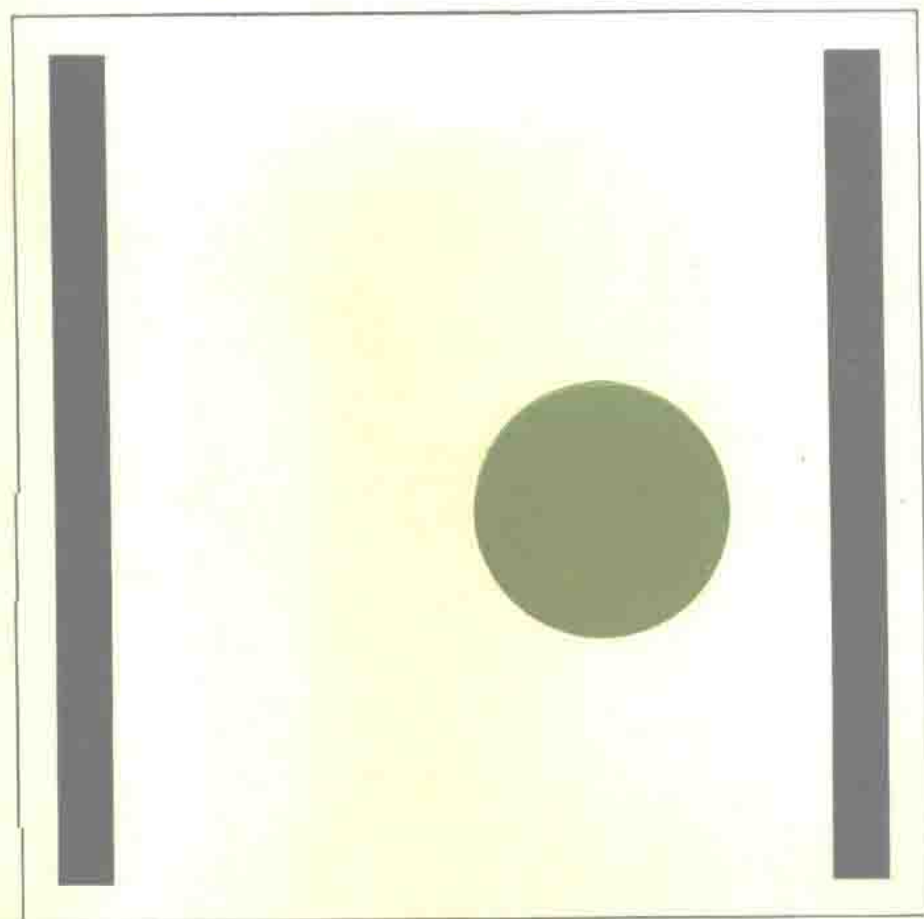


可靠性与质量管理丛书

参数设计与容差设计

刘婉如 徐信之 编著

KEKAOXING YU ZHILIANG
GUANLI CONGSHU



可靠性与质量管理丛书

参数设计与容差设计

刘婉如 徐信之 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书通过一些实例介绍了用正交表做参数设计和容差设计的方法。在参数设计中主要讲述了直接择优法、稳定性择优法、直接择优与稳定性择优相结合的方法及直接择优与回归相结合的方法。书中还有正交表简介及常用的正交表。凡学过一点高等数学及概率统计的大专学生、工程技术和科学研究人员及有关质量管理的工作人员都可以参照使用。

可靠性与质量管理丛书

参数设计与容差设计

刘婉如 谷信之 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 5 128千字

1988年7月第一版 1988年7月第一次印刷 印数：0.001—6,400册

ISBN 7-118-00036-1/F3 定价：1.50元

出版说明

“企业的技术开发工作要特别重视新产品试制、中间试验、生产性试验以及解决工业化生产中的质量、可靠性、经济性、成品率等一系列工艺和设备问题。”(《中共中央关于科学技术体制改革的决定》1985年3月13日)

产品的可靠性是产品质量的重要组成部分。质量与可靠性是国内及国外市场竞争中能否胜利的决定因素。质量及可靠性要从产品的设计、试制抓起,把质量与可靠性设计到产品中去,贯彻在从试制、试验、生产到使用的各个阶段中。提高产品的质量和可靠性将给研制生产单位带来巨大的经济效益,也带来巨大的社会效益。鉴于国内还没有全面地从各个专题方面介绍可靠性及质量管理方面的著作,本社特委托何国伟同志组织国内有关方面的专家,编著了这套《可靠性与质量管理丛书》,并由何国伟同志担任本丛书的主编。本丛书的目的在于培养可靠性工程和全面质量管理的专业人材,以保障和提高产品质量。

本丛书适用于大专以上的工程技术人员和管理人员,主要用于在职教育,也可供大专院校教学参考。

前 言

参数设计和容差设计是产品设计和科学研究的有力工具，是企业致富的法宝，八十年代受到世界各国的推崇，在我国推广后取得了巨大的经济效益和社会效益。本书是根据我们近十年来在全国各地推广三次设计的讲稿整理而成的。

产品的设计可分三个阶段：系统设计，参数设计，容差设计。三次设计是质量管理的三个要素。

系统设计指的是对产品整个系统结构的设计。例如，对原材料的选用，确定各零部件的功效与连接（连接包括机械性连接、电磁性连接、光电与放射性连接等），产品的形状、颜色等都属于系统设计的范畴。在这个设计阶段，对于可计算性项目利用专业知识和数学方法建立产品的某些性能与各元、器件(参数)之间的函数关系，为参数设计作好准备。

参数设计指的是根据系统设计寻找使得产品的性能达到优良状态时的参数搭配，即寻找所谓的好参数组合。参数设计的方法很多，本书主要介绍用正交表做参数设计的方法：直接择优法、稳定性择优法、直接择优与稳定性择优相结合的方法及正交与回归相结合的方法。直接择优就是选择参数组合使得产品的性能指标达到优良的标准。稳定性择优就是对性能指标随着环境的变化，或随着元、器件等的变化而产生一些波动的产品，选择好的参数组合，使得产品性能波动小，稳定性好。直接择优与稳定性择优相结合、正交与回归相结合都是我国在使用正交表做参数设计中的一些新的成功的探讨。它们对参数的优化有十分明显的效果。

容差设计指的是在参数设计的基础上通过质量损失函数解决提高质量与降低成本这一对矛盾的一个方法。换句话说容差设计是选择元、器件的精度，以便使产品的总经济损失达到最低的

限度。

我们曾在北京、上海、南京、无锡、杭州、南通、武汉、大连、丹东、青岛等十八个省市举办了 200 余次学习班讲授参数设计和容差设计，参加学习的约有两万人。取得了上万项的成果，总经济收益成千万元，参数设计与容差设计在航天、造船、电子、机械、化工、兵器、农业、商业、铁路等行业都得到了成功的应用。

凡是学过一点高等数学及概率统计的大专院校学生及从事质量管理、工程技术和科学研究的工作者都能看懂这本书，并可以参照使用。

在编写本书的过程中，得到张里千、蒋定华、余道衡等先生的大力帮助，特此致谢。编者深感水平有限，书中缺点错误在所难免，望读者批评指正，谢谢。

刘婉如 徐信之
于北京大学

目 录

第一章 正交表简介	1
第二章 直接择优法	4
2.1 生产工艺的改进	4
2.2 配比较方的成本计算	9
2.3 生产计划的制订	15
2.4 参数择优问题	24
第三章 正交与回归相结合的方法	31
3.1 问题的提出	31
3.2 新的数学模型与估计式	39
第四章 稳定性择优	45
4.1 问题的提出	45
4.2 惠斯登电桥的参数设计和容差设计	47
4.3 AGC 部分电路的参数设计和容差设计	64
第五章 直接择优与稳定性择优相结合的方法	86
5.1 系统设计	86
5.2 参数设计	91
5.3 元件参数的确定	105
5.4 小结	106
第六章 正交表方法的优良性	108
6.1 均衡分散性	108
6.2 整齐可比性	115
附录一 正交表	119
附录二 中国科协代表团参加美国科学促进协会年会的 报告摘要	151
参考文献	152

第一章 正交表简介

正交表是由数学工作者根据数学理论构造出的一些规格化的表。这些表是正交法的基本工具。现在，我们以 $L_8(2^7)$ 表为例，来认识一下正交表。

表1-1 $L_8(2^7)$

列号 条件号	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	2	2	1	2
2	2	1	2	2	1	1	1
3	1	2	2	2	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

$L_8(2^7)$ 表有 8 个横行，7 个纵列。表中只有 1, 2 两个字码。这张表具有两个特点：

- (1) 每纵列都恰好有 4 个“1”与 4 个“2”；
- (2) 在任意两个纵列横向形成的 8 个数字对中，(1, 1)、(1, 2)、(2, 1)、(2, 2) 各出现两次。这就是说，任意两个纵列的字码 1、2 之间的搭配是均衡的。

再如 $L_9(3^4)$ 表

表1-2 $L_9(3^4)$

列号 条件号	1	2	3	4
1	1	1	3	2
2	2	1	1	1
3	3	1	2	3

(续)

列号	1	2	3	4
条件号				
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

$L_9(3^4)$ 表有 9 个横行, 4 个纵列, 表中只有 1, 2, 3 三个字码, 这张表也具有与 $L_8(2^7)$ 表相类似的特点:

(1) 1、2、3 三个字码在每一纵列中出现的次数都相同, 都出现了三次;

(2) 在任意两个纵列横向形成的 9 个数字对中, (1, 1)、(1, 2)、(1, 3)、(2, 1)、(2, 2)、(2, 3)、(3, 1)、(3, 2)、(3, 3) 出现的次数都相同, 都是一次, 即任意两个纵列的字码 1、2、3 之间的搭配是均衡的。

又如 $L_8(4^1 \times 2^4)$ 表

表1-3 $L_8(4^1 \times 2^4)$

列号	1	2	3	4	5
试验号					
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

$L_8(4^1 \times 2^4)$ 表有 8 个横行, 5 个纵列, 第 1 纵列由字码 1、2、3、4 组成, 其余 4 列均由字码 1、2 组成, 它也有与上述两表相类似的特点:

(1) 在每个纵列中, 就各自的字码来说, 每个字码出现的次数都是相同的;

(2) 在任意两个纵列横向形成的 8 个数字对中, 每个数字对出现的次数都相同, 即任意两个纵列字码之间的搭配是均衡的。

凡是一张正交表都具有上述两个特点, 这两个特点就叫做正交表的正交性, 正交表的记号如 $L_9(3^4)$, L 的下角 9 是正交表的横行数(试验次数); 括号中的数 3 是表中的字码数(位级数); 3 的上角 4 是表的纵列数(因素数)。

第二章 直接择优法

2.1 生产工艺的改进

我们以山西忻县化工厂利用正交设计法选择糠醛生产的较佳工艺条件为例,介绍利用正交表来安排和分析多因素试验的方法。

2.1.1 试验目的

糠醛是一种用于合成工业的有机原料。它是由含多缩戊糖纤维的物质为原料,在高温和酸溶液的作用下,多缩戊糖断裂为木糖,木糖再脱水而成。我国生产的糠醛 90% 以上是以玉米芯为主要原料,全国产量的三分之一在山西,由于农业体制的改革,玉米芯的收购量大幅度下降。忻县化工厂采用了以来源充足的高粱壳代替玉米芯生产糠醛,试验已初步成功,但毛醛收率太低,成本太高(生产 1 t 亏损 6 元)。现在试图用正交法找出较佳工艺组合条件,以提高毛醛收率。

2.1.2 试验方案

1. 因素位级表

影响毛醛收率的因素很多,经该厂糠醛车间 QC 小组分析讨论,决定对硫酸浓度、固液比、水解压力、生产周期 4 个因素进行测定。对于这 4 个要考察的因素,现在分别按具体情况选出要考察比较的条件。在正交法中称这些条件为位级。

因素 A——硫酸浓度,第一位级 $A_1=6\%$,第二位级 $A_2=6.5\%$,第三位级 $A_3=7\%$ 。

因素 B——固液比,第一位级 $B_1=1:0.40$,第二位级 $B_2=1:0.43$,第三位级 $B_3=1:0.46$ 。

因素 C——水解压力,第一位级 $C_1=5\text{kg}/\text{cm}^2$,第二位级 $C_2=6\text{kg}/\text{cm}^2$,第三位级 $C_3=7\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

因素 D —生产周期, 第一位级 $D_1=6h$, 第二位级 $D_2=5h$, 第三位级 $D_3=7h$ 。

把以上这些条件列入下表, 称为因素位级表(见表 2-1)。

表 2-1 因素位级表

因素 位级	A 硫酸浓度	B 固液比	C 水解压力	D 生产周期
1	6	1:0.40	5	6
2	6.5	1:0.43	6	5
3	7	1:0.46	7	7

为了提高总的试验效果, 每个因素三个位级的次序可以任意地排, 例如生产周期的 1、2、3 位级既不是从小到大排的, 也不是从大到小排的, 而是任意来排的。(有时为了凑出某种搭配, 以便在试验中来作比较, 也可以对位级作相应的调整, 例如, 在 2.2.2 中就是这样。)

2. 确定试验方案

表 $L_9(3^4)$ 最多能安排 4 个 3 位级因素的试验。本例恰好可用该表来安排, 具体步骤如下:

(1) 因素顺序上列。按照上面的因素位级表确定的 4 个因素依次为: A (硫酸浓度), B (固液比), C (水解压力), D (生产周期)。把它们逐个填在 $L_9(3^4)$ 的四个纵列上, 每列只放一个因素。

(2) 位级对号入座。4 个因素分别占据了一列之后, 再按因素位级表中所确定的各因素的各位级逐个填到表中相应的字母处。也就是说:

第 1 列由 A (硫酸浓度) 所占有。在第 1 列的 3 个号码 1 的后面都写上 6%, 即 A_1 ; 在第 1 列的 3 个号码 2 的后面都写上 6.5%, 即 A_2 ; 在 3 个号码 3 的后面都写上 7%, 即 A_3 。

第 2 列由 B (固液比) 所占有。在第 2 列的 3 个号码 1 的后面都写上 1:0.40, 即 B_1 ; 在第 2 列的 3 个号码 2 的后面都写上 1:0.43, 即 B_2 ; 在这一列的 3 个号码 3 的后面都写上 1:0.46, 即 B_3 。

用同样的方法填写 3, 4 两列。这样一来, 得到了下面的正交试验方案表(见表 2-2)。

表 2-2 试验方案表

因素 列号	A 硫酸浓度	B 固液比	C 水解压力	D 生产周期	毛醛收率
条件号	1	2	3	4	(%)
1	1 (6)	1 (1:0.40)	3 (7)	2 (5)	7
2	2 (6.5)	1	1 (5)	1 (5)	7.48
3	3 (7)	1	2 (6)	3 (7)	6.5
4	1	2 (1:0.43)	2	1	7.89
5	2	2	3	3	8.24
6	3	2	1	2	8.02
7	1	3 (1:0.46)	1	3	8.5
8	2	3	2	2	9.22
9	3	3	3	1	8.3
I	23.39	20.98	24	23.67	I + II + III
II	24.94	24.15	23.61	24.24	
III	22.82	26.02	23.54	23.24	= 总和
R	2.12	5.04	0.46	1	= 71.15

3. 列出试验条件

表 2-2 是一张列好的试验方案表。表的每一横行就是一种试验条件, 该表共有 9 个横行, 也就是共有 9 个试验条件。例如, 第 1 号试验条件为 $A_1B_1C_3D_2$: 即硫酸浓度为 6%, 固液比为 1:0.40, 水解压力为 $7\text{kg}/\text{cm}^2$, 生产周期为 5 h。再如第 5 号试验条件为 $A_2B_2C_3D_3$, 即硫酸浓度为 6.5%, 固液比为 1:0.43, 水解压力为 $7\text{kg}/\text{cm}^2$, 生产周期为 7 h。同样地, 根据表 2-2 可以写出第 2、3、4、6、7、8、9 号试验条件。这 9 个试验的先后次序可以由操作的方便而定。对于那些没有排在正交表中的因素, 在每次试验中, 都让它们保持在同样的优良状态下。如果我们已经知道其中某些因素对试验的影响比较小, 那么也可以让它们保持在容易操作或比较经济的自然状态下。现在按 9 个试验条件作了 9 个试验, 将 9 个试验的毛醛收率填入表 2-2 的右端试验结果一栏中。

2.1.3 分析试验结果

1. 直接看。直接比较这 9 个试验结果, 容易看出第 8 号的试验条件($A_2B_3C_2D_2$)效果最好, 毛醛收率为 9.22%。其试验条件为, 硫酸浓度 6.5%, 固液比 1:0.46, 水解压力 $6\text{kg}/\text{cm}^2$, 生产周期 5 h。这是通过试验得到的好搭配, 当然是比较可靠的。

2. 算一算。通过对试验的数量结果作简单的计算, 往往还能找出收率更高的试验条件, 同时还能粗略地估计出哪些因素比较重要, 各因素的好位级大致在什么地方。

首先对每个因素计算各位级的三次收率之和 I, II, III。例如, 第 1 列的因素硫酸浓度的 $I = 23.39$, 这是由这一列 3 个位级 1 所在的三个试验的收率加在一起得到的。第 1 列的数码 1 所对应的条件号是 1, 4, 7, 相应的收率分别为 7, 7.89, 8.5, 所以

$$I = 7 + 7.89 + 8.5 = 23.39$$

同样地, $II = 24.94$ 是第 1 列中的 3 个位级 2 所在的第 2, 5, 8 号试验的毛醛收率 7.48, 8.24, 9.22 之和。 $III = 22.82$ 是第 1 列的 3 个位级 3 所在的试验中毛醛收率之和。其它 3 列的 I, II, III 的算法与第 1 列 I, II, III 的算法相同。显然, 每列 I, II, III 之和都等于这 9 个试验毛醛收率的总和, 即等于 71.15。这一事实可以用来检验各列的运算是否正确。

极差 R 是由各列的 I, II, III 中的最大数减去最小数。例如第 1 列硫酸浓度的 I, II, III 中最大的是 24.94, 最小的是 22.82,

$$R = 24.94 - 22.82 = 2.12$$

又如第 2 列固液比的极差

$$R = 26.02 - 20.98 = 5.04$$

将每个因素的极差都算出来, 填在表 2-2 的最下方。

现在我们来比较每列 I, II, III 的大小。例如, 第 1 列的 III 最大, 这表示硫酸浓度的位级 2 的毛醛收率通常比位级 1, 3 的毛醛收率高。

极差 R 的大小可以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选取的不同位级对于收率的影响较大，一般说来，它是重要因素。而极差小的因素可能是不重要的因素。在本例中，第2列固液比的 $R=5.04$ ，它比其它各列的极差都大，这表明对毛醛收率来说，固液比是重要因素。若想提高毛醛收率，必须对固液比再做详细考察。第1列硫酸浓度的 $R=2.12$ ，这表明硫酸浓度对毛醛收率的影响是第二重要的因素，生产中可以采用它的好位级 A_2 ，或围绕着 A_2 再进行考察。第3，4两列的极差值很小，这说明它们的这些位级对毛醛收率的影响可能不大，因而对于水解压力与生产周期这两个因素，生产中可以按照节约方便、提高效率、降低成本等原则来选择它们的位级。

3. 画趋势图。对于数量性的因素，画出用量与试验结果之间的关系图，也就是把算一算的结果形象化，以便从图形上明显地看出试验结果随各因素用量变化的大致关系。例如画固液比的趋势图，以固液比为横坐标，以毛醛收率之和为纵坐标，在横坐标上从小到大依次取0.40，0.43，0.46三个点(注意，不是以位级1，2，3的次序取点，不过此处这两者一致)，在这个坐标系中得到三个相应的点(0.40, 20.98)，(0.43, 24.15)，(0.46,

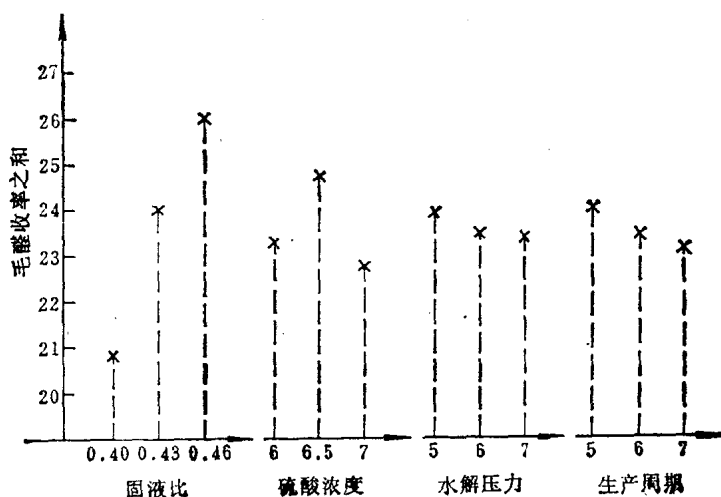


图2-1 毛醛收率趋势图

26.02)。用同样的方法作出另外三个因素的趋势图。为了便于比较,我们将4个因素取同一个纵坐标来作趋势图(见图2-1)。

由趋势图可见,毛醛收率随着固液比的增加而增加。该厂对9.22%的毛醛收率暂时比较满意,因此选取了毛醛收率最高的第8号试验条件为生产条件。投产以后,毛醛收率由原来的6.8%提高到8.3%。成本由原来每吨1871元降低到每吨1595元,按年产500t糠醛计算,年创经济效益13.80万元。解决了用高粱壳代替玉米芯生产糠醛的问题。

理论上,还可以围绕着直接看出来的第8号试验条件,并结合由算一算与趋势图所得到的对问题的新认识,再做一批试验,来找更好的生产条件^[1]。

2.2 配比较方的成本计算

2.2.1 试验目的

某电线厂是我国生产出口铜芯塑胶线的重要厂家之一。近年来,随着国民经济与对外贸易的不断发展,国内、外的一些用户纷纷要求该厂按国际标准生产电线。为此,该厂于1980年按英国标准生产电线。

英国标准一般要求电线的工作温度为70°C;而该厂原来按SG22-73标准生产,一般电线的最高工作温度只有65°C,为此该厂从1981年开始进行了“耐热70°C绝缘级和柔软级电缆料”配方的研究。该电缆料主要是由PVC树脂、增塑剂、稳定剂等组成。电缆料耐热等级的高低取决于增塑剂的选择。考虑到其综合性能与使用价值,必须采用多种增塑剂并用的方法。该厂选用了A, B, C三种增塑剂。根据国内、外的生产经验已知,当PVC树脂为100份时,增塑剂应取46份,那么A, B, C应各取多少份搭配在一起才好呢?他们用单因素轮换法作试验,确定了A为18份, B为10份, C为18份。此时,电缆料的各项性能都达到了英国标准。下面我们以这个问题为例介绍如何用正交试验法来降低生产成本。由于三种增塑剂的价格不等, C的价格最高,

A 的价格次之, B 的价格最低, 因此这个问题正交试验的目的是试图减少 C 的用量比例, 加大 B 的用量比例, 寻找既要满足性能指标, 又要降低成本的配方。

2.2.2 确定试验方案

1. 制定因素位级表

在原配方周围减少 C 的比例, 增加 A , B 的比例。每个因素各取4个位级, 其位级差距都取1.5份。 A 取为16.5, 18, 19.5, 21份; B 取为8.5, 10, 11.5, 13份; C 取为13.5, 15, 16.5, 18份, 把它们随机地取为1, 2, 3, 4位级。排出下面的因素位级表(见表2-3)。

表2-3 因素位级表

因素 位级	A	B	C
1	18	13	13.5
2	16.5	10	16.5
3	21	8.5	18
4	19.5	11.5	15

2. 列出试验方案

这里有3个因素, 每个因素有4个位级, 我们选用 $L_{16}(4^5)$ 表(见表2-4)安排试验方案。

表2-4 $L_{16}(4^5)$

列号 条件号	1	2	3	4	5	列号 条件号	1	2	3	4	5
1	1	1	4	3	2	11	3	3	2	3	3
2	2	1	1	1	3	12	4	3	3	1	2
3	3	1	3	4	1	13	1	4	2	1	1
4	4	1	2	2	4	14	2	4	3	3	4
5	1	2	3	2	3	15	3	4	1	2	2
6	2	2	2	4	2	16	4	4	4	4	3
7	3	2	4	1	4						
8	4	2	1	3	1						
9	1	3	1	4	4						
10	2	3	4	2	1						

按照因素顺序上列, 位级对号入座的方法, 将 A , B , C 三个因素依次放在1, 2, 3列上。第4, 5两列不安排因素, 因