2 t_1$ ， $v_1 s_2 t_1$ 与 $v_1 s_1 t_2$ 就没有做试验。其次，选出来做试验的4个配合的代表性也很差（这一

⊖ 这个试验上面已经做过，因此也可以利用上面的试验结果。

⊙ 这个试验也已做过，可利用上面的试验结果。

点将在下一节的分析中说明)。最后,在比较条件的好坏时,是以单个数据作简单对比,而试验数据中肯定包含误差,对比时不能剔除误差的干扰,因此有时会造成结论不稳定。可见,用这种方法选择出来的生产工艺条件只能说是固定条件下的“较优”,因而试验效果并不理想。

什么叫全面试验法呢?还用上面的例来说明。这时就必须做8次试验:

$$\begin{aligned} &u_1s_1t_1, u_1s_1t_2, u_1s_2t_1, u_1s_2t_2, \\ &u_2s_1t_1, u_2s_2t_2, u_2s_2t_1, u_2s_1t_2. \end{aligned}$$

也就是说,把三个因素两个位级的全部搭配方案($2^3=8$)一个不漏地安排了试验。这种按因素位级的全部搭配方案逐一进行试验的方法就叫做全面试验法。

这种试验方法同单因素轮换法相比,由于参加试验的各种影响因素都变化,不会漏掉好的配合,因而能把最优配合找出来,提高了试验的选优效果。但是也应当看到,当因素和位级增加时,试验次数也要大大增加,其数量可以达到惊人的程度。比如,7个因素2个位级,全面试验要做128次;11个因素2个位级,全面试验要做2048次;11个因素3个位级,全面试验就得做177147次。时间和金钱的花费是很大的。而在工业生产中一次科学试验,参加试验的因素在六、七个以上是常事,照这样,做试验的次数就相当可观了。不仅人力、物力、财力耗费巨大,所需时间也是惊人的。因此,这个方法虽然能把最优方案选择出来,但当因素、位级较多时也只能说是个少慢差费的笨办法。那么,能不能找到一个做试验次数较少,又能把较好的方案选择出来的好办法呢?许多数学工作者和从事生产实践的人们经过长时间的摸索与研究,终于找到了一个多快好省的科学办法,即正交试验设计

法（简称正交试验法）。

§ 2 正交试验法

正交试验法是根据数理统计学的原理，从大量的试验点中挑选适量的具有代表性的试验点，应用一种标准化了的“正交表”来合理安排多因素试验的一种科学方法。根据这种方法，人们只要做较少次数的试验就能得到比较满意的结果。

一、指标、因素和位级

指标 进行一项试验，首先要明确试验的目的，以及如何考察它的效果。一般把试验需要考察的效果称为试验指标。能够用数量来表示的试验指标，称为定量指标，例如重量、尺寸、速度、温度、压力、性能、寿命、硬度、强度、精度、光洁度，等等。不能用数量来表示的试验指标称为定性指标，如颜色、外观、味道，等等。在质量管理中，一般把质量特性作为试验指标。

因素 对试验指标产生影响的原因称为因素。因素是在试验中应当加以考察的重点内容。在试验中能够人为地加以控制和调节的一类因素称为可控因素。如转速、走刀量、吃刀深度、加热温度、保温时间，等等。由于试验条件受到限制，暂时还不能人为地加以调节和控制的因素称为不可控因素。如机床的轻微振动、刀具的微小磨损，等等。正交试验法在设计试验方案时，一般只适用于可控因素。

位级 因素在试验中所处状态、条件的变化，可能引起指标的变化，我们把因素变化的各种状态和条件称为因素的位级。在试验中需要考察某因素的几种状态时，则称该因素为几位级的因素。如，要考察的时间因素为1小时、2小时和4小时，则称时间因素为三位级的因素，又如，要考察的

机床转速为1000转/分、800转/分和1500转/分，则称机床转速为三位级的因素，等等。

在正交试验中，因素一般用大写的拉丁字母 A 、 B 、 C 、 D ……来表示；位级用阿拉伯字码 1、2、3、4……来表示。如 A_1 表示 1 位级的 A 因素； B_2 表示 2 位级的 B 因素，等等。

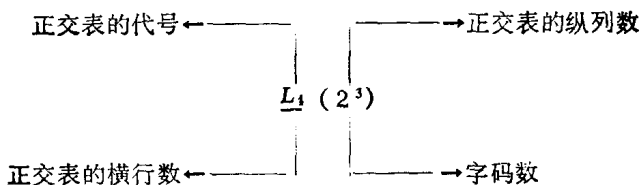
二、正交表

用正交试验法合理安排试验，并对试验数据进行统计分析，需要用一种已经制作好的标准化的表格，这类表格称为正交表。它是正交试验法的基本工具。最简单的正交表是 $L_4(2^3)$ ，如表 1-2 所示。

表 1-2 $L_4(2^3)$

试 验 号 \ 列 号	1	2	3
1	1	1	1
2	2	1	2
3	1	2	2
4	2	2	1

正交表记号 $L_4(2^3)$ 的含义如下：



就是说 $L_4(2^3)$ 这张正交表具有 4 行、3 列，由字码“1”和“2”组成。

正交表一般有下列两个特点:

1. 每一列中, 不同字码出现的次数相等。如 $L_4(2^3)$ 中, 字码“1”和“2”各出现2次。

2. 任意两列中, 将同一行的两个字码看成有序数字对时, 则必然构成完全有序数字对, 而且每种数字对出现的次数相等。如 $L_4(2^3)$ 中第1、2列构成一个完全有序数字对:

(1, 1)、(1, 2)、(2, 1)、(2, 2), 其中每种数字对均出现一次。

凡是满足上述两个条件的表就称为正交表。这里的“正交”二字是从几何学中两个向量正交的定义借用过来的。

常见的正交表有: $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 、 $L_{16}(2^{15})$ 、 $L_9(3^4)$ 、 $L_{27}(3^{13})$ 、 $L_8(4^1 \times 2^4)$ 、 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 等等 (详见附录)。

正交表中每列所包括的字码种数相同时, 称为同位级正交表, 如 $L_4(2^3)$ 、 $L_9(3^4)$ 等等。正交表中每列所包含的字码种数不不同时, 称为混合位级正交表, 如 $L_8(4^1 \times 2^4)$ 、 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$, 等等。

现在用正交试验法来安排上节所述选择机械加工切削量的试验方案, 分析一下使用正交试验法的好处。

上例中有三个因素, 每个因素均选二个位级, 所以只要选用 $L_4(2^3)$ 正交表来安排试验就行了。这时需要做下面4个试验:

$$v_1 s_1 t_1, v_2 s_1 t_2,$$

$$v_1 s_2 t_2, v_2 s_2 t_1.$$

本来三因素的全面试验需要做 $2^3=8$ 次, 这8个实验点所构成的立方体网点如图1-1所示。这就是说, 全面试验是把这8个点全都试验一遍。正交试验则按照正交表的规则

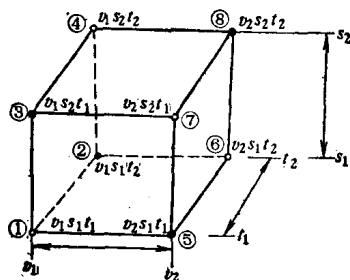


图 1-1

分散，很有代表性。根据同样道理，也可以挑②、③、⑤、⑧（图 1-1 中用●表示）这 4 个点来做试验。

我们还可以看到，当切削速度 v 取 v_1 时，走刀量 s 和吃刀深度 t 这两个因素的两个位级也变化了。即

$$v_1 \begin{cases} s_1 & t_1 & (\text{试验点①}) \\ s_2 & t_2 & (\text{试验点④}) \end{cases}$$

当切削速度 v 取 v_2 时，走刀量 s 和吃刀深度 t 这两个因素的两个位级也都变化了。即

$$v_2 \begin{cases} s_1 & t_1 & (\text{试验点⑥}) \\ s_2 & t_2 & (\text{试验点⑦}) \end{cases}$$

正是由于这一点，说明切削速度 v 这个因素由 v_1 变化到 v_2 时，走刀量 s 和吃刀深度 t 这两个因素对指标的影响相互抵消了，因而对应于 v_1 和 v_2 这两个位级试验结果的差异，主要是由 v 的不同位级引起的。同样，对于走刀量 s 和吃刀深度 t 这两个因素也有类似的性质，这就是正交表的整齐可比性给正交试验带来的好处。

上节已经分析过，用单因素轮换法做这个试验，虽然试验次数也是 4 次，但是选出来的试验点却是图 1-1 中的④、

⑤、⑥、⑧。显然，它们的代表性是很差的。因为这4个点中有3个都集中在右面和后面，前面和左面只有1个。因此很难说 $v_1 s_2 t_2$ 就是8个配合中较好的一个。

通过以上分析，可见用正交试验法安排试验方案，正是吸取了全面试验法和单因素轮换法的优点，摒弃它们的缺点，做到试验次数少，反映情况较全面，而且在一定条件下可以得到比较满意的效果。因此，正交试验法对于全面试验法来说是一种部分试验法；对于单因素轮换法来说又是一种多因素优选法。

三、基本方法

（一）试验计划的安排

如何安排试验计划是正交试验设计的重要内容之一，下面通过一个实例来说明：

某工厂一零件的镗孔工序质量不稳定，经常出现内径偏差较大的质量问题。为了提高镗孔工序的加工质量，改进工艺操作规程，决定对该工序进行正交试验，以探求较好的工艺条件，这就是本试验的目的。试验的考核指标是内径偏差量。

根据上述试验目的和要求，用正交试验法应如何安排这个试验呢？

首先，有关人员根据生产实践经验和理论知识，分析造成镗内孔质量问题的各种因素，画出“为什么镗内孔偏差大”的因果分析图。经调查研究，大家认为刀具的数量与布局、切削速度、走刀量和刀具种类等因素是造成内径偏差大的主要原因。再根据以往的生产经验，选了切削速度的三个位级：30转/分、38转/分和56转/分；刀具数量的三个位级：2把、3把和4把；刀具种类的三个位级：I型理论刀、II型理论刀

和常规刀；走刀量的三个位级：0.70 毫米/转、0.60毫米/转和 0.47 毫米/转。现将这些因素和位级列于表 1-3。

表 1-3 因素位级表

因素 位级	切削速度 A	刀具数量 B	刀具种类 C	走刀量 D
1	30	2	I 型	0.70
2	38	3	II 型	0.60
3	56	4	常规	0.47

其次，选取一张合适的正交表来安排这个试验。根据这个试验的因素有 4 个，位级有 3 个，决定选用 $L_9(3^4)$ 正交表，如表 1-4 所示。这张表有 9 行 4 列，表中整齐地排列着“1”、“2”、“3”三种数码。

表 1-4 $L_9(3^4)$

列号 试验号	1	2	3	4
1	1	1	3	2
2	2	1	1	1
3	3	1	2	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

然后把切削速度、刀具数量、刀具种类和走刀量这4个因素顺序地放在表1-4中“列号”1、2、3、4的位置。

最后，再把表1-4中第1列的字码“1”换成“切削速度30转/分”，字码“2”换成“切削速度38转/分”，字码“3”换成“切削速度56转/分”；把第2列的“1”换成“刀具数量2”，“2”换成“刀具数量3”，“3”换成“刀具数量4”；把第3列的“1”换成“I型理论刀”、“2”换成“II型理论刀”、“3”换成“常规刀”；把第4列的“1”换成“走刀量0.70毫米/转”、“2”换成“走刀量0.60毫米/转”、“3”换成“走刀量0.47毫米/转”。于是，作成表1-5。表中的每一行都是一个试验操作条件。如，第1号试验条件是：切削速度30转/分、刀具数量2把、刀具种类是常规刀、走刀量0.60毫米/转，简记为 $A_1B_1C_3D_2$ 。第5号试验条件是：切削速度38转/分、刀具数量3把、刀具种类是常规刀、走刀量0.47毫米/转，简记为 $A_2B_2C_3D_3$ ，等等。总共要做9次试验。

表 1-5 试验计划表

试 验 号	因 素 列 号	切削速度	刀具数量	刀具种类	走 刀 量	偏 差 量
		A	B	C	D	
		1	2	3	4	
1		1 (30)	1 (2)	3 (常规)	2 (0.60)	
2		2 (38)	1 (2)	1 (I型)	1 (0.70)	
3		3 (56)	1 (2)	2 (II型)	3 (0.47)	
4		1 (30)	2 (3)	2 (II型)	1 (0.70)	
5		2 (38)	2 (3)	3 (常规)	3 (0.47)	
6		3 (56)	2 (3)	1 (I型)	2 (0.60)	

(续)

试验号	因素 列号	切削速度 A	刀具数量 B	刀具种类 C	走刀量 D	偏差量
		1	2	3	4	
7		1 (30)	3 (4)	1 (I型)	3 (0.47)	
8		2 (38)	3 (4)	2 (II型)	2 (0.60)	
9		3 (56)	3 (4)	3 (常规)	1 (0.70)	

表1-5最右边一栏是试验指标的“偏差量”。试验做完后，将每号试验得到的“偏差量”数据填入相应的栏内，供以后分析试验结果用。

现将上述安排试验计划的步骤归纳如下：

第一步：明确试验目的，确定试验的考核指标。

第二步：挑因素，选位级，制订因素位级表。

挑因素、选位级一定要充分发挥有关人员的理论知识、专业技术和生产经验等特长，把因素和位级尽量找得比较准确。

第三步：选用正交表。

第四步：确定试验计划。

这一步的内容包括：因素顺序上列，位级对号入座，列出试验条件等。

(二) 试验结果的分析

如何分析试验结果是正交试验中另一个重要内容。现在仍以上节的实例来说明：

当镗孔的试验已做完，偏差量数据均已填入“偏差量”栏（见表1-6）后，即可按以下步骤分析试验结果：