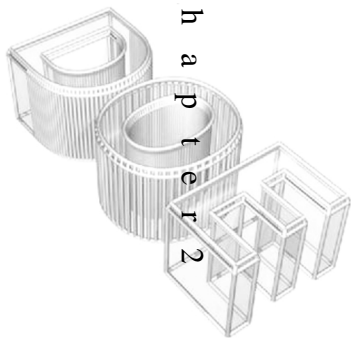


▼
第2章

Chapter 2



实验策略与计划

2.1 实验策略与计划

在实验之前，必须制定周密的实验计划，掌握实验的背景信息，了解描述的问题区域。如果是团队，大家要有比较一致的认识，举行一个会议，审查实验的目标，根据实验的可供资源与实验要达到的目标，选择合适的实验类型与实验规模，选择合适的实验指标、实验因子与水平以及了解哪些水平组合不能发生，并且需要利用或避免物理上可能发生的交互效应，避免数据缺失点，制定数据的采集与应急计划，减少或消除不可控的因素，确保实验的顺利完成。

实验计划的基本思想：

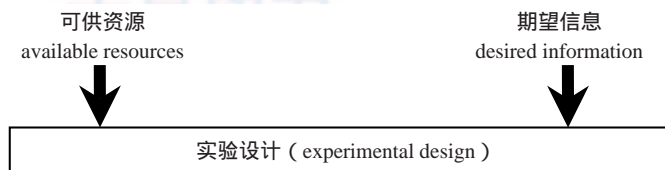


图2-1 实验计划的原理图

总之，实验计划要考虑到实验的目标、实验指标、实验因子与水平，也要考虑到实验的成本、时间、材料、人员、设备以及测量系统，同时还要考虑随机化，实验的区组安排，实验样本，还要观察有哪些噪声因子干扰或影响实验结果，等等。主要内容包括：

- (1) 根据实验目标选择实验类型
- (2) 定义实验目标
- (3) 根据实验目标选择指标

- (4) 选择满足目标的对指标产生影响的因子、水平与实验条件
- (5) 实验设计的三个基本原理：重复、区组与随机化

实验计划往往是一个重复多次的过程。

如何设计实验计划

设计实验计划一般基于以下考虑：

- ▶ 保持实验简单
- ▶ 通过一个能达到目标的少量（小）实验代替一个量大繁杂的（大）实验
- ▶ 用序贯实验：
 - 通过在大量实验前做一个试探性实验
 - 在大量因子中识别少量的关键因子
 - 用响应曲面方法来优化少量的关键因子
 - 用验证实验来验证结果
- ▶ 把复杂的系统拆分成子系统，安排小实验
- ▶ 把连续工艺拆分成独立步骤，安排小实验
- ▶ 利用经验来计划实验，包括工程师的知识、历史数据、实验结果、理论知识与专家意见

2.2 如何选择实验类型

工程中常用的实验类型有：

- ▶ 序贯实验（sequential experiment）：用一次实验结果来计划下一次实验，也称连续性实验
- ▶ 筛选实验（screening experiment）：从大量因子中识别在限定范围内对指标有最大影响的少量关键因子
- ▶ 二级实验设计（second order design experiment or RSM）：通过有关曲率来优化指标
- ▶ 稳健实验（robust design experiment）：通过制造产品或工艺对可变资源的非敏感性来达到制造产品符合规格的稳定性
- ▶ 敏感性实验（sensitivity experiment）：找出变化范围，例如变化因子在最佳值 $\pm 10\%$
- ▶ 验证实验（confirmation runs）：验证所推荐的水平组合的结果。有时需要给出是否要做跟随实验
- ▶ 跟随实验（follow-up experiment）：例如，若根据实验结果显示两组模型所得出的结果同样的好，只能选择一个作为最优模型，那么必须做一个跟随实验

20 实验设计(DOE)应用指南

- ▶ 试探性实验 (exploratory runs): 先于DOE的实验, 比如确定因子的设置:
 - 新设备
 - 在两个化学相的边界附近操作
 - 确定泵的能力限制等

根据不同的研究内容, 还可以对实验设计进行多种方法的分类, 这里做些概要介绍。

根据实验的因子个数, 可以分为单因子和多因子。根据实验的目的, 可以分为析因设计和回归设计。在不考虑区组的设计中, 常用的有完全随机化设计 (complete randomized design); 在考虑区组的设计中, 常用的有配对比较设计 (paired comparison design)、随机区组设计 (randomized block design)、平衡不完全区组设计 (balanced incomplete block design)、部分平衡不完全区组设计 (partial balanced incomplete block design) 等。根据因子效应是固定效应还是随机效应可以分为两大类。在固定效应中, 又可以分为单向分类 (one-way layout)、双向分类 (two-way layout)、多向分类 (multi-way layout)。在随机效应中, 主要是应用嵌套设计 (nested design) 或称方差分量模型 (variance component modeling)。这些实验设计用到的理论和方法都比较复杂, 工程师们用得较少, 除了单因子单向分类在第4.2.5节有介绍及第10章、11章、12章、13章介绍了一些特别实用的拓展实验设计外, 其他内容本书就不再介绍了。

根据实验目的主要分为两大类: 析因设计和回归设计。第1章开始的叙述中已经说明, 我们进行实验有两个基本目的: 一是明确哪些自变量 X 显著地影响着 Y ; 二是找出 Y 与 X 间的关系式, 从而进一步找出自变量 X 取什么值时将会使 Y 达到最佳值。第一种实验的目的是为了确定在相当多的自变量中, 哪些自变量 X 并不显著地影响着 Y , 应予以删除; 哪些自变量 X 显著地影响着 Y , 应予以保留。我们称其目的为“因子筛选设计”。由于这种实验的目的是针对因子的, 因此这种实验设计属于“析因设计”(factorial design) 或称“因子设计”。第二种实验目的是为了确定 Y 与 X 间的关系式, 找出 Y 对于 X 的回归方程。由于这种实验的目的是针对回归关系的, 这种实验设计被称为“回归设计”(regression design)。

当然, 这两类设计也有相通之处, 一方面, 我们筛选因子的方法其实也是先建立一个 Y 与 X 间的简单的线性回归方程, 然后根据各项系数的显著性来筛选。这里要注意的是, 我们在实验设计中所说的“线性”, 与通常数学概念中的“线性”有所不同: 在“实验设计”中说的“线性”指的是在回归方程中除了可以包含各自变量的一次项外, 还允许包含有两个或多个自变量的乘积项, 如可以含有 x_1x_2 , $x_1x_2x_3$ 等; 而通常的数学概念中的“线性”是不允许包含这些项的。在建立了线性回归方程后, 除了可以判断变量是否显著外, 对于求最大值或最小值的问题也可以求出最佳值以及达到此最佳值的自变量的最佳设置, 这在实际工作中也常常是有用的。总之, 筛选变量也是通过建立回归方程来实现的; 另一方面, 我们建立了回归方程, 特别是建立了含平方项的响应曲面方程后, 也可以在方程中判断是否有效应不显著的因子, 可以删除它们, 达到筛选因子的目的。因此, 析因设计和回归设计间确有相通之处: 它们都要建立回归方程。但析因设计只要线性的, 而这里的回归设计指

的是二阶的。总的说来,筛选的要求是较粗糙的,实验次数较少;建立回归曲面方程要求就细致多了,实验次数要大增。在析因设计中,又可以按因子水平的个数分为二水平析因设计、三水平析因设计和混合水平析因设计几类。实践证明:在析因设计中,使用二水平正交实验法,再加若干中心点的设计方法最简单有效,因此本书主要介绍二水平的实验设计。再细分,又有完全析因设计(full factorial design)或称全因子实验设计和部分析因设计(fractional factorial design)两大类,本书将在第5章和第6章中分别加以介绍。对于回归设计,我们可以建立二次回归方程为主要工具,介绍响应曲面方法(response surface methodology, RSM),这部分内容将在第8章详细介绍。

有时,现有的生产条件已基本能满足要求,但我们希望获得更好的结果,这时可以在原有生产条件的基础上稍加调整来寻求解决方案。这就是“调优操作”(evolutionary operation, EVOP),这部分内容将在第9章中介绍。

另一类很重要的实验目的是寻求系统的稳健性。所谓稳健性,是指系统的抗干扰的能力要强,即当系统受到难以控制的因子(或称“噪声”)的严重影响时,系统输出的变异性(variation)要足够小。为做到这一点,我们尽量选择那些使得系统对噪声变化不敏感的控制因子的某种水平的组合来达到目的。这就是稳健参数设计(robust parameter design)。在国内,这类设计通常称为“田口参数设计方法”。这类问题在六西格玛改进工作中也是有重要意义的,请参阅有关田口设计的书籍。

如果我们讨论的是配方问题,如在橡胶、造纸、药品生产等行业中,我们研究的是在整个产品中各个分量所占的比率问题,显然,这些比率的总和应该为100%。研究这类问题的实验设计称为“混料设计”(mixture design),请参阅混料设计有关书籍的介绍。

综上所述,根据实验的目的不同选择不同的实验类型。

我们在进行实验类型选择时,通常是根据比较、筛选、优化与稳健等几种目的来选择的。我们的基本思路是:首先在开始阶段进行因子筛选,选出显著因子,然后对少数是关键因子进行优化,验证实验结果,求得统计上的支持,再扩大实验的规模,最后应用到实际生产中。简述可由以下三个步骤完成。

1. 用部分析因设计进行因子的筛选

最开始,情况不是很清楚,考虑到影响响应变量的因子个数可能较多(大于或等于5),这时应在较大的实验范围内,先进行因子的筛选,通常应使用部分析因实验设计法,这样获得的结果可能较为粗糙,但实验次数可以大大节省,并能达到筛选的目的。如果认为部分析因实验费用仍然太昂贵,则可以使用实验次数更少的“Plackett-Burman设计”方法(详细内容见第6.7节)来筛选因子。

2. 用全因子实验设计法对因子效应和交互效应进行全面的分析

当因子的个数被筛选到小于或等于5个之后,我们可以在稍小范围内进行全因子实验设计以获得全部因子效应和交互效应的准确信息,并进一步筛选因子直到因子个数不超过3个。

22 实验设计(DOE)应用指南

3. 用响应曲面方法(RSM)确定回归关系并求出最优设置

当因子个数不超过3个时,我们就有条件采用更为细致的响应曲面设计分析方法,在包含最优点的一个较小区域内,对响应变量拟合一个二次方程,从而得到实验区域内的最优点。

以上所说的是典型步骤。在实际工作中,可能跳过某个环节,也可能在某个步骤上反复进行好几次。总之,实验要不断地筛选因子、不断调整实验的范围和因子水平的选择,经过几轮实验后才能最终达到我们实验的总目标。

2.3 定义目标

在设计和分析一个实验时,首先,和实验有关的每个人必须对所研究的问题究竟是什么,如何收集数据,要有清晰的认识,至少对如何分析这些数据要有定性的了解。

问题的识别和问题的提法。这一点看起来似乎是再明白不过的,但是在实践中,确认需要实验的问题却不是那么简单,将其总是摆明并变为都可接受的提法也不是那么简单。需要弄清有关实验目的的全部想法。重要的是要吸引所有有关人员的参与,其中包括:工程、质量保证、制造、市场营销、经营、顾客及操作人员(通常他们有很多看法,却常常被忽略了)。另外,由于实验需要成本,有些实验成本甚至是昂贵的,因而更需要写清楚实验的起因以及实验完成要达到的具体目标,需要一个审批过程,所以,清晰的问题提法对更好地理解现象和最终求得问题的解答有重大帮助。

2.4 选择指标的考虑

指标也称为响应,是应变量,常用 Y 来表示。在选择响应变量时,实验者应该确信这一变量真正会对所研究的过程提供有用的信息。最经常的,是取测量特性的平均值或标准差(或两者)作为响应变量。在实际应用中往往会遇到多响应的问题。如果问题中确实需要同时考虑多项指标,就会使问题变得非常复杂,因为多指标问题的复杂性表现在指标间可能出现相互矛盾的现象,对一个指标好的某水平组合对另一个指标来讲可能又是不好的,因此通常意义下的“最优”水平组合可能并不存在,从而我们只能在平衡中寻找一个较为满意的方案。此外由于某些情况下指标间的矛盾性,又带来了方案间的不可比较性,从而使寻找满意方案也会遇到一些困难。为了解决这些困难,需要建立一些综合评价的准则,从不同角度提出不同的准则就产生了不同的分析方法,大家可以从实际问题出发,去寻找一些适合实际问题的方法,没有统一的方法可以照搬,综合平衡法与综合评分法是常用的方法,但常常也是设法将之化为单指标的情形来处理的。这方面MINITAB能最大程度地帮助我们的应用,而且能比较容易地实现多响应的优化。另外,仪表性能(或测量误差)也是一个重要因素。如果仪表性能差,则只有相对大的因子效应才能通过实验检测出来,或者需要做附加的重复实验。

选择指标应考虑以下方面：

- ▶ 最好选择一个计量型指标，因为计量型数据比计数型数据能提供更多的信息
 - ▶ 选择可能揭示失效机制的指标而非笼统的合格率或失效率指标
 - ▶ 选择容易测量的指标
 - ▶ 选择能覆盖产品与工艺的不同方面
 - ▶ 选择一个典型的样本计划
 - ▶ 检查测量的准确性、精确性与稳定性
 - ▶ 选择合适的测量指标，如：
 - 粘接强度
 - 体积或重量的百分比浓度
 - 厚度
 - 利润
 - 成本
 - 持续时间
 - 寿命
 - 取代有兴趣的变量，如破坏性实验指标等
-

当然，一般除了平均值外，有时还要同时考虑方差、标准差或均匀性等离散性指标，在优化的过程中也要一并考虑，以保证在相同条件下有比较稳定的指标。在具体的选择中有些技巧可以应用，如例2-1就是一种有效的方法。



例2-1 SONY牌电视机有两个产地：日本与美国。按设计方案规定，电视机的彩色浓度 y 的目标值为 m ，公差=5，当 y 在公差范围 $[m-5, m+5]$ 内，判该机的彩色浓度合格，否则判为不合格。但20世纪70年代后期，美国消费者购买日产SONY电视机的热情高于购买美产SONY电视机，这是什么原因呢？

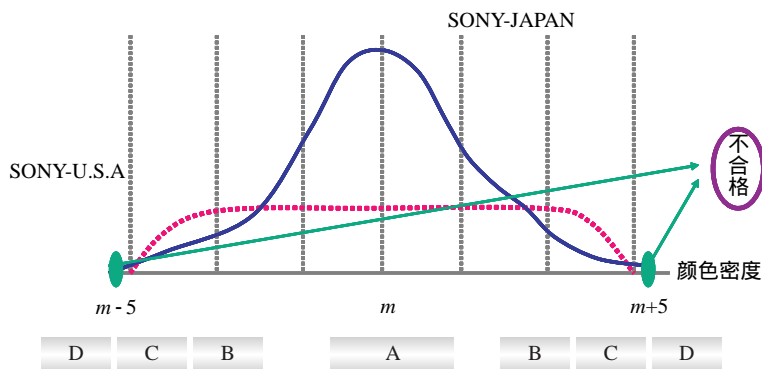


图2-2 电视机彩色浓度分布图

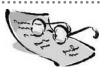
从图2-2可见，日产SONY的彩色浓度 y 的概率密度曲线近似正态分布，其均值为 m ，标

24 实验设计(DOE)应用指南

准差为 $5/3=1.667$ ；美产SONY的彩色浓度近似为在 $m \pm 5$ 上的均匀分布，其均值仍为 m ，而标准差大，为 $10/\text{SQRT}(12)=2.887$ 。

从图2-2还可见，日产SONY大约有0.3%的彩色浓度在公差之外，而美产SONY基本上无不合格品出厂。所以顾客喜爱的差异是不能用不合格品率来解释的。假如把注意力转到标准差上，按彩色浓度靠近目标值的远近分为A、B、C、D四级，那么日产SONY A级多于美产SONY，而C级又比美产SONY少得多。这是美国消费者喜爱日产SONY的原因之一。原因之二是彩色浓度会随着时间发生退化，即浓度减弱。假如把图上两个分布向左移动一个标准差的距离，表示使用一段时间后彩色浓度的分布，这时美产SONY的彩色浓度有16.7%不合格，而日产SONY彩色浓度只有2.3%不合格。随着时间的延长，此种差别会更大。这两个原因的产生是由于美产SONY的管理者只注意控制偏差 δ ，符合规格即可出厂，而不注意控制方差 σ ；日产SONY的管理者致力于命中目标值 m ，尽量向目标值靠近，这样不仅可减少偏差，又可减少方差。两种不同观点，直接影响产品质量和用户损失，最后导致两个工厂的利润不同。所以有时方差往往也是考虑的指标之一。

计量型指标比计数型指标含有更丰富的信息，而且做实验分析也相对容易些。所以在实验过程中，尽管用计量型指标，不得已时用计数型指标。在实际设计中，高明的方法是把计数型指标转化为计量型指标，使得问题简化且效果更佳。下面就是很好的一个例子。



例2-2 提高LLTS后可靠性之研究

随着科技发展进步，通信产品成长迅速，而其可靠性要求也日益严格而多样化，除了导通之外，更要求孔铜经多次冷热交替后质量无虑，Liquid to Liquid Thermal Shock (LLTS) 的测试便是孔铜可靠性测试的一项工具，主要为测试孔铜镀铜层与基材经连续冷热冲击后可靠性验证项目，此种测试主要应客户之要求，在经过500 cycle之后，孔铜不得有crack现象发生，阻值变化不得超过10%。自2006年年初以来，陆续收到客户回馈孔铜发生crack问题，经长期追踪仍无解决方法。在这里，我们将针对全过程可能的因素进行研究，找出解决crack问题的方案。

经客户回馈FA料号经LLTS测试后，连续7次sample孔铜发生crack，将客户所送回之切片进行详细观察，发现在通孔部分，每一孔皆有crack之现象，足见此问题之严重（见图2-3）。

为使实验的结果可以进行数量化的分析，我们将crack程度分为三级，为无crack、半crack与全crack，无crack不计分（分数为0），半crack计0.5分，全crack计1分，如图2-4所示：

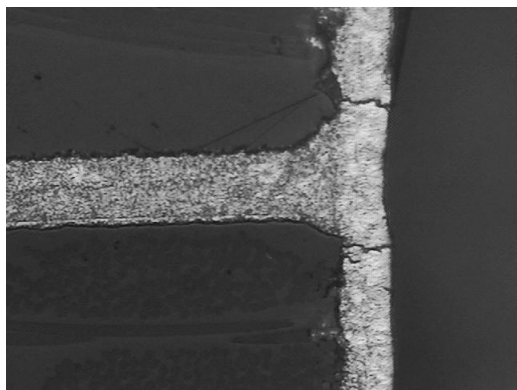


图2-3 LLTS严重的crack现象图

如图2-4所示：

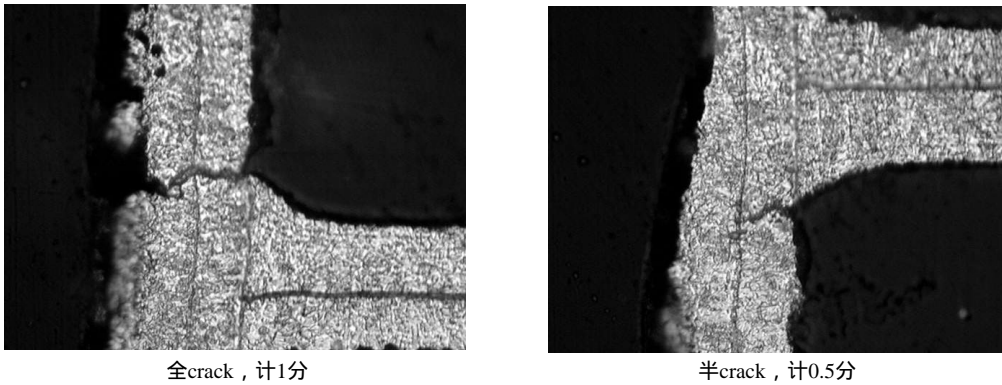


图2-4 LLTS严重的crack现象评估打分图

每样本切片10孔，观察其孔内crack情形，加以计分进行统计。统计每一样本孔内crack总积分，进行比较。这样就很好地实现了把计数型指标转化为计量型指标，从而使实验分析功能变得强大，操作也很容易。



例2-3 磷掺杂 (Phosphorous Doping)

因为测量磷的浓度是非常耗时的，且缺乏灵活性；对制造工艺来说也是不方便的。但我们知道：

- ▶ 测量方块电阻是比较容易的
- ▶ 磷的浓度与方块电阻是强的负线性相关的

所以，我们用容易测量的方块电阻作为指标来代替磷的浓度这个指标。

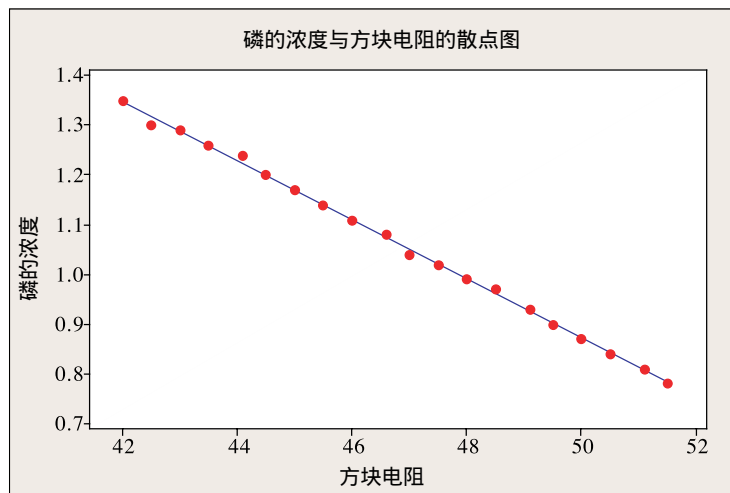


图2-5 方块电阻与磷的浓度相关性分析图

2.5 如何选择因子、水平与实验条件

一般来说,实际问题都是复杂的,任何数学模型都只是它的某种抽象概括,实验设计也不例外。我们先给出一些有关实验设计的简单基本概念的描述,然后给出一些更深入的对概念的定义。

1. 因子的选择

因子的选择应考虑以下方面:

- ▶ 用工程师的知识和经验及历史数据来选择因子
- ▶ 开始阶段情愿包括多个因子而避免漏掉重要因子
- ▶ 选择对指标有期望效应(是筛选还是优化)或与目标有关的因子
- ▶ 选择能覆盖问题的不同方面
- ▶ 确定是否有已知的讨厌变量可能影响试验(是否要分区组)
- ▶ 考虑与试验有关的人为因素

.....

因子的选择使用以下的方法:

- ▶ 团队合作
- ▶ 头脑风暴
- ▶ 流程图
- ▶ 因果分析
- ▶ FMEA
- ▶ QFD(CT树)
- ▶ 相关性
- ▶ 回归分析
- ▶ 多变量分析
- ▶ 书面回顾
- ▶ 来自供应商、客户、操作员的建议
- ▶ 科学理论

.....

以上就常用方法流程图与因果分析做些展开,希望读者掌握此技巧。

绘制流程图,可以是一般的流程图。

流程图一般是自上而下,按顺序揭示一个过程中的各个活动。

特点

- ▶ 采用一些符号来阐明过程走向、决策点和所进行的各项活动

- ▶ 绘制流程图之前，要对该过程有事先认识。要求熟悉该过程的各个方面的人员参与，听取他们的意见，这样，画出的流程图才格外有用

如何绘制流程图

- ▶ 规定本过程的起始和结束边界（起始点和结束点）
- ▶ 按顺序列出本过程的各个活动
- ▶ 水平轴表示活动的位置/责任，说明涉及的个人（按职务/岗位）、具体位置或职能
- ▶ 向下画出各个栏目，并标出本过程中的各个活动
- ▶ 列出构成过程的各种步骤、活动和决策，可以通过头脑风暴来列出一份清单以便大家能进行同等水平的思考
- ▶ 确认各活动实际发生的顺序
- ▶ 阐明以下内容时利用箭头指示过程的方向：
 - 在过程的某点上谁做了些什么
 - 在何处进行各个活动
 - 两个活动间工作必须移动的距离
 - 工作流超出和返回本过程的点
 - 事件的顺序
- ▶ 构制一份流程图

有用的提示

- ▶ 尽量简单，尽可能用最少的文字标明栏目和说明工作步骤
- ▶ 如果工作流进入或超出本过程，另辟一个栏目并标明之为“界外”，或是建立数个栏目，其标题反映工作流的走向（部门领导、工程，等等）
- ▶ 邀请过程参与者加入流程图绘制团队，这些人最熟悉此过程，将经历未来过程中的任何改革

一开始人们很难就过程形成一致的认识，即使详细了解本过程某一特殊部分的团队成员，也不一定能考虑到每一个部分与全局的关系。

下面是一个制造类的流程图（见图2-6），有了流程图我们就可以列出各个过程，结合因果图我们则可以详细分析关键输入、关键输出，我们的实验指标往往来自关键输出，因子X往往来自关键输入。

因果图

最适用于发现根本原因的工具可能莫过于因果图。它有几个名字（石川图、鱼骨图等），而且使用方式也多种多样。因果图主要是作为整理信息的工具，以建立和澄清某一效果与其主要原因之间的关系。

- ▶ 因果图能够明确影响输出指标的问题根本原因（X's）

28 实验设计(DOE)应用指南

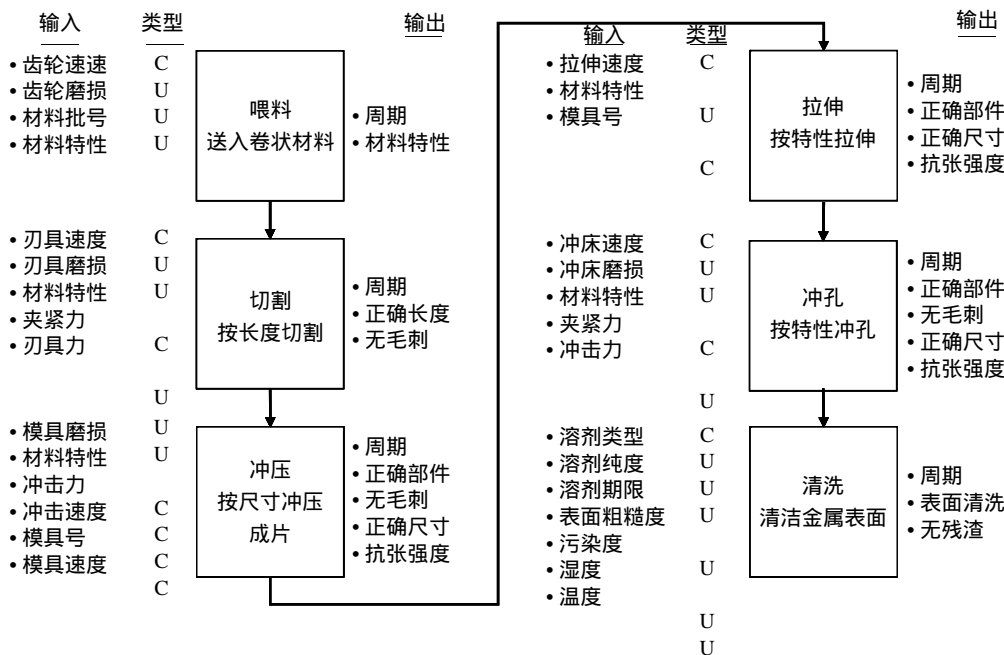


图2-6 流程图

- ▶ 因果图通过文字和线条绘出一幅图画，旨在揭示效果与其原因之间的关系
- ▶ 因果图有助于达成对问题的共识，揭示问题的潜在原因

因果图的制作：

- ▶ 在“鱼头”处写出结果(Y)
- ▶ 确定该结果的原因的主要类别(可能原因)

有几种不同的方法可以用来确定主要类别。

(1) 最常用的方法是对人员、方法、机器、材料、环境和测量的“类属”分类。在可行的情况下将它们与问题的主要因素相互匹配。例如，一个接地线的耐久性问题，通过头脑风暴，画出了下面的因果图，我们把关键因子聚焦在尺寸、原料与供应商方面，这三个因素可以作为我们进行改进接地线的耐久性问题的三个因子，而且水平取值也比较清楚，如图2-7所示。

(2) 针对流程图中的主要过程活动，在鱼骨图上指定一个分支。

(3) 你可以对所观察到的效果的可能原因进行集体研讨。列出所有内容后，将其归类成鱼骨图上的主要分支。

- ▶ 利用以上的流程图，结合“5个为什么”工具，完成整个因果图分析
- ▶ 找出最有可能的根本原因，在上面画一个圈——这是你在该链条中确定的最后一项内容(提示：最频繁出现的原因有时是一个极好的切入点)。这些往往是我们进行(筛选)实验的因子

- ▶ 通过（筛选）实验，我们能够确定真正的显著因子，最终改进这些显著因子，就能使响应得到很好的控制

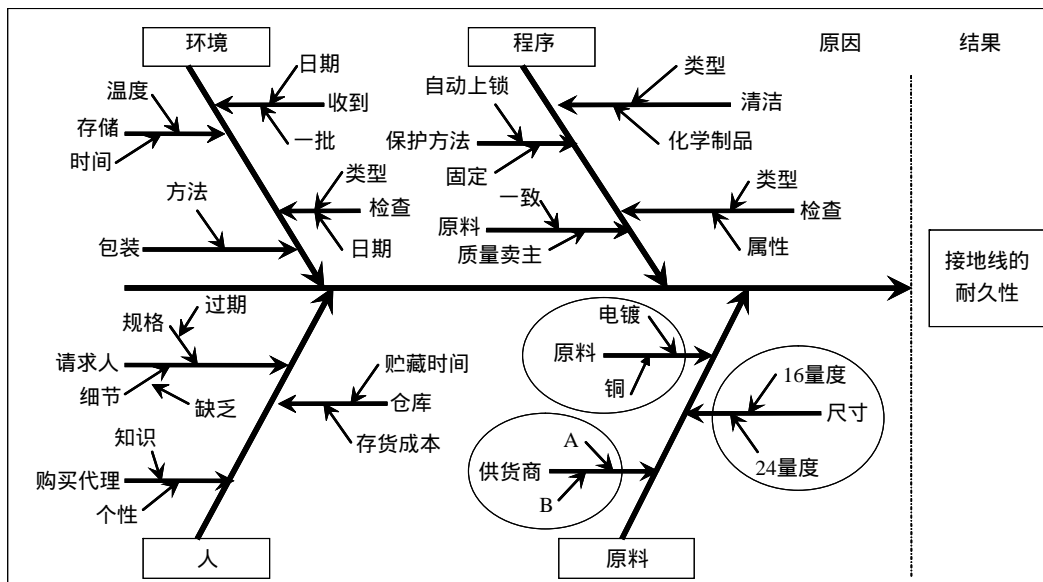


图2-7 接地线的耐久性问题因果图

例2-4 这是一个半导体工艺的流程图，它是为提高刻蚀的均匀性而展开的流程图。

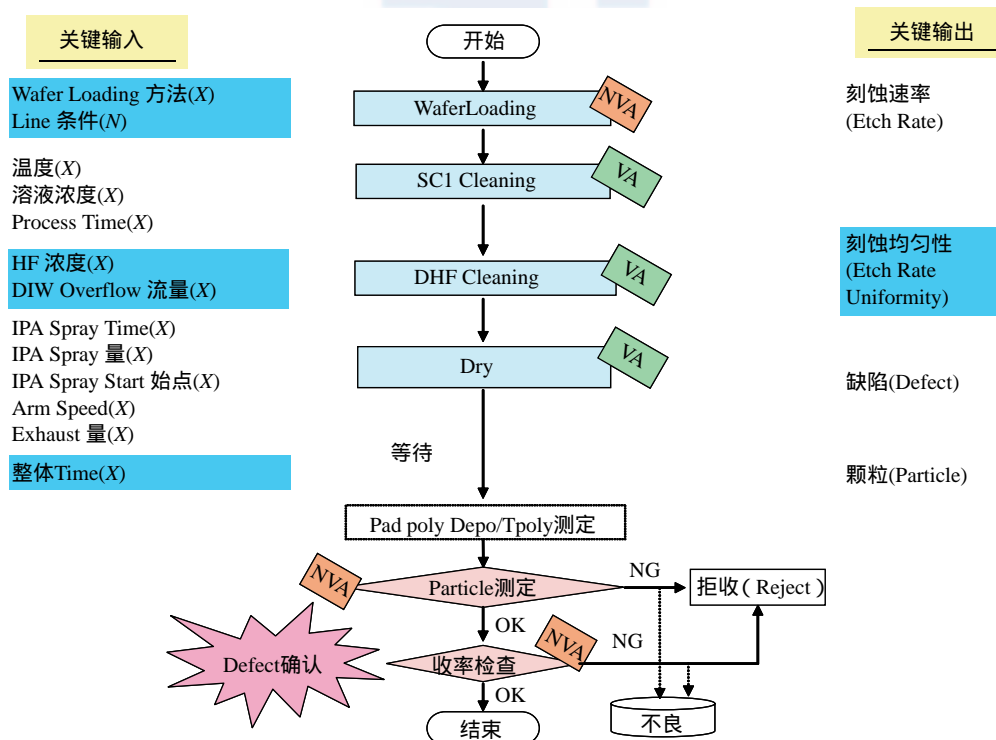


图2-8 改善刻蚀均匀性 (Etch Rate Uniformity) 流程图

30 实验设计(DOE)应用指南

从关键输出可以知道，刻蚀均匀性 (Etch Rate Uniformity) 是主要的指标，而从关键输入因素中选择Wafer Loading方法 (X)、HF浓度 (X)、DIW Overflow 流量 (X)、整体Time (X) 四个可控变量作为我们实验设计的因子。

例2-5 图2-9是一个半导体工艺的因果图。主要为了寻找缺陷的发生数居高不下的原因，结合流程，绘制了详细的因果图，从因果图中可以看出，缺陷发生数是主要的指标Y，而从关键输入因素中选择浓度 (X)、DIW Overflow 流量 (X)、压力 (X) 三个可控变量作为我们实验设计的因子来考虑。

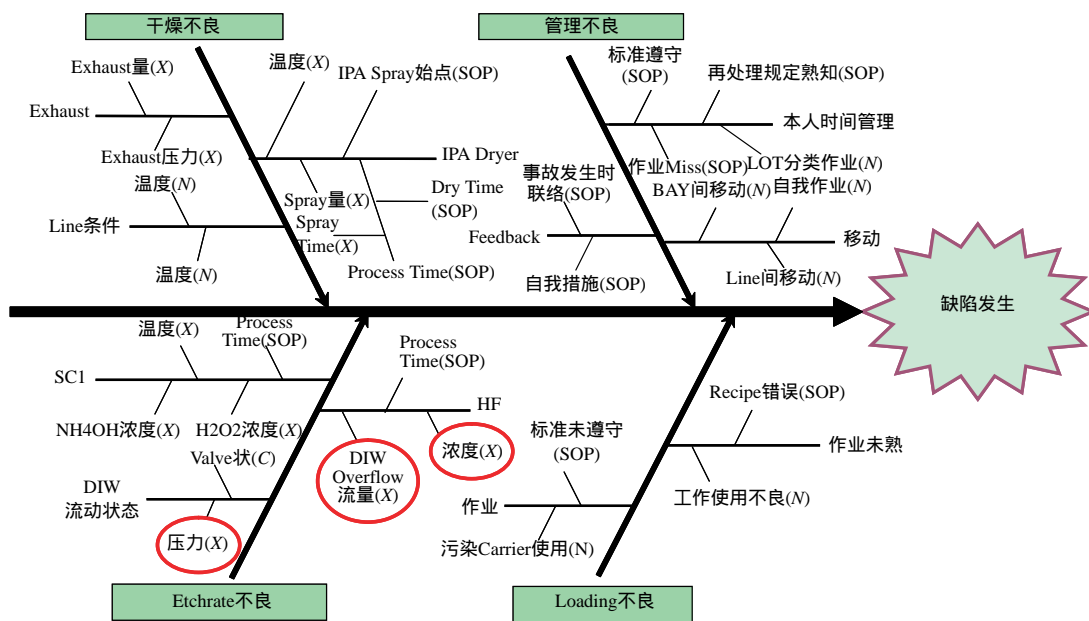


图2-9 寻找缺陷 (Defect) 发生问题因果图

2. 因子：可控因子与非可控因子

我们将过程模型简化为图1-4，其中 Y_1, Y_2, \dots, Y_s 是我们关心的输出变量，这些常称为“响应变量”(response)或“指标”。一般情况下，我们需要考虑多方面的指标。但在学习实验设计中，我们常常只考虑单个响应变量的情况，因为这样比较容易。我们将影响响应变量的那些变量称为实验问题中的因子(factor)。我们假定， X_1, X_2, \dots, X_k 是人们在实验中可以加以控制的因子(称可控因子, controlled factor)，它们是输入变量，是影响过程最终结果的。这些变量可以是连续型的(通常是这样)，也可以是离散型的，如温度、压力、功率、流量、供应商、原料产地、机器编号……

影响过程及结果的变量除了这些可控因子外，还可能包含一些可以记录但不可控制的非可控因子(uncontrolled factor): n_1, n_2, \dots, n_q ，这些变量可能取连续值，也可能只取离散值(见图2-9)。对于这些变量，我们通常很难将它们控制在某个精确值上，实际问题

中它们可能取不同的值。我们也把这些非可控因子称为噪声因子 (noise factor), 因为我们常把它们当做误差来处理, 如环境温度与湿度、机器的老化、电源电压的波动、客户的使用方式、设备、操作员、材料批次……

3. 水平及处理

为了研究因子对响应的影响, 需要用到因子的两个或更多个不同的取值, 这些取值称为因子的水平 (level) 或设置 (setting)。

进行水平设置一般基于以下考虑:

- ▶ 实验的范围往往是工艺或设备供应商提供的可运行范围的子集
- ▶ 考虑因子的交互效应, 既要考虑安全又要考虑不允许发生的情况
- ▶ 定量因子的水平值设置应该足够分散, 这样效应就会检测出来, 但是也不要设置太分散以至各种物理机械因素都会包括进来
- ▶ 选择实验区域基本一致的过程范围 (如化学相)
- ▶ 连续型因子的水平可参考: 名义值 \pm 运行区域长度的10%到30%
- ▶ 通常二水平已充分, 除非要曲率分析
- ▶ 定性因子的水平选择缺乏灵活性
- ▶ 确定资源限制, 包括时间、成本、材料、人员、仪器和设施

……

各因子皆选定了各自的水平后, 其组合被称为处理 (treatment)。一个处理的含义是, 按照设定因子水平的组合, 我们就能进行一次实验, 可以获得一次响应变量的观测值, 因此处理也可以称为一次“实验”(trail或experimental run), 也称“一次运行”(run)。处理需要特别注意两点: 水平组合应该是可行的, 安全的, 业务上是允许的, 并且尽量避免缺失数据点; 了解哪些水平组合会产生交互效应, 而这些交互效应在物理上是不允许的。

4. 实验单元与实验环境

指对象、材料或制品等载体, 处理 (即实验) 应用其上的最小单位称为实验单元 (experiment unit)。例如, 按因子组合规定的工艺条件所生产的一件 (或一批) 产品, 接受治疗的一个病人, 等等。

以已知或未知的方式影响实验结果的周围条件, 被称为实验环境 (experiment environment)。这里通常包括温度、湿度、电压等。

2.6 实验设计的三个基本原则: 重复、区组与随机化

有三个基本原则在实验设计中必须考虑: 重复实验 (replication)、划分区组 (blocking) 和随机化 (randomization)。

32 实验设计(DOE)应用指南

1. 重复实验

所谓重复实验是指一个处理施于多个实验单元。这些单元是在统计推断中一个处理所形成的总体的代表，它可以使人们对实验误差的大小进行估计。通常的显著性检验都是将不同处理间形成的差别与随机误差相比较，只有当处理间的这种差别比随机误差显著地大时，我们才说“处理间的差别是显著的”。没有随机误差就无法进行任何统计推断，因此在实验设计中安排重复实验是必不可少的。需要注意的是：我们一定要进行不同单元的重复(replicate)，而不能仅进行同单元的重复(repetition)。换言之，我们一定要重新做实验(即重复实验)，而不能仅重复观测或重复取样。以同单元重复得到的差异来估计随机误差将会低估实验误差，所得的结论是不可信的。我们在实验中一定要包含真正的重复。

2. 随机化

随机化的含义是以完全随机的方式安排各次实验的顺序或所用实验单元，这样做的目的是防止那些实验者未知的但却可能会对响应变量产生的某种系统的影响。



例2-6 随机化实验安排

表2-1 随机化示意图

实验时间	实验顺序	A	B	房间温度
上午9:00	1	-1	-1	15°C
上午10:00	2	1	-1	16°C
下午13:00	3	-1	1	22°C
下午14:00	4	1	1	24°C

在例2-6中，假使我们在同一天内进行的4次实验的顺序就按照表2-1所列顺序进行的话，会有什么问题吗？如果当天的实验前两次实验是在B因子低水平下进行的，后两次实验是在B因子高水平下进行的。但是，随着房间温度的变化，上午的温度较低，下午的温度较高，究竟是因子B的作用还是房间温度的作用，是无论如何也分辨不清的。如果将这4次实验顺序完全打乱，则不会再出现上述问题了。随机化并没有减少实验误差本身，但随机化可以防止未知的但却可能会对响应变量产生某种系统影响的出现。

3. 划分区组

各实验单元间难免会有某些差异，如果我们能按某种方式把它们分成组，而每组内可以保证差异较小，即它们具有同质齐性(homogeneous)，则我们可以在很大程度上消除由于较大实验误差所带来的分析上的不利影响。一组同质齐性的实验单元称为一个区组(block)，将全部实验单元划分为若干区组的方法称为划分区组或区组化。通过在一个区组内比较处理间的差异，就可以使区组效应在各处理效应的比较中得以消除，从而使对整个实验的分析更为有效。例如，假定在上下午时段内差异不大，则可以不考虑安排区组；

如果上下午差异较大，那我们就把上午、下午当做两个区组来安排。这时在分析中就可以去除上下午间的差异的影响，或尽可能把实验全都安排在上午（或下午）进行。如果分区组有效，则在分析时，可以将区组内与区组间的差异分离出来，这样就能大大减少可能存在的未知变量的系统影响。这就是划分区组的好处。

当然，在区组内还应该用随机化的方法进行实验顺序及实验单元分配的安排。什么时候划分区组，什么时候用随机化呢？我们在实验的设计中应遵照下列原则：“能划分区组者则划分区组，不能划分区组者则随机化(block what you can and randomize what you cannot)”。

表2-2 区组安排示意图

	C1 标准序	C2 运行序	C3 中心点	C4 区组	C5 A	C6 B	C7 C
1	3	1	1	1	1	-1	1
2	2	2	1	1	1	1	-1
3	1	3	1	1	-1	-1	-1
4	4	4	1	1	-1	1	1
5	8	5	1	2	1	1	1
6	7	6	1	2	-1	-1	1
7	5	7	1	2	1	-1	-1
8	6	8	1	2	-1	1	-1

练习题

1. 实验如何计划？选择指标、因子及因子水平的设置要考虑什么？
2. 你对实验设计三大基石：重复、区组与随机化是怎样理解的？