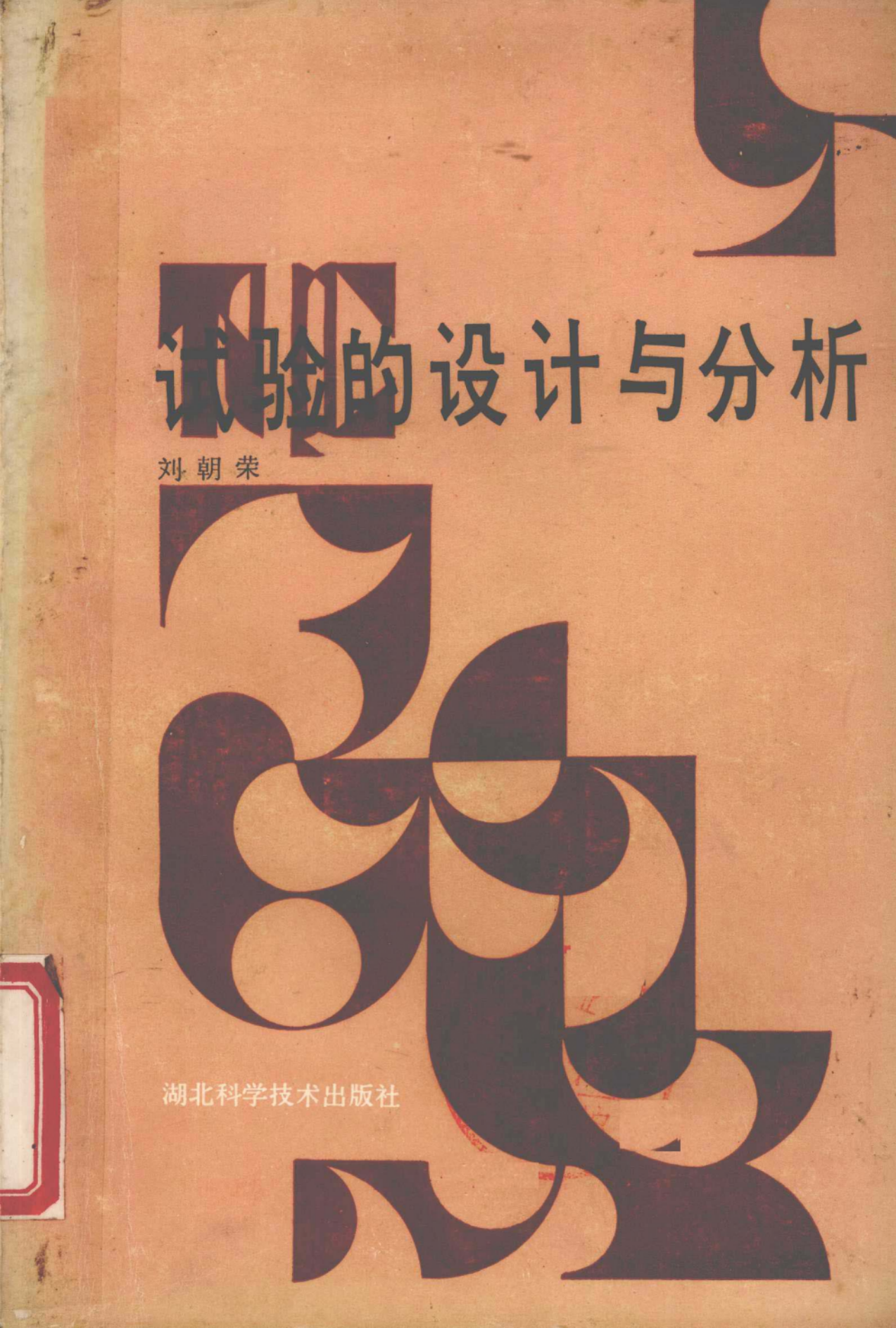




试验的设计与分析

刘朝荣

湖北科学技术出版社

ISBN 7-5352-0575-5

G·127 定价:4.80 元

T 试验的设计与分析

刘朝荣

湖北科学技术出版社

试验的设计与分析

刘朝荣

*

湖北科学技术出版社出版发行 新华书店湖北发行所经销

中国科学院武汉分院科技印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 14印张 342千字

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

ISBN7-5352-0575-5/G·127

印数：1—15 000 定价：4.80元

序

人类总要有所发现。当人们看到异常现象时，就会进行思索，希望有所发现。至于怎样能看到异常现象？人们也许会较多地联想到到南澳大利亚去观看日蚀；到宇宙飞船上去观察植物的生长，等等。而很少想到一种有普遍价值的科学方法——试验的设计与分析。试验的设计能增加引人思考的异常现象的出现机会，而试验的分析则能帮助人们去发现其中的奥秘。作为一种科学方法，试验的设计与分析能加快人类有所发现、有所前进的过程，因而它不仅是每个专业工作者必备的技能，也是常人不可缺少的知识。

早在本世纪 20 年代，英国 R.A. Fisher 首创试验设计这门学科。虽然当时针对的问题是农业试验的设计安排和分析计算，但自始这门学科就有了一般科学方法的特色。Fisher 说过，大自然就是这样：要向它提出一组设计好的问题而不是单个的问题，才会得到最好的回答。的确，事物的关系是多方面的，试验结果由多个因素决定，而又往往表现为多种性能。换句话说，试验总是多因素、多指标的。为了达到对某一指标或某一组指标的要求，不能孤立地看每一个因素的作用，而要同时看一组因素的交互作用。因此，Fisher 提倡多因素、多水平的一种至今称为析因试验的设计。析因设计及其后来发展的部分析因设计，配上一套相应的分析方法，特别是

方差分析法,就成为一种强有力的科学试验方法。这种方法尔后普遍地应用于工农业各个生产部门或科研部门。

试验设计经过了几十年的演变,又结合不同生产部门和专业的需要而出现了许多专门为农业、工业、生物医学、教育心理等试验而设计的试验方案。虽然析因设计仍不失为试验设计的一个最基本的内容,但考虑到试验的经济性、实际可行性以及试验环境的变异,就有必要对析因设计作种种限制、补充、变更,并使其得到发展。其中一些有较大实用价值的设计思想包括区组、混杂、裂区、分枝、平衡、轮换设计等等,不一而足。对每一种设计都要有一套相应的分析方法,务使对试验结果作出公平的比较,以期发现异常现象的真正原因。为了作出公平的比较,可以说这是试验设计的主要目的之一。如要比较三种不同合成橡胶制造出来的轮胎,除了在实验室做耐磨等试验外,还需要进行现场试验。这时,不仅要排除路面、车辆、气候条件等差异,还要考虑前轮和后轮,甚至左轮和右轮的区别。为了进行公平比较,有条件的话,最好制成由三段不同橡胶接成的轮胎,以保证试验的可比性。事实上,许多比较试验是不能同时同地在完全相同条件下进行的,这就要求我们根据具体情况进行试验设计并作出相应的分析。

试验的设计与分析虽然是试验的两个不可分割的部分:在试验阶段就要考虑如何分析的问题,并在分析阶段又要回顾设计的特点,看分析结论是否公平合理。然而,在实际应用中,对这两个不同的组成部分,可以有所侧重。在侧重于设计时,往往对试验结果的分析只求其大概,略而不详。于是安排多因素试验而不问其交互作用,甚至把试验设计看作一种优选法,只盼通过试验

带来好的试验结果。至于为什么好，其可靠程度如何，就不必深究，至少不必操之过急。另一方面，侧重分析者，不问试验结果的好坏，一律加以分析，追究每个因素的效应及其相互之间的交互作用。试验结果的重现性如何，试验结果与因素之间的数量关系如何，均在过问之列。甚至在试验之前，根据专业和先验知识，对试验结果如何响应于因素的变化，已有一理论模型，从而导致所谓试验回归最优设计。随着试验目的的不同而不强求一致。实际上，一旦应用获得了成功，试验设计与分析这门学科便随之向前发展。

以日本学者田口玄一为代表的正交表试验倡导者，成功地把试验设计与分析这一科学方法应用于开发日本的工业产品，提高产品质量而获得巨大的经济效益。田口的一句名言：“质量不是检查出来的而是设计出来的”已引起世界范围的兴趣和重视，使人们每想到产品质量就想到正交设计。当然，质量控制并不等于正交设计，更不等于试验设计。我国借鉴于日本的成功经验，一度普遍推广正交表在工农业试验上的应用，并取得了显著的成绩。但是，和在日本的情形相类似，基本上都属于一种按目标——产品质量而发展的一套试验设计法，也算是一种侧重于设计的方法，还不构成一套较完整的、适用于各个生产部门和学科领域的试验设计与分析。为了适应形势的发展，我们还需要有作为一门科学方法的试验设计与分析。

刘朝荣的《试验的设计与分析》一书，比较全面地介绍了该学科的内容，既适当地讲解原理，又注重实际应用。兼容欧美日教材的特点和我国多年实践经验于一册。一方面，从原理上把正交设计同析因、部分析因设

计沟通起来,从而使正交表及其有关设计的作用得以更好地发挥;另一方面,根据试验的目的性、可行性和对专业的适应性,在统一的试验设计原则上,引进有较大应用价值的概念和方法,如固定与随机效应模型、裂区设计、分枝设计、回归设计、响应曲面、调优运算、协方差分析,以及田口的系统一参数一容差三次设计,等等。该书兼顾了理论与应用两方面的需要,给读者窥见试验设计与分析的全貌以极大的方便,对于推进试验设计的应用亦必起到良好的作用。

试验设计是数理统计的一个分支,它的原理和应用都离不开数理统计,对任一种试验设计的理解和运用都应强调统计思想。而数理统计的准备在读者之中不免有所差别。为了适应广大读者需要,作者费尽心机,力图使本书写法深入浅出。例如,三次设计,包括参数设计所用到的非线性效应,有着较深的统计思想,然而,方法的具体应用步骤却用接近于程序化的方式浅显地表达了出来。本书经过作者的精心处理,差不多每一种设计,从原理到应用,所涉及的试验安排和计算步骤都做到了有例可循。这是本书作为教材的一大特色,也是作者多年来从事试验设计教学工作 and 生产实践的丰富经验的总结所取得的一个成就。

在我国继续深入改革的今天,每一门学科都要不断刷新,都要结合我国的具体情况考虑它的科学性和先进性。从这点看,本书也是符合当前形势的需要的。相信它的出版会受到广大读者的欢迎。

华中理工大学 林少宫

1988年7月25日

前 言

试验的设计与分析是数理统计中应用很广的一个重要分支。生产管理要实现优质、高产、低消耗，科学研究中探索事物的变化规律，都需要进行试验。怎样安排试验？试验结果如何分析？这些是试验者关心的问题。经验表明，试验安排得好，经过少数试验便可获得有用的信息，通过科学的数据分析就可得到明确的结论；试验安排得不好，试验次数既多又不易于分析，花费了人力物力还达不到试验的目的。试验设计与分析方法应成为技术人员、管理人员和研究人员必备的知识。近些年来，我国各行业推广应用正交试验法取得了丰硕成果。正交试验法是一种效率高且简便易行的方法。但它只是试验设计与分析方法的一部分。有的课题囿于正交试验法，可能得不到满意的结果。一些试验者要求对试验设计与分析有更多的了解。因此在继续推广正交试验法时，有必要比较全面系统介绍试验的设计与分析方法。

本书从 R. A. Fisher 的试验设计三原则讲起，概述了古典的与现代的一些试验设计与分析方法。全书共六章：第一章是关于试验设计的概念、原则和程序，简略回顾了统计分析的原理。第二章讨论单因素试验设计基本类型，完全随机化设计、区组设计和拉丁方设计。分别给出了固定效应模型和随机效应模型的分析方法。着重讲了方差分析思想和算法。第三章是多因素析因试

验。阐明了交互作用与混杂。正交试验在这里被看成析因试验或部分析因试验特例。第四章讨论多因素试验的区组与拉丁方设计以及裂区与分枝设计。第五章是回归试验的正交设计、旋转设计和 D- 最优设计以及混料设计, 还有用于生产优化的调优运算与响应曲面方法。第六章介绍新产品开发的三次设计, 它是日本著名学者田口玄一的线外质量管理的基本内容。

此书的主要对象为实际工作者。我希望能写得通俗、简明、实用、甚至手册化, 并能将中国的强调效率、日本的灵活运用和欧美的精密细致融合起来。在介绍试验设计与分析方法时, 做到有充分的理论依据, 尽量阐明方法的统计思想, 力求使计算操作程序化, 注意问题的实际背景与结论的专业技术解释。每种设计都讲明它的适用范围、优点缺点。分析与设计紧密结合, 并指出不同设计在分析上的差别, 这可使试验者在各种设计分析方法中根据实际需要灵活地从效率和精细上作出选择。每种设计与分析均按一定程式进行, 并用实例从头至尾演示到底。这将有助于方法的掌握。但愿这些设想和作法能够收到好的效果。本书主要供生产管理中的工程技术人员和科学研究工作者使用, 亦可作为工科院校有关专业教材, 数学与统计系学生也可将它当作学习参考书。

在这本书写作过程中, 得到华东师范大学魏宗舒教授的鼓励与关怀, 华中理工大学林少宫教授给予不少指导与帮助。林教授仔细审阅了全书初稿, 并热心为之作序。在此谨向他们表示衷心感谢。由于作者水平有限, 缺点错误在所难免, 欢迎读者批评指正。

作 者

1988年7月23日

目 录

第一章 试验设计与分析基础	(1)
§1 试验设计的常用术语.....	(1)
§2 试验设计的基本原则.....	(2)
§3 试验结果的统计分析.....	(6)
§4 试验设计与分析的实施程序.....	(21)
第二章 试验设计与分析基本类型	(25)
§1 完全随机化试验的设计与分析.....	(25)
§2 随机区组试验的设计与分析.....	(65)
§3 拉丁方试验的设计与分析.....	(83)
§4 不完全区组试验的设计与分析.....	(98)
第三章 析因试验的设计与分析	(113)
§1 主效应与交互作用.....	(113)
§2 一般析因试验的设计与分析.....	(118)
§3 2^k 和 3^k 析因试验的设计与分析.....	(158)
§4 部分析因试验的设计与分析.....	(198)
第四章 多因素试验的随机化限制	(222)
§1 析因试验的完全区组和拉丁方设计与分析.....	(222)
§2 析因试验的不完全区组设计与分析.....	(227)
§3 裂区试验的设计与分析.....	(236)
§4 分枝试验的设计与分析.....	(254)

第五章 试验的回归设计与分析	(265)
§1 回归分析.....	(266)
§2 回归试验的正交设计与分析.....	(292)
§3 回归试验的旋转设计与分析.....	(307)
§4 回归试验的 D- 最优设计与分析.....	(317)
§5 混料试验的设计与分析.....	(326)
§6 响应曲面方法.....	(344)
§7 调优运算.....	(356)
§8 协方差分析.....	(373)
第六章 SN 比试验的设计与分析	(395)
§1 SN 比与损失函数.....	(395)
§2 望目特性的三次设计.....	(408)
§3 望小、望大特性的参数设计.....	(421)
§4 动态特性的参数设计.....	(429)
附 表	(434)

第一章 试验设计与分析基础

① 试验的设计与分析是数理统计的一个重要分支。它有其自身的研究范畴、基本理论和处理问题的方法。为了掌握它的基本内容并有效地加以应用，首先我们必须了解它的一些基本概念，熟悉试验设计的基本原则，懂得数据分析的基本方法。因为它是一门应用学科，还有必要知道它在应用过程中所应遵循的程序和有关的注意事项。

§1 试验设计的常用术语

在试验设计中，我们将衡量试验结果好坏的标准称为指标，可能影响指标的原因称为因素，因素所处的各种状态称为水平。一般，指标用 y 表示，因素用 $A, B, C, \dots$ 表示，因素 A 的水平用 $A_1, A_2, \dots$ 表示。

例 1.1 考察某种柴油机中喷油嘴的质量。柴油机运行时产生的一氧化碳 CO 愈少愈好。希望通过试验提高喷油嘴的质量。显然，这一试验的指标 y 为柴油机运行时 CO 的生成量。经研究认为，喷油嘴孔径的大小可能影响 CO 的生成，因此喷油嘴孔径可看成是这一试验的因素 A 。如果试验者想比较两种不同孔径喷油嘴的优劣，那么这两种不同喷油嘴孔径便是喷油嘴孔径这个因素 A 的两个水平 A_1 和 A_2 。

在进行试验时，我们将在一次试验中所指定的试验条件称为处理。在试验只有一个因素情况下，处理即为一次试验中所指定

的因素的某个水平；在试验有多个因素情况下，处理则是一次试验中所指定的因素的某个水平组合。此外，我们将处理所针对的对象称为试验材料，试验材料的一个单位称为试验单元，除去考察因素以外的那些已知或未知的影响试验结果的周围条件称为试验环境。在例 1.1 中，每种喷油嘴孔径便是一种处理。每种喷油嘴孔径效果好坏，需在选定的几台柴油机上进行试验，这时柴油机就是试验材料，每台柴油机可看成一试验单元。试验处的通风状况，试验时空气的温度和湿度等周围条件也可能影响 CO 的生成，这些可视为试验环境。

所谓试验设计，顾名思义，是指试验的设计或安排方法。在例 1.1 中，两种喷油嘴孔径在柴油机上进行试验时，采用不配对的方法试验和采用配对的方法试验就是两种不同的试验设计或两种不同的试验方案。按照试验方案进行试验，可以获得一批试验数据。要想通过试验得出有用的结论，必须对所得数据进行统计分析。以后将会看到，试验设计与数据分析有着密切的关系。本书将把二者结合起来加以讨论。

§2 试验设计的基本原则

对试验数据进行分析，要求数据服从一定的统计规律。试验总存在误差。任何试验的设计与分析，都希望尽可能减少试验误差的干扰，得到比较精确可靠的结论。为此，试验设计必须遵循以下三个原则。

(1) 重复 如果同一处理在试验中出现一次以上，则称这一处理被重复或这一处理进行了重复试验。在例 1.1 中，如果某种喷油嘴孔径在三台柴油机上进行试验，那么我们就说这种喷油嘴孔径重复试验了 3 次。重复的作用主要是估计误差、提高试验精度和增强统计推断的能力。在试验中，我们将同一试验在多次重

复中所反映出的差异称为误差。通常，误差的大小用重复试验数据的标准差来度量，它描述了一个试验的精度。显然，不重复是无法知道误差的大小，只有重复才能得到误差的估计。在有重复的试验中，各种处理的效果一般用其观测到的平均值表示。自然，一个重复试验的精度应是处理平均值的标准差。我们知道，当试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 $\sigma/\sqrt{n}$ ，故增加试验次数能提高试验的精度。倘若不重复，即每种处理只进行一次试验，由于不可能知道误差是多少，则只能简单地直接比较各处理观测值大小以判断其优劣。但这种比较无法得到任何精确可靠的结论，因为没有误差的估计，无法确定所观察到的差异究竟是表示各处理间真正存在差异，还是由于误差所致。倘若试验进行了重复，由于可以估计出误差，有关处理间差异的推断便可基于观测到的处理平均值之差与其标准差的比较，得到较为可靠的结论。增加试验的重复次数，可减少处理平均值误差标准差，因而能增强辨别处理间是否有真实差异的能力。进行重复试验或增加试验的重复次数是必要的，但重复次数过多并不一定好，重复过多意味着经济上付出的代价越大。一项试验究竟重复多少次为好，这应根据理论上的分析和实际上的需要而定。

(2) 随机化 试验的随机化指处理在各试验单元的配置或各个试验的顺序完全以机遇的或随机的方式确定。实现试验随机化通常采用抽签、查随机数表和掷随机骰子等方法。随机化是试验数据统计分析的基础。因为只有随机化后试验数据才服从一定的统计分布规律，而统计分析一般是建立在一定的统计分布理论之上的。随机化还可使未受控制的因素的影响相互抵消或使系统误差转化成随机误差。在例 1.1 中，假定两种喷油嘴内径在 6 台柴油机上试验。假若试验是在同一实验室里进行。显然，越到后来室内的 CO 量越多，所以在有规律地先作完 A_1 的 3 台试验再作

A_2 的3台试验后,即使 A_1 与 A_2 之间没有差异,数据也可能是 A_2 的CO量高。设想试验顺序和所产生的误差如表 1.1(a)所示。这时出现了具有一定方向的系统误差。但如果将试验次序随机化,则可能得到表 1.1(b)那样的误差分布。这里随机化采用抽签的方法:准备写有 A_1 的卡片3张和 A_2 的卡片3张,将全部6张卡片均匀混合,一次随机从中抽出一张,依次将它们排列起来,即得随机化序列。易见,此时 A_1 的误差分布是: $-4, +1, +3$; A_2 的误差分布是: $-2, -1, +3$, 它们各自的误差之和等于零。当然,就系统误差而言,即使对试验进行随机化,能做到如此彻底的平衡也是极为少见的,这只不过是一个说明的例子。按照概率的观点,经过随机化,系统误差是趋向于相互抵消的。如果将各试验单元的系统误差看成各处理的误差,无论是 A_1 还是 A_2 , 因为可能取正值也可能取负值,所以就染上了随机误差的特色。结果系统误差被转化成了随机误差。随机化还在实际上避免了各处理平均值比较时发生偏倚。因为它以一定的方式保证了在试验中不会有某种有意或无意的外加的变异来源使得某种处理持续地处于有利的地位。即每种处理都有同等的可能性被配置到任何一个试验单元上去,而不论对它有利或者无利。随机化提

表 1.1(a)

序号	1	2	3	4	5	6
有规律排列	A_1	A_1	A_1	A_2	A_2	A_2
系统误差	-4	-2	-1	+1	+3	+3

表 1.1(b)

序号	1	2	3	4	5	6
随机化排列	A_1	A_2	A_2	A_1	A_2	A_1
随机误差	-4	-2	-1	+1	+3	+3

供了一种机会均等的方法。随机化多少有点象保险。它是一种对付也许会也许不会发生的干扰的防患于未然的措施。

(3) 局部控制 在一项试验中, 除了选来进行研究的因素以外, 可能还有其它“背景”因素对试验结果产生影响。为了消除这些“背景”因素对试验的干扰, 有时可按某些标准将试验材料分成若干部分或将试验单元分成若干组, 使得各部分内或各组内的试验环境比较一致, 而使其差异尽量表现在各部分之间或各组之间。这就是所谓的局部控制。由于划分的各个部分或各个组称为区组, 局部控制的原则也叫作区组构成原理。在例 1.1 中, 除研究喷油嘴孔径外, 试验用柴油机在结构上的差异也可能影响试验的结果。显然, 此时比较 A_1 、 A_2 两种喷油嘴孔径, 使用同一台柴油机进行试验比较好。假定有 3 台柴油机, 用更换两种喷油嘴孔径的方法, 对 A_1 、 A_2 各作一次试验。为了使两种喷油嘴孔径在一台柴油机上进行试验时地位均等, 各台柴油机上两种喷油嘴孔径的试验次序按随机化确定。试验设计如表 1.2 所示。这里, 我们把每台柴油机作为一个区组。在每个区组即每台柴油机

表 1.2

柴油机	1	2	3
喷油嘴孔径次序	A_1, A_2	A_2, A_1	A_2, A_1

上, 同做 A_1 、 A_2 两个试验的试验环境自然是一致的。这样, 不管各台柴油机间结构上有多大差异, 它们都不会影响到 A_1 和 A_2 的比较, 因为柴油机这种个体之间的差异在分析时可以将它排除。从而实现了局部控制。

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。试验设计三原则首先由 R.A. Fisher 提出, 因而通常称为 Fisher 试验设计三原则。在本世纪 20 年代, R.A. Fisher 最早将试验的设计与分析方法用于农业试验。第二次世界大战后, 试验