

SQC-6

统计质量控制

STATISTICAL QUALITY CONTROL

实验设计

Experiment Design

陈国铭 主编

饶上建 田从金 编

中国石化出版社

统计质量控制

实验设计

中国石化出版社

96
08
9

SQC-6

统计质量控制

STATISTICAL QUALITY CONTROL

实验设计

Experiment Design

陈国铭 主编

饶上建 田从金 编

中国石化出版社

(京) 新登字 048 号

内 容 提 要

本分册叙述的是安排实验的科学设计方法，是数理统计的一个重要分支。在质量管理中，它在开发新产品及质量改进等活动中，均有广泛的应用。

本册在讲述了实验设计的基本概念、原则和实施程序后，重点介绍了优选法、单因素实验设计、正交设计等，并深入地讲述了正交实验的统计分析。本书着重于结合石化生产的实践，讲述与实例相结合，略去了对一些公式的数学推证，力求深入浅出，使读者易于理解和掌握。

本书可供企业的质量管理人员，工程技术人员，有关院校师生阅读。

SQC-6

统计质量控制

STATISTICAL QUALITY CONTROL

实验设计

Experiment Design

陈国铭 主编

饶上建 田从金 编

*

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲 1 号 邮政编码: 100029)

煤炭工业出版社印刷厂排版

煤炭工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

850×1168 毫米 大 32 开本 $7\frac{1}{2}$ 印张 196 千字 印 1—6400

1995 年 3 月北京第 1 版 1995 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-80043-559-8/O·024 定价: 8.50 元

中国石油化工总公司质量管理协会组织编写

生产技术顾问：张德义

统计技术审核：王经涛

主 编：陈国铭

副主编：张祖荫 郭耀曾

编 委（按姓氏笔划）：李世英 陈国铭 杨丽春

张祖荫 饶上建 郭耀曾 崔廷铨

其他编辑校核人员：万 涛 刘秋萍 吕巧云

邱以玲 田从金

序 言

为了适应国际贸易往来和经济合作的要求，国际标准化组织经过十多年的努力，于1986年和1987年相继正式发布ISO8402《质量——术语》标准和ISO9000质量管理 and 质量保证系列标准，将世界多年质量管理的经验进行了标准化。ISO9000系列标准的基本点是要求企业在生产过程中建立有效的质量保证体系，并对质量体系中相互关联、相互作用的若干要素进行有效的控制。在过程质量控制中，科学、有效方法之一就是数理统计方法。因此在ISO9000系列标准的各个模式中以及质量管理和质量体系要素指南中都要求在市场分析、产品设计、工序控制、性能评定、数据分析等方面广泛使用统计技术，其范围包括实验设计、方差分析、显著性检验、累积和控制图、抽样检验等技术。因此，研究学习统计质量控制技术对于贯彻ISO9000质量保证系列标准，提高科学管理水平是非常必要的。

回顾世界质量管理的发展史，可以看出，数理统计技术在质量管理中发挥了重要作用。从19世纪末到现在，质量管理在历史上经过了检验质量管理、统计质量控制和全面质量管理三个阶段。单纯检验质量管理的严重缺点：一是只能从产品中发现和挑出废品，事前预防功能不强；二是由于检验人员的差错，即使全数检验也可能漏检或错检；三是至关重要的破坏性试验不可能全数进行。产品是生产出来的，单靠检验是不能防止产生废品的。1924年美国贝尔研究所的休哈特(W. A. Shewhart)运用数理统计的原理提出了控制生产过程中的“6 σ ”方法，即后来发展的质量控制图和预防缺陷的概念。与此同时，同属贝尔研究所的道奇(H. E. Dodge)和罗米格(H. G. Romig)联合提出了在破坏性试验情况下采用的“抽样检验表”。二次大战初期，美国大批民用品转入军

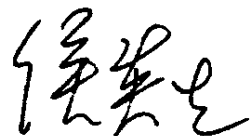
工生产，由于事先无法控制废品而不能满足交货期要求，又由于军工生产多属破坏性试验，全数检验不可能也不允许。美国国防部为了解决这一难题，邀集休哈特、道奇、罗米格以及美国材料与试验协会、美国标准协会、美国机械工程师协会等有关人员研究，于1941~1942年先后公布了一系列“美国战时质量管理标准”，要求各公司普遍实行统计质量控制方法，结果半年内取得显著成效。后来统计质量控制取得了很大发展。

我国自从1978年从日本引进全面质量管理，十多年取得了显著成效。纵观我国的质量管理发展历史，是由检验质量管理直跃全面质量管理，对数理统计方法的运用远不是像当年美国那样深入广泛，不少决策、设计、科研、生产、销售、服务部门在提出问题、解决问题、检查结果时有些人还不习惯于进行科学的数理解析。

为了普及数理统计基本知识并在生产实际中发挥作用，我们组织石化行业中具有实践经验的质量管理专家编写了这套《统计质量控制》系列丛书。本书共分十册，第一册是数据收集和整理，第二册概率和数理统计基础，第三册估计和检验，第四册控制图，第五册方差分析，第六册实验设计，第七册相关和回归分析，第八册抽样检验，第九册统计方法应用演示50例，第十册数表。

数理统计方法就是通过对生产实践中大量数据的收集、整理、解析，研究生产实际中的内在规律的数学方法。和目前国内其它有关数理统计的书籍相比，本系列丛书的显著特点：一是它不同于一般的数学教科书，特别突出了实际应用，因此在编写中尽量减少不必要的公式推导，是一本实用性较强的书籍；第二个特点是书中列举了大量社会和生产（特别是石油化工生产）实例，文章从实例引出理论，又从理论回到实例，便于读者理解和应用，适合于工业企业特别是石油化工等流程型行业设计、研究、生产、销售、辅助等系统技术人员和管理干部学习参考；第三是语言既通俗易懂，又有一定深度和广度，既可用于中等水平人员学习应用，又可适用于高等水平技术人员研究参考。

为了更好应用本书，建议学习中注意几点：一是随着计算机的高度发展，许多数理统计方法可完全不需手工计算，即可很快得出结果，已经掌握了统计方法的人可直接借助计算机，但对于初学之人，还是先用手算为好，防止知其然而不知其所以然，不利于在实践中灵活运用；二是对于现场技术人员，不要去深究公式推导，只要求会实际灵活运用；三是统计方法只提供解决问题的手段，必须和固有技术相结合才能解决问题，因此要使读者学会用数学的思维考虑专门技术问题；四是质量管理所用的方法不限于数理统计方法，还包括许多其它方法，如价值分析 (VA)、生产工学 (IE)、操作研究 (OR)、价值工程 (VE)、可靠性工程 (RE) 等，本书这次没有列入，读者可根据需要深入研究，灵活运用。



1995 年 1 月

目 录

1	概述	1
1.1	实验设计的基本概念	1
1.2	实验设计的类型	2
1.3	实验设计的基本原则	4
1.4	实验设计的实施程序	9
2	优选法及其应用	13
2.1	单因素优选法	13
2.2	双因素优选法	38
2.3	多因素优选法	48
3	单因素实验设计	53
3.1	拉丁方实验设计	53
3.2	不完全区组实验设计	64
4	多因素实验设计——正交实验设计	69
4.1	正交实验设计的基本知识	69
4.2	正交表的表头设计	77
4.3	不考虑交互作用的正交实验	85
4.4	考虑交互作用的正交实验	105
4.5	分批正交实验	115
5	正交实验的统计分析	121
5.1	正交实验统计分析的目的	121
5.2	正交实验统计分析的内容	121
5.3	正交实验统计分析中简化数据的变换	121
5.4	正交表的平方和分解	123
5.5	正交实验的方差分析	125
5.6	正交实验设计的技巧运用	146

习题.....	169
习题答案.....	176
附表 1 平衡不完全区组设计的参数表	180
附表 2 平衡不完全区组设计表	182
附表 3 多因素实验设计常用正交表	210
附表 4 常用的有交互作用列的正交表的点线图	222
本册使用符号.....	226
参考文献.....	227

1 概述

1.1 实验设计的基本概念

实验设计，顾名思义，就是为了解决如何做好实验的有关设计或安排方法。

随着商品生产和市场经济的迅速发展，企业为了在日趋激烈的国内外市场竞争中求得生存和发展，不断保持和扩大其产品（或服务）对市场的占有率，必须始终如一地坚持质量改进、优化生产工艺技术、努力提高产品质量、降低实物消耗、高度重视并致力于新产品的开发设计，力求以最低的投入实现高质量、高产率、高效益。围绕投入——产出预期目标的实现，企业往往要进行大量的质量改进和科学实验，并在实验中经常会遇到以下问题：

（1）怎样才能用最少的实验次数、最短的实验时间和最经济的人力、物力去完成需要进行的全部实验？

（2）采用什么样的实验方案（或实验条件的组合）进行实验，才能获得预期的实验结果？

（3）各种考察因素、实验条件、实验环境及其相互作用等对实验结果有何影响？影响的程度如何？

（4）怎样分析、判断实验结果是否符合规定要求？……等等。

这些问题，既是企业经营者和实验人员的共同关心所在，也是实验设计作为数理统计的一个分支所研究和涉及的全部内容。

实践证明，解决以上问题的办法就是合理地安排实验方案，并对实验数据进行有效的科学分析。如果实验方案安排得好，就可以收到事半功倍的效果，获得可为实践活动提供依据的满意信息。相反，则会事倍功半，甚至不可能达到预期的实验目的。

为便于有效地对实验设计及实验数据进行安排和分析，在实验设计中，我们通常将实验所需考察的结果称为指标。将对实验

结果可能产生影响的各种变数称为因素。将每一因素在实验中所确定的、需要对比的各个具件条件称为水平。同时把在一次实验中所指定的实验条件称为处理。把除去考察因素以外的一切可能影响实验结果的其它条件称为实验环境。为了应用方便，一般用 y 表示指标，用 $A、B、C、D$ 等表示因素，用 $A_1、A_2、B_1、B_2、C_1、C_2$ 等表示各因素的不同水平。

例 1-1 某石油化工实验装置，要在原有生产实践的基础上，对现有生产工艺条件做进一步实验，以求提高装置的总轻油收率。

经专业技术分析，决定在原料性质保持相对稳定的情况下，对催化剂循环量、反应温度、反应时间等三个对总轻油收率影响较大的因素进行重点考察，其中每个因素比较两种不同的条件，将具体条件分列如下：

实验考察的因素	实验对比的条件
A. 催化剂循环量（吨/小时）	$A_1=600 \quad A_2=650$
B. 反应温度（℃）	$B_1=495 \quad B_2=500$
C. 反应时间（秒）	$C_1=3 \quad C_2=3.5$

总轻油收率就是实验的指标（ $y\%$ ）。对指标可能有较大影响的，而且在实验中提出了明确的条件加以对比的变数：催化剂循环量、反应温度、反应时间是实验中待考察的三个因素。三个因素需要在实验中对比的各个具体条件，如 600 吨/小时、650 吨/小时是催化剂循环量这个因素的两个水平，495℃、500℃是反应温度这个因素的两个水平，3 秒、3.5 秒是反应时间这个因素的两个水平。三个因素、六个水平在每次实验中所确定的水平组合，如 $A_1B_1C_1、A_2B_2C_2、A_1B_2C_1$ ……等就分别是几种不同的处理。其它未列入考察因素的、可能对指标产生一定影响的有关条件，如原料性质、反应压力、主风量、实验时的大气温度、湿度等，均为实验环境，可视它们为相对稳定。

以上问题中共有三个因素，每个因素均取二个水平，在实验设计中称之为二水平三因素实验，一般表示为 a^3 型实验。

1.2 实验设计的类型

实验设计按其考察因素的多少及实验方法的特殊性，一般有
以下常用的基本类型：

- (1) 单因素实验设计。
- (2) 双因素实验设计。
- (3) 三因素实验设计。
- (4) 拉丁方实验设计。
- (5) 正交实验设计。

上述每一类型的实验设计，根据实验条件、实验目的和要求的不同，可采用多种不同的实验方法。如用于单因素实验设计的方法通常有 0.618 法、分数法、对分法、均分分批实验法、比例分割法、完全随机化实验设计、随机区组实验设计、拉丁方试验设计、不完全区组实验设计等；用于双因素实验设计的方法有降维法、瞎子爬山法、陡度法、坐标轮换法等；用于三因素或多因素实验设计的方法主要是正交实验设计法，它直接利用已经设计好的正交表安排实验，并对实验数据进行相应的数理分析。

在上述方法中，0.618 法和正交实验设计法应用最为广泛和普遍。因此，这两种方法也是本分册的主要内容和重点。在实际应用时，不论是进行哪类实验设计，合理安排实验和对实验数据进行相对应的分析，始终是做好任何实验不可分割的两个部分。即是说，在实验阶段就要充分考虑如何对实验数据进行分析的问题，在分析阶段，又要回顾设计的特点，看分析结论是否科学合理。尽管如此，根据每项实验的目的和要求不同，对以上两个不同的组成部分，也可以各有侧重，可以从具体情况出发，对实验的方法加以灵活应用。

当实验的目的仅侧重于设计时，往往对实验结果的分析只求其大概，甚至略而不谈，通常可把实验设计视为对考察因素的一种选优，只要求通过选定的方案进行实验能达到预期的实验结果就行了，至于实验结果为什么好？实验的精度和可靠程度如何？均不作深究。即实验者所着重关心的问题，仅仅是 1.1 节中所列四个问题中的第 (1)、(2) 两个问题。若当实验的目的和要求侧重

于分析时，实验者所着重关心的问题则是上述四个问题中的第(3)、(4)两个问题。此时，无论是实验结果好坏，都要对实验数据进行全面的统计分析，找出每一实验因素及其相互作用对实验结果的影响效应，并对实验的精度和可靠性作出定量评价，从而为进一步开展实验和指导生产实践活动提供更多的有用信息。在许多情况下，如果根据专业技术知识和原有的实践经验，在进行实验设计之前，就已经知道实验结果与因素之间存在某种数量关系或理论模型，则可进一步采用各种实验回归最优设计，以用于更有效地对指标进行预测和对因素进行控制。总之，由于各种实验设计的数据状态不同，所用统计分析的方法也均应与其相对应。

1.3 实验设计的基本原则

实验设计作为数理统计的一个重要分支，又是一门广泛适用的应用学科。它既要求实验数据必须服从一定的统计规律，以便对数据进行有效分析。同时也更希望尽可能减少客观存在的实验误差的干扰，以最终得到比较精确可靠的结论。为兼顾这两方面的要求，实验设计普遍应遵循以下三个原则。

1) 重复原则

如果同一指定的实验条件（包括某一因素的某个水平或多个因素的某一水平的组合）在实验中出现一次以上，则称这一处理被重复，或对这一处理进行了重复实验。进行重复实验的目的主要是估计误差，提高实验的精度和增强统计推断的能力。

根据本丛书第二、三分册中已阐述的统计基础理论，在实验中，我们通常把同一实验在多次重复中所出现的差异称为误差，用以反映实验中客观存在的一些无法避免的不可控因素对实验结果的影响，并用重复实验数据的标准差来度量其大小和描述该项实验的精度。如果实验不重复，即每种处理只进行一次实验，显然无法知道误差的大小，只能简单地直接比较每次处理观测值（即每次实验所观测到的实际结果）的大小来判断其优劣，这种比较因为不能得到误差的估计，因此也不可能得出任何精确可靠的结论。相反，若实验进行了重复，由于可以估计出误差值，则对实

验每种处理之间出现的差异是由因素的变化所致或是由误差而引起，便可以得出比较可靠的推断和结论。由此可见，进行重复实验或增加实验的重复次数是非常必要的。按照统计规律，各种处理的效果在测定中，因往往并不知道其真实数值，因而通常用多次观测到的平均值作为标准，一个重复实验的精度则自然是处理平均值的标准差。当实验数据分布的标准差为 σ 时，重复 n 次的处理平均值的标准差等于 $\sigma/\sqrt{n}$ 。这表明，增加实验次数就能大大提高实验的精度。当然，重复实验的次数越多，所需付出的人力、时间和经济上的代价相应越大，因此应兼顾二者的要求，在实际应用时合理确定每项实验重复次数的多少。

2) 随机化原则

指实验时处理在各项实验中的配置或各个实验的顺序不应以人为的、或某种有利的方式确定，而是完全以随机的方式进行安排。随机化通常包括两个方面，一是因素水平的随机化，即在选取因素时，应随机地排列其水平顺序，尽量不要由小到大或由大到小来排列，而应使因素的某个水平或指定因素的某个水平组合，都具有均等的机会或概率被配置到任何一个实验中去；二是实验次序的随机化，即实验时不要按规定（规则）或数列的自然顺序来决定实验的实施顺序，而应使实验顺序随机化。随机化原则是对实验数据进行统计分析的基础，只有随机化后的实验数据才服从一定的统计分布规律，而统计分析则是建立在一定的统计分布的理论之上。按照概率的观点，经过随机化，系统误差可趋向于相互抵消。在实施实验时，则可使未受控制的因素的影响相互抵消而使系统误差转化为随机误差，从而避免了各处理平均值在比较时发生偏倚。

实施实验随机化的方法，通常可采用抽签、抓阄、掷骰子和查随机数表等。

例 1-2 对例 1-1 中的实验，若只需考察反应温度因素 B 的两种条件对总轻油收率的影响，催化剂循环量（因素 A ）、反应时间（因素 C ）与其余可能对指标 y 有一定影响的全部实验条件都保

持相对稳定，试按随机化的原则对 B_1 与 B_2 进行比较。

仍设 $B_1=495^{\circ}\text{C}$ 、 $B_2=500^{\circ}\text{C}$ ，各作 5 次实验，其实验顺序的随机化，可用以下抽签法确定。

取 B_1 、 B_2 各 5 根签，二者混杂一起，然后从 10 根签中抽出一根，如为 B_1 签时，则第一次实验按 B_1 作，并记录其数据。然后逐次在剩余的签中每次抽出一根，并按每根抽出签所标示的因素位级 B_2 、 B_2 、 B_1 ……依次作第二次、第三次、第四次……实验，直至抽完最后一根签，即是第十次实验所考察的因素水平。将抽出的十次实验顺序及其相应考察因素水平的实验结果整理后如表 1-1。

表 1-1

结果 处理	重 复	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均%
$B_1=495^{\circ}\text{C}$		71.2			71.8		72.4		71.5	72.3		71.84
$B_2=500^{\circ}\text{C}$			75.6	76.0		74.8		71.3			76.2	74.78

由表 1-1 可见：

①因素 B 的两个考察水平 B_1 、 B_2 ，在总共十次实验中各重复 5 次的实验顺序，是完全随机化的顺序。即 B_1 的 5 次重复试验是在十次总实验顺序号中第 1、4、6、8、9 号进行， B_2 的 5 次重复试验则是在 2、3、5、7、10 号上进行；

②以 B_1 、 B_2 各进行 5 次重复实验，实验结果的平均值 $\bar{y}_1=71.84\%$ 、 $\bar{y}_2=74.78\%$ 相比较， $\bar{y}_2>\bar{y}_1$ ，表明在考察因素水平所确定的实验范围内 ($495^{\circ}\text{C}-500^{\circ}\text{C}$)，提高反应温度可以提高总轻油收率。如反应温度超越了实验中确定的范围，则需另设水平安排实验方案，根据实验结果重新进行比较和判断；

③将 B_2 和 B_1 各重复 5 次实验的结果相比较，其中有 4 次 $y_2>y_1$ ，而第七次实验的结果 y_2 却小于第 4、6、8、9 次实验的结果 y_1 ，这表明在第七次实验时，除考察因素 B 以外的其它某些因素，如原料性质或催化剂循环量等可能发生了不利于轻油收率提

高的变化或波动，从而使第七次实验的系统误差增大，出现了与正常情况下相矛盾的实验结果。在实践活动中，由于影响指标的因素总是为数众多而又客观存在，在实验中要完全控制它们处于相对稳定，以排除其对指标产生的系统影响，实际上很难做到。因此，为了公平合理地比较考察因素或因素的不同水平对指标的影响效应，就还需对实验条件进一步实施局部控制，并对实验数据进行必要的统计分析。

3) 局部控制原则

指在一项实验中，对选定进行考察的因素之外、可能对实验结果产生影响和对实验产生干扰的其它因素，在必要时，可按某些标准将实验对象和实验环境等实验条件，如日期、地区、生产装置和原材料批等分成若干部分或区组进行实验，以实现局部控制。实施局部控制的目的在于使各部分内或各区组内的实验环境比较一致或相对稳定，使其差异尽量表现或局限在各部分之间或各区组之间，而不致影响对考察因素的比较和分析。局部控制原则通常又叫做区组构成原理。

例如，欲对 3 种分子筛催化剂 A_1 、 A_2 、 A_3 对催化裂化汽油收率的影响效应进行比较，决定在全国不同地区的 5 套催化裂化装置上进行实验。根据专业知识分析，除分子筛催化剂以外，催化原料的性质、催化裂化装置的特点、其它工艺操作条件等，都可能对实验结果产生影响。如果 3 种分子筛催化剂都在同一套催化裂化装置上进行实验，上述实验环境的系统差异相对来说较易控制和保持稳定，但现在决定是在全国不同地区的 5 套催化裂化装置上进行实验，为了消除实验环境系统差异对实验结果的影响，在安排确定实验方案时，我们可以把不同地区的每套催化裂化装置作为一个区组，在每个区组即每套催化裂化装置上安排进行 3 种催化剂实验。为使 3 种催化剂在任何一套催化裂化装置上进行实验都有均等的机会，3 种催化剂的实验顺序均按随机化确定，其实验方案设计如表 1-2 所示。这样，无论 5 套催化裂化装置在地区、装置特点和原料性质等各方面存在多大差异，但进行 A_1 、 A_2 、

表 1-2

实验顺序	区 组	装置 1	装置 2	装置 3	装置 4	装置 5
处 理	催化剂种类 A_1, A_2, A_3	A_2, A_1, A_3	A_3, A_2, A_1	A_1, A_2, A_3	A_2, A_3, A_1	A_1, A_3, A_2

A_3 三个实验的实验环境都基本上接近一致, 因此不同区组存在的系统差异, 不可能对 3 种催化剂的比较构成影响, 在分析时可以将其排除。这样也就实现了对实验环境差异的局部控制。通过比较 3 种催化剂在每套催化裂化装置上的实验结果, 可以分别得到在不同区组内每种催化剂对汽油收率的影响效应。然后再对 5 个区组的实验数据和结论进行分析比较, 就可以进一步找出 3 种催化剂对催化裂化汽油收率带有共性的影响效应。

重复、随机化和局部控制三原则的作用和相互关系如图 1-1 所示。由图示可见, 随机化的作用主要在于使实验数据服从一定的统计规律, 以便于对实验结果进行误差估计和统计推断。局部控制的作用则在于尽量减少和排除系统差异对实验结果的影响及干扰, 以利于提高实验精度。而重复则兼具两者的作用。所谓实验设计, 就是根据实验目的、考察指标和所选定的因素水平, 按照重复、随机化和局部控制的原则所制定出的一个实验方案。按此方案进行实验, 并对实验数据进行统计分析和推断, 就能得到比较精确、可靠和优化的实验结果。

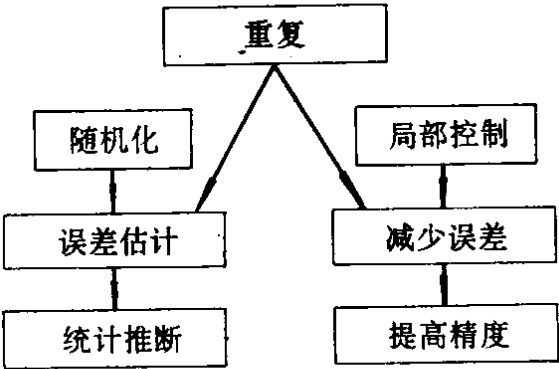


图 1-1

实验设计三原则是由英国著名统计学家费歇 (R . A . Fisher) 于本世纪 20 年代所开发, 通常又称为 Fisher 实验设计三原则。按此原则, 当时他首先在农业实验上采用多因素配置方式,