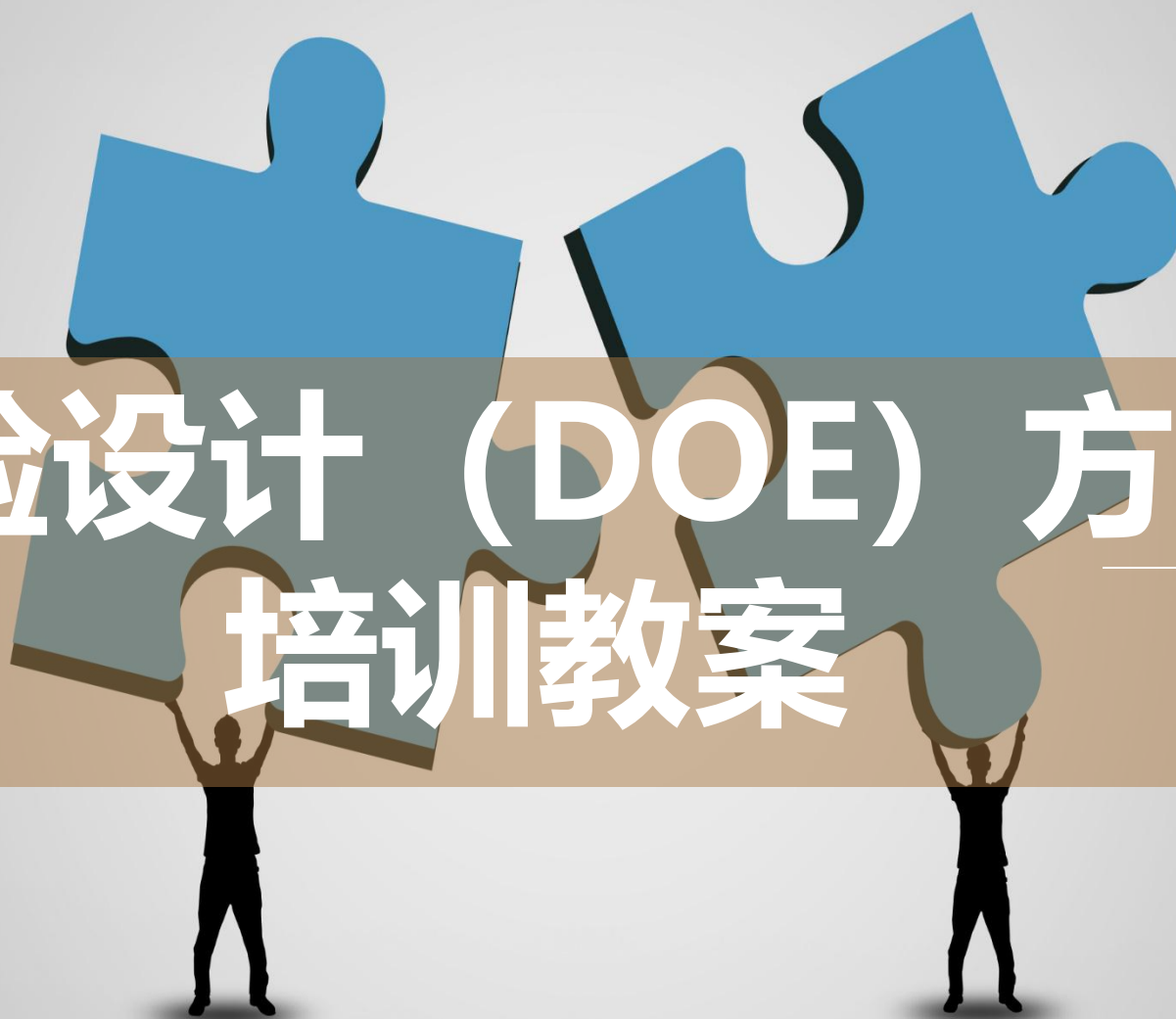




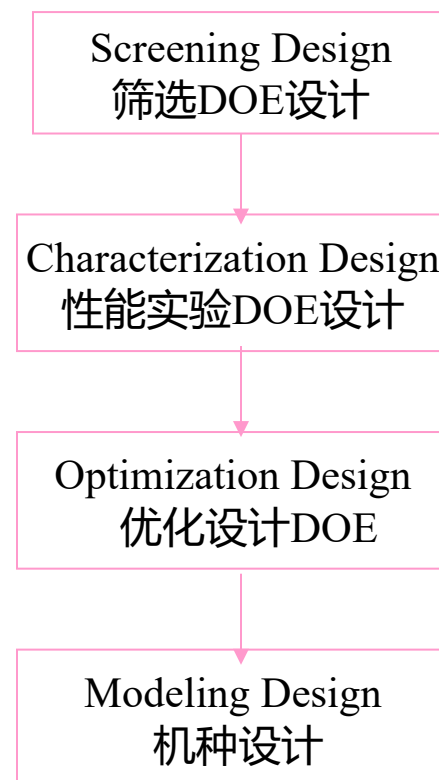
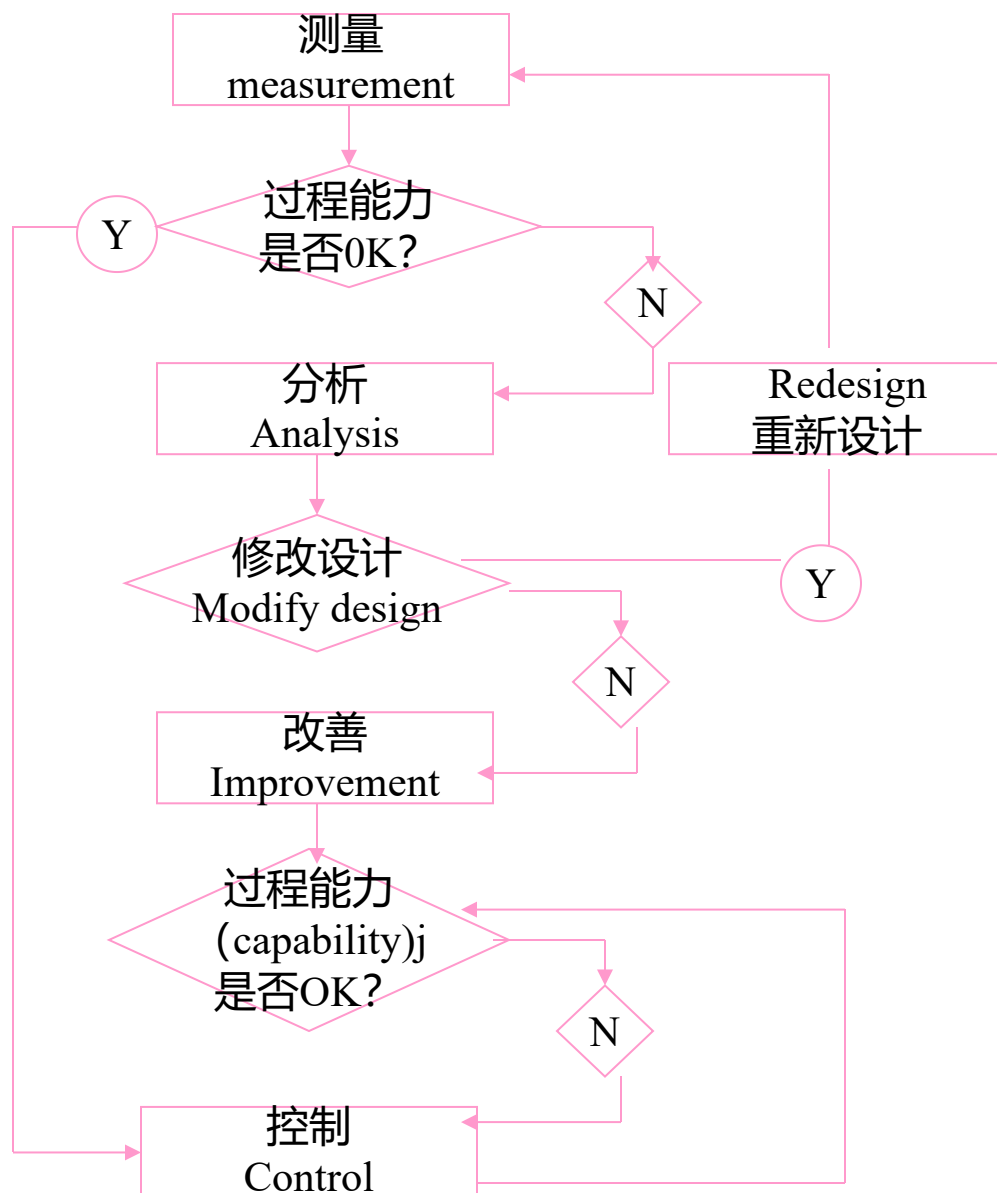
实验设计 (DOE) 方法 培训教案

第一节 6Sigma品质改善策略

- ④ 一、实验设计 (DOE) 流程
- ④ 二、实验设计 (DOE) 分析
- ④ 三、实验设计 (DOE) 意义
- ④ 四、实验设计 (DOE) 计划

实验设计 (DOE) 流程

- 实验设计 (DOE) 是6Sigma品质改善的利器
- 通过 “M-A-I-C”循环可达到品质改善之目的，图（一）表示它们的关系。



实验设计 (DOE) 分析

- 不同程度或分辨率DOE设计，对应不同产品设计要素。表（一）是DOE实验设计分级表。

ITEM	程度或分辨率等级	应用特点
Screening Designs 筛选 DOE设计	III级	1、因子数较多 2、两个水平
Characterization Designs 性能实验DOE	IV级V级	1、因子数较少 2、两个或两个以上水平
Optimization Dressings优 化设计DOE	V或最高级	1、两个或三个因子 2、用精确的数学方法进行 处理

表一

实验设计 (DOE) 的意义

- 1、优化设计的必要性

- 1) 优化因子水平
- 2) 用于建立与原材料或部件制造有关的工艺，使其在规定的范围内。
- 3) 使设计的产品能够稳定或者牢靠运行于实际的环境中
- 4) 减少总的工程设计周期
- 5) 减少ECN的数量
- 6) 改善产品性能、质量及成本，最大限度地满足客户要求。
- 7) 改善产品的可制造性。
- 8) 减少实际制造工艺中的问题。
- 9) 减少产品的检查和性能测试强度

2、实验设计的作用

表二

基础研究 (Basic Research)	1、发现相关问题 2、明了技术要点
产品设计 (Product Design)	1、灵敏度分析 2、建立可靠性的公差 3、特征组件 4、特征结构 5、包括低成本组件 6、包括低等级物料 7、最小的变化 8、性能的改善
工艺研发 (Process Development)	1、变量研究 2、变量的优化设置 3、建立可靠公差

工艺研发 (Process Development)	4、发现降低成本的解决办法 5、养活变化 6、改善过程中心 7、减少生产周期 8、降低坏品率 9、改善产品的可靠性
基础研究 (Basic Research)	1、发明相关问题 2、明了技术问题
工艺改善 (Process Improvement)	1、解决问题 2、明了变量及过程之关系 3、进行过程能力研究 4、设备及方法比较
计量 (Metrology)	1、进行测量系统研究 2、判定误差的主要来源 3、最小测量误差

四、实验设计 (DOE) 计划

- 1、实验设计中需考虑的60个因素

- 1) 实验中包含的变量数或因子数
- 2) 判定误差引起的结果
- 3) 工序的稳定状况
- 4) 潜在因素影响程度
- 5) 非线性影响的可能性有多大
- 6) 均方差
- 7) 正态分布
- 8) 趋势、变动、周期对变量的影响
- 9) 相关平均值
- 10) 错误数据的影响

- 11) 错误数据的影响
- 12) 需要重复实验的次数
- 13) 样本标记和可判断性
- 14) 测量的精度
- 15) 抽样的成本
- 16) 测试成本
- 17) 劳动力成本
- 18) 实验及其方向性影响
- 19) 抽样偏差
- 20) 混淆及其影响
- 21) 背景变量及其影响
- 22) 人为偏差 (有意或无意)
- 23) 实验中所含仪器设备的影响
- 24) 重复性
- 25) 数据收集
- 26) 控制要求保持其有效性
- 27) 研究问题的知识
- 28) 主要因子影响程度比较
- 29) 实验误差
- 30) 测量影响
- 31) 测试灵敏度
- 32) 定义平均值
- 33) 定义方差值
- 34) 过程控制
- 35) 环境的影响

36)材料的影响

37)机器设备的影响

38)测试设备的影响

39)领导者的支持

40)制造者支持

41)工程部门的支持

42)优化后的合格率

43)配合度

44)测量精密

45)随机抽样

46)块的区分

47)决定区分程度

48)假设构造

49) 测量方法

50) 管理者支持

51) 将实验结果图表化

52) 确定主要因子

53) 计算出各因子影响大小

54) 作出相关因子影响图

55) 连续样本

56) 从样本收集到样本测量的时间

57) 误差复合影响

58) 因子量化及分层表示

59) 样本复杂性分析

60) 因变量及其影响

2、DOE实验计划

在进行DOE实验之前，要充分考虑 $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 因变量Y和自变量x的关系。确定实验因子的人数，据此可确定实验因子表进行实验，一般实验计划包括如下内容。

- 1) 确定实验目的：要有一个明确的实验目的，以此才能达到需要的目标。
- 2) 确定实验因子：要分析影响因变量变化的因子个数，进行全因子的DOE实验。
- 3) 确定实验因子水平：不同的实验因子水平会影响实验结果。
- 4) 选定DOE实验表格：根据因子数和因子水平确定DOE实验表格。
- 5) 安排实验时间：根据DOE进行次数确定实验时间。考虑过程的连续性，尽量安排在同一阶段进行实验为好。

- 6) 分析实验结果：将实验结果进行方差分析，确定实验因子的重要性及各因子对实验结果的影响程度。
- 7) 重复性实验：将重要因子或影响实验的主要因素进行评估，重新进行DOE实验，以确定其实验的真实性。
- 8) 作出结论：对实验结果进行分析后作出结论。

第二节 实验设计 (DOE) 方法

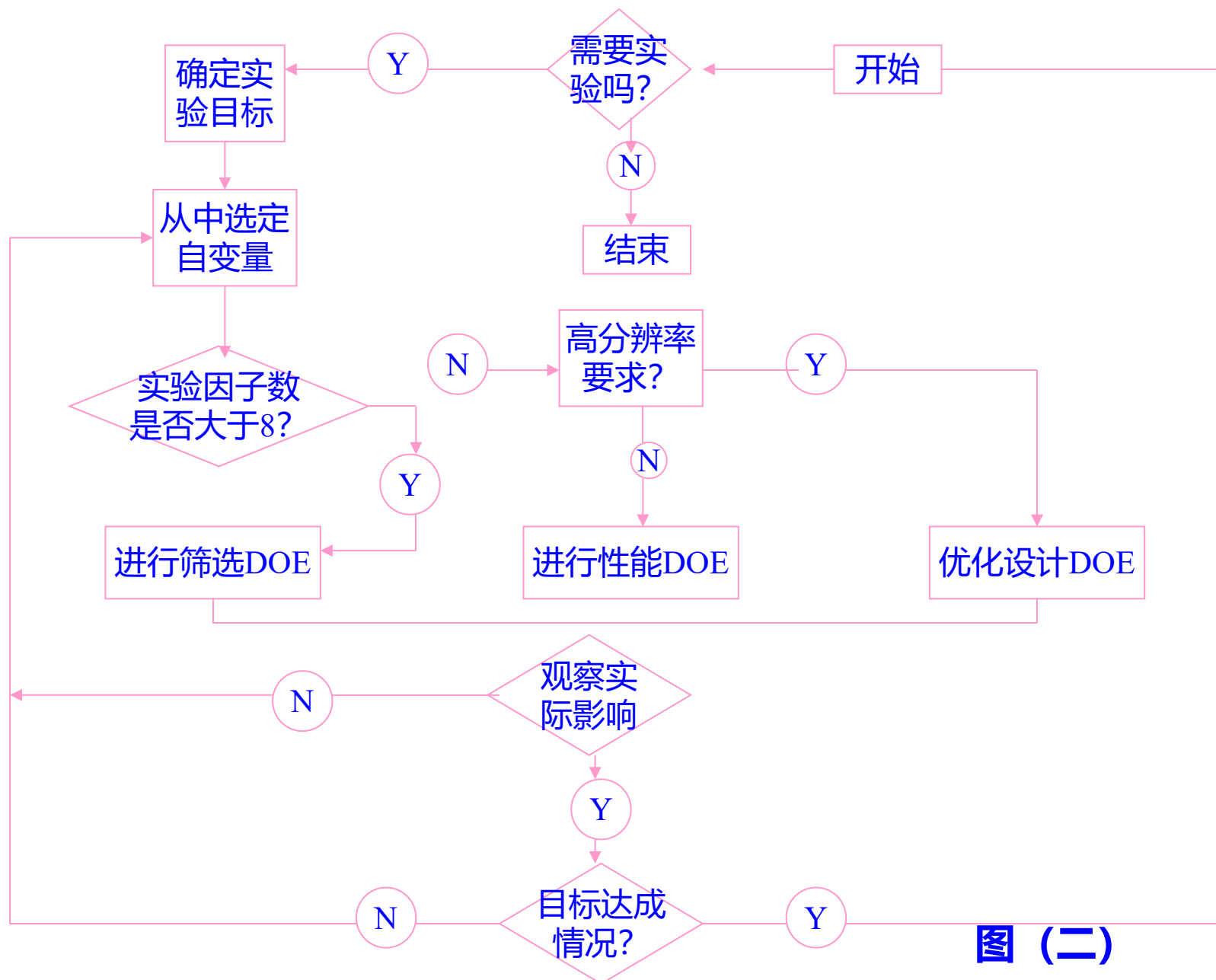
- ④ 根据具体要求选择DOE实验方法
- ④ 实验设计的基本策略
- ④ 筛选实验设计方法
- ④ 全因子和分部DOE

根据具体要求选择DOE实验方法

- DOE实验方法流程如图(二)所示

实验设计的基本策略

- 1、确定问题
- 为解决何种问题，需要进行的何种实验，应做到心中有数，有的放矢。
- 2、建立实验目标
- 实验要达到何种目的，要达到怎样的指标，应从实际出发，根据当时当地的实情，确定实验目标，不要夸大其辞，矫揉造作。



图（二）

- 3、选择因变量Y
- 实验中因子随自变量X的变化而变化的变量叫因变量。因变量和自变量的关系为 $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。
- 4、选择自变量x
- 实验中因子不随因变量变化而变化的变量叫自变量。也叫受控制变量。
- 5、选择因子水平
- 不同的因子水平必然会引起不同的实验结果，根据实验要求，确定因子水平，也是实验成功与否的关键一环。这不仅要有丰富的实际经验，而且要有把握问题本质的能力。
- 6、收集数据
- 实验要用数据说话，一切实验数据从实验中来，切忌弄虚作假，DOE实验是科学，来不得半点虚假的东西，否则就会失去实验的本来意义。

- 7、分析数据
- 数据为实验提供了强有力的佐证，说明了什么问题，是一清二楚的，因此需认真分析数据，进行科学运算，以找出实验本质的可以代表实验结果的东西。
- 8、作出结论
- 有实验数据，给问题下一个令人信服而又真实的结论，找出问题的症结所在。
- 9、达到目的
- 通过实验解决品质中存在的问题，使过程能力得到提升，使我们又向6 σ 靠近了一步。

筛选实验设计方法

1. 选择因变量Y（实验结果）
2. 选择实验因子且确信是最重要的因子
3. 确定因子水平——只允许有两个水平
4. 根据因子水平数量确定实验表格
5. 对每一个实验，根据实验表格按一个水平进行，根据重复运行的结果计算出平均值（Y）
6. 按标准计算软件或EXCEL进行计算

7. 作出实验因子的影响及关系图
8. 进行方差分析, 用以决定实验因子是否重要, 用P值进行衡量 ($P < 0.05$)
9. 对方差分析结果进行评价, 以确定因子对实验的影响程度
10. 选择重要因子(通常不超过4个)而进行全因子DOE实验, 以确定实验的最终结果

全因子和分部DOE

1. 确定问题
2. 建立实验目标
3. 选拔因变量和自变量关系 $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
4. 选择因子水平
5. 选择实验表格,全因子DOE每一个因子或水平都要进行实验,分部DOE相对于全因子DOE来说有少的实验次数,因为分部DOE可对部分因子进行组合
6. 收集数据并筛选DOE方法进行方差分析计算
7. 分析数据及实验结果
8. 分析实验误差对实验结果的影响
9. 作出结论
10. 达到实验目标

第三节：正交试验设计

- 正交试验设计法是研究与处理多因素试验的一种科学方法。它在实践经验与理论认识的基础上，利用规范化的表格——正交表，科学地挑选试验条件，合理安排试验。其优点在于能从很多试验条件中选出代表性强的少数次条件，并能通过对少数次试验条件的分析，找出较好的生产条件即最优或较优的试验方案。
- 正交试验设计法最早由日本质量管理专家田口玄一提出标准型（田口型）正交试验法。
- 针对田口型正交试验设计法计算复查的问题（方差分析），中国数学家张里干教授发明的中国型正交试验设计法，由于应用计算简便的极差分析法，非常适合工业企业和生产现场应用。

一、名词介绍

- 1、试验因素

试验因素指当试验条件变化，试验考核指标也发生变化时，影响考核指标取值的量称为试验因素（因子），一般记为A，B，C等。

试验因素可以理解为试验过程中的自变量，如：化学试验中的温度、压力、时间、催化剂用量；机械加工中的切削速度、吃刀量、刀具的几何参数等。从广义上讲，试验因素可理解为若干变量间的某种确定关系，如原料的配方比例、供货单位、工艺流程等也都可以看作为一种广义因素。

因素有可能按数量表示，如温度、时间、压力等称为定量描述的因素。但也有不能用数量表示而只能定性描述的，如材料的品种、产品的型号、工艺流程的类别等，称为定性描述的因素。在试验过程中有些因素所处的状态是可以控制或调节的，如加热温度、溶化温度、切削速度等，这样的因素称为可控因素。反之，别外一些因素所处的状态是不能控制或调节的，如未装空调的生产环境的温度、湿度等，称为不可控因素或干扰因素。在正交试验设计应用过程中，如无特殊规定，因素一般是指可控因素。在试验过程中只考察一个因素对试验结果（考核指标）影响的试验，称为单因素试验。若同时考察两个以上因素，则称为多因素试验。单因素试验设计一般可应用优选法进行，而多因素试验设计必须应用正交试验设计法解决。

2、因素的位级

试验因素的位级（水平）是指试验因素所处的状态。一般试验方案是由若干个试验因素所组成的若干组合，因素的几种状态，就称为有几个位级（水平）。

例如，在化学试验中，温度、时间、压力这些因素允许在一定范围内变化，但在一个试验方案中，温度、时间、压力等因素总是固定在几个状态中变化。例如：温度可以是 100°C ， 120°C ， 150°C 等；时间可以是1h，1.5h，2h等；压力可以是1MPa，1.5MPa，2MPa等。这称为试验中因素的三个位级（水平）。

3、考核指标

考核指标是在试验设计中，根据试验目的而选定的用来衡量试验效果的量值（指标）。

考核指标可以是定量的，也可以是定性的。定量指标如硬度、强度、寿命、成本、几何尺寸、各种特性等。定量指标根据试验结果的预期要求，又可分为望目值、望小值、望大值三种类型。定性指标不是按数而是按质区分，如质量的好与坏，天气的晴与阴，指标可以用加权的方法量化为不同等级。

考核指标可以是一个，也可以是多个。前者称为单指标试验设计，后者称为多指标试验设计。在多指标试验设计中，一般根据指标的重要程度予以加权，确定为一个综合性考核指标，以便进行计算。

4、完全因素位级组合

完全因素位级组合指参与试验的全部因素与全部位级相互之间的全部组合次数，即全部的试验次数。

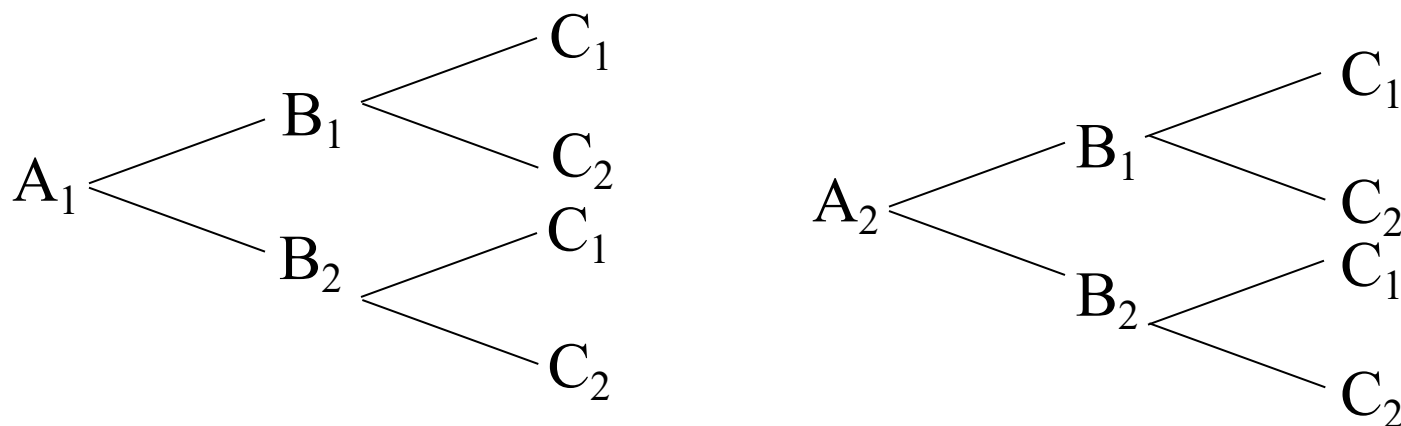


图5—1 三因素两位组的完全因素位级组合

若试验中共有 i 个因素，每个因素各有 j 个位级，则其完全因素位级组合数（全部试验的次数）应有 $N=j^i$ 次。如，对于一个具有3个因素（A, B, C），每个因素各有两个位级（ $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ ），其完全因素位级组合数为 $N=2^3=8$ 次，其实际组合情况如图5—1所示。

随着因素位级数的增加，完全因素位级组合数也随之增加：

$3^4=81$	$2^7=128$	$4^5=1024$
$2^{15}=33768$	$2^{31}=2146983648$	

.....

理论上认为只有经过全部试验（完全因素位级组合）后才能准确找出最佳的因素位级组合（最佳的试验方案）。但是，当因素位级数比较多时，实现完全因素位级组合又是不可能的。

5、部分因素位级组合

部分因素位级组合是从全部因素位级组合中抽取一部分因素位级组合构成试验方案，实际上是一种抽样。

(1) 单因素轮换法

在正交试验设计未发明之前，人们采用单因素轮换法实现部分因素位级组合的抽样。单因素轮换法是在若干试验因素中逐个因素轮换去考虑哪一位级试验结果好，考虑一个因素时其他因素处于确定的位级。如对一个三因素三位级的试验，按图5—2的程度试验。先将A，B因素确定在 A_1 ， B_1 位级，考虑 C_1 、 C_2 和 C_3 哪个位级好，试验结果 C_2 好。然后将A，C因素确定在 A_1 ， C_2 位级，考虑 B_1 、 B_2 和 B_3 哪个位级好，试验结果 B_3 好。最后将B，C因素确定在 B_3 ， C_2 位级，考虑 A_1 、 A_2 和 A_3 。

哪个位级好，试验结果 A_2 好。于是，下结论 $A_2B_3C_2$ 是最佳试验方案。显然，单因素轮换法是不合理、不科学的抽样。因为确定 C_2 位级好的前提是与 A_1, B_1 组合，但试验方案是 C_2 位级与 A_2B_3 组合，与前提条件不符。

采用单因素轮换法时，因不比位级越多，结论的可信度越差，而且提供的信息不够丰富，且若不进行重复试验也给不出误差估计。

(2) 正交试验设计法

正交试验设计法由于应用正交表安排试验方案，正交表的正交性保证了在一定置信度下的统计抽样。因此，正交试验设计是科学的、合理的部分因素位级组合。

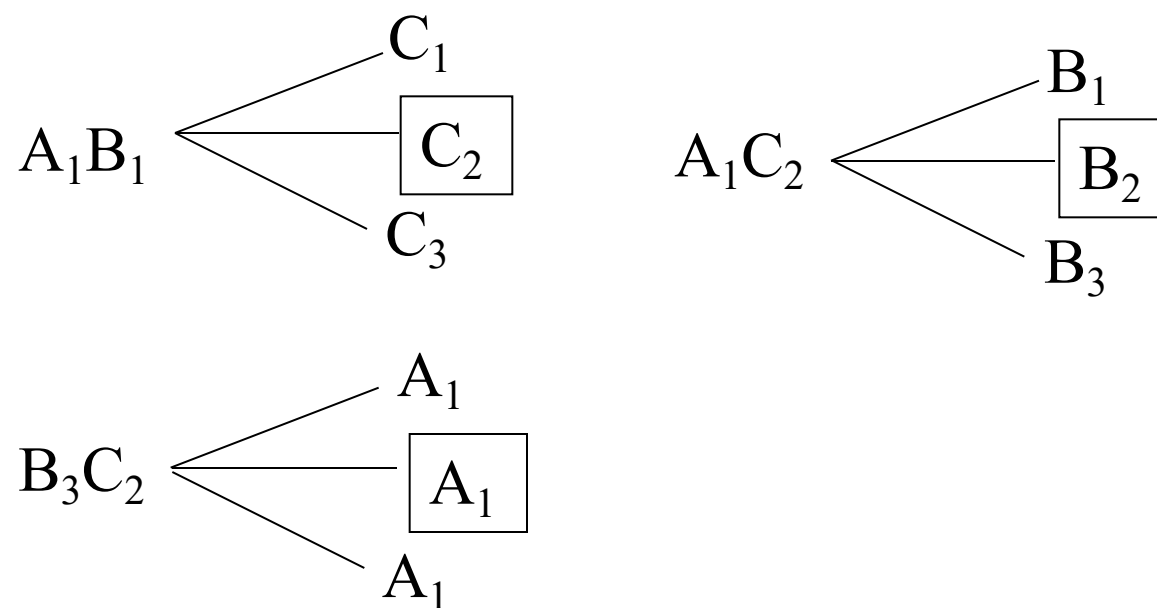


图5—2 单因素轮换法应用程度

二、正交表

1、正交表的符号

正交表是正交试验设计法的基本工具。它是运用组合数学理论在正交拉丁方的基础上构造的一种规格化的表格正交表的符号是：

$$L_n(j^i)$$

其中：L——正交表的代号；

n——正交表的行数（试验次数、试验方案数）；

j——正交表中的数码（因素的位级数）；

i——正交表的列数（试验因素的个数）；

$N=j^i$ ——全部试验次数（完全因素位级组合数）。

2、正交表的结构

应用正交试验设计法，必须了解正交集，本书给出了常用的24种正交表。现在通过对最常用的两种正交表 $L_8(2^7)$ （表5—1）和 $L_9(3^4)$ （表5—2），介绍正交表的结构。

表5—1 正交表 $L_8 (2^7)$

列号 试验号	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	3	2	1	2	1	2	2
5	2	1	2	1	1	2	2
6	4	1	1	1	2	2	1
7	3	2	1	1	1	1	1
8	2	2	2	1	2	1	2

表5—2 正交表 $L_9 (3^4)$

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

(1) 正交表 $L_8(2^7)$

该表为可容纳7个因素各2个位级，具有8个试验方案的正交表，其特点如下：

1具有8个横行，表示8个试验方案的因素位级组合；

2具有7个直列，表示最多可容纳7个试验因素；

3正交表中横行与直列交点的数码，表示该列因素的位级。

正交表 $L_8(2^7)$ 中的数码，表现为每个因素的每个位级各出现4次，即每个数码出现的机会是完全均等的。任意两列其横向组合的8个数字对 $(1, 1)$, $(1, 2)$, $(2, 1)$, $(2, 2)$ 恰好各出现2次，即任意两列间位级的搭配是均衡的。

(2) 正交表 $L_9(3^4)$

该表为可容纳4个因素各3个位级，具有9个试验方案的正交表。其特点如下：

1具有9个横行，表示9个试验方案的因素位级组合；

2具有4个直列，表示最多可容纳4个试验因素；

3正交表横行与直列交点的数码，表示该列因素的位级。

正交表 $L_9(3^4)$ 中的数码，表现为每个因素的每个位级各出现3次，即每个数码出现的机会是完全均等的。任意两列其横向组合的9个数字对中， $(1, 1)$ ， $(1, 2)$ ， $(1, 3)$ ， $(2, 1)$ ， $(2, 2)$ ， $(2, 3)$ ， $(3, 1)$ ， $(3, 2)$ 和 $(3, 3)$ 各出现1次，即任意两列间位级的搭配是均衡的。

三、正交试验设计法的基本应用程序

正交试验设计法有两大类型，即国际标准型（田口型）和中国型。这里主要介绍中国型正交试验设计的应用。

- 明确试验目的，确定考核指标。
- 挑因素、选位级，确定因素位级表。
- 选择适宜的正交表。

注：中国型正交试验设计根据因素位级数量，直接选用正交表，因素可以填满直列，也可以不填满直列。田口型正交试验设计法还需要考虑因素之间的交互作用，进行表头设计，同时因素不能填满直列，最少要空出一个直列以便进行方差计算。

——因素位级正交表，确定试验方案，并按试验方案进行试验。

——试验结果分析（析因分析）。

注：中国型正交试验法对试验结果采用极差分析法进行分析。田口型正交试验设计法采用方差分析法进行分析。

极差分析法的应用步骤：

(1) 看一看，可靠又方便：

直接从诸试验方案的试验结果中找出最好的试验结果。

(2) 算一算，有效又简单：

计算各因素、各位级的贡献系数 K ，

注：贡献系数为每位级参加试验各次考核结果的累加值。

计算各因素贡献系数的极差 R 。

注：极差为该因素各位级贡献系数中最大值与最小值之差。

将诸因素按极差的大小，由大向小依次排列。

注：极差大小反映该因素的重要度。

根据各因素各位级贡献系数值确定好位级，展望好的试验条件。

注：好位级的选择：

望大值质量特性，贡献系数大好；

望小值质量特性，贡献系数小好；

望目值质量特性，贡献系数的平均值接近目标值好。

——进行调优试验，必要时反复调优，逼近最优试验方案。

调优试验时，选择因素的原则：

- 1、重要因素有苗头处加密；
- 2、次要因素按技术、经济两方面综合确定；
- 3、有疑问的因素重复考虑；
- 4、意外发现补充考虑；
- 5、第一轮试验结果若与期望目标相差太远或试验结果

不理想，是由于因素位级选择不当，应重新考虑选择因素位级。

- 确定最优方案并进行生产验证上；
- 标准化。

案例

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, 4-二硝基氯化苯（以下简称氯化苯）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，达到提高知产的目的。

考核指标：产率（%）与外观（颜色）。

（一）制定因素位级有

影响试验结果的在素是多种多样的。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 $A_1=200\text{mL}$, 第二位级 $A_2=0\text{mL}$ (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 $B_1=\text{理论量的2倍}$, 第二位级 $B_2=\text{理论量的1.2倍}$ 。

(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 $C_1=\text{回流温度}$, 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°C 跟它比较。)

因素D——反应时间

第一位级 $D_1=4h$ ，第二位级 $D_2=2h$

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，综合成因素位级表（见表5-3）。

表5-3 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	200mL	理论量的2倍	回流	4h	精品	中快
位级2	0mL	理论量的1.2倍	60℃	2h	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（反应速度），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（200ml），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（0ml），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5-4 试验计划表

因素 列号 试验号	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(200mL)	1(2倍)	1(回流)	1(2h)	2(粗品)	1(中块)
2	2(0mL)	1(2倍)	2(60°C)	2(2h)	1(精品)	1(中块)
3	1(200mL)	2(1.2倍)	2(60°C)	2(2h)	2(粗品)	2(快)
4	2(0mL)	2(1.2倍)	1(回流)	2(2h)	1(精品)	2(快)
5	1(200mL)	1(2倍)	2(60°C)	1(4h)	1(精品)	2(快)
6	2(0mL)	1(2倍)	1(回流)	1(4h)	2(粗品)	2(快)
7	1(200mL)	2(1.2倍)	1(回流)	1(4h)	1(精品)	1(中块)
8	2(0mL)	2(1.2倍)	2(60°C)	1(4h)	2(粗品)	1(中块)

3、列出试验条件：表5-4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：200mL；

水合肼用量：理论量的2倍

反应温度：回流温度；

反应时间：2h；

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：200mL；

水合肼用量：理论量的1.2倍；

反应温度：60℃；

反应时间：2h；

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5-5。怎样充分利用这八个试验的结果呢？

1、直接看，可靠又方便

直接比较八个试验的产率，容易看出：

表5-5 试验结果分析

试验计划							试验结果	
	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	产率 (%)	颜色
	1	2	3	4	5	6		
1	1(200mL)	1(2倍)	1(回流)	2(2h)	2(粗品)	1(中块)	56	合格
2	2(0mL)	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(4h)	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		
II=位级2四 次产率之和	210	181	224	218	212	220		
极差R=I、II 中, 大数-小 数	5	63	23	11	1	15		

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，有效又简单

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？

如表5-5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（A₁）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

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

其他五列的计算I、II的方法，跟第1列相同。

为了检查计算是否正，对每列算得的I和II进行验证：

$I + II = 425$ (即8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:

第1列乙醇用量的 $R = 215 - 210 = 5$

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）

A₂和用粗品水合肼E₂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，按照极差R的大小，把诸因素按极差从大到小排列确定出主次因素。

注：极差分析法的分析过程比方差分析法粗，后面对本案例的方差分析结果可以看出在诸因素中只有B因素（水合肼用量）对试验结果有显著影响。

表5-6将选用的位级排列，帮助大家看得更清楚。

表 5-6

因素	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
位级	B1	C2	F2	D2	A2	E2
数值	理论量的2倍	60℃	快速	2h	0mL(不用)	粗品

(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。

但八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

已做过的八个条件中时)，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 $A_2B_1C_2D_2E_2F_2$ ），还只是一种可能好的配合。

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) 调优试验 (第二轮试验, 撒小网)

在第一轮试验的基础上, 为进一步提高产出率 (收率) 和弄清影响产品的颜色 (合格品率) 的原因, 决定按调优原则进行第二轮试验 (习惯上称其为撒小网)。

第二轮正交试验设计:

1、挑因素、选位级, 制定因素位级表

根据第一轮试验结果的分析 and 调优试验原则, 第二轮试验决定挑选下面三个要考察的因素及相应的位级。

(1) 重要因素有苗头处加密

因素A——粗品水合肼用量。

位级1: A_1 = 理论用量的1.7倍。

位级2: A_2 = 理论用量的2.3倍。

水合肼用量是每一轮试验中的重要因素，应该详细考察。在第一轮试验中好位级2倍用量的附近加密，选择1.7倍和2.3倍两个新用量继续试验。

至于水合肼的品种，在第一轮试验结果的极差分析中可知，它们的极差很小。这表明粗品和精品基本上没有差别。本着次要因素按技术、经济两方面综合考虑的原则，决定第二轮试验一律采用粗品。

注：水合肼的精品又贵又少，北京化工厂原工艺采用的精品是对采购的粗品进行提纯加工所得。现改用粗品后，撤消了提纯车间、减少了环境污染和对工人的身体损伤，降低了生产成本，是一举多得的善举。

(2) 有疑问的因素重复考虑

因素B——反应时间。

位级1: $B_1=2h$,

位级2: $B_2=4h$,

在第一轮试验结果的分析中可知, 2h的反应, 其产出率优于4h的反应, 这与一般的专业理论似乎不相符合, 而且, 生产第一线的工程技术人员对2h的反应时间优于4h反应时间很感兴趣, 为慎重起见, 再一次比较2h和4h这两个位级。

(3) 意外发现补充考虑

因素C——加料速度。

位级1: $C_1=快速加料$ 。

位级2: $C_2=慢速加料$ 。

在追查出现紫色产品的原因的验证试验中。意外发现加料速度可能是影响产品颜色的重要原因。因此，在第二轮试验中要重点考察这一意外发现。

综合以上，得因素位级表5-7：

表 5-7

因素	水合肼用量	时间	加料速度
位级1	1.7倍	2h	快
位级2	2.3倍	4h	慢

至于上批试验的其他因素，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 °C，虽然比回流好，但60 °C难于控制，决定用60 °C-70 °C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“精制主料氯化苯”这道危险工序，而一律采用工业氯化苯。

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，不再描述。现将试验计划与试验结果列于表5-8。

表 5-8

试验计划				试验结果	
因素 列号 试验号	水合肼用量A	时间B	加料速度C	产率 %	颜色
	1	2	3		
1	1(1.7倍)	1(2h)	1(快)	62	不合格
2	2(2.3倍)	1	2(慢)	86	合 格
3	1	2(4h)	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，“快速加速”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2h；

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	2h

“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, 4-二硝基氯化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2h，温度掌握在60 °C-70 °C之间，采用慢速加料搅拌。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，砍掉“精制主料氯代苯”的危险工序。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。

(六) 标准化

将优化的工艺条件纳入企业工艺文件。

(七) 该案例的方差分析

表5-9为试验结果分析及平方和计算表，表5-10为正交试验方差分析表。从计算结果可判断，因素B对试验结果具有非常显著的影响，而其他因素的影响均不具有显著性。

表 5-9 试验结果分析及平方和计算

因素(列) 试验号(行)	试验方案							试验结果	
	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	F搅拌速度	空项	产率 %	颜色
1	1(200)	1(2倍)	1(回流)	2(2h)	2(粗品)	1(中快)	2	56	合格
2	2(0)	1	2(60°C)	2	1(精品)	1	1	65	紫色
3	1	2(1\2倍)	2	2	2	2(快速)	1	54	合格
4	2	2	1	2	1	2	2	43	合格
5	1	1	2	1(4h)	1	2	2	63	合格
6	2	1	1	1	2	2	1	60	合格
7	1	2	1	1	1	1	1	42	紫色

续表

因素(列) 试验号(行)	试验方案							试验结果	
	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	F搅拌速度	空项	产率 %	颜色
8	2	2	2	1	2	1	2	42	合格
K ₁	215	244	210	207	213	205	221	$\sum y_i = K_1 = K_2 = 425$ $\sum y_i^2 = 23223$ $P = (\sum y_i)^2 / 8 = 22578.125$ $S_j = K_1^2 + K_2^2 / 4 - P$	
K ₂	210	181	224	218	212	220	204		
R	5	63	23	11	1	15	17		
S _j	3.125	496.125	66.125	15.125	0.125	28.125	36.125		

表 5-10 正交试验方差分析表

方差来源	平方和Sj	自由度f	均方 $\bar{s}$	F值	临界值
因素A	3.125		3.125	0.189	$F_{0.01}=16.3$ $F_{0.05}=6.61$ $F_{0.10}=4.06$
因素B	496.125		496.125	30.025**	
因素C	66.125		66.125	4.002	
因素D	15.125		15.125	0.92	
因素E	0.125		0.125	0.0076	
因素F	28.125		28.125	1.702	
空项e	36.125		36.125		
小项和e'	82.625	5	16.125		
总和	644.875				

结论：因素B对试验结果具有非常显著的影响。

四、正交试验设计法的广泛应用

正交试验设计法在诸多方面具有广泛的应用范围，以下通过几个实例介绍其他各方面的应用案例，为简便介绍只出课题、正交表及极差分析的计算，除特殊情况说明外，其他步骤请读者参照“正交试验设计法的基本应用程序”。

1、晶体退火工艺的改进

(1) 课题的提出

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，其他指标都已合格，只是应力未能低于7kPa。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（kPa）

（2）因素位级表（表5—11）

表 5—11

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/h	600°C	6h	1.5A
位级2	50°C/h	450°C	2h	1.7A
位级3	100°C/h	500°C	4h	15°C/h

关于因素位级的说明：

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”和一个快速升漫“每小时100°C”；关于恒温温度B，原工艺的恒温温度600°C是从国外资料中借鉴的，现在增添两个较低的温度500°C与450°C，

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°C的等速温度；三个降温的位级，都是下降到250°C后断电而自然降温。

(3) 正交表及试验结果分析

表5-12

因素 列号 试验号	升温速度A (°C /h)	恒温温度B (°C)	恒温时间C (h)	降温速度D	应力 (kPa)
	1	2	3	4	
1	1(30)	1(600)	3(4)	2(1.7A)	6
2	2(50)	1	1(6)	1(1.5A)	7
3	3(100)	1	2(2)	3(15 °C/ h)	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	13
I=位级1三次应力之和	15	28	15	28	I+II+III =63.5 kPa=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,最大数 最小数	21.5	12.5	14	11.5	

(4) 第二轮试验（撒小网）

降低应力尚有潜力，决定进行第二轮调优试验。
因素位级表见表5-13，试验结果分析见表5-14。

表 5—13

因 素	恒温温度	恒温时间	降温速度
位 级 1	450 °C	3h	15 °C/h
位 级 2	400 °C	5h	25 °C/h

表 5—14

因素 列号 试验号	恒温温度	恒温时间	等速降温	应力 (kPa)
	1	2	3	
1	1(450 °C)	1(3h)	1(15 °C/h)	0
2	2(400 °C)	1	2(25 °C/h)	0.2
3	1	2(5h)	2	0.4
4	2	2	1	0
I	0.4	0.2	0	I+II=0.6
II	0.2	0.4	0.6	
R	0.2	0.2	0.3	

通过两轮正交试验设计取得的新工艺。基本上消除了晶体的应力。

五、复合因素

有时候，需要考察的因素比较多，但因试验次数受到限制，正交表的列数不够用。这时，可将若干种因素合并成一种因素进行考察。

表 5—23 因素位级表

因素	A+B+C	A:B:C	熔化带直径	炉缸直径 (mm)	仪器和班次	
位级1	100	1:3:2	φ800	φ540	甲	早
位级2	200	1:1:1	φ770	φ510	乙	中
位级3	150	2:1:2	φ820	φ570	丙	晚

举例如下：

①配比

[例] 三种成分的配比A:B:C构成一种溶液，不同的配比成为溶液的不同位级。像酸洗、去油去锈和漆等项目，要求控制的不是溶液的绝对用量，而是它的成分配比。

②总量与配方

[例] 有的项目，不仅要求A，B，C的相对比值，还在确定它们的绝对用量。这时可把三种成分的总量 $A+B+C$ 作为一种考察的因素。由每号试验的总量和比值联合，解出每种成分的用量，即解出配方。

③直接联合

[例] 冲天炉化铁试验，一炉接着一炉进行。为了时间不要

六、活动位级的应用

拖得太长，常常把熔化带直径和炉缸直径两种因素合并成一种炉型因素来考察。如上表中仪器和班次也是由两种因素合并成一种因素。

这类由多种因素合并成的因素，叫做复合因素。

有的试验，根据过去的经验与认识，安排方案时已经知道在某些因素之间有一定程度的依赖关系。一种因素用量的选取，需随另外因素的用量而定。这时，可采用活动位级的方法。

[例] 北就印染厂生产白的确良，用到一种增白剂。为了提高该产品的质量，用正交表 $L_8(2^7)$ 作了七因素两位级的试验。其中有两个因素：一个是反应时间，安排了7h和9h两个位级；另一个是在反应进行中，通过二氧化碳 CO_2 的时间。显然，该

因素的取值和反应时间的取值有着密切的关系。它最多和反应时间相同，而不能超过它。现在要考察在反应进行中、应全时通入二氧化碳呢，还是不用？于是，对于通二氧化碳时间这个因素安排了随着反应时间跑的活动位级。下面先列出该试验的因素位级表，然后在5-25中列出按活动位级排出的试验计划。

表 5—24 因素位级表

因素	硼酸量	脱水量	反应时间	邻氨基 用量	二甲苯 温度	苹果酸用 量	通二氧化碳时 间
位级1	1.5g	7mL	7h	45g	70 °C	25g	0.8×反应时间
位级2	1.7g	8.2mL	9h	50g	60 °C	26g	1×反应时间

试验计划:

表 5—25 试验计划表

	硼酸	脱水	反应时间	邻氨基	温度	苹果酸	通二氧化碳 时 间
	1	2	3	4	5	6	7
1	1(1.5)	1(7)	1(7)	2(50)	2(60)	1(29)	2(7)
2	2(1.7)	1	2(9)	2	1(70)	1	1(7.2)
3	1	2(8.2)	2(9)	2	2	2(26)	1(7.2)
4	2	2	1(7)	2	1	2	2(7)
5	1	1	2(9)	1(45)	1	2	2(9)
6	2	1	1(7)	1	2	2	1(5.6)
7	1	2	1(7)	1	1	1	1(5.6)
8	2	2	2(9)	1	2	1	2(9)

我们注意到，在八个试验中，第2，3，6和7号试验，通二氧化碳时间这个因素虽然都是位级1，但是，它们的取值是不同的。在2，3号试验中，由于反应时间为9h，通二氧化碳为 $9 \times 0.8 = 7.2\text{h}$ ；在6，7号试验中，由于反应时间为7h，通二氧化碳为 $7 \times 0.8 = 5.6\text{h}$ 。另外，对应于该因素的位级2的四个试验，情形也是这样。这就是说，对于通二氧化碳时间这个因素，它的同一位级不是采用固定的用量。它的用量是随着第3列因素的不同位级而活动的，所以叫活动位级。

又如，镇江市有线电厂的铰链镀铬试验，硫酸量估计为铬酸用量的1.1%左右。但认识不是很清楚，于是把硫酸B排了跟着铬酸A跑的三个活动位级：

$$B_1 = 0.007A, B_2 = 0.011A, B_3 = 0.015A$$

同样，氟硅酸C猜想是硫酸量的30%左右，排了跟着硫酸B跑的三个活动位级：

$$C1=0.5B, C2=0.3B, C3=0 \times B=0$$

因素和位级表如下：

表 5—26 因素位级表

因素	铬酸(g/L)A	硫酸(g/L)B	氟硅酸(g/L)C	温度(°C)D
位级1	250	A的0.7%	B的50%	35
位级2	300	A的1.1%	B的30%	55
位级3	350	A的1.5%	0	45

用正交表 $L_9(3^4)$ 安排了九个试验条件，列入表5-27。

表 5—27 试验计划表

因素 列号 试验号	铬酸(g/L)A	硫酸(g/L)B	氟硅酸(g/L)C	温度(°C)D
	1	2	3	4
1	1(250)	1(0.007A=1.75)	3 (0)	2(55)
2	2(300)	1(0.007A=2.10)	1(0.3B=1.05)	1(35)
3	3(350)	1(0.007A=2.45)	2(0.3B=0.735)	3(45)
4	1(250)	2(0.011A=2.75)	2(0.3B=0.852)	1
5	2(300)	2(0.011A=3.30)	3 (0)	3
6	3(350)	2(0.011A=3.85)	1(0.5B=1.925)	2
7	1(250)	3(0.015A=3.75)	1(0.5B=1.875)	3
8	2(300)	3(0.015A=4.5)	2(0.3B=1.35)	2
9	3(350)	3(0.015A=5.25)	3 3(0)	1

在第1, 2, 3号试验中, 硫酸用量虽然都是位级1 (铬酸的0.7%), 但实际用量却分别为1.75, 2.10和2.45(g/L)。这是由于铬酸的不同用量造成的。在第3, 4, 8号试验中, 氟硅酸的用量虽然都是位级2, 但实际用量却分别为0.735、0.825和1.35(g/L)。这是由于硫酸的不同用量造成的。

本试验考察的四个因素中, 有两个安排了活动位级。如果不这样做, 每个因素都取固定的用量, 则有些试验的搭配出现明显的不合理现象, 那么, 这要大大降低试验效果。遇到这种情况, 就应该采用活动位级的方法来安排试验。

活动位级方法, 是正交试验中常用的一种方法。在利用活动位级方法安排试验时, 应该像表5-26、表2-28那样, 在试验计划中, 将活动位级的有关因素 (表5-26) 中为反应时间和通二

七、拟位级和后备位级

氧化碳时间两个因素，表5-28中为铬酸用量、硫酸用量和氟硅酸用量的三个因素）的用量，在每个试验中标出来，而且必须先标原来因素不同位级的用量，随后标出跟着跑的活动位级的用量。如表5-25中先标反应时间的用量，根据它来标出通二氧化碳时间的用量。

正交表是一种整齐规则的表。它的列数、位级数与试验次数之间都保持一定的关系。在决定好要考察的因素以后，对任意多个位级并不都有正好合用的表。对于连续变化的因素，位级的个数可以根据需要而适当选定时，问题容易解决。对于分散对象的因素，像四种催化剂、两台机器、五种原料等，位级的个数自然形成，不便于随意改变。遇到这种情形，有时候找

不到试验次数少的正交表。对于这类因素，下面讨论一下怎样调整位级的个数，选出合用的表。

例如，在一项化学反应中，考察设备种类、催化剂品种、原料品和反应时间共四种因素。设备分两套，催化剂有四个品种，原料和时间都分三个位级。假如位级个数一成不变，则需用到L36，嫌次数太多。这时可调整一下前面两种因素的位级数目，制订因素位级表如表5-28。

表 5—28 因素位级表

因素	设备	催化剂品种	原料品种	反应时间
位级1	甲	卯	长春	30min
位级2	乙	寅	武汉	40min
位级3	(甲)	子	广州	20min

四种因素，都当作三个位级，可以套用 $L_9(3^4)$ 。

拟位级：设备只有甲、乙两个位通级，现在要扩充成三个位级。由于猜想设备甲可能比较好，愿意多做些试验。除了把设备甲对应于位级号码“1”以外，还把它现次对应于剩下的位级号码“3”。作为位级3的设备甲，称作拟位级。这样一来，用设备乙做三次试验，而用设备甲做六次试验。计算时，还是分别求位级1，3的各三次结果之各，看看I，III的差别怎样。如果I，III差别不大，则说明设备甲的效果比较稳定与可靠；反之，如果差别大，则说明设备甲对同其他因素之位级的配合方式会起额外的作用，现象比较复杂。下批试验中，可对较好的设备继续试验。

后备位级：催化剂有子、丑、寅、卯四个品种。为了首批试验的次数不至于太多，要缩减成三个位级。把估计效果可能好的品种卯、寅、子，分别对应于位级1，2，3，先做试验，而让效果估计比较差的品种丑，在首批中暂时不试验，等着看出其他催化剂同另外因素的配合情况后，放在第二批补充试验。这样的品种丑，叫做后备位级。

通过这种增加或减少位级的措施，后面附的常用正交表通常是够用的。超过36次的正交表可查其他资料。

八、试验结果的综合评分法

在多指标正交试验设计中，作完试验得出每号试验的各个指标结果后，依据一定的评分标准，得到各号试验的综合评分，以综合评分值作为单指标进行分析，简化分析过程，这种方法称为综合评分法。

综合评分法的关键在于评分。评分既要反映各项指标的要求，又要反映出指标的重要程度。综合评分法可以分为次序评分法和公平评分法。

1、次序评分法

如果试验后得到的各项指标对整个试验是同等重要的，则可按指标的数值及相邻次序的差异程度，按一定的规则给各号试

验评分。评分采用100，10，5均可。

表5-29是对精矿粉进行造球配方试验的因素位级表。考核指标有抗压强度、落下强度、裂纹度三项要求。表5-30为正交表 $L_9(3^4)$ 和试验结果。表5-31为综合评分表。

之后的步骤与前叙述相同，通过极差分析法展望的好条件为 $B_3A_3C_1D_1$ 。

表 5—29 因素位级表

因素	A 水分	B 粒度	C 碱度	D 膨润土
位级1	9	30	1.2	1.0
位级2	10	60	1.4	1.5
位级3	8	80	1.6	2.0

表 5—30 $L_9(3^4)$ 试验计划及试验结果分析表

因素 试验号	A水分	B 粒度	C 碱度	D膨润土	拉压强 度	落下强 度	裂纹度	综合评 分
1	1(9)	1(30)	1(1.2)	1(1.0)	11.3	1.0	2	65
2	1	2(60)	2(1.4)	2(1.5)	4.4	3.5	3	50
3	1	3(80)	3(1.6)	3(2.0)	10.8	4.5	3	60
4	2(10)	1	2	3	7.0	1.0	2	55
5	2	2	3	1	7.8	1.5	1	65
6	2	3	1	2	23.6	15.0	0	100
7	3(8)	1	3	2	9.0	1.0	2	60
8	3	2	1	3	8.0	4.5	1	70
9	3	3	2	1	13.2	20.0	0	95
K1	175	180	235	225				$\Sigma=620$
K2	220	185	200	210				
K3	225	225	185	185				
R	50	75	50	40				

表 5—31 综合评分表

排顺序	评分 (100分制)
6号试验	100分
9号试验	95分
8号试验	70分 (因指标差距较大)
1号和5号试验	65分 (因指标各有所长)
3号和7号试验	60分
4号试验	55分
2号试验	50分

2、公平评分法

根据多指标试验的目的和要求，利用一定的公式进行综合评分的方法称为公平评分法。

表5-32是五吨冷风冲天炉为提高铁水质量、降低生产成本的
正交试验设计因素位级表。考核指标为：铁水温度要高于1400℃，
熔化速度要大于5t/h，总焦铁比要尽量高。这是根据专业知识确
定的因素位级表。

表 5—32 因素位级表

因素	熔化带直径× 炉缸直径	一排风口尺寸× 二排风口尺寸	风压	批焦铁比 1:x
位级1	φ760×φ620	(φ40×6) ×(φ40×6)	130	13.5
位级2	φ740×φ550	(φ30×6) ×(φ25×6)	160	14.5
位级3	φ720×φ650	(φ20×6) ×(φ25×6)	150	12.5

采用L₉(3⁴)正交表安排实验,试验结果见表5-33。

表 5—33 $L_9(3^4)$ 试验计划及结果分析表

因素 试验号	A	B	C	D	铁水温度 T_i	熔化速 度 V_i	总焦铁比 F_i	综合评 分
1	1	1	1	1	1408	5.3	11.7	2
2	1	2	2	2	1399	5.2	13.2	7
3	1	3	3	3	1409	5.6	12.3	6
4	2	1	2	3	1409	5.2	11.9	6
5	2	2	3	1	1405	4.9	12.5	9
6	2	3	1	2	1412	5.1	13.0	21
7	3	1	2	2	1415	5.4	13.3	24
8	3	2	1	3	1413	5.3	12.2	12
9	3	3	2	1	1419	5.1	13.5	33
K_1	15	32	35	44	[因素、位级、名称 数值略] $\Sigma=120$			
K_2	36	28	46	52				
K_3	69	60	39	24				
R	54	32	11	28				

根据生产实践和专业知 识，确定评分标准为：铁水温度 T_i 以 1400°C 为基准，每增高 1°C 加1分，每降低 1°C 减1分；熔化速度 V_i 以 5t/h 为基准，每增（或减） 0.1t/h 都减1分；总焦铁比 F_i 以 $1:12$ 为基准，每高 0.1 加1分，每低 0.1 减1分。

综合评分数 M_i 可用下面的公式计算。

$$M_i = (T_i - 1400) - 10 V_i - 5 + 10(F_i - 12)$$

式中的 $I = 1, 2, \dots, 9$ 。

由此，可计算出每号试验的综合评分。

例如：

$$M_1 = (1408 - 1400) - 10 \times 5.3 - 5 + 10(11.7 - 12) = 2$$

$$M_2 = (1419 - 1400) - 10 \times 5.1 - 5 + 10(13.5 - 12) = 33$$

.....

其他步骤与前叙述相同，展望的好条件为： $A_3B_3D_3C_2$

九、正交表的选择

正交表的选择主要考虑以下几个方面：

- ①考察因素的个数；
- ②一批允许作试验的次数；
- ③有无重点考察的因素。

实际上选择正交表时也和考察因素的位级个数有关，也就是说，位级数的确定与正交表的选择这两个问题是相互牵连的，经常是放在一起考虑。上一节所举的各方在的实例已经说明了这一问题。表5-34归纳了正交表选择时应考虑的几个方面。

正交表的选择虽然比较灵活，并且常用的正交表也有几十个(本书给出了若干常用的正交表供读者应用中选择)。但是，某一项试验该采用哪一张正交表，还需要考虑表5-34中给出的几方面问题。

表 5—34 选择正交表应考虑的问题

因素的 个数	有重要因素		无重要因素	
	一批要求少做试 验	一批允许多做试 验	一批要求少做试 验	一批允许多做试 验
3个	$L_8(4^1 \times 2^4)$	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$	$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$ 或 $L_{16}(4^5)$
4个	$L_8(4^1 \times 2^4)$	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$	$L_9(3^4)$	$L_9(3^4)$ 或 $L_{16}(4^5)$
5个	$L_8(4^1 \times 2^4)$	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 或 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$	$L_8(2^7)$	$L_{16}(4^5)$
6个	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 或 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$	$L_8(2^7)$	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 或 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$
7个	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 或 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$	$L_8(2^7)$	$L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 或 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$



END

Thank You