

Experiments

Planning, Analysis, and
Parameter Design Optimization

试验设计与分析及参数优化

C.F.Jeff Wu

Michael Hamada 著

张润楚 郑海涛 兰 燕 译
艾明要 林 怡 杨贵军



中国统计出版社
China Statistics Press

1. 课程名称

2. 课程编号

3. 课程学分

会计学基础与实务

课程负责人

课程负责人

课程负责人

课程负责人

课程负责人

课程负责人

C.F. Jeff Wu Michael Hamada 著

0212.6
2W 535

试验设计与分析及参数优化

张润楚 郑海涛 兰 燕 译
夏明要 林 怡 杨贵军

中国统计出版社
China Statistics Press



HAN 5/11

Experiments Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization

C.F. Jeff Wu Michael Hamada

ISBN: 0-471-25511-4

Copyright © 2003. by John Wiley & Sons, Inc. Inc.

Simplified Chinese translation edition jointly published by China Statistics Press

本书中文简体字翻译版由中国统计出版社出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2003-1659

(京)新登字041号

图书在版编目(CIP)数据

试验设计与分析及参数优化

/ (美) 吴建福 (Wu Jeff, C. F.), (美) 哈曼蒂 (Hamada, M.) 著; 张润楚等译.

- 北京: 中国统计出版社, 2003. 3

ISBN 7-5037-4023-X

I 试…

II ①吴… ②哈… ③张…

III ①试验设计(数学) ②试验分析(数学) ③参数-最优化

IV 0212.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第012701号

责任编辑/吕军

出版发行/中国统计出版社

通信地址/北京市西城区月坛南街75号 邮政编码/100826

办公地址/北京市丰台区西三环南路甲6号

电话/(010) 63459084, 63266600-22500 (发行部)

印刷/科伦克三莱印务(北京)有限公司

经销/新华书店

开本/787×1092 1/16

字数/730千字

印张/38.125

印数/1-2000册

版别/2003年3月第1版

版次/2003年3月北京第1次印刷

书号/ISBN 7-5037-4023-X/0·45

定价/69.00元

版权所有。未经许可，本书的任何部分不准以任何方式在世界任何地区以任何文字翻印、拷贝、仿制或转载。中国统计版图书，如有印装错误，本社发行部负责调换。

中文版序

试验设计和分析是数理统计学中最重要的分支之一，也是发展最早、影响最大的分支之一。从历史上看，早在上世纪二十年代现代统计学的主要奠基者之一 R. A. Fisher 在英国的农业试验站工作时，就从田间试验设计研究入手，发展了统计试验设计的基本思想和方法，进而推动了整个数理统计学的发展，此后试验设计的思想和方法被广泛应用到工业、医药、社会和心理等方面的研究。试验设计一直是数理统计学中一个很活跃的分支。尤其是近二、三十年来，世界经济快速发展，全球化市场竞争日趋激烈，对产品的先进性和质量的要求越来越高，因而对提高质量、降低成本的科学实验的依赖也越来越多。此外，近代科学飞速发展，无论是工农业生产，还是医疗卫生、生物技术、空间技术等等都离不开试验，要科学地进行试验，都离不开试验设计。由于实际的需要，再加上数理统计其它分支如线性模型理论、非参数方法、Bayes 推断和统计计算的发展，推动着近代试验设计的理论、技术和数据分析方法快速发展，使之取得许多崭新的成果。为了帮助人们学习和运用这门知识，很需要有一本专门介绍包括近代发展并且兼顾理论和应用的试验设计专著。

几十年来，关于试验的设计与分析的著作出版了不少，但由于这门学科发展太快，不少现存的著作已不能反映本学科的当前面貌。因此，由吴建福 (C.F. Jeff Wu) 教授和迈克尔·滨田 (Michael Hamada) 博士合作的最近著作《**Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization**》于 2000 年出版，可以说正合时宜。它一出版就受到国际统计学界的高度评价，当年便获得国际上概率论与统计学优秀著作奖 (The Wiley Award)。著者之一吴建福教授是当今国际上一流的著名统计学家，统计学知名奖项 COPPS 奖的获得者，他对发展近代试验设计理论和方法作出了卓越的贡献，在他的带领下开辟了试验设计发展的一些新方向。本书内容也反映了这点。本书除叙述试验设计的一些基本知识外，还介绍了不少有广泛应用和影响的新成果，如著名的田口方法，特别是包括了吴建福教授及其合作者近年来大量的研究成果。可以说，这部著作代表和反映了本领域当前理论和应用的最高水平。

本书的中文译本《试验设计与分析及参数优化》与读者见面了。译者是南开大学数学科学学院统计学系张润楚教授和他指导的研究生。张润楚教授长期致力于统计试验设计的研究，是我国在该领域研究成果突出的一位学者，在国际上具有较大的影响。他的一些研究成果也被收进本书。考虑到翻译这本巨著的难度和工作量，译者在短期内高质量地完成了工作，他们的努力值得钦佩。

本书虽然是一本高水平的专著，但能适应各层次广泛读者的需要。对入门者，本书用精练准确的语言讲述了试验设计的基本理论、思想和方法，其中包括了作者提出的一些新思想。对侧重应用的读者，本书用大量最新的应用实例展示了这门学科的广泛应用，并通过这些实例引入概念和方法，使得理论和方法的实际背景变得清晰明了。对研究工作者来说，本书的不少内容直指当前的研究前沿，有引路的作用。另外，由于本书的内容丰富、层次分明、结构新颖，使得在适当选择下，可以作为统计学和相近学科不同阶段学生（本科生、硕士生、博士生）的教材。总之，它对于本专业的学生、学者、教师和应用工作者来说，都是一本难得的、值得一读的好书。

这个译本语言流畅可读性强，术语译法简洁、准确，图文表格的处理也相当细致。它

的出版必将有助于国内广大的读者学习掌握这一领域的现代统计思想和方法,必将对我国在试验设计领域的教学和科研的发展产生积极的影响,其意义是深远的.因此,我写下上面这些文字,除了对作、译者表示钦佩外,也热诚向读者推荐这本好书.

陈希孺

2002年12月于北京

译者序

近代试验设计可以追溯到伟大的统计学家 R. A. Fisher 二、三十年代在英国一个农业试验站开创性的工作, 发展至今, 已形成广泛的理论和应用体系. 其理论涉及到数学的多个分支, 除了概率论与数理统计基础以外, 涉及到数论、有限代数、投影几何、组合理论、代数几何、信息论、编码理论、运筹学、计算数学以及计算机科学等各个分支. 其应用也十分广泛, 初期主要应用于农业, 后来深入到几乎各个领域, 包括工业、农林业、生物、医学、工程、物理、化学、环保以及社会经济、天文等等. 归结为一句话, 凡是要进行科学实验的地方, 都要用到试验设计和数据分析. 尤其是在激烈市场竞争的今天, 产品质量成为企业的生命, 使得试验设计成为产品质量工程的重要组成部分而受到特别重视, 应用十分广阔.

多年来, 试验设计已成为是统计学专业的核心课程之一, 被列入为本科生的专业必修课或重点选修课程, 有的工科专业也将它列为必修课. 如何选该课程的教材无疑是很重要的. 我们很荣幸看到由吴建福 (C. F. Jeff Wu) 教授和迈克尔·滨田 (Michael Hamada) 博士著的这本书《**Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization**》于 2000 年在 John Wiley & Sons 公司出版. 本书是现今国际上试验设计领域中理论兼应用最优秀的著作. 它一出版就受到国际统计界的高度评价, 并在 2000 年获得国际上的概率和统计优秀著作奖 (The Wiley Award). 著者吴建福教授是当代国际一流的著名统计学家, 由于他对统计学发展的突出贡献, 1987 年获得国际著名的统计学奖 COPPS 奖. 他为试验设计领域研究开创了一个新的时期. 这本书是他及其合作者对该领域理论和方法及其发展的主要总结.

本书主要包括三方面内容: 一是试验的原则和设计理论, 包括基本思想、各种设计的构造理论和方法, 并给出了各种设计的大量新的设计表; 二是分析, 包括对设计的分析和试验数据的分析, 给出了许多新的思想和方法, 例如, 效应分析的三原则, 排序原则、稀疏原则和遗传原则, 分析方法的正交成分系统和线性 - 二次系统以及 Bayes 方法等等; 三是稳健参数设计, 包括对静态和动态特征系统的减小变差策略, 给出了一系列新的设计、建模和分析方法, 特别对信号 - 响应系统的参数设计作了专门深入讨论. 此外还给出了在改善可靠性等方面的应用以及对非正态数据试验的分析. 本书还具有以下几个方面的特点: 第一, 它首先以精练而清晰的文字从理论和应用两个角度深刻地阐述了试验设计的基本原理和思想, 全面系统介绍了试验设计的一般理论和方法, 包括各种设计的构造和分析、建模理论和数据分析方法, 其中许多内容是新的, 在以前的同类著作中所没有的. 因此, 它由浅入深能使读者以很快的速度进入该领域. 第二, 它反映了该领域近代特别是近二十多年来的最新研究成果和发展动态. 现有一些好的著作, 如 Box, Hunter 和 Hunter 1978 年出版的书《*Statistics for Experimenters*》, 但不含近期的发展. 自 80 年代以来试验设计发展了许多新的思想、理论和方法, 尤其是用于产品设计和质量改进的稳健参数设计思想和方法, 而这些都在本书中得到充分的体现, 给出了很好的归纳、总结和提高. 特别是, 书中包含了著者及其合作者多年以来尤其是近些年来的大量研究成果. 因此, 通过学习这本教材, 读者不仅能掌握试验设计的基本理论和方法, 而且可以直接被带到该领域研究的最前沿. 第三, 本书特别注重应用, 把理论和应用非常巧妙地联系起来. 书中给出了大量

的应用实例,从第三章起的每一章都是以一个或几个例子开头,然后发展所需要的理论和办法,最后返回来用引进的理论和办法来解决所提出的问题.这样可以引导读者学会如何将理论联系实际.第四,在材料的安排上也很讲究,不但深入浅出、内容丰富,而且很有层次,便于使用该教材时具有很大的灵活性.著者在书的前面特别给出了教师如何使用该教材的指导说明,使得本著作有多种用途,选择不同的适当章节可以分别适合统计学及相关专业的本科生、硕士、博士研究生的教材.另外,每章的结尾有实用小结,每章末还有大量的习题,包括实际问题,这对读者都很有用.由此,它对实际工作者来说,也是一本很好的参考书.希望该著作的中译本的出版对我们试验设计的教学、应用和研究工作的发展起到积极推动作用.

本书的翻译工作是我们集体合作完成的.1998年张润楚在Michigan大学访问时参加了著者写书的一些辅助工作,就接受了将该书翻译成中文的动议.回国后开始组织和指导研究生协同合作,主持实施这项工作.张润楚、郑海涛和兰燕分别完成原著1-3章、4-9章和10-13章的翻译初稿,同时由张润楚、艾明要进行校对修改,最后又由张润楚全面审核修改、整合、协调定稿.林怡、杨贵军负责在计算机上文字修改、版面的设计调整和图表安排等工作,林怡、王真、朱建平、曾鹏、李鹏飞、张文博参加了部分内容校对和图表制作等方面的工作.

在这里我们首先感谢原著者吴建福教授,他给我们提供了出版前的英文原稿和图表,这样使我们节省了许多时间,而且保证图表的准确性.我们还要特别感谢张尧庭教授的帮助,是他推荐了这本译著在中国统计出版社出版.同时感谢出版社的范仲实、刘国宁、吕军编辑的大力支持和帮助,使得这本书得以顺利出版.本书的翻译工作还得到国家自然科学基金项目(10171051)和教育部博士点基金项目(1999005512)的支持,在此一并表示感谢.

由于我们的水平所限,加上时间紧迫,尽管我们在翻译工作中作了很大努力,但仍然会在译文或其它方面存在不妥之处甚至错误,敬请同行专家和读者给以批评指正.

译者

2002年10月于南开大学

序 言

统计试验设计和分析是试验者必不可少的工具,也是统计学课程的核心科目之一.由于它在现代统计学发展中的重要性,所以出现了许多有关此科目的教科书和一些经典著作,包括 Box, Hunter 和 Hunter 1978 年出版的有影响力的《Statistics for Experimenters》.自 1978 年以来,又发展了许多新的思想和方法,而这些内容未被标准的教科书所涵盖.我们写这本书的部分动机就是期望用一种易于接受的形式使更多的读者能够接触到这些现代思想和方法.

在这些新的方法中,稳健参数设计作为线外质量和生产改进的创新统计或工程方法尤为突出.它试图通过利用统计设计的试验使得工艺或产品对噪声变化的灵敏度减弱来达到改进工艺或产品的目的.理论试验设计的另一个重要发展是广泛采用最小低阶混杂准则将因子最优地安排到一个设计表的列上.当选择部分因析设计时这个准则比最大分辨率准则更有优越性.第三个发展是在处理节俭的试验时越来越多地采用带有复杂别名的设计.结果是许多这样的设计可用来估计交互作用,这与仅将它们用于估计主效应的流行做法是相反的.第四个发展是广泛采用广义线性模型 (GLM) 和 Bayes 方法来分析非正态数据.许多试验响应是非正态分布,比如二项分布和 Poisson 记数,有些试验响应是有序频数,或者服从寿命分布,这在可靠性和生存分布分析研究中引起并且观测可能被截尾.随着现代计算技术的发展,这些工具已经写入卫生统计学和社会统计学的教材中.显然也应该使这些工具对从事自然科学和工程的试验人员来说成为通用的.还有另外一些试验方法,这些方法在二十年前甚至更早已经出现,然而在以应用为主的标准教材中却关注得很不够.这包括二、四混合水平设计、生成正交主效应设计的并水平方法、Plackett-Burman 设计以及混合水平正交表.我们写这本书的主要目的就是为填补这些空白,并将试验设计和分析的新的完整系统展现出来,这对于建立新的教学方式和引导这一学科方向的研究可能都会有所帮助.

本书的预期读者群既包括一般的实际工作者也包括专家.作为一本教科书,它包含了标准材料,象方差分析 (ANOVA)、二水平、三水平因析和部分因析设计以及响应曲面方法等基本知识.要阅读本书的大部分内容,只需要掌握统计方法的大学水平课程和回归分析的基本知识即可.由于本书包含的选题很多,因而它可用于各种各样的课程.本书的内容已在 Michigan 大学统计系以及工业和运筹工程系的高年级大学生、硕士和博士研究生中讲授过.为帮助教师从书中选择适合的内容,在该前言之后另单给出了一份“教师选题建议”.

本书的一些重点和新内容可概括如下:第一、二章包含了方差分析、单向和多向分类、随机化区组设计、拉丁方、平衡不完全区组设计以及协方差分析的基本内容.第三章讲述了二水平因析设计,并在 3.13-3.17 节中提供了除基于正态和半正态图的非正规检验方法之外,还有对效应显著性使用正规检验的新内容.第四章是关于二水平部分因析设计的,使用最小低阶混杂准则来选择最优设计,而且强调要使用跟随试验来解除别名效应之间的混杂.第五章是处理三水平设计,其中处理和分析交互效应的线性-二次系统和变量选择策略的内容都是新的,同时还给出了一种处理多个响应的新的策略.第六章关于二、四混合水平设计和滑动水平方法的大部分内容都是新的.第七章是关于非正规设计的,是本书中仅

讲理论的一章。它强调设计的统计性质和应用而不是它们的构造和数学结构。对实际工作者来说，只有附录中收集的表和章节中有关它们统计性质的部分讨论可能是有兴趣的。第七章为讲述第八章中的新内容铺平了道路。第八章同时给出了频率分析策略和 Bayes 分析策略，后者利用 Gibbs 抽样方法进行有效模型搜索。另外本章还简要讨论了超饱和设计。第九章包含响应曲面方法的标准处理。第十章和第十一章介绍稳健参数设计，前一章处理带有简单响应的问题，而后一章处理带有信号 - 响应关系的问题。对参数设计我们考虑了三个重要方面：性能度量的选择、设计技术以及建模和分析策略。第十二章讨论改善可靠性的试验，同时考虑失效时间数据和降级 (degradation) 数据。第十三章讨论非正态响应的试验，考虑包括广义线性模型和 Bayes 方法在内的多种分析方法。

本书有几个有趣的特点，这些在试验设计的教科书中通常很难发现。第三章至第十三章中的每一章都以一个或几个研究案例开头，包括研究的目标、数据、试验计划以及因子和它们的水平。然后接下来的若干节专注于描述试验方案（即试验设计），并在这些节中发展试验设计所需要的理论和方法。再接下来一些节是讨论建模和分析策略。然后在该章的末尾又返回到初始的数据，利用刚刚阐述的策略来分析这些数据，并且讨论分析结果对初始研究案例的统计含义。本书共包含八十多个试验，绝大多数都是基于实际的研究案例，其中三十个在正文中分析过，其余五十多个在练习中给出。每一章结束时都有一个实用小结，它对本章中介绍的方法提供了一个十分方便的指南。对于那些想找到一种特殊工具但又没有耐性去浏览整章内容的读者来说，实用小结特别有用。本书给出设计表时采用了新颖的方法，许多设计表都是新的，它们是基于试验设计理论和算法的最新研究结果而得到的。对正规设计仅给出了设计生成元，由这些生成元读者很容易生成完整的设计。在这些表中还给出了纯净效应的集合，因为推导起来需要费一番工夫，特别是对非数学方向的读者。为了方便读者，第七章中给出了正交表的完整分类。由于我们把重点放在方法和应用上，因而给出的数学推导非常简练。除非推导过程本身对理解此方法非常关键，否则我们将省略这一过程而去参考初始来源。

本书的大部分章节是在 Michigan 大学撰写的。书中引用作者的大部分研究成果是在 Michigan 大学得到国家科学基金 (1994-1999) 和在 Waterloo 大学 (1988-1995) 得到加拿大自然科学和工程研究委员会以及质量和生产中的 GM/NSERC Chair 基金的资助下完成的。许多同事和学生的讨论和协助使我们受益非浅，有 Julie Bérubé, Derek Bingham, Ching-Shui Cheng, Hugh Chipman, David Fencsik, Xiaoli Hou, Longcheen Huwang, Bill Meeker, Randy Sitter, Huaiqing Wu, Hongquan Xu, Qian Ye, Runchu Zhang 和 Yu Zhu. Shao-Wei Cheng 在本书完成时起了重要的支持作用，Jock Mackay 通读了本书的全部初稿并提出了许多有见地的宝贵意见，Jung-Chao Wang 在准备第七章中的表时提供了可贵的帮助。我们非常感激他们。如果没有他们的努力和参与，本书是不能完成的。

C. F. JEFF WU
Ann Arbor Michigan
MICHAEL HAMADA
Los Alamos, New Mexico
2000

教师选题建议

统计、工程、物理、生命和社会科学的高年级大学生和研究生的一个学期课程（具有包括回归分析在内的初等统计学背景）：

第 1, 2, 3 (3.1–3.12), 4 章；从第 10 (10.1–10.5), 5 (5.1–5.6), 8 (8.1–8.4), 9 (9.1–9.3, 9.5, 9.7) 章中选择内容。对缺乏回归分析知识背景的学生应保证 1–2 周的回归分析内容的回顾。

统计学或生物统计学的硕士和博士研究生的一个学期课程：

第 1, 2, 3 (3.13–3.17 节可省略), 4, 5 (5.7–5.8 节可省略), 9 (9.4 和 9.8 节可省略), 10 (10.1–10.5) 章；从第 6 (6.1–6.5, 6.9), 7 (7.1–7.5), 8 (8.5 节除外) 章中选择内容。对具有 ANOVA 知识背景的学生可加速第 1, 2 章的学习进度。

统计学或生物统计学的硕士和博士研究生的两个学期课程：

第一学期：第 1, 2 章（如果事先要求具备 ANOVA 知识，此二章可加快进度），第 3 (3.14–3.17 节可省略), 4, 5, 6, 7 (可省略较多的理论内容) 章。

第二学期：第 8 (8.5 节可省略), 9 (9.8 节可省略), 10, 11 (11.6 节可省略), 12 (12.5, 12.7–12.8 节可省略), 13 章。

具有初级研究生试验设计课程背景的博士生的一个学期高级专题课程：

根据学生的兴趣和背景从第 6–13 章中选取专题。

统计和数学博士生的一个学期理论试验设计课程：

第 1 (1.3), 2 (2.6–2.9), 3 (3.3–3.5, 3.12), 4 (4.2–4.6), 5 (5.3–5.4, 5.8), 6 (6.2–6.3, 6.7–6.8), 7, 9 (9.4, 9.7–9.8), 10 (10.6–10.9), 11 (11.6) 章。

目 录

序 言	ix
教师选题建议	xi
试验数据及有关表目录	xiii
图形目录	xxi
第一章 基本原则与单因子试验	1
§1.1 试验设计简介与历史回顾	1
§1.2 计划和实施试验的系统方法	3
§1.3 基本原则: 重复, 随机化, 分区组	6
§1.4 一般线性模型	8
§1.5 回归分析中的变量选择	13
§1.6 单向分类设计	14
§1.7 多重比较	20
§1.8 定量因子和正交多项式	23
§1.9 残差分析: 模型假设的评估	27
§1.10 实用小结	31
练习	32
参考文献	37
第二章 多因子试验	39
§2.1 配对比较设计	39
§2.2 随机化区组设计	41
§2.3 二向分类设计	45
2.3.1 两个定性因子	47
2.3.2 一个定性因子和一个定量因子	49
2.3.3 两个定量因子	51
§2.4 多向分类设计	51
§2.5 响应的变换	53
§2.6 拉丁方设计: 两个分区组变量	57
§2.7 希腊拉丁方设计	60
§2.8 平衡不完全区组设计	61
§2.9 协方差分析: 联合辅助信息	64
§2.10 实用小结	68
练习	68
附录 2A: 拉丁方、希腊拉丁方、超希腊拉丁方表	76
参考文献	78

第三章 二水平完全因析试验	81
§3.1 晶体外延层生长试验	81
§3.2 望目特征问题和二次损失函数	81
§3.3 二水平完全因析设计: 一般讨论	83
§3.4 因子效应和图示	87
3.4.1 主效应	88
3.4.2 交互效应	89
§3.5 因子效应的基本原则: 效应排序原则、效应稀疏原则和效应遗传原则	94
§3.6 利用回归和模型矩阵计算因子效应	95
§3.7 与“一次一个因子”方法的比较	96
§3.8 样本方差的对数变换	98
§3.9 同时检验的效应	99
§3.10 正态和半正态图	100
§3.11 位置和散度分析: 回访晶体外延层生长试验	102
§3.12 2^k 因析设计在 2^q 个区组中的分组和最优安排方案	106
§3.13 无重复试验效应显著性的一个正规检验: 没有 s^2	110
§3.14 检验方差的齐性	112
§3.15 \bar{y}_i 的效应显著性的一个正规检验: 用 s^2	114
§3.16 对 $\ln s_i^2$ 效应显著性的一个正规检验	116
§3.17 分析策略的总结	117
§3.18 实用小结	117
练习	119
附录 3A: 分 2^q 个区组的 2^k 因析设计表	124
参考文献	126
第四章 二水平部分因析试验	129
§4.1 叶形弹簧试验	129
§4.2 部分因析设计: 效应别名以及分辨度和最小低阶混杂准则	129
§4.3 分析	136
§4.4 解除别名效应中模糊性的技术	141
4.4.1 添加正交水平组合的方法	141
4.4.2 跟随试验的最优设计方法	142
4.4.3 跟随试验的折叠-反转 (Fold-Over) 技术	145
§4.5 用最小低阶混杂及相关准则选择 2^{k-p} 设计	147
§4.6 部分因析设计中的分区组	151
§4.7 实用小结	153
练习	154
附录 4A: 2^{k-p} 部分因析设计表	162
附录 4B: 分 2^q 个区组的 2^{k-p} 部分因析设计表	168
参考文献	172

第五章 三水平完全因析和部分因析试验	175
§5.1 安全带试验	175
§5.2 望大和望小特征问题	175
§5.3 3^k 完全因析设计	177
§5.4 3^{k-p} 部分因析设计	182
§5.5 简单分析方法: 作图和方差分析	185
§5.6 一种替代分析方法	192
§5.7 多个响应的分析策略 I: 限外概率	198
§5.8 3^k 和 3^{k-p} 设计的分区组	205
§5.9 实用小结	207
练习	208
附录 5A: 3^{k-p} 部分因析设计表	214
附录 5B: 分 3^q 个区组的 3^{k-p} 部分因析设计表	215
参考文献	219
第六章 多于二水平试验的其它设计和分析技术	221
§6.1 基于二、四混合水平设计的切削刀片试验	221
§6.2 替换法与 $2^m 4^n$ 设计的构造	223
§6.3 $n = 1$ 或 2 的 MA $2^m 4^n$ 设计	226
§6.4 $2^m 4^n$ 试验的分析策略	228
§6.5 切削刀片试验的分析	230
§6.6 基于二、三混合水平设计的喷涂试验	233
§6.7 36 个水平组合的二、三混合水平试验的设计和分析	233
§6.8 对任意素数 r 的 r^{k-p} 部分因析设计	240
6.8.1 25 个水平组合的 5 水平部分因析设计	240
6.8.2 49 个水平组合的 7 水平部分因析设计	242
6.8.3 一般构造方法	243
§6.9 关联因子: 滑动水平方法和嵌入效应分析	243
6.9.1 灯泡试验的分析	247
§6.10 实用小结	250
练习	251
附录 6A: $2^m 4^1$ 最小低阶混杂设计表	257
附录 6B: $2^m 4^2$ 最小低阶混杂设计表	258
附录 6C: $OA(25, 5^6)$	260
附录 6D: $OA(49, 7^8)$	261
参考文献	262
第七章 非正规设计的构造与性质	265
§7.1 两个试验: 焊接修理铸件和血液葡萄糖测试	265
§7.2 与 2^{k-p} 和 3^{k-p} 系列设计相比非正规设计的一些优点	267
§7.3 关于正交表的一个引理	268

§7.4	Plackett-Burman 设计和 Hall 设计	269
§7.5	一类有用的混合水平正交表	271
§7.6	基于差阵构造混合水平正交表	273
§7.7	用替换法构造混合水平正交表	276
§7.8	通过并水平构造正交主效应设计	277
§7.9	实用小结	281
	练习	282
	附录 7A: Plackett-Burman 设计 $OA(N, 2^{N-1})$	286
	附录 7B: Hall 的类型 II 至 V 的 16 个水平组合正交表	289
	附录 7C: 一些常用的混合水平正交表	291
	附录 7D: 一些常用的差阵	304
	附录 7E: 一些常用的正交主效应设计	306
	参考文献	307
第八章	带有复杂别名的试验	309
§8.1	效应的部分别名和别名矩阵	309
§8.2	传统的分析策略: 筛选设计和主效应分析	311
§8.3	利用效应稀疏性简化复杂别名	312
§8.4	带有复杂别名设计的分析策略	313
	8.4.1 某些限制	318
§8.5	带有复杂别名设计的 Bayes 变量选择策略	319
	8.5.1 Bayes 模型先验	320
	8.5.2 Gibbs 抽样	321
	8.5.3 先验调节常数的选择	323
	8.5.4 回访血液葡萄糖试验	323
	8.5.5 其它应用	325
§8.6	超饱和设计: 构造与分析	326
§8.7	实用小结	329
	练习	329
	附录 8A: 满条件分布的进一步细节	336
	参考文献	338
第九章	响应曲面法	341
§9.1	呋喃硝胺分离试验	341
§9.2	响应曲面法的序贯特性	342
§9.3	从一阶试验到二阶试验: 最峭攀登搜索法和方格搜索法	345
	9.3.1 曲度检测	346
	9.3.2 最峭攀登搜索法	346
	9.3.3 方格搜索法	350
§9.4	二阶响应曲面的分析	354
	9.4.1 岭系统	355

§9.5 呋喃硝胺试验的分析	357
§9.6 多重响应的分析策略 II: 等高作图和使用渴求函数	359
§9.7 中心复合设计	362
§9.8 Box-Behnken 设计和均匀外壳设计	366
§9.9 实用小结	368
练习	369
附表 9A: 中心复合设计表	377
附录 9B: Box-Behnken 设计表	380
附录 9C: 均匀外壳设计表	381
参考文献	382
第十章 稳健参数设计简介	385
§10.1 外延层生长试验和叶形弹簧试验的稳健参数设计描述	385
10.1.1 再访外延层生长试验	385
10.1.2 再访叶形弹簧试验	386
§10.2 减小变差的策略	387
§10.3 噪声 (难以控制) 因子	388
§10.4 通过稳健参数设计减小变差	390
§10.5 试验与建模策略 I: 乘积表	391
10.5.1 位置和散度建模	393
10.5.2 响应建模	397
§10.6 试验与建模策略 II: 单一表与响应建模	402
§10.7 乘积表: 估计能力与最优选择	405
§10.8 在乘积表与单一表之间选择	406
§10.9 单一表的最优选择	410
§10.10 信噪比及其在参数设计优化中的局限性	411
10.10.1 外延层生长试验的信噪比分析	413
§10.11 进一步的问题	414
§10.12 实用小结	415
练习	416
附录 10A: 基于 2^{k-p} 设计的单一表	425
参考文献	433
第十一章 信号-响应系统的稳健参数设计	437
§11.1 注射铸模试验	437
§11.2 信号-响应系统及其分类	441
11.2.1 测量系统的校准	443
§11.3 参数设计优化的性能度量	444
§11.4 建模与分析策略	447
§11.5 注射铸模试验的分析	449
11.5.1 PMM 分析	450

11.5.2 RFM 分析	451
§11.6 试验计划的选择	454
§11.7 实用小结	457
练习	457
参考文献	465
第十二章 改善可靠性的试验	467
§12.1 带有失效时间数据的试验	467
12.1.1 日光灯试验	467
12.1.2 恒温器试验	468
12.1.3 钻头试验	468
§12.2 失效时间数据的回归模型	471
§12.3 处理带截尾的失效时间数据的一种似然方法	472
12.3.1 MLE 的可估性问题	475
§12.4 依赖设计的模型选择策略	475
§12.5 失效时间数据的估计和模型选择的 Bayes 方法	476
§12.6 带有失效时间数据的可靠性试验的分析	478
12.6.1 日光灯试验的分析	479
12.6.2 恒温器试验的分析	480
12.6.3 钻头试验的分析	481
§12.7 降级数据的可靠性试验	483
§12.8 降级数据的简单分析	487
§12.9 实用小结	489
练习	490
参考文献	495
第十三章 非正态数据的试验	497
§13.1 带有计数数据的波焊接试验	497
§13.2 广义线性模型	498
13.2.1 响应的分布	498
13.2.2 系统效应的形式	500
13.2.3 GLM 与响应变换	501
§13.3 广义线性模型的分析	501
§13.4 波焊接试验的分析	503
§13.5 广义线性模型的其它应用和推广	505
§13.6 带有有序数据的泡沫铸模试验	506
§13.7 有序数据的建模和分析	506
13.7.1 有序数据的 Gibbs 抽样	508
§13.8 泡沫铸模试验的分析	511
§13.9 得分: 分析有序数据的一种简单方法	513
§13.10 实用小结	515