

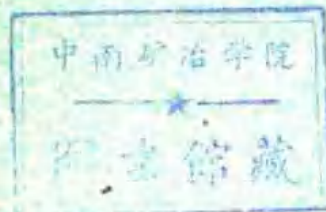
517984

调 优 运 算

GEORGE E. P. BOX
[美] 著
NORMAN R. DRAPER

秦廷龙 曹琴南等译

倪 俊校



中国石油化工总公司上海石油化工总厂

科技情报研究室

《调优运算》是美国BOX教授创导的一种在工业生产装置上应用的简便而有效的数理统计方法。从五十年代开始该方法在美国许多工业企业，尤其是化工企业中推广应用，取得了明显的经济效益。本书阐述了调优的基本原理和实际应用方法，探讨了企业在推广应用过程中会遇到的各种问题。

为了配合上海石油化工总厂开展生产调优工作，我们翻译了本书，参加本书翻译工作的还有陈静方、曹得勇、马海良和周祖根等同志。

本书的读者对象为工程管理人员，特别是生产装置上的工程技术人员和管理人员，也可供管理科学和化学工程专业的师生阅读，对专业统计人员也有一定的参考价值。

秦延龙
曹琴南

一九八四年五月

前 言

调优运算 (Evolutionary Operation) 简称调优 (EVOP), 是目前工业上普遍采用的一种简便而富有成效的统计方法。本书不但阐述它的基本理论, 而且介绍它的实际应用。经验早已告诉我们: 尽管各类统计方法有时候显得颇为深奥难懂, 但它们对于受过专门训练的工程师与化学师确实具有极大的价值, 有助于提高他们的实验室研究和中间试验的效率。然而, 采用调优运算却是基于这样一种看法: 在日常生产中, 只要工艺操作人员自己能经常广泛地应用简单的统计设计和分析手段, 企业就会额外地获得一笔巨大的经济收益。

读者使用本书可采取不同方法。为了掌握简单的常规的调优运算程序, 只需要阅读第一、四、五章, 但如果要获得透彻的理解, 第二、三章也是必须阅读的, 因为这两章的内容涉及到调优运算的基本原理以及许多适用于一切调优运算方案的概念。第一章至第五章就此组成一套完整的调优运算教程。

要使调优运算的应用获得成功, 必须在企业内组织下列三级培训:

1、高、中级管理人员务必懂得调优是什么; 务必坚信它的有效性; 务必懂得它如何能同企业的组织结构相适应; 还务必懂得它如何同其它研究工作互相关联。

2、负责实际装置操作的工艺管理人员、化学师与工程师务必具有足够详尽的知识, 以便能起始、执行和解释调优程序。

3、工艺操作人员务必理解调优的目标, 并接受有关运算方法的训练, 训练的深度视调优运算对于他们工作相关程度而定。

第六章讨论怎样才能达到调优目标。

第七章扼要地讨论一些与调优有关联的技术以帮助读者了解调优运算的来龙去脉。第八章解答在讨论执行调优计划时常被人提出的各类问题。四个附录补充说明了正文中阐述过的若干要点, 书末还列出了详细的参考书目。

本书特地用了一些篇幅来讨论基础统计原理。经验表明: 人们如果在一开始实施调优时就学会如何应用这些基础统计原理, 那将大大有助于他们对优良实验设计及分析的基本原理的理解, 同时也将为他们今后学习和使用更高级的统计方法作好准备。

编写本书时我们意想中的读者主要是工业管理人员, 特别是负责工业过程管理的化学师、工程师、领班和生产管理人员。本书也可作为一种有益的教材, 供学习管理科学、化学工程学和工业管理学的在校生使用。此外, 本书涉及的连续信息收集、分析和反馈的基本原理及有关的专门问题, 对于专业统计人员而言, 也许亦是不无助益的。

目 录

第一章 基本概念	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 小规模研究和生产规模研究	(2)
1.3 类似于生物学上的自然选择	(4)
1.4 固定操作和调优运算	(4)
1.5 消除噪音	(5)
1.6 实例	(6)
1.7 信息板分析	(8)
1.8 三变量模式	(9)
1.9 调优委员会	(9)
1.10 在什么情况下应继续执行调优	(10)
第二章 调优的统计原理	(12)
2.1 工业过程, 观察值和点绘图	(12)
2.2 频数分布	(15)
2.3 分布的特征值: 平均值和方差	(17)
2.4 正态分布	(18)
2.5 从样本估计平均值和标准离差	(21)
2.6 样本平均值的分布	(25)
2.7 效应的平均值和方差	(28)
2.8 对不确定性的统计推断: 显著性检验和置信区间	(31)
第三章 2^2和2^3因子设计	(37)
3.1 因子设计	(37)
3.2 2^2 因子设计	(38)
3.3 2^3 因子设计	(48)
3.4 把 2^3 因子设计分为两个区组	(61)
3.5 小结	(65)
第四章 两变量调优程序工作表	(66)
4.1 引言	(66)
4.2 有附加参比条件的 2^2 因子工作表	(68)
4.3 没有附加参比条件的 2^2 因子工作表	(76)

第五章 三因子调优程序工作表	(77)
5.1 引言	(77)
5.2 2^3 因子工作表(分两个区组,每个区组有一个参比操作点)	(77)
5.3 没有附加参比点的分组 2^3 因子设计工作表	(88)
5.4 简单和复杂	(88)
5.5 组与组之间的偏差和阶段平均标准误差	(88)
第六章 调优的组织工作	(91)
6.1 培训方案	(91)
6.2 两个变量调优的模拟练习	(93)
6.3 促使调优成功的一些手	(99)
第七章 调优、最优化和一些修正的调优	(103)
7.1 引言.....	(103)
7.2 最优化方法和调优.....	(108)
7.3 某些和调优有关的最优化方法.....	(110)
7.4 某些和调优无关的最优化方法.....	(116)
7.5 对调优提出的一些修正.....	(116)
第八章 关于调优的一些问题和说明	(119)
附录 1 在调优方法中标准离差的近似估算方法(见4.2).....	(130)
附录 2 EVOP练习中数据的产生(见6.2).....	(131)
附录 3 最佳经验反馈(见7.1).....	(132)
附录 4 为了发现大小适当合理的效应,必须进行多少次循环?(见7.1).....	(141)
附表 I 正态分布(单侧)	(146)
附表 II 正态分布的概率点(单侧)	(147)
附表 III 正态分布的概率点(双侧)	(148)
附表 IV 用正态样本容量K换算估计标准离差值用的因子 w_k 表	(149)
附表 V $f_{k,\alpha}$ 值表	(149)
附表 VI 调优运算计算用表	(150)
附表 VII 简易随机正态偏差表	(150)
参考资料	(156)

第一章 基本概念

§1.1 引言

一个典型的工业过程的开发，需要经过许多阶段。要开发一个以生产某种产品为目标的化学过程，首先得提出一条有希望的生产路线，然后进行（通常是较长期的）实验室研究来探索它的可行性。再根据实验结果，对可行性作出初步评价，然后确定具体的目标，并勾画出工业化生产的初步轮廓。下一步是根据这一轮廓来建造一套中试装置。作为实验室研究和工业生产之间的一个过渡性装置，中试装置应具有足够的灵活性；对试验条件允许作出较大幅度的改变。直至中试结束后，我们方才可以应用工程学知识来设计工业装置。在上述每一个阶段，都需要进行经济效益分析，以决定是该作进一步探索呢，还是干脆放弃这个课题，把精力转移到寻求更有希望的路线方面去。假定某一装置现已建成，按理说，该设计方案应是一个集现有知识和资源之大成的最佳方案。装置一经投产后，生产者除非不得已，是不会对装置作任何重大修改的。装置既已建成，我们就必须学会如何用好它。然而，操作条件常有很大的选择余地。小试研究已提供了浓度、温度、压力、流速、搅拌速度、加热速度和冷却速度的近似估计值。这些估计值固然是有用的，但一般来说，它们仅仅是连续生产工艺条件的第一批较好的猜测值。这一点已为人们所公认，故而在新装置开车时，人们总是格外的谨慎小心。通常在这阶段要组织专门的技术班子，因为人们懂得，在开车过程中很可能要被迫作出一些重大的调整，如不这样做，装置就无法正常运转，甚至根本不能运转。

开车一旦成功，就意味着工业过程的开发又通过了一个阶段。这时，人们希望该工艺能生产出畅销的产品。然而，几乎不可避免的是，产品的生产速率、收率和质量等暂时低于装置的设计能力。

所以，装置还需要经过一个“调谐”过程。只要回顾一下典型的工厂发展史，我们就可以明白“调谐”可带来极大的好处。通常人们发现：化工厂开车十年后，生产速率将是予想的二至三倍，产品产量大大增加，产品质量明显提高。本书要讨论的正是这个“调谐”法。

“调谐”的意义确实非常重大，但要做好这件工作也不容易。假定我们把一个中等复杂程度的化工过程的标准操作程序分解为许多单独的指令，就象在编制计算机程序时把一个数学上的计算方法分成不同的指令那样，我们便可得出最后的结果如下：指令1：“将浓度1调到A。”……指令17：“把温度5调到X。”……指令37：“调节搅拌速度3到Z。”……指令数不难达到100或更多。假如我们对生产管理人员逐条宣读指令，每次都提出这样一个问题：“你能否肯定如此设定的条件确实是适合于你们的工业装置的最佳条件？”他的回答往往是：“不，我不能肯定。这一设定值是根据小试结果选择的。虽然我们采用它，但它不一定是最好的。”或者他会作如下回答：“这条件曾在工业装置上测试过，那时似乎是最好的，但在测试以后我们已变更过其它一些变量，所以我们现在不能肯定它仍然是最好的。”

在大多数工业部门，开车以后，仍然要继续作出巨大努力来求得生产的改进。除了记录和考核日常运转数据外，研究开发部人员还常在实验室、中试装置以及生产装置上从事进一步的专门研究。特别是当他们利用统计设计及分析这一有效的现代研究工具时，这些研究极有价值，应当持之以恒。

然而，这类专门研究的工作量往往由于技术人员的缺乏而受到限制。我们在这里讨论另一种方法——按照这种方法，只需动用少许技术力量就能对上述的专门研究起到拾遗补缺的作用。

现在让我们换一个角度来看问题。如果借助于专门的技术措施来改进工艺，生产者通常能在他的装置上实现生产能力的稳定增长。当制造大量不同的产品时，年平均增长率往往非常接近常数，如图1.1中的实线所示。

一方面令人感到放心的是，尽管生产者在年初并不具体地知道新的一年内可以改进哪一项工艺，也不确切地明白改进的实质是什么，但他仍然可以相当准确地预测到技术工作能取得的总效果。另一方面令人感到沮丧的是，虽然对本年度内可以实现的具体的工艺改进量能作出十拿九稳的预测，但生产者心里明白，如果不能获得某种新的主动性（initiative），他就无法指望加快改进生产能力的速度。

本书的目的正是阐述一种能提供这种新的主动性的方法，它简单而富有成效，被称为调优运算，简称调优。这种方法已被十分广泛地、卓有成效地应用于化学工业。毋庸置疑，它对其它工业部门，同样是有价值的。调优运算在生产装置上的应用一俟开始，就必须天天搞，一日也不可停顿。但实施调优不需要专职人员；一般的生产人员只需经过短期培训就能应付自如。调优的基本思想是：工业生产仅仅出产品是不够的。工业生产不仅要出产品，而且还应给出如何改进产品的信息。

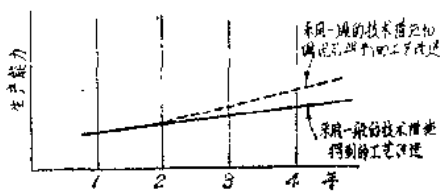


图1.1 生产的增长

调优运算是一种管理方法。实施调优后，装置操作的基本模式将成为一种连续不断的、探索性的日常操作，而不是一种常规的固定操作。有关生产人员一旦习惯这种操作模式，他们关心的问题就不再是“我们是否在搞调优？”而是“我们现在通过调优研究什么？”

调优运算不能代替基础研究。基础研究应该与调优运算并驾齐驱。然而，调优运算通常确实能为从事基础研究的技术人员指明作进一步探索的方向。

§1.2 小规模研究和生产规模研究

如前所述，调优是工业装置上使用的一种基本操作方法。那么我们为什么是在生产装置上而不是在实验室或中试装置上运用这种调优方法呢？这是因为：

- 1、放大效应会使在非生产规模装置上的“调优”失去意义。
- 2、生产装置反正在任何情况下都要运转，而在中试装置和小试装置上实施调优则需要耗费额外的力量，会使并不宽裕的设备及技术力量受到牵制。

放大效应

我们已经知道，小规模实验在设计阶段能够提供非常宝贵的信息，能提供有关工业装置的操作条件的第一批猜测值。然而，流动特性、传热特性、混合情况等将随装置规模的改变而改变，要对这些效应作出校正，人们尚缺乏成熟的工程技术。

当然，也不能说工业生产情况和预料的完全不一样，因为要是这样的话，根据小试进行设计就完全没有意义了。从小试研究转为工业生产，主要过程特性通常保持不变，但可能存在某些细节上的差异，而这些差异在经济上却是不容忽视的。

下面，对图1.2作简单的说明。图中绘出了同样一个化学反应在小试验装置(a)和生产装置(b)上的产率等值线。由图可见，由于放大效应，虽然两个图形的基本特征非常相似，但与小试相比，工业生产的产率等值线有了变形和位移。小试中浓度和时间的最佳结合点(P)到了工业装置上却令人失望地出现了低产率。从小装置最优点P移向大装置最优点O的研究必须，并只能在大装置上进行，因为小装置上的研究只能导致返回P点。我们好比是爬山运动员，可千万别认错了山峰。

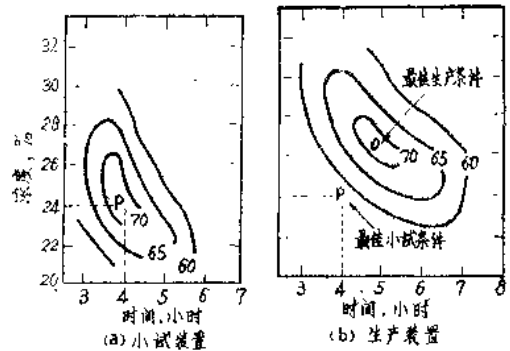


图1.2 产率等值面示意图——小试装置和生产装置产率(%)等值线

注：对图1.2所示的情况不熟悉的读者可能会感兴趣于下面的解释：一个响应（如产率%）和两个变量（如时间和浓度）之间的关系可以用一个曲面来表示，称作响应面。在最大响应的附近，该曲面的形状象一个土墩，土墩的高度代表在某个特定的时间和浓度条件下的响应值。为了在二维空间表示这个曲面，我们在时间和浓度的二维空间内绘出产率的等值线，正如在地图上画出等高线一样。

此图能说明我们的论点，但显然是把问题过分简化了。事实上，由于放大效应引起的移位和变形是发生在多维空间而不是在二维空间。而且，在实际情况下，我们的目标也不一定是最高的产率。在以后各章里我们还将讨论到这一点。

众所周知，生产者需要“调谐”他们的工艺过程。我们已指出，在开车阶段，通过经验调节可作出某些调整。在以后相当长的时间里，偶然的发现，新的设想，专门的实验研究等，都可以导致进一步的改进。在生产装置上引入调优可以大大地提高改进工艺的速度，并且通常会导致另一些若不用调优几乎不可能实现的改进。

实验室和中试装置的局限性

现在我们来谈谈在生产装置本身进行调优处理的第二个理由：即使没有放大效应所造成的困难，单用小试来研究如何改进操作，在经济上往往是划不来的。这些实验的费用很高，倘若要对所有的工艺过程同时进行工艺改进试验，就得配备足够的实验室设备，中试装置和技术力量，在经济上是完全行不通的。

事实上，这些小试是一种代价高昂的“奢侈品”。当我们动用这些装置、设备和所需的

技术专家来研究某个专门课题时，我们就等于放弃了用他们来研究其它课题的可能性。与此相反，工业生产装置及其必要的操作人员已经承担了产品的日常生产任务。假如所需要的信息明明能直接从日常生产中获得，却偏偏还要动用别的人力和物力去搞，那就显得生产者太无能了。工业生产的设备是现成的，操作人员业已配齐，并接受过如何使用这些设备的训练，而生产又总是要进行的，有何理由不去充分利用这些条件呢？

最后还应当指出，旨在改善装置操作的调整措施通常在小试装置上是根本无法模拟的。

§1.3 类似于生物学上的自然选择

在引入调优时，我们应制订一套“工厂正常操作规程”，以确保企业内始终有一股“调优力”在起作用——它将稳定地、自动地将生产推向最优点（如果尚未处于最优点的话），而不会引起任何因产品质量问题而遭受经济损失的重大风险。这种技术能逐步地将操作程序变为最适合于现有装置的形式。为了帮助读者理解如何能做到这一点，我们不妨比较一下工业生产的进化和生物物种的进化。生物进化的机理有两个：

- 1、由于不同因素引起的遗传变异，如突变；
- 2、自然选择。

化工过程也有类似的进化。发现新的生产路线相当于突变；一旦确定了路线，那么，把操作变量调节到最佳水平并加以采用，就相当于一个自然选择的过程。在此过程中操作变量水平不佳的组合将被一些很有希望的组合所淘汰。

图1.3表示龙虾的进化。假定某种突变产生了一种虾，它的“爪子的长度”和“爪子间的压力”相当于图上的P点，在给定环境下“能活到繁殖后代的虾的百分比”的等值线如图所示。围绕P点的点子代表这种龙虾的后代。由于在箭头方向的那些变体生存机会最多，所以过了一段时间以后，代表龙虾后代的点子将自动地沿着生存虾等值面朝着上移动。“自然选择”这一自动进行的过程可以保证在不对龙虾作任何专门处理的情况下，最优型龙虾就能生存下来。又假定环境改变使生存虾等值面发生了变化，那末，自然选择同样可以保证龙虾将朝着新的生存虾等值面上的最优点发生相应的变化。下面，我们力求模仿这个过程。

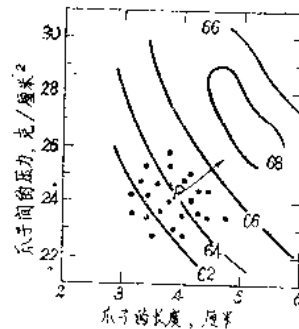


图1.3 一种龙虾的进化。等值线表示在一定环境中能活下来繁殖后代的龙虾百分比

请特别注意，自然选择过程中存在两个基本的因素：

- 1、变异；
- 2、选择优良的变体。

§1.4 固定操作和调优运算

日常生产通常是按严格规定的操作条件（称作工艺参数）进行的。这些工艺参数体现了

当时确认的最佳操作条件。工厂操作者始终严格地按照同一种条件进行生产的操作方法，叫做固定操作。假如我们死板地执行这种操作法，显然就不可能有进化发展，但是，这种操作法所要达到的目的对成功的生产毕竟是十分重要的。因为实际上，我们不仅对过程的生产能力，而且还对产品的物理性质感兴趣。如果允许工艺参数任意变化，产品的物理性质就可能不合格。因此，我们改进操作方法必须有可靠措施，以保证废品率不超过允许范围。

采用调优方法时，我们仔细设计一套在工艺参数附近作微小变化的“变体”*循环。装置的日常操作就依次采用各个“变体”，并不断地重复“变体”循环。这种循环采用一种简单的、不断反复的模式，从而使在工艺参数附近的产品产率和产品物理性质的数据在日常生产过程中逐步积累起来。这样，我们通过日常生产不仅可以获得所需的产品，而且还能得到改进生产所必需的信息。

在日常生产中以上述方式引入了可控“变异”之后，“选择”的效应是这样引入的：把结果以一种易于理解的方式加以排列，并连续不断地提供给工业管理人员，以使能看清为了改进生产必须作出何种变动。在不同生产条件下得到的产品信息流应该汇总在一块挂在显眼处的信息板上，还应指定专人及时地往上填写数据。信息应写得工艺管理人员在任何时候都一眼就能看出：所得数据是否已足够明显到需要把变体的中心移到新的一点；哪些类型的变化会使产品质量降低因而不可取的；运行的耗费是多少等等。

实施调优时，装置的日常操作条件不断地发生变化，这和我们进行某项专门实验时遇到的情况大不一样。后者只持续一段有限的时间，配有专门的实验设备，而且可以把预料产生的废品编入预算。然而，调优是工厂日常生产中的一种具有延续性的操作方法，几乎不需要任何专门设备，也无须通过核准。正因为如此，操作变量的改变必须小到使它对一次运转的影响无法检测出来，所采用的技术也必须简便到能使操作人员自己在实际生产条件下连续不断地加以利用。

§1.5 消除噪音

我们已经讲过，通过稍许改变工艺操作条件可以获得改进生产的信息，而这种改变小到使它对一次运转的影响是无法检测出来的。

为了帮助读者弄清究竟如何才能做到这一点，下面我们将作更详细的讨论。

假定一个新装置刚刚建成。我们设想通过适当地调节工艺可以获得一些改进（用某项指标如经济效益来衡量）。图1.4将这些改进按递减的顺序分别绘出。位于图左边的一些较大的效应在开车后很快就能发现。一俟发现，就顺藤摸瓜，寻根究底，继而对工艺过程作出调整和改进。

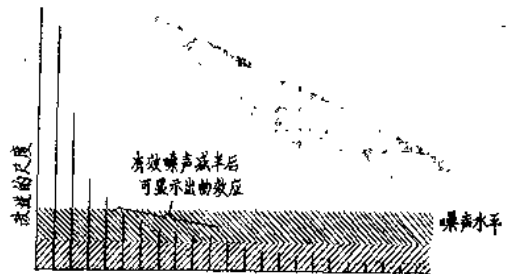


图1.4 效应和“噪声水平”

*因与生物学上的进化相对照，故作者采变体 (variants) 一词，其实就是在固定的工艺条件附近的一些操作点。如图1.5中，现行工艺参数 (O点) 附近的 1, 2, 3, 4 四个操作点即为四个变体——译者。

能迅速发现这些效应并加以利用的原因是它们产生的信号比过程偏差的基准水平（有时称为噪音水平）大。

噪音有多种来源，如原料的改变，输入变量不能精确地保持在设定的水平，仪表和计量误差等等。最终测得的输出值的偏差是所有这些因素的总和。偏差用标准离差或均方根偏差来量度，标准离差 σ 的计算方法和严格定义将在第二章叙述。

在装置运转期中的任何一段给定时间里，以标准离差 σ 量度的偏差具有某个定值，它取决于那时过程控制所能达到的精度。这个标准离差的特定倍数可称作噪音水平或“草坪高度”。假如输入变量水平的改变使得响应的相应变化明显地超过噪音水平，则它“伸出在草坪之上”，因而很容易被发现和利用。然而，假如产生的效应比噪音水平小得多，它就不能被发现和利用。

为了发现被噪声掩盖的效应，必须提高信号/噪声比。我们必须降低有效噪声水平或者提高信号水平。实施调优的过程中，我们同时使用这两种方法。慎重地改变经仔细选定的变量，可使信号放大，而重复这些改变并把这些结果取平均值则可降低有效噪声水平。从图1.4可看出：假如我们将噪声减到原值的一半，一些原来被掩盖的效应将能显示出来。

§1.6 实 例

本章的目的是提供调优全过程的“鸟瞰图”。在以后各章中，我们将详细阐述该法的各个要点。这里我们简要地描述一个简单的二变量调优模式，有关该模式设计的详细情形和结果分析留待以后讨论。

研究的变量

在某个间歇工艺的特定开发阶段，研究了两个工艺变量（或称因子），即某种进料的百分浓度和反应温度。

变体模式即设计

变体的模式示于图1.5。现行的工艺参数标号为0，四种变体的标号为1，2，3，4。在每组条件下生产一批产品，依0，1，2，3，4；0，1，2，3，4；……的次序连续进行操作。

考虑的响应

- 1、生产单位产品的费用。它可用“指定条件下的生产费用”除以“该条件下测得的重量收率”求得。希望此项费用尽可能小，但同时要满足下面两个条件（2和3）；
- 2、某种杂质的百分含量不超过0.5；
- 3、流度测定值在55到80之间。

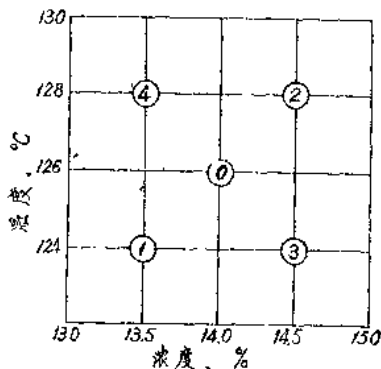
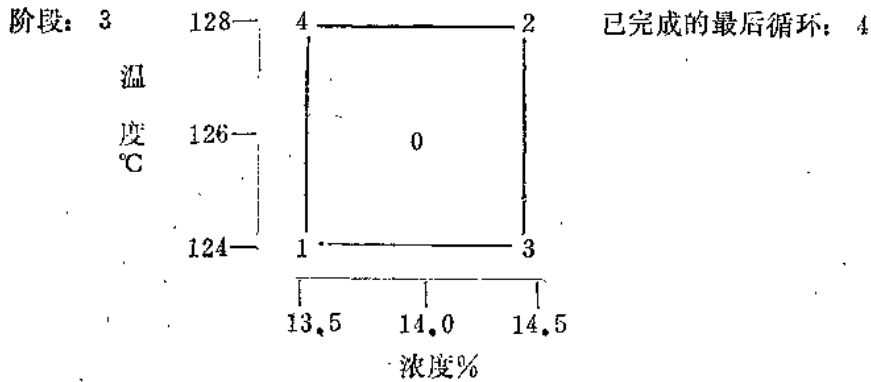


图1.5 工艺参数附近的变体循环

信息板

信息用粉笔写在一块普通的黑板上。也可用蜡笔写在白塑料板上或将磁性字母和数字吸在钢板上，关键是应使数字便于擦去或更改。图1.6表示的模式并不是可以选用的唯一模式，我们只不过是介绍一种切实可行的结果配置方法。

板的左上角的阶段数表示本过程已做完了两个阶段的调优运算。通常，这两个阶段涉及到的是其它变量或取相同变量的不同水平。为了把新的结果和以往得到的结果综合起来考虑，前几个阶段的最终平均值也应准备好待用（例如，可以写在纸片上，再钉在板上）。右上角的循环数表示第三阶段的调优运算已完成了四轮循环。两角下方是现行变体循环的示意图。位于示意图下方的表格摘要记载了操作的现行情况。第一行是必须满足的要求，接下来是不同生产条件下的运行平均值（即最新平均），按变体循环的同样方式列出。这种安排便于评价这些结果的一般含义。



	成本		杂质(%)		流度	
要求	最小		<0.05		55至80	
运行平均值	32.6	33.9	0.29	0.35	73.2	76.2
	32.8		0.27		71.3	
	32.3	33.4	0.17	0.19	60.2	67.6
两倍标准误差范围	±0.7		±0.03		±1.1	

图1.6 四次循环后，信息板上的部分数据

误差范围

各项运行平均值的可靠性由两倍标准误差范围来表示。正如下文要详细解释的那样，在研究工作的任何一个给定阶段，真值一般总是落在这个范围内。例如，在百分浓度14.5和温度128°C下，流度的平均测定值是76.2。这个值受实验误差的影响，但根据误差范围我们知

道，在这些条件下真正的流度几乎总是在 76.2 ± 1.1 的范围内。随着每次循环的完成，计算出的误差范围就愈来愈窄，这反映出运行平均值愈来愈可靠。有了这些误差范围，生产管理人员在任何给定阶段都可确定他们观察到的数据的差异在什么范围仅属偶然性波动，在什么范围内可能代表了真正的效应。

§1.7 信息板分析

为了对图1.6所示情况作全面分析，需要引入某些将在以后各章讨论的概念。这样作的直接目的只不过是为什么作分析做一下示范。我们仅用初学者熟悉的概念来作一些不充分的评述。

结合生产要求和工艺知识对信息板进行分析研究后，管理人员能在下列两个基本决策中选定一个：

- 1、原方案保持不变，继续进行下去，等待下一轮循环提供进一步的信息。
- 2、以某种方式改进操作，这样就开始了调优运算的一个新阶段。

作出第二种决策时，我们会面临好多种可能性。其中几种列举如下：

a、把这些变体中的一个作为新的“工艺参数”，在新的中心点附近重新开始循环。

b、在已指明的有利于改进的方向上探索，并在已找出的最佳条件周围重新开始循环。

(例如，可以在已指明的方向上作一系列的试探，在每一阶段以新的条件和过去的最好条件交替运行。)

c、用新变量代替一个或数个旧变量。在调优方案中常有许多变量有待于试验。

d、根据现有信息的分析，适当改变变体的模式。特别是当进行了一些循环而未发现显著的效应时，可以在更宽的范围内再次改变现有的变量。

针对图1.6中的例子所提供的数据，该作出什么决策呢？从运行平均值我们可以看到：减少百分浓度，费用明显地下降，杂质百分浓度和流度也都降低。若降低温度，对减少费用看来是有利的，但效果较小，而对降低杂质含量，则非常有效。然而，降低温度似乎还会引起流度的显著降低。按照要求，流度必须保持在55以上。这样看来，一旦大幅度降低温度，这个界限就会很快突破。然而，如果大幅度降低浓度，则这个界限有可能不被突破。虽然降低温度可较大量地减少杂质含量——这当然是有益的，但这时该项指标并不是关键所在。因此，我们实际上可以作出单独降低浓度的决定。在第四阶段中设定的三组条件（浓度、温度）为（13%， 126° ），（13.5%， 126° ）和（14%， 126° ）。在这些点运行几轮循环后，将它们进行互相比。第一点平均费用为32.1（已有所降低），杂质含量为0.25，流度为60.7（仍大大高于55）。这一点（13%， 126° ）就被选为作进一步探索的出发点。我们把它规定为新的“工艺参数”，它也就成为今后各轮循环的新基础。

调优运算的艺术

从这个例子中我们能够看出，在不同情况下采取的措施不是一成不变的。人为判断在调优过程中，就像在任何其它研究工作中一样，起着非常重要的作用。自动运行的规则事实上使得工艺负责人对装置运行无法承担责任，因而在心理上和实际效果上都是有害的。正确地执行调优方案可以保证工艺负责人员能连续不断地得到该工艺过程的明白无误的信息，并能

及时采取他认为恰当的相应措施。面对这些信息，他应该采取类似奕棋的姿态。奕棋者一方面要遵循一些固定不变的规则，另一方面，棋赛的各阶段都需要人为判断估计成功或失败的可能性并及时采取相应的对策。

§1.8 三变量模式

前面已举了典型的二变量调优方案的例子，并提出了如何检验结果的初步想法。

现在我们简要地讨论典型的三变量方案。如前所述，几何图形有助于理解。图1.7 a 显示了用于检验三个变量的变化效应的变体循环。这三个变量是：

- 1、升温速率；
- 2、吹入空气量；
- 3、碳处理。

重叠的中心点(点0和∅)是标准工艺参数点。1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

是每个变量分别取高、低两个水平按各种可能形式组合而成的八个变体。图1.7 b 表示该方案五次循环后观测到的平均“特性”。假定我们的目标是使这个“特性”的观测值尽可能小，那么，我们通过对这些数据的研究将能得出什么样的结论呢？读者也许会对这一问题感到兴趣。

至此我们已经讨论过同时研究两个或三个变量的简单方案。虽然也可以在一个调优方案中考察更多的变量，但这种做法通常是不足取的，其原因在于，虽然从理论上讲同时考察更多的变量能够提高研究效率，这一点我们将在以后详细讨论。但实际上，日常运转的工业装置似乎最多只能处理两个或三个左右的变量。假如我们把工业生产过程的研究方案搞得过于复杂而引起混乱，人们就很容易找到借口来使调优夭折。因此宁愿搞一个稳妥的、切实可行的方案，也不要强行实施一个理论上虽好但很快会流产的方案。

不能精确测定的响应

上述例子也附带地说明了没有必要把调优仅仅局限于能直接测量响应的研究工作。在图1.7的例子中，响应是某种产品的“特性”——一项有点捉摸不定但很重要的质量指标。为了得到响应值，需要制备一组经专家鉴定的标准样品，它们在“特性”的某个范围内具有大致均匀的分级，并为每个样品标上一数值记号。然后，将生产出的各种样品分别同标准样品相对照，按照和它最相象的标准样品计值。有许多其它的难以测量的响应也可用类似的方式加以估计，例如粉状产品的结块和照相底片在加速试验时的褪色。

§1.9 调优委员会

在§1.3, 我们曾把自然进化过程和调优作了比较。两者之间有一个重要的差别。在自然进化过程中，变体是自发产生的，但在我们人为的进化过程中，变体需要引入。一般可以

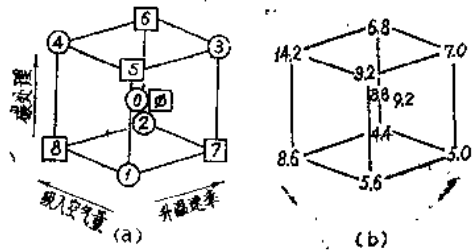


图1.7 三变量调优的变体循环方案

(a) 变体循环

(b) 五次循环后“特性”平均值

选择有关温度、浓度和压力等水平的变体，但是也可以尝试采用许多不太为人熟悉的方式来改革生产工艺。在装置投产多年后，由于采用了“冷门”的新工艺而取得显著成效的事例也是屡见不鲜的，这表明许多有价值的改革措施正等待着我们去发现。

因此为使人工进化过程真正收效，我们还需要创造出一种环境——一种能使有价值的设想不断涌现出来的环境。最好的办法也许是，每隔一定时间召集一批分散在各个技术领域的技术专家进行讨论，请他们提出一些新的设想，这批专家除了包括负责生产装置的成员本身外，还可包括那些对类似于该装置化学反应的一些反应的机理很熟悉的人，以及掌握了有关该装置设备的专门知识的化学工程师等等。讨论的目的在于集思广益，取长补短，力戒人云亦云，老生常谈。

这些人应该组成一个小小的调优委员会的核心，大约每月开一次会，他们的责任是帮助和指导工艺负责人执行调优。这个组织的主要任务是讨论、分析所获数据的含义，并对下一阶段的操作提出建议。他们的评议常常会导致一系列新理论的建立，这些理论将为进一步的探索指明有利的方向。

鉴于有可能出现要求改变产品某项物理性质的问题，负责产品质量的部门也应有代表参加调优委员会。要是还能请到一名统计学家，我们也许能从观察结果中得到更多的启示，并且在有必要时可以大胆采用更高级的技术。

科学反馈

科学反馈在调优中起的作用也许是最最重要的。每隔一定时间，我们应该请来自于不同技术领域的，见多识广，经验丰富的技术人员一道对工艺数据进行一次校核，对工艺问题进行一次讨论。一个忠于职守的调优委员会的成员，除了必须对观察结果作有价值的科学分析外，还要给研究工作源源不断地注入新思想。没有这种经常性的“刺激”，调优就可能停滞不前，甚至可能以彻底失败告终。

我们在本章的先前部份指出：调优是由装置操作人员自己执行的。但是，注意发挥调优委员会的专家们作用，并不违背这个原则。事实上，专家们花费的时间可能仅仅是每月一个下午而已。调优方案的实施主要还是由工艺负责人负责，而不是由专家们负责，后者只是以顾问的身份发挥作用。

调优委员会一俟建立，有效地执行调优计划所需的一切条件均已具备，我们且已得到了图1.8所示的“闭路循环”。就这样，我们可以提供一种改进生产的切实可行的方法：使用这种方法不需要添置任何专门的设备，而且它几乎适用于任何生产过程——不管所涉及的装置是简单还是复杂。

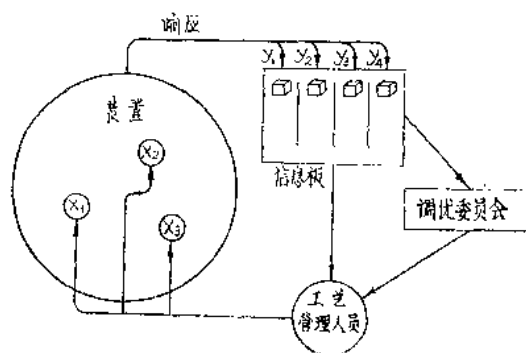


图1.8 调优操作“闭路循环”图示

§1.10 在什么情况下应继续执行调优

有了一支机灵活跃的职工队伍，有关工艺改革的思想就会源源不断地涌现出来。调优方

法的确是一种永久性的日常操作模式，人们完全应该这样来看待它。只有当调优运算看来是得不偿失时，才有理由重新采用固定操作。事实上，即使我们只获得非常小的收益，继续执行调优也是值得的。可以用图1.9来评价任何给定时间内的装置运行情况。图上的实线A表示在操作的不同阶段所能节省的成本费用（美分/磅）。虚线B表示假如每一阶段都在中心点或“工艺参数条件”下操作所能节省的成本费用。倘若产量稳定不变的话，阴影部分的面积和执行调优方案累计节省的成本费用成正比，而在实践和虚线间的每块矩形面积表示在该阶段执行调优的累计“费用”。第一阶段的黑面积表示这阶段执行调优的总的费用，从第二阶段节省成本费用中扣除。

其实，每一阶段调优运算所引起的费用，只持续一段有限的时间，而它带来的改进却随生产过程的延续一直起作用。假定工艺改进在被揭示后将连续赚钱 p 年，而执行调优时增加产品成本 c 美分/磅，那么，在任何时刻调优是否应该继续执行的问题，可以通过比较调优过程中预期产生的改进速率 r （美分/磅）和临界改进速率 $r_0 = c/p$ 来决定。假定预期调优需运行 t 年，以致到这阶段末成本将下降 rt 美分/磅；同时，又假定每年生产 k 磅产品，那么，在采取这一改进措施的 p 年内，将共节省成本费用 $rtkp$ 美分。在同一时期，我们将共生产 kt 磅产品，支出调优运算费用 ckt 美分。只要 $rtkp$ 大于 ckt ，也就是 r 大于 $r_0 = c/p$ ，则调优方案在经济上就是上算的。

且以图1.9所示情况为例来讨论。图示的方案到底应该继续执行呢还是立刻停止？让我们非常保守地假定该工艺获得改进后能连续三年赚钱，所以设 $p = 3$ 。假定 c 取开始九个阶段的平均值。这样， $c = 0.3$ 美分/磅。然后求出临界速度 $r_0 = 0.3/3 = 0.1$ 美分/磅/年。这种情况下，只要调优预期得到的改进速率大于或至少不低于 0.1 美分/磅/年，我们就应该继续执行调优方案。临界增长速率表示在图1.9的顶部。可以看出，实际改进速率在上一年约为 6 美分/磅/年（约为临界增长速率的 60 倍），并且没有任何迹象表明这个速率下降。所以毫无疑问，这个方案应继续执行。

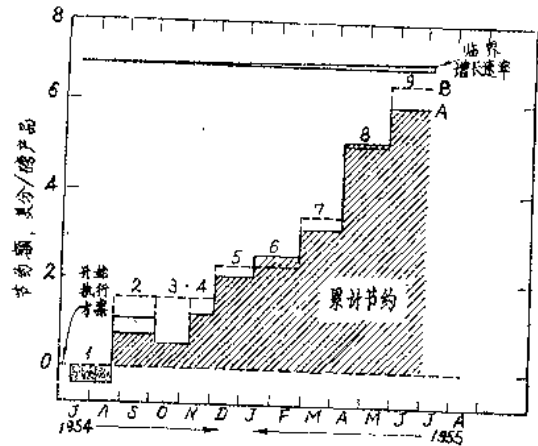


图1.9 调优方案的进度（附临界增长速率）

自从1954年开始执行调优以来，从大量方案中获得的经验已经证实：上述例子是颇有代表性的，调优确实是应该视为一种永久性的日常操作模式。

把调优说成是“实验生产”，或说成是“实验”是心理上的错误。所谓实验是指在一段有限的时间内被人们执行的一种有限的专门程序，而调优却是装置常规操作的一部分。

第二章 调优的统计原理

在调优过程中所需要进行的各种计算都是比较简单的，我们将在第四章和第五章作系统的介绍。读者可以很方便地按照这两章列出的工作表来进行计算。事实上，掌握调优的常规方法所需要的有关知识都已包括在第一章、第四章和第五章这三章里了。但是，对于一个实施调优的负责人来说，他还很有必要弄懂作为调优运算的理论基础的基本统计原理。我们将在这一章中阐述这些原理，并在第三章中，通过列举一些经常使用的统计设计的例子来作具体讨论。

§2.1 工业过程、观察值和点绘图

典型的生产操作

假定有这样—个工业过程：把几种配制好的原料加进反应器，然后拌和、加热，最后化合成产品。这一过程既可通过间歇操作进行，也可通过连续操作进行。间歇操作的方式是：往反应器里加足一批配料，发生反应，取出产品；然后再往反应器里加入一批配料，重复上述各个步骤。连续操作的方式是：原料连续不断地加进反应器，在这同时，产品连续不断地被取出。无论采取哪一种操作方式，装置在反应条件不变的情况下运行的一定的周期，被称作“一次运转”。对于间歇操作来讲，“一次运转”是指在相同的条件下连续生产几釜或—釜的过程。对于连续操作来讲，“一次运转”是指装置在恒定的反应条件下连续操作的一个周期。实施调优计划时，我们要把工艺条件有意地作某些变更。但在本章中，我们主要讨论在工艺条件不有意改变时实验结果的偶然变化，也就是说，我们要研究在逐次运转中仅仅由偶然因素所引起的实验结果的变化，其目的在于帮助读者学会如何区别真正的效应和随机影响；前者是由于有意地改变工艺条件而引起的，而后者则在工艺条件不有意改变时，也可能发生。

结果值的偏差

即使工艺条件保持不变，逐次运转的观察结果也会发生变化。这种逐次运转的偏差是由于许多不同因素造成的。测量误差和分析误差固然是一部分原因，但变化的主要原因却在于这样一个事实——任何—次特定的运转都不可能精确地重现原来的设定条件。

按时间顺序排列的点绘数据

假定有这样—个化学过程，其10次连续运转的产率百分数记录为：66.1, 63.7, 65.8, 64.8, 65.7, 66.3, 64.8, 65.2, 64.3, 65.3。我们把上面的记录值以时间顺序点绘在图2.1中。