

# 试验设计与分析

杨 德 编著

中国农业出版社



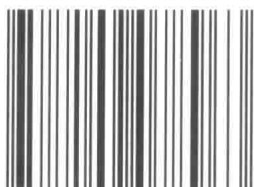
# 试验设计 与分析

杨 德 编著

中国农业出版社



ISBN 7-109-07896-5



9 787109 078963 >

ISBN 7-109-07896-5/S·5244

定价：150.00 元

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 试验设计与分析

DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS

杨 德 编著

中 国 农 业 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

试验设计与分析/杨德编著. -北京: 中国农业出版社, 2002.12

ISBN 7-109-07896-5

I. 试... II. 杨... III. ①试验设计 (数学)-基本知识②试验设计 (数学)-基本知识 IV. O212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 093077 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑: 耿增强

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 33

字数: 900 千字 印数 1~1000 册

定价: 150.00 元

<http://www.ccap.com.cn>

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

# 序一

试验设计是自然科学研究方法论领域中一个比较成熟的分枝学科，可进一步分为环境设计和处理设计。环境设计的主要目的是，在试验实施的过程中追求试验误差的最小化和无偏估计，以提高试验的灵敏度和准确测验处理效应的显著性。这是试验的基础设计，包括随机设计、对比设计、随机区组设计、拉丁方设计等。处理设计则是为解决试验中的某些问题而采用的特别设计。例如：为减少处理数目，采用部分重复设计、回归模型设计、正交主效应设计等；为缩小区组（同质试验单元的集合）规模，采用不完全区组设计、平衡不完全区组设计、混杂设计、格子设计、增广设计等；为探究产品成分的合适配比，采用单形格子设计、矩心设计等；为避免个体间（如人类）差异太大而影响试验结果比较，采用交叉设计、交换设计等。这些设计，尽管大多数都始于农业研究，但设计的原理在不同的专业领域（例如工业和农业、医学和地学）大多相通。这些设计的实施，都可能以较小的化费、较为有效地发现客观规律，或者证实和否定以往的认知和结论；都曾经在并继续在有关国家和地区推动着科学技术的进步和工、农业生产的发展。

在我国，试验设计的知识和应用都有待进一步普及。尤其是处理设计，虽然在 20 世纪的 40 年代就有过介绍（范福仁，田间试验之设计与分析，第 1 版，广西农业试验场丛书，1942；第 2 版，新农企业股份有限公司，1948。当时曾作为“大学教本”），但新中国成立后较少出版这方面的著作，50 年代以来试验设计的新发展更是缺少系统的介绍。另外，不少非常精妙的设计都只是在很有限的范围内应用过，或者可能还没有人去应用过。这不能不是我国科技界的一个无形的大损失。

杨德博士曾师从已故数量遗传学家和大豆育种家马育华教授攻读试验统计，以后又在美国北卡罗来纳州立大学统计系等地访问两年，注意收集和积累有关试验设计的理论和应用的资料。我是非常支持他将个人所得作系统整理、撰写成《试验设计与分析》专著的。其意义将不仅是填补一个空白，更重要的是有助于提高我国广大科技工作者的研究水平，以更好地落实科教兴国的基本国策。由此，我也非常乐于将此著推荐给从事科学研究工作的所有读者，相信诸位读后都会有不同程度的收获。是为序。

夏惠栋

2000 年 6 月于扬州大学

## 序二

正确设计试验方案并对所获调查数据进行科学的统计分析是每个研究工作者必需具备的基本功。农业试验周期长,受环境条件影响大,对此门知识的掌握与应用尤为重要。但较长时间以来,由於种种原因,农业试验设计与统计分析无论在大专院校课程的设置还是科研单位的实际应用中,都没有受到应有的重视。虽然有关部门曾多次组织专家、教授编写、修订高校统编教材,其间也出版有少数专著如马育华(1982)、范濂(1983)、莫惠栋(1984, 1992再版)等作为课外参考读物,但这些作者在审时度势之后,往往去繁就简,只着重介绍一些基本原理和最常用的方法,没有从发展学科的角度进行较全面的阐述。改革开放后,杨德博士先后在国内外攻读试验设计与统计分析,学有所成,并积累了多年的教学与实践经验,他撰写的《试验设计与分析》一书,主要从农业科学试验的需要出发,也注意到工业、医学和其它生物科学的特定要求,并针对过去国内出版的教材与书籍中未涉及或未展开的一些问题,从第10章起便依次增添论述了稳健设计、回归设计、配方设计、均匀设计、正交裂区和裂区混杂设计、交替设计、格子设计、增广设计、广义格子设计、近邻分析、双向随机区组设计、长期试验设计等内容,有不少是近年的进展。概括起来,不外乎通过减少区组容量、精选处理、完善局部控制或施加统计控制的方法以提高试验精确度,并适应多品种(系)和特殊试验的需要,用最少的花费与工作量获取尽可能多而可靠的信息。许多设计与分析在过去认为过于繁琐复杂、难以应用,在计算机日益普及的今天已不成为问题。本书阐述系统,内容比较丰富,既有原理方法又有分析实例,可与国内外已出版的同类专著相参照,拓宽读者对本领域的认识,并启迪他们深化的思考。

杨德

2001年1月於北京

# 前 言

迎面而来的“知识经济”以全新的理念说明，知识为经济的基础，知识创新是经济发展基本动力之一。知识创新的关键是要拥有大量高素质的人才，科学家则是直接进行知识创新的人力资源。科学家们在科学试验中进行着知识生产、重组、扩展、应用的创新活动，而试验设计则是他们进行科学试验的设计实施、数据收集、结果分析、结论推断的一门科学。正确的试验设计乃是科学试验成功的必备条件，而优良的设计方法及分析技术可保证试验结果和推断的可靠性及科学性。因此，试验设计虽然仅是统计学中的一门分枝学科，但却是一个科学家必备的统计素质。科学家们进行科学试验设计、分析及推断科学结论的能力，将直接制约他们对新知识的认知程度和创新能力，并影响科学研究的成败。因而，作为一名科学研究工作者，熟练地掌握和应用这一学科非常重要。

试验设计来源于农业试验，试验设计学科的奠基人 R.A.Fisher (1890—1962) 自 1919 年起在英国 Rothamsted 农业试验站从事田间试验的统计分析工作，经过 14 年的研究与实践，他在 1925 年的《研究工作中的统计方法》一书中提出了“试验设计”的术语；1935 年在《试验设计》一书中首次系统地介绍了试验设计的原理和方法，如试验设计的随机、重复、区域控制三条基本原理；又如随机区组设计、拉丁方设计等基本的试验设计与分析方法。在 20 世纪 40 年代，英美两国在工业上采用试验设计方法进行工艺研究。在 50 年代，Cochran 和 Cox (1957, 1992) 及 Kempthorne (1952) 的两本经典著作对试验设计的原理和方法进行了系统而全面的介绍。

随着近代统计学及计算机科学向试验学科的渗透，现代科学研究中更注重试验设计的统计性和实用性，要求试验方案的选择具有效率高、信息丰富、统计性能优良、实用性强的特点，从而使各种实用设计方法的应用日趋广泛。我国在回归设计方面的应用发展迅速，随着各种统计软件的涌现，研究人员对各种试验设计原理、设计方法及合理有效应用的兴趣与日俱增。最早的试验设计专著是范福仁的《田间试验之设计与分析》(1942)，近些年来国内虽出版了一些有关专著，但主要是侧重介绍了部分的试验设计方法，如回归设计、正交设计等。迄今国内还缺乏系统论述试验设计基本原理及其方法的专著，本书正是适应这种需要而编著的。

本书 18 章主要分为三个部分：第一部分（第 1 章至第 3 章）介绍了试验设计和试验统计的原理及基本方法，主要包括试验的基本概念、内容、步骤，试验设计的作用、实例，各类环境设计和处理设计的原理、原则，以及试验统计的基本方法等。

第二部分（第 4 章至第 8 章）介绍了常用试验设计的原理、方法及分析技术，主要包括完全随机设计、随机完全区组设计、拉丁方设计、不完全区组设计、因子设计、交叉设计、巢式设计、混杂设计、分式因子设计等。

第三部分（第 9 章至第 18 章）介绍了一些实用的设计方法及分析技术，如正交设计，它主要适用于因子筛选与因子互作分析试验；稳健设计，主要适用于产品工艺质量控制中考虑干扰因子影响下产品生产使用的稳健性；回归设计、均匀设计、配方设计等，主要适

用于分析各因子间相互作用和反应模型的选择及优化;裂区设计,主要适用于不同因子需要不同大小试验单元的试验;交替设计,主要适用于医学和动物研究中试验个体(试验单元)间存在一些自然差异的试验;格子设计、 $\alpha$ 设计、简化广义格子设计、增广设计,主要适用于单因素试验中2~4重复及无重复的大数量处理筛选、鉴定的试验;长期试验,主要适用于农业持续发展(如肥料定位及优化耕作制度)研究及一些环境科学中处理存在后续效应的一系列试验设计;另外采用近邻分析方法可对影响试验结果的一些试验材料间固有的数量差异进行统计控制。

本书系统地介绍了国内外科学研究中试验设计的原理、方法和应用,重点介绍各种常用的和近代的试验设计基本原理、实用方法及分析技术,内容侧重于应用,对于统计原理,叙述时省略其繁冗的推导过程,着重介绍其基本思想。试验设计虽然源于农业田间试验,但它已在自然科学的许多领域广泛应用。为了给读者提供便利,在附录中给出了有关试验设计的统计符号、统计表、设计方案、统计术语等;在 dyES 软件包中编制了与本书例题配套的相应程序,并同时编制了与本书例题配套的 SAS 程序,它们都可到有关 Web 站点中下载使用。作者从各方面尽量体现本书的系统性、新颖性、实用性。

本书是作者自 1979 年以来先后在湖南农业大学、南京农业大学、美国北卡罗纳州立大学、云南农业大学担任研究生“试验设计与分析”课程的教学及试验设计方面研究的基础上,参阅了国内外一些有关专著撰写而成。

作者感谢马育华教授 12 年的指导及鼓励关心此书的撰写。本书得到国家科学技术学术著作出版基金资助,得到黄炳生先生的关心与支持,在研究中得到云南省自然科学基金的支持,中国科学院资深院士、中国农业科学院庄巧生研究员为本书作序,扬州大学莫惠栋教授在审阅本书时提出了许多宝贵的修改意见并作序,首都师范大学郭平仲教授、中国农业大学孔繁玲教授、云南大学王学仁教授均给予了很多关心,中国农业出版社给予重视,责任编辑耿增强和宛秀兰同志在稿件审校、后期绘图、编辑排版等方面做了大量工作。在本书撰写过程中,作者得到所在单位领导及同事们的关心,在教学中研究生提出了有益的建议,刘楚莹女士承担了本书初稿繁重的录入编排绘图工作,特在此一并表示感谢。

本书既可作为自然科学研究人员、工程技术人员和教师进行科学试验设计与分析的参考书,亦可作为农业类、生物类、统计类的高年级大学生、研究生的教学参考用书。

因作者水平有限,错谬之处在所难免,希望广大读者与专家不吝赐教。

杨 德

2001 年 8 月于云南农业大学

封面设计 胡金刚 王 涛



序一  
序二  
前言



## 试验设计在科学研究中的作用

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1.1 试验设计在科学研究中的<br>地位与意义 ..... | 1 |
| 1.2 试验设计学科的历史与发展 .....         | 2 |
| 1.3 科学研究中不同阶段的试验设计 .....       | 4 |
| 1.3.1 研究初期阶段的探索试验 .....        | 4 |
| 1.3.2 研究中期阶段的析因试验 .....        | 4 |
| 1.3.3 研究后期阶段的优化试验 .....        | 4 |
| 1.4 试验设计的实例 .....              | 4 |



## 试验设计的概念及原理

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 2.1 试验的基本概念 .....                    | 15 |
| 2.1.1 总体与样本 .....                    | 15 |
| 2.1.2 试验因子、水平、处理 .....               | 15 |
| 2.1.3 试验单元、抽样单元、测量单元、<br>重复、区组 ..... | 16 |
| 2.1.4 试验误差及来源 .....                  | 16 |
| 2.1.5 试验误差的分类 .....                  | 17 |
| 2.1.6 精密度、正确度、精确度 .....              | 17 |
| 2.1.7 提高试验精确度的主要途径 .....             | 18 |
| 2.2 试验设计的内容及试验步骤 .....               | 19 |
| 2.2.1 科学试验的主要步骤 .....                | 19 |
| 2.2.2 试验设计的主要内容 .....                | 19 |
| 2.3 试验设计的原理 .....                    | 22 |
| 2.3.1 惟一差异原则 .....                   | 22 |
| 2.3.2 试验设计的基本原理 .....                | 22 |
| 2.3.3 试验设计原理的拓广 .....                | 23 |
| 2.4 试验设计的种类及其特点 .....                | 23 |
| 2.4.1 试验设计的种类 .....                  | 23 |
| 2.4.2 常用试验设计的主要特点 .....              | 24 |



## 试验统计的基本方法

|                   |    |
|-------------------|----|
| 3.1 试验数据的整理 ..... | 27 |
|-------------------|----|

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 3.1.1 试验数据的类型 .....               | 27 |
| 3.1.2 试验数据的次数分布 .....             | 27 |
| 3.1.3 试验数据的初步分析 .....             | 30 |
| 3.2 概率基础知识 .....                  | 32 |
| 3.2.1 概率的概念 .....                 | 32 |
| 3.2.2 事件的相互关系 .....               | 33 |
| 3.2.3 概率计算法则 .....                | 34 |
| 3.3 概率分布 .....                    | 36 |
| 3.3.1 随机变量与分布函数 .....             | 36 |
| 3.3.2 离散随机变量及概率分布 .....           | 36 |
| 3.3.3 连续随机变量及概率分布 .....           | 38 |
| 3.3.4 二项分布 .....                  | 39 |
| 3.3.5 普阿松分布 .....                 | 40 |
| 3.3.6 正态分布 .....                  | 41 |
| 3.4 抽样分布 .....                    | 46 |
| 3.4.1 抽样 .....                    | 46 |
| 3.4.2 统计量与参数估计 .....              | 47 |
| 3.4.3 抽样分布 .....                  | 50 |
| 3.5 假设检验与比较试验 .....               | 53 |
| 3.5.1 假设检验 .....                  | 53 |
| 3.5.2 样本均值与总体数学期望值的<br>比较 .....   | 56 |
| 3.5.3 总体方差相同时两样本平均数间<br>的比较 ..... | 57 |
| 3.5.4 置信区间 .....                  | 59 |
| 3.5.5 总体方差不同时两样本平均数间<br>的比较 ..... | 60 |
| 3.5.6 样本平均数的检验方法 .....            | 61 |
| 3.6 配对比较设计的样本平均数检验 .....          | 61 |
| 3.6.1 配对比较试验 .....                | 61 |
| 3.6.2 配对比较试验分析 .....              | 62 |



## 完全随机、随机区组、 拉丁方及有关设计

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 4.1 完全随机设计 .....        | 64 |
| 4.1.1 完全随机设计特点及方法 ..... | 64 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 4.1.2 方差分析及完全随机设计的统计<br>分析 ..... | 65 |
| 4.1.3 完全随机设计固定模型的实例<br>分析 .....  | 68 |
| 4.1.4 完全随机设计参数估计 .....           | 69 |
| 4.1.5 多重比较 .....                 | 70 |
| 4.1.6 完全随机设计随机模型的实例<br>分析 .....  | 78 |
| 4.2 随机区组设计 .....                 | 79 |
| 4.2.1 随机区组设计的特点和方法 .....         | 79 |
| 4.2.2 随机完全区组设计的统计分析 .....        | 80 |
| 4.2.3 随机完全区组实例分析 .....           | 81 |
| 4.2.4 随机区组设计的相对效率 .....          | 82 |
| 4.3 拉丁方设计 .....                  | 83 |
| 4.3.1 拉丁方设计的方法及特点 .....          | 83 |
| 4.3.2 拉丁方设计的统计分析 .....           | 85 |
| 4.3.3 拉丁方设计实例分析 .....            | 85 |
| 4.4 正交拉丁方设计 .....                | 87 |
| 4.4.1 正交拉丁方组 .....               | 87 |
| 4.4.2 希腊拉丁方设计 .....              | 88 |
| 4.4.3 多重正交拉丁方设计 .....            | 89 |
| 4.5 双向随机区组设计 .....               | 89 |
| 4.5.1 双向随机区组设计的特点 .....          | 89 |
| 4.5.2 单因素双向随机完全区组设计<br>与分析 ..... | 90 |
| 4.5.3 两因素双向随机完全区组设计<br>与分析 ..... | 92 |

## 5 不完全区组设计

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 5.1 不完全区组设计的特点 .....            | 95  |
| 5.2 平衡不完全区组设计 .....             | 95  |
| 5.2.1 平衡不完全区组设计的参数<br>及条件 ..... | 96  |
| 5.2.2 平衡不完全区组的设计方法 .....        | 96  |
| 5.3 平衡不完全区组设计分析 .....           | 99  |
| 5.3.1 平衡不完全区组设计的区组内<br>分析 ..... | 99  |
| 5.3.2 平衡不完全区组设计实例 .....         | 100 |
| 5.4 部分平衡不完全区组设计 .....           | 103 |
| 5.4.1 部分平衡不完全区组设计参数 .....       | 103 |
| 5.4.2 部分平衡不完全区组设计方法 .....       | 106 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5.4.3 部分平衡不完全区组统计分析 ..... | 107 |
| 5.4.4 部分平衡不完全区组设计实例 ..... | 108 |
| 5.5 尤顿方设计 .....           | 111 |

## 6 因子设计

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 6.1 复因子试验和因子主效及互作 .....            | 114 |
| 6.1.1 复因子试验 .....                  | 114 |
| 6.1.2 复因子试验的特点 .....               | 114 |
| 6.1.3 因子的主效与互作 .....               | 114 |
| 6.2 $2^k$ 因子设计分析 .....             | 116 |
| 6.2.1 $2^2$ 设计 .....               | 117 |
| 6.2.2 $2^3$ 设计 .....               | 123 |
| 6.2.3 对于 $2^k$ 设计的 Yates 氏算法 ..... | 127 |
| 6.2.4 一般的 $2^k$ 设计 .....           | 127 |
| 6.2.5 无重复的 $2^k$ 设计 .....          | 128 |
| 6.3 $3^k$ 因子设计分析 .....             | 130 |
| 6.3.1 $3^2$ 设计 .....               | 130 |
| 6.3.2 $3^3$ 设计及 $3^k$ 设计 .....     | 134 |
| 6.4 一般的复因子试验设计 .....               | 135 |
| 6.4.1 复因子全面试验设计方法 .....            | 135 |
| 6.4.2 交叉设计 .....                   | 135 |
| 6.4.3 巢式设计 .....                   | 138 |
| 6.4.4 交叉与巢式混合设计 .....              | 141 |

## 7 混杂设计

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 7.1 混杂设计的作用和目的 .....                  | 142 |
| 7.2 $2^k$ 因子混杂设计 .....                | 142 |
| 7.2.1 2 区组的 $2^k$ 因子混杂设计 .....        | 142 |
| 7.2.2 4 区组的 $2^k$ 因子混杂设计 .....        | 144 |
| 7.2.3 $2^k$ 因子混杂设计方法及定义比较<br>选择 ..... | 146 |
| 7.2.4 两区组 $2^k$ 因子混杂设计的分析 .....       | 148 |
| 7.2.5 $2^k$ 因子试验的完全混杂设计及<br>分析 .....  | 148 |
| 7.2.6 $2^k$ 因子试验的部分混杂设计及<br>分析 .....  | 149 |
| 7.3 $3^k$ 因子混杂设计 .....                | 151 |
| 7.3.1 3 区组的 $3^k$ 因子混杂设计 .....        | 151 |
| 7.3.2 9 区组的 $3^k$ 因子混杂设计 .....        | 153 |
| 7.3.3 $3^p$ 区组的 $3^k$ 因子混杂设计 .....    | 154 |
| 7.4 其它混杂系统 .....                      | 154 |



## 分式因子设计

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 8.1 分式因子设计的特点 .....                    | 156 |
| 8.2 混名与定义比较 .....                      | 157 |
| 8.2.1 混名的概念 .....                      | 157 |
| 8.2.2 混名与定义比较的关系 .....                 | 157 |
| 8.3 $2^{k-p}$ 分式因子设计分析 .....           | 158 |
| 8.3.1 $1/2$ 的 $2^{k-1}$ 分式因子设计分析 ..... | 158 |
| 8.3.2 $1/2$ 的 $2^{k-1}$ 分式因子设计 .....   | 164 |
| 8.3.3 $1/2$ 的 $2^{k-1}$ 分式因子设计 .....   | 164 |
| 8.3.4 $1/4$ 的 $2^{k-2}$ 分式因子设计 .....   | 165 |
| 8.3.5 $1/2^p$ 的 $2^{k-p}$ 分式因子设计 ..... | 165 |
| 8.3.6 分式试验的区组混杂设计 .....                | 166 |
| 8.4 $3^{k-p}$ 分式因子设计 .....             | 167 |
| 8.4.1 $1/3$ 的 $3^{k-1}$ 分式因子设计 .....   | 167 |
| 8.4.2 $1/3^p 3^{k-p}$ 分式因子设计 .....     | 169 |



## 正交设计

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 9.1 正交表与正交设计的特点 .....  | 171 |
| 9.1.1 正交设计的发展与应用 ..... | 171 |
| 9.1.2 正交表 .....        | 171 |
| 9.1.3 正交设计的特点 .....    | 172 |
| 9.2 正交试验的步骤及结果分析 ..... | 173 |
| 9.2.1 正交试验的步骤 .....    | 173 |
| 9.2.2 正交试验的结果分析 .....  | 174 |
| 9.3 筛选因子的正交设计分析 .....  | 175 |
| 9.4 正交表的形式与表头设计 .....  | 177 |
| 9.4.1 正交表的不同形式 .....   | 177 |
| 9.4.2 正交表的表头设计 .....   | 179 |
| 9.5 因子互作的正交设计分析 .....  | 179 |
| 9.5.1 直观分析与方差分析 .....  | 179 |
| 9.5.2 方差分析与模型选择 .....  | 183 |
| 9.6 水平数不等的正交试验设计 ..... | 187 |
| 9.6.1 混合水平的正交试验 .....  | 187 |
| 9.6.2 并列法 .....        | 188 |
| 9.6.3 拟水平法 .....       | 194 |
| 9.6.4 部分追加法 .....      | 196 |
| 9.7 均匀设计 .....         | 197 |
| 9.7.1 均匀设计的特点 .....    | 197 |
| 9.7.2 均匀设计与均匀设计表 ..... | 198 |
| 9.7.3 均匀设计的分析 .....    | 199 |



## 稳健设计

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 10.1 稳健设计的特点 .....           | 202 |
| 10.2 稳健设计在工业质量控制中的应用 .....   | 202 |
| 10.2.1 田口玄一法及三次设计 .....      | 202 |
| 10.2.2 稳健设计与质量革新 .....       | 203 |
| 10.3 稳健设计的目标 .....           | 204 |
| 10.4 质量损失函数 .....            | 205 |
| 10.4.1 目标值最优的质量损失函数 .....    | 205 |
| 10.4.2 极大值最优的质量损失函数 .....    | 206 |
| 10.4.3 极小值最优的质量损失函数 .....    | 206 |
| 10.5 信噪比 .....               | 207 |
| 10.6 稳健设计的主要步骤 .....         | 208 |
| 10.7 稳健设计实例 .....            | 208 |
| 10.7.1 目标值最优的瓷砖试验 .....      | 208 |
| 10.7.2 极小值最优的栏杆应力试验 .....    | 210 |
| 10.7.3 极小值最优的印刷电路板焊接试验 ..... | 211 |



## 回归设计

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 11.1 古典回归分析 .....                  | 214 |
| 11.1.1 建立回归方程 .....                | 216 |
| 11.1.2 方差分析及 $F$ 测验 .....          | 217 |
| 11.1.3 偏回归系数的 $t$ 测验及 $F$ 测验 ..... | 218 |
| 11.1.4 预测值 $\hat{y}$ 的标准误 .....    | 220 |
| 11.2 回归设计的特点 .....                 | 221 |
| 11.3 回归正交设计 .....                  | 221 |
| 11.3.1 回归正交设计方法及特点 .....           | 221 |
| 11.3.2 回归试验设计的编码水平和实施水平 .....      | 223 |
| 11.3.3 一次回归正交设计的回归系数计算与检验 .....    | 224 |
| 11.4 回归组合设计 .....                  | 227 |
| 11.4.1 二次回归组合设计 .....              | 227 |
| 11.4.2 回归正交组合设计 .....              | 229 |
| 11.4.3 二次回归正交设计的方差分析和回归系数估计 .....  | 231 |
| 11.4.4 回归正交组合设计分析实例 .....          | 232 |
| 11.5 回归旋转设计 .....                  | 234 |

|                                    |     |                                   |     |
|------------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 11.5.1 二次回归旋转设计的 $\gamma$ 选择 ..... | 235 | 13.2 简单裂区设计 .....                 | 286 |
| 11.5.2 二次旋转组合设计的 $m_0$ 选择 .....    | 236 | 13.2.1 简单裂区设计试验布置 .....           | 286 |
| 11.5.3 回归正交旋转组合设计与分析 .....         | 239 | 13.2.2 简单裂区试验统计分析 .....           | 287 |
| 11.5.4 二次回归通用旋转组合设计 .....          | 242 | 13.2.3 简单裂区设计的实例分析 .....          | 289 |
| 11.6 回归设计的正交区组 .....               | 243 | 13.3 再裂区设计 .....                  | 291 |
| 11.7 回归最优设计 .....                  | 246 | 13.4 正交裂区设计 .....                 | 293 |
| 11.7.1 回归最优设计的准则 .....             | 247 | 13.4.1 正交裂区设计的因子及水平 .....         | 293 |
| 11.7.2 饱和最优设计 .....                | 252 | 13.4.2 表头设计 .....                 | 294 |
| 11.7.3 回归最优设计试验分析 .....            | 255 | 13.4.3 拟水平设计及试验方案 .....           | 294 |
| 11.7.4 双向区组的回归设计与分析 .....          | 256 | 13.4.4 正交裂区设计的方差分析 .....          | 297 |
| 11.8 其它回归设计 .....                  | 258 | 13.5 裂区混杂设计 .....                 | 299 |
| <b>12 配方设计</b>                     |     | 13.5.1 副区混杂设计的因子及处理 .....         | 299 |
| 12.1 配方试验设计的概念 .....               | 259 | 13.5.2 副区混杂设计的处理设计及<br>环境设计 ..... | 300 |
| 12.1.1 配方试验的概念 .....               | 259 | 13.5.3 副区混杂设计的方差分析 .....          | 300 |
| 12.1.2 单形顶点及单形的点坐标 .....           | 259 | 13.6 裂区试验的环境设计 .....              | 302 |
| 12.1.3 配方试验的数学模型 .....             | 260 | 13.6.1 主区拉丁方排列的裂区设计 .....         | 302 |
| 12.1.4 Scheffé 正则多项式模型 .....       | 260 | 13.6.2 副区拉丁方排列的裂区设计 .....         | 303 |
| 12.2 单形格子设计 .....                  | 262 | 13.6.3 主副区拉丁方排列的裂区设计 .....        | 304 |
| 12.2.1 单形格子设计的试验方案 .....           | 262 | 13.7 时间裂区设计 .....                 | 304 |
| 12.2.2 单形格子设计的分析 .....             | 263 | 13.8 条区设计 .....                   | 305 |
| 12.3 单形矩心设计 .....                  | 264 | 13.8.1 条区设计方法 .....               | 305 |
| 12.3.1 单形矩心设计方法 .....              | 264 | 13.8.2 条区设计的分析 .....              | 307 |
| 12.3.2 单形矩心设计的分析 .....             | 266 | <b>14 交替设计</b>                    |     |
| 12.4 轴点拓广单形设计 .....                | 267 | 14.1 交替设计的特点 .....                | 311 |
| 12.4.1 轴点拓广单形设计的试验方案 .....         | 267 | 14.2 简单交替设计统计分析 .....             | 312 |
| 12.4.2 轴点拓广单形设计的分析 .....           | 268 | 14.2.1 线性模型及符号 .....              | 312 |
| 12.5 限制成分的配方设计 .....               | 270 | 14.2.2 一般方差分析 .....               | 313 |
| 12.5.1 限制成分下界的单形设计 .....           | 270 | 14.2.3 差异方差分析 .....               | 314 |
| 12.5.2 限制成分上界的配方设计 .....           | 275 | 14.3 简单交替设计的替代参数 .....            | 314 |
| 12.5.3 限制成分上下界的配方设计 .....          | 277 | 14.3.1 3 参数模型(模型 1) .....         | 314 |
| 12.5.4 多重成分限制的配方设计 .....           | 279 | 14.3.2 后续效应模型(模型 2) .....         | 315 |
| 12.6 其它配方设计 .....                  | 279 | 14.3.3 处理时期互作模型(模型 3) .....       | 315 |
| 12.6.1 成分率的配方设计 .....              | 279 | 14.3.4 顺序效应模型(模型 4) .....         | 315 |
| 12.6.2 含有工艺变量的配方设计 .....           | 282 | 14.3.5 处理顺序互作模型(模型 5) .....       | 316 |
| 12.6.3 配方成分的筛选试验 .....             | 283 | 14.4 反转设计 .....                   | 317 |
| <b>13 裂区设计</b>                     |     | 14.4.1 反转设计及特点 .....              | 317 |
| 13.1 裂区设计方法与特点 .....               | 285 | 14.4.2 两处理反转设计统计分析 .....          | 317 |
| 13.1.1 主区与副区 .....                 | 285 | 14.4.3 两处理反转设计实例 .....            | 318 |
| 13.1.2 裂区设计的特点 .....               | 286 | 14.4.4 一般反转设计统计分析 .....           | 318 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 14.4.5 一般反转设计实例 .....    | 319 |
| 14.5 拉丁方交替设计 .....       | 320 |
| 14.5.1 拉丁方交替设计及特点 .....  | 320 |
| 14.5.2 拉丁方交替设计统计分析 ..... | 321 |
| 14.5.3 拉丁方交替设计实例 .....   | 323 |



## 格子设计

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 15.1 格子设计的特点及类型 .....            | 325 |
| 15.1.1 格子设计的特点及维数 .....          | 325 |
| 15.1.2 格子设计的基本分组方法和类型 .....      | 326 |
| 15.2 平方格子设计 .....                | 327 |
| 15.2.1 平衡格子设计 .....              | 327 |
| 15.2.2 部分平衡格子设计 .....            | 329 |
| 15.2.3 平方格子设计的统计分析 .....         | 330 |
| 15.3 矩形格子设计 .....                | 337 |
| 15.3.1 矩形格子设计方法 .....            | 337 |
| 15.3.2 矩形格子设计的分析 .....           | 338 |
| 15.4 立方格子设计 .....                | 342 |
| 15.5 广义格子设计 .....                | 343 |
| 15.5.1 广义格子设计的特点 .....           | 343 |
| 15.5.2 广义矩形格子设计 .....            | 344 |
| 15.5.3 $\alpha$ 设计 .....         | 344 |
| 15.6 简化广义格子设计 .....              | 346 |
| 15.6.1 简化广义格子设计构成原理<br>与特点 ..... | 346 |
| 15.6.2 简化广义格子设计构成方法 .....        | 346 |
| 15.6.3 简化广义格子设计的区组形式 .....       | 352 |
| 15.6.4 简化广义格子设计实例分析 .....        | 353 |



## 增广设计

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 16.1 增广设计的特点 .....       | 356 |
| 16.2 增广设计与分析 .....       | 357 |
| 16.2.1 增广随机区组设计 .....    | 357 |
| 16.2.2 增广拉丁方设计 .....     | 360 |
| 16.3 修饰增广设计 .....        | 363 |
| 16.3.1 修饰增广设计方法 .....    | 363 |
| 16.3.2 修饰增广设计的统计分析 ..... | 365 |
| 16.3.3 修饰增广设计实例 .....    | 366 |
| 16.4 行列增广设计 .....        | 368 |
| 16.4.1 行列增广设计方法 .....    | 368 |
| 16.4.2 行列增广设计的分析 .....   | 369 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 16.4.3 行列增广设计实例 ..... | 370 |
|-----------------------|-----|



## 试验设计的近邻分析

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 17.1 试验环境设计的统计控制 .....             | 372 |
| 17.2 协方差分析特点 .....                 | 372 |
| 17.3 完全随机设计的协方差分析 .....            | 373 |
| 17.3.1 完全随机设计的协方差分析方法 .....        | 373 |
| 17.3.2 完全随机设计的协方差分析实例 .....        | 375 |
| 17.4 随机完全区组设计的协方差<br>分析 .....      | 377 |
| 17.4.1 随机完全区组设计的协方差分析<br>方法 .....  | 377 |
| 17.4.2 随机完全区组设计的协方差分析<br>实例 .....  | 378 |
| 17.5 双因素完全随机设计的协方差<br>分析 .....     | 380 |
| 17.5.1 双因素完全随机设计的协方差<br>分析方法 ..... | 380 |
| 17.5.2 双因素完全随机设计的协方差<br>分析实例 ..... | 381 |
| 17.6 近邻分析 .....                    | 383 |
| 17.6.1 近邻分析的误差相关模型特点 .....         | 383 |
| 17.6.2 近邻模型的差分分析 .....             | 384 |
| 17.6.3 近邻模型的协方差分析 .....            | 385 |
| 17.6.4 近邻模型的协方差分析实例 .....          | 387 |



## 长期试验设计

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 18.1 长期试验设计特点 .....     | 391 |
| 18.1.1 长期性计划 .....      | 391 |
| 18.1.2 长期试验类型 .....     | 391 |
| 18.2 长期试验设计与后续效应 .....  | 392 |
| 18.2.1 一般设计方法 .....     | 392 |
| 18.2.2 后续效应的估计与分析 ..... | 393 |
| 18.3 平衡设计 .....         | 394 |
| 18.3.1 一般平衡设计 .....     | 394 |
| 18.3.2 其它平衡设计 .....     | 396 |
| 18.4 双重交替设计 .....       | 396 |
| 18.5 因子设计 .....         | 398 |
| 18.6 裂区设计及趋向分析 .....    | 398 |
| 18.7 其它设计 .....         | 400 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 18.7.1 同一作物种植多年 .....  | 400 |
| 18.7.2 不同轮作方式的比较 ..... | 400 |
| 18.7.3 一系列长期试验 .....   | 401 |
| 18.8 长期试验的应用 .....     | 401 |

## 附录

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 附录 A 主要统计符号注解 .....                                            | 402 |
| 附录 A1 希腊字母符号 .....                                             | 402 |
| 附录 A2 拉丁字母符号 .....                                             | 402 |
| 附录 B 常用试验统计表 .....                                             | 405 |
| 附录 B1 累积正态分布 $F(u)$ 值表 .....                                   | 405 |
| 附录 B2 正态离差 $u$ 值表(两尾) .....                                    | 407 |
| 附录 B3 学生氏 $t$ 值表(两尾) .....                                     | 407 |
| 附录 B4 5%(上)和 1%(下)时 $F$ 值<br>(一尾)表 .....                       | 409 |
| 附录 B5 $\chi^2$ 值表(一尾) .....                                    | 415 |
| 附录 B6 Duncan 氏新复极差测验 $\alpha$ 为<br>0.05 及 0.01 时的 SSR 值表 ..... | 416 |
| 附录 B7 5% $q$ 值表(两尾) .....                                      | 418 |
| 附录 B8 1% $q$ 值表(两尾) .....                                      | 419 |
| 附录 B9 Dunnett 氏测验的 $Dt_{0.05}$ 和 $Dt_{0.01}$ 值表<br>(两尾) .....  | 420 |
| 附录 B10 Duncan-Waller 最小平均风险<br>(MAR)的 $t$ 值( $K=100:1$ ) ..... | 421 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 附录 B11 $r$ 与 $R$ 的 5% 和 1% 显著值 ..... | 425 |
| 附录 B12 $Z$ 与 $r$ 值转换表 .....          | 426 |
| 附录 B13 正交多项式的系数 $c_j$ .....          | 427 |
| 附录 C 常用试验设计的计划 .....                 | 428 |
| 附录 C1 标准拉丁方 .....                    | 428 |
| 附录 C2 正交拉丁方组 .....                   | 428 |
| 附录 C3 不完全区组设计的计划 .....               | 431 |
| 附录 C4 $2^{k-p}$ 分式因子设计的混名关系 .....    | 443 |
| 附录 C5 正交表 .....                      | 450 |
| 附录 C6 回归设计表 .....                    | 468 |
| 附录 C7 均匀设计表 .....                    | 471 |
| 附录 C8 交替设计的拉丁方计划 .....               | 480 |
| 附录 C9 格子设计的计划 .....                  | 486 |
| 附录 C10 增广设计的计划 .....                 | 490 |

## 附录 D 试验设计和统计术语英汉

|           |     |
|-----------|-----|
| 对照表 ..... | 495 |
|-----------|-----|

## 附录 E 试验设计分析的有关计算机

|          |     |
|----------|-----|
| 程序 ..... | 500 |
|----------|-----|

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 附录 E1 下载及使用 dyES 软件包(试用版)<br>的说明 ..... | 500 |
| 附录 E2 下载及使用 SAS 有关程序的<br>说明 .....      | 500 |

## 参考文献

# Contents

|                                                                                  |    |                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Foreword                                                                         | 1  | 2.2.2 Substance of experimental designs                                      | 19 |
| Foreword                                                                         | 2  | 2.3 Principles of experimental designs                                       | 22 |
| Preface                                                                          |    | 2.3.1 Law of one difference                                                  | 22 |
| <b>1 Action of experimental designs on scientific research</b>                   |    | 2.3.2 Basic principles of experimental designs                               | 22 |
| 1.1 Role of experimental designs in scientific research                          | 1  | 2.3.3 Other principles of experimental designs                               | 23 |
| 1.2 Historical perspective                                                       | 2  | 2.4 Kinds and features of experimental designs                               | 23 |
| 1.3 Design of experiments in different stages of scientific research             | 4  | 2.4.1 Kinds of experimental designs                                          | 23 |
| 1.3.1 Primitive experiments in initial stages of scientific research             | 4  | 2.4.2 Features of experimental designs                                       | 24 |
| 1.3.2 Interpret experiments in medium stages of scientific research              | 4  | <b>3 Basic methods of experimental statistics</b>                            |    |
| 1.3.3 Optimum experiments in post stages of scientific research                  | 4  | 3.1 Treatment of experimental data                                           | 27 |
| 1.4 Samples of designed experiments                                              | 4  | 3.1.1 Types of experimental data                                             | 27 |
| <b>2 Concepts and principles of experimental designs</b>                         |    | 3.1.2 Frequency distributions of experimental data                           | 27 |
| 2.1 Basic concepts of experiments                                                | 15 | 3.1.3 Prospect of experimental data                                          | 30 |
| 2.1.1 Samples and population                                                     | 15 | 3.2 Elementary probability                                                   | 32 |
| 2.1.2 Factors, levels and treatments of experiments                              | 15 | 3.2.1 Concept of probability                                                 | 32 |
| 2.1.3 Units of experiments, of sampling, of observation, replications and blocks | 16 | 3.2.2 Relationship between objects                                           | 33 |
| 2.1.4 Sources of experimental errors                                             | 16 | 3.2.3 Analysis methods of probability                                        | 34 |
| 2.1.5 Different errors of experiments                                            | 17 | 3.3 Distributions of probability                                             | 36 |
| 2.1.6 Precision, truesness and accuracy                                          | 17 | 3.3.1 Random variables and distribution functions                            | 36 |
| 2.1.7 Main ways to obtain high accuracy of experiments                           | 18 | 3.3.2 Discrete random variables and its probability distribution functions   | 36 |
| 2.2 Substance of designs and procedure of experiments                            | 19 | 3.3.3 Continuous random variables and its probability distribution functions | 38 |
| 2.2.1 Procedures of experiments                                                  | 19 | 3.3.4 Binomial distribution                                                  | 39 |
|                                                                                  |    | 3.3.5 Poisson distribution                                                   | 40 |
|                                                                                  |    | 3.3.6 Normal distribution                                                    | 41 |
|                                                                                  |    | 3.4 Sampling distributions                                                   | 46 |
|                                                                                  |    | 3.4.1 Sampling                                                               | 46 |
|                                                                                  |    | 3.4.2 Statistic and parameter estimation                                     | 47 |