



全国统计教材编审委员会“十二五”规划教材

试验设计

第二版

茆诗松 周纪芃 陈颖 主编

 中国统计出版社
China Statistics Press



全国统计教材编审委员会“十二五”规划教材

试验设计

第二版

茆诗松 周纪芃 陈颖 主编

 中国统计出版社
China Statistics Press

图书在版编目(CIP)数据

试验设计 / 茆诗松, 周纪芑, 陈颖主编. —2 版.

—北京: 中国统计出版社, 2012. 9

全国统计教材编审委员会“十二五”规划教材

ISBN 978—7—5037—6681—7

I. ①试… II. ①茆… ②周… ③陈… III. ①试验设计—高等学校—教材 IV. ①O212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 209091 号

试验设计(第二版)

作 者/茆诗松 周纪芑 陈 颖

责任编辑/钟 钰

封面设计/上智博文

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 57 号 邮政编码/100826

办公地址/北京市丰台区西三环南路甲 6 号 邮政编号/100073

电 话/邮购(010)63376909 书店(010)68783171

网 址/<http://csp.stats.gov.cn>

印 刷/河北天普润印刷厂

经 销/新华书店

开 本/710×1000mm 1/16

字 数/480 千字

印 张/27.25

印 数/1—3000 册

版 别/2012 年 9 月第 2 版

版 次/2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价/49.00 元

版权所有。未经许可,本书的任何部分不得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。

如有印装差错,由本社发行部调换。

全国统计教材编审委员会

顾问 罗 兰 袁 卫 冯士雍 吴喜之
方积乾 王吉利 庞 皓 李子奈

主任 徐一帆

副主任 严建辉 田鲁生 邱 东 施建军
耿 直 徐勇勇

委员(按姓氏笔划排序)

丁立宏	万崇华	马 骏	毛有丰	王兆军
王佐仁	王振龙	王惠文	丘京南	史代敏
龙 玲	刘建平	刘俊昌	向书坚	孙秋碧
朱 胜	朱仲义	许 鹏	余华银	张小斐
张仲梁	张忠占	李 康	李兴绪	李宝瑜
李金昌	李朝鲜	杨 虎	杨沛华	杨映霜
汪荣明	肖红叶	苏为华	陈 峰	陈相成
房祥忠	林金官	罗良清	郑 明	柯惠新
柳 青	胡太忠	贺 佳	赵彦云	赵耐青
凌 亢	唐年胜	徐天和	徐国祥	郭建华
崔恒建	傅德印	景学安	曾五一	程维虎
蒋 萍	潘 璠	颜 虹		

出版说明

“十二五”时期,是我国全面实施素质教育,全面提高高等教育质量,深化教育体制改革,推动教育事业科学发展,提高教育现代化水平的时期。“十二五”伊始,统计学迎来了历史性的重大变革和飞跃。2011年2月,在国务院学位委员会第28次会议通过的新的《学位授予和人才培养学科目录(2011)》(以下简称“学科目录”)中,统计学从数学和经济学中独立出来,成为一级学科。这一变革和飞跃将对中国统计教育事业产生巨大而深远的影响,中国统计教育事业将在“十二五”时期发生积极变化。

正是在这一背景下,全国统计教材编审委员会制定了《“十二五”全国统计教材建设规划》(以下简称“规划”)。根据“学科目录”在统计学下设有数理统计学,社会经济统计学,生物卫生统计学,金融统计、风险管理与精算学,应用统计5个二级学科的构架,“规划”对“十二五”全国统计规划教材建设作了全面部署,具有以下特点:

第一,打破以往统计规划教材出版学科单一的格局。全面发展数理统计学,社会经济统计学,生物卫生统计学,金融统计、风险管理与精算学,应用统计5个二级学科规划教材的出版,使“十二五”全国统计规划教材涵盖5个二级学科,形成学科全面并平衡发展的出版局面。

第二,打破以往统计规划教材出版层次单一的格局。在编写出版好各学科本科生教材的基础上,对研究生教材出版进行深入研究,出版一批高水平高层次的研究生教材,为我国研究生教育、尤其是应用统计研究生教育提供教学服务。同时,积极重视统计专科教材出版,联合各专科院校,组织编写和出版适应统计专科教学和学习的优秀教材。

第三,打破以往统计规划教材出版品种单一的格局。鼓励内容创新,联系统计实践,具有教学内容和教学方法特色的、各高校自编的相同内容选题的精品教材出版,促进统计教学向创新性、创造性和多样性

发展。

第四,重视非统计专业的统计教材出版。探讨对非统计专业学生的统计教学问题,为非统计专业学生组织编写和出版概念准确、叙述简练、深入浅出、表达方式活泼、练习题贴近社会生活的统计教材,使统计思想和统计理念深入非统计专业学生,以达到统计教学的最大效果。

第五,重视配合教师教学使用的电子课件和辅助学生学习使用的电子产品的配套出版,促进高校统计教学电子化建设,以期最后能形成系统,提高统计教育现代化水平。

第六,重视对已经出版的统计规划教材的培育和提高,本着去粗存精、去旧加新、与时俱进的原则,继续优化已经出版的统计教材的内容和写作,强化配套课件和习题解答,使它们成为精品,最后锤炼成为经典。

“十二五”期间,编审委员会将本着“重质量,求创新,出精品,育经典”的宗旨,组织我国统计教育界专家学者,编写和编辑出版好本轮教材。本轮教材出版后,将能够形成学科齐全、层次分明、品种多样、配套系统的高质量立体式结构,使我国统计规划教材建设再上新台阶,这将对推动我国统计教育和统计教材改革,推动我国统计教育事业科学发展,提高我国统计教育现代化水平产生积极意义。

让教师的教学和学生的学习事半功倍,并使学生在毕业之后能够学以致用,是本轮教材的追求。编审委员会将努力使本轮教材好教、好学、好用,尽力使它们在内容上和形式上都向国外先进统计教材看齐。限于水平和经验,在教材的编写和编辑出版过程中仍会有不足,恳请广大师生和社会读者提出批评和建议,我们将虚心接受,并诚挚感谢!

全国统计教材编审委员会

2012年7月

第二版前言

本书首版发行以来各方反应尚可。有的作教材用,有的作现场使用参考。本书初始目的也在这二方面。大家对常用试验设计方法能在本书内找到而感到满意。

这次乘再版机会我们对书中一些不当之处都作了校正,对部分叙述作了改进,使表述更清楚易懂。此外对区组和区组设计作了部改等。

大家对区组作为试验设计三个基本原则之一已有了共识,另二个原则是重复与随机化。可在国内资料所见实际使用并不多。在实践中尽量使用区组概念就是承认环境对试验结果有干扰,此种干扰有大有小,当大到不可忽略地步时,正确使用区组可使试验结果的统计结论更为可信。

“区组是不是因子?”在国内外都有一些争论。最近几年我们通过实践对此也有一些感受,认为区组不是可挖因子,但在一定场合下可看作噪声因子。这看法在本书中也作了叙述,引起讨论。

最后还是希望广大读者对本书提出批评和指正,以便不断修改,充实和提高。

编者

2012年1月

第一版前言

本书是按照全国统计教材编审委员会审定的《试验设计》编写大纲编写的、供高等院校统计专业学生使用的教科书,也可供相关专业学生 and 实际工作者使用。

试验设计是使用频率最高的统计方法之一。著名统计学家 G. E. P. Box 说过,假如有 10% 的工程师使用各种试验设计方法,产品的质量与数量都会得到很大提高。质量工程学创始人田口玄一(G. Taguchi)博士说过,不懂试验设计的工程师只能算半个工程师。可见普及试验设计方法对我国现代化建设是一件重要的战略措施。这个任务无疑落在统计专业的学生和教师身上。只有经过系统而严格的试验设计课程的学习才能担负起这个任务,也为今后研究试验设计打下基础。本书就是为此目的而编写的。

试验设计是英国统计学家 R. A. Fisher 创立的,至今已有近 80 年的历史,产生了许多试验设计的方法,其中有些方法已被近 30 年创立的新方法所替代。我们选了其中最为实用且各具一格的方法作为本书内容。包括区组设计、正交设计、饱和设计与超饱和设计、参数设计、回归设计、均匀设计、混料设计等。这些方法有共同点,也有不同点。只有懂得多种试验设计方法,在比较中才能选出最适合你的课题所应使用的方法。我们用通俗语言、生动例子详尽地叙述这些方法(当然用墨不等),就是想使学生能达到一个理想的境界,即能较为透彻地理解各种方法的设计思想及其实践过程,并在将来能运用自如,除旧创新。

本书收集了我们在大学教学和为工程师培训所用的大量实例,以帮助学生更具体地认识试验设计的基本概念和基本方法。还把很多的例子改编为习题供学生练习之用,习题分节设立,针对性强,习题都附有答案并放在书末。这些习题会使学生加深对试验设计的理解以便灵活应用。当然这一切还希望学生自己动手去做,不要怕繁生畏,而要善

于利用计算机作为助手完成这些作业。要知道,善于完成作业就能善于思考,这是今后从事研究工作特别需要的能力。

还有一点要讲的是,我们首次把饱和设计和超饱和设计搬上了教科书,想借这本教材在我国推广这类设计的研究和应用。产生这个想法有点偶然。当我们前两位作者正在努力编写这本教材的时候,我系在德国留学的陈颖博士回来了。初次交谈使我们感觉他在饱和设计研究上颇有心得,他在饱和设计上提出的假设检验方法特别有效,希望他能加盟我们的编写队伍。这一想法立即得到他的积极响应,并同意把他的研究成果和全部数表如实地引入教材。这不仅增加了本书的成色,也为读者贡献了一点 2003 年的最新成果。

本书共分八章,茆诗松编写第一、二、三、六章,周纪芄编写第四、七、八章,陈颖编写第五章,最后由茆诗松负责审阅全部书稿,并几经讨论修改,最后与读者见面了。由于我们水平有限,不当之处,敬请批评指正,以便不断修正、充实和提高。

最后要感谢张润楚教授在百忙中审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的改进意见和建议,使本书质量大有提高。还要感谢国家统计局教育中心及其教材处诸同志的指导和关心。也要感谢中国统计出版社为此所付出的辛勤劳动,没有他们的多次叮嘱,本书不可能这么快就和读者见面。

编者

2003 年 12 月

目 录

第一章 试验设计概要	(1)
§ 1.1 什么是试验	(1)
§ 1.2 几个名词的解释	(2)
1.2.1 指标	(2)
1.2.2 因子与水平	(2)
1.2.3 试验误差	(3)
1.2.4 试验设计	(3)
§ 1.3 基本原则	(4)
1.3.1 重复	(4)
1.3.2 随机化	(5)
1.3.3 区组	(5)
§ 1.4 试验设计一般指南	(6)
第二章 单因子试验的设计与分析	(7)
§ 2.1 单因子试验	(7)
2.1.1 一个例子	(7)
2.1.2 单因子试验	(8)
§ 2.2 单因子方差分析	(11)
2.2.1 偏差平方和及其自由度	(11)
2.2.2 总平方和的分解公式	(13)
2.2.3 统计分析	(15)
2.2.4 等重复试验的一些结果	(20)
2.2.5 正态变量的二次型及其分布	(22)
§ 2.3 多重比较	(28)
2.3.1 重复数相等情况的 T 法	(28)
2.3.2 重复数不等情况的 S 法	(30)
§ 2.4 效应模型	(33)

2.4.1	固定效应模型	(34)
2.4.2	随机效应模型	(37)
§ 2.5	正态性检验	(44)
2.5.1	正态性的图检验方法	(45)
2.5.2	W 检验	(51)
2.5.3	数据的变换	(53)
§ 2.6	方差齐性检验	(58)
2.6.1	Bartlett 检验	(59)
2.6.2	修正的 Bartlett 检验	(61)
2.6.3	Hartley 检验	(62)
第三章	区组设计	(64)
§ 3.1	随机化完全区组设计	(64)
3.1.1	区组与区组设计	(64)
3.1.2	统计分析	(66)
3.1.3	区组是不是因子	(72)
§ 3.2	平衡不完全区组设计	(79)
3.2.1	平衡不完全区组设计(BIB 设计)	(79)
3.2.2	统计模型及其参数估计	(83)
3.2.3	方差分析	(87)
§ 3.3	链式区组设计	(93)
3.3.1	链式区组设计的构造	(93)
3.3.2	统计模型及其参数估计	(96)
3.3.3	方差分析	(101)
第四章	正交设计	(107)
§ 4.1	多因子试验与正交表	(107)
4.1.1	多因子试验问题	(107)
4.1.2	交互作用	(108)
4.1.3	正交表	(109)
§ 4.2	无交互作用情况下的正交设计	(111)
4.2.1	用正交表进行整体设计	(111)

4.2.2 数据的直观分析	(114)
4.2.3 数据的方差分析	(116)
4.2.4 贡献率分析	(123)
§ 4.3 有交互作用情况下的正交设计	(126)
4.3.1 表头设计	(126)
4.3.2 数据的方差分析	(129)
4.3.3 最佳水平组合下指标均值的估计	(133)
4.3.4 避免混杂现象——表头设计的一个原则	(134)
§ 4.4 有重复试验情况下的数据分析	(137)
4.4.1 总平方和分解	(138)
4.4.2 对模型的检验	(139)
4.4.3 最佳水平组合的选择	(142)
§ 4.5 水平数不等情况下的试验设计	(143)
4.5.1 混合水平正交表	(143)
4.5.2 直接选用混合水平正交表	(146)
4.5.3 拟水平法	(151)
4.5.4 组合法	(154)
4.5.5 赋闲列法	(159)
§ 4.6 裂区法	(166)
4.6.1 试验设计	(167)
4.6.2 方差分析	(170)
4.6.3 最佳水平的选取	(175)
§ 4.7 多指标的数据分析	(177)
4.7.1 综合平衡法	(178)
4.7.2 综合评分法	(182)
第五章 饱和设计与超饱和设计	(186)
§ 5.1 饱和设计	(186)
5.1.1 饱和设计	(186)
5.1.2 统计模型	(187)
§ 5.2 图形分析法	(189)
5.2.1 半正态图	(189)

5.2.2 用半正态图识别显著因子	(192)
§ 5.3 数值分析法	(196)
5.3.1 直接法	(196)
5.3.2 $MaxU_r$ 方法	(198)
5.3.3 逐步检验法	(202)
§ 5.4 超饱和设计	(204)
5.4.1 超饱和设计问题	(204)
5.4.2 统计模型	(205)
5.4.3 超饱和设计的构造	(207)
5.4.4 数据分析	(210)
第六章 参数设计	(214)
§ 6.1 参数设计的基本思想	(214)
6.1.1 产品开发的三个阶段	(214)
6.1.2 从损失函数看质量	(215)
6.1.3 减少平均损失的两步法	(217)
§ 6.2 稳健设计	(218)
6.2.1 一个简化了的例子	(218)
6.2.2 明确参数设计问题	(223)
6.2.3 区分可控因子与噪声因子	(223)
6.2.4 内外表设计	(223)
6.2.5 进行试验,获得每个试验结果 y_{ij}	(225)
6.2.6 信噪比	(225)
6.2.7 进行统计分析	(228)
6.2.8 验证试验	(228)
§ 6.3 灵敏度设计	(234)
6.3.1 什么是灵敏度设计	(234)
6.3.2 灵敏度设计与分析的要点	(235)
§ 6.4 综合噪声因子	(240)
§ 6.5 动态特性的参数设计	(247)
6.5.1 动态特性	(247)
6.5.2 信号因子	(248)

6.5.3	动态特性参数设计的要求	(249)
6.5.4	动态特性参数设计的试验安排	(251)
6.5.5	信噪比与灵敏度的计算公式	(252)
6.5.6	动态特性参数设计的实例	(256)
第七章	回归设计	(266)
§ 7.1	回归设计的基本概念	(266)
7.1.1	多项式回归模型	(266)
7.1.2	多元线性回归	(267)
7.1.3	由被动到主动	(271)
7.1.4	因子水平的编码	(271)
§ 7.2	一次回归正交设计	(272)
7.2.1	一次回归正交设计	(272)
7.2.2	数据分析	(274)
7.2.3	零水平处的失拟检验	(279)
7.2.4	含交互作用的模型	(281)
7.2.5	快速登高法	(282)
7.2.6	一次回归正交设计的旋转性	(287)
§ 7.3	二次回归的中心组合设计	(289)
§ 7.4	二次回归正交设计	(291)
7.4.1	二次中心组合设计的结构矩阵 X 与系数矩阵 $X'X$	(291)
7.4.2	正交性的实现	(293)
7.4.3	统计分析	(294)
§ 7.5	二次回归旋转设计	(301)
7.5.1	旋转性条件与非退化条件	(301)
7.5.2	二次旋转设计	(304)
7.5.3	二次回归正交旋转设计	(307)
7.5.4	二次回归通用旋转设计	(308)
7.5.5	数据分析	(308)
第八章	其他试验设计方法介绍	(317)
§ 8.1	均匀设计	(317)

8.1.1 均匀设计表	(317)
8.1.2 均匀设计的使用表	(318)
8.1.3 试验设计与数据分析的步骤	(320)
§ 8.2 混料设计	(323)
8.2.1 混料设计的概念	(323)
8.2.2 单形格子设计	(326)
8.2.3 单形重心设计	(330)
§ 8.3 全因子试验的数据分析	(333)
8.3.1 统计模型	(334)
8.3.2 方差分析	(334)
8.3.3 在诸水平组合下均值的估计	(337)
参考文献	(340)
习题答案	(343)
附表	(358)
附表 1 标准正态分布函数表	(358)
附表 2 t 分布的 p 分位数表	(359)
附表 3 χ^2 分布的 p 分位数表	(360)
附表 4 F 分布的分位数表	(361)
附表 5 t 化极差统计量的分位数 $q_{1-\alpha}(r, f)$ 表	(365)
附表 6 正态性检验统计量 W 的系数 $a_i(n)$ 的数值表	(368)
附表 7 正态性检验统计量 W 的 α 分位数 W_α 表	(370)
附表 8 统计量 H 的分位数 $H_{1-\alpha}(r, f)$ 表	(371)
附表 9 平衡不完全区组设计表($4 \leq v \leq 10, r \leq 10$)	(372)
附表 10 正交表	(378)
附表 11 Lenth 检验的临界值表	(389)
附表 12 $Max U_r$ 检验的临界值 $c_{\alpha, p, r}$ 表	(392)
附表 13 $Max U_r^3$ 检验的临界值 $c_{\alpha, p, r}^3$ 表	(398)
附表 14 超饱和设计表	(398)
附表 15 均匀设计表及其使用表	(403)

第一章 试验设计概要

§ 1.1 什么是试验

目的在于回答一个或几个经过精心构思的问题的实践活动称为试验,又称为实验。一项试验必须要有明确的目的,即要明确要回答的问题,如:

- 为提高产品产量或质量而寻找最佳的或满意的工艺参数搭配;
- 为开发新产品而寻找性能稳定和成本低廉的设计方案;
- 为控制生产过程而寻求描述过程的数学模型;
- 为了证明一个或几个特定因子对某个重要指标所发挥的作用在统计上是否具有显著性,这里的指标与因子将在下面解释。

前三个问题常出现在工农业生产中,最后一个问题常出现在科学研究中。可见试验可以广泛地应用在工农业生产和科学研究中,但它们的的目的往往有很大的差别,这种差别会影响试验的设计与数据的分析。譬如,在生产中为了达到某种目的(如前三个问题之一),常常希望用尽量少的(费用)观察值对一些因子影响生产过程的程度获得最大的客观的(无偏见的)信息,区别出哪些因子对产品质量有重要影响,再利用这些信息,工程师们不断地调节生产过程,使生产过程不断得到改进,直到获得最佳质量为止。而在科学研究中是为证明某个命题在统计学意义上是否成立,它在费用和时间上较少考虑,而集中于探索事物的本质,如在科学研究中方差分析常用来揭示因子间实际存在的交互作用,甚至高阶交互作用,而在生产中常对此不甚感兴趣,认为这样做有时反而把认识过程中的重要因子的工作搞得复杂化了。要把试验设计从科学家手中转化为工程师手中的实用工具,不仅要在观念上认识两者的差别,而且要在操作上和计算上简化试验设计方法,有时还要寻找更简化的计算方法。在这方面,正交试验法可以称为楷模,在那里有时可以不用方差分析法,而改用极差分析法或贡献率法。

§ 1.2 几个名词的解释

1.2.1 指标

用于衡量试验结果好坏的特性值称为指标。在回归设计中指标又称为响应变量。

常见的指标有两类:定量指标与定性指标。用测量结果表示的指标称为定量指标,如电阻器的电阻、橡胶件的强度、粮食的产量等。用等级评分等表示的指标称为定性指标,如药物的疗效、物质的光谱度、布料的柔软度等。对定量指标要用具有一定准确度和精密度的测量仪器测得,对定性指标要组织专家评判组进行等级评分。由于测量数据含有的信息丰富,故在试验中要尽量选用定量指标,在不得已场合下才选用定性指标。

在一个试验问题中仅考察一个指标称为单指标试验问题,若考察两个或更多个指标称为多指标试验问题。目前给出的试验设计方案都是对单指标试验问题而言的,但它也可以用于多指标试验问题,然后在各指标间寻求平衡或折中,或用综合指标把多指标问题化为单指标问题。这些方法将结合具体例子加以说明。

1.2.2 因子与水平

影响试验结果的因素称为因子,因子所处的状态称为水平。

因子常可分为两类:可控因子与不可控因子。可用某种控制方式将其状态(即水平)作审慎改变的因子称为可控因子,有时简称因子,常用大写字母 A、B、C 等表示,如反应时间、反应温度、原料产地、机器编号等。在实际操作中不能控制、或难以控制、或要化费昂贵才能控制、或试验人员尚未意识到对试验结果会有影响的因子统称为不可控因子,又称噪声因子或误差因子,如环境温度与湿度、机器的老化、电源电压的波动等。

试验中的噪声因子会对试验结果起干扰作用,要消除这种干扰有时是不可能的,只能尽量限制它,使其减少干扰。所以试验是在尽量限制噪声因子的条件下考察可控因子的变化对试验结果(指标值)的影响,从中寻找可控因子水平的最佳搭配,使产品的指标值接近目标值,有时还要求指标值的波动尽量小。这一过程可用黑箱模型来描述。见图 1.2.1。

噪声因子是引起指标值波动的“元凶”,或者说是引起试验误差的源泉。要罗列一切噪声因子是困难的,但要尽力列举,以便人们研究它、限制它。田口玄一建议,可以从如下三个方面去考察噪声因子:(1)外部噪声,它是在产品之外引发的一