

//

$$X = \begin{bmatrix} f_1(X) & f_2(X) & \cdots & f_r(X) \\ f_1(X) & f_2(X) & \cdots & f_r(X) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(X) & f_2(X) & \cdots & f_r(X) \end{bmatrix}$$

试验设计与分析

——原理·操作·案例

洪 伟 吴承祯 编著

异常数据剔除

完全随机化试验

交互作用的试验设计与统计分析
部分平衡格子设计

二次饱和 D- 最优设计

通用旋转组合设计的统计方法

回归旋转设计

三次设计在参数优化中的应用

[案例] 毛竹营养液开发与应用效果研究

极端顶点设计



中国林业出版社

试验设计与分析

——原理·操作·案例

洪 伟 吴承楨 编著

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

试验设计与分析——原理·操作·案例/洪 伟, 吴承祯 编著.
—北京: 中国林业出版社, 2004.7
ISBN 7-5038-3828-0

I. 试… II. ①洪…②吴… III. 试验设计(数学)
IV. 0212-6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 070796 号

试验设计与分析——原理·操作·案例

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同 7 号)

E-mail cfphz@public.bta.net.cn 电话 66184477

发行 新华书店北京发行所发行

印刷 三河市富华印刷包装有限公司

版次 2004 年 8 月第 1 版

印次 2004 年 8 月第 1 次

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 23.25

字数 580 千字

印数 1~5000 册

定价 35.00 元

作者简介

洪伟,男,1947年11月出生于福建省福州市,福建农林大学常务副校长、教授、博士生导师、国家有突出贡献中青年专家。福建省“211”重点学科——森林培育学科带头人,主要从事森林生态学、森林培育学、森林经理学等领域研究与教学工作;以其为课程带头人的《生物统计学》于1995年被评为“福建省优秀课程”,2003年被评为“福建省精品课程”。获省部级科技进步二等奖3项、三等奖19项;获省社会科学优秀成果二、三等奖5项。在《林业科学》《生态学报》等刊物上发表学术论文200余篇,出版《马尾松人工林经营模式及其应用》《林业试验设计技术与方法》等专著8部。担任中国林学会理事、省林学会副理事长、省科协常委、《林业科学》编委、《水土保持学报》编委、《福建林学院学报》主编以及教育部森林培育学科教学指导委员会成员等多项社会学术职务,先后荣获国务院政府特殊津贴、国家突出贡献中青年专家、省优秀专家、省优秀共产党员、香港柏宁顿(中国)教育基金会“孺子牛金球奖之荣誉奖”、省优秀科技工作者、省先进工作者等国家级和省级荣誉奖。



吴承祯,男,1970年7月出生于江西省吉安县,福建农林大学林学院副院长、教授、博士生导师,生态学博士、作物学博士后。主要从事森林生态学、森林经营学等领域的科研与教学工作,获省部级科技进步二、三等奖8项,获福建省社会科学优秀成果二、三等奖4项。在《林业科学》《植物生态学报》等刊物上发表学术论文100余篇,出版《杉木数量经营学引论》等专著4部。1998年确定为“福建省百千万人才工程”人选,先后荣获国务院政府特殊津贴、福建省新长征突击手、运盛(福建)青年科技奖、福建青年科技奖等荣誉称号。

福建省“百千万人才工程”人选培养资金资助项目
The Project Sponsored By Fujian Provincial Training
Foundation For “Bai-Qian-Wan Talents Engineering”
福建省精品课程“生物统计学”建设项目
The Project Constructed By Fujian Provincial
Great Courses Of “Biology Statistics”

自 序

试验设计是在数理统计的基础上,逐渐发展起来的一门应用统计学分支学科。它越来越受到人们的重视,特别是目前计算机应用已深入各学科,因而试验设计的应用范围日益广泛。试验设计已成为制定科研方案和分析实验数据的必要手段,一个科学、正确的试验设计,可以最大限度地节约试验成本、提高试验成效、缩短试验周期,同时又能获得可知的结论。

20 世纪 90 年代初作者在福建林学院任教时,撰写了《林业试验设计技术与方法》一书。该书在研究生和本科生的学习过程中使用,受到好评,并被科技界专家、学者广泛应用,引用数高达 300 多篇次,1996 年获得林业部中青年优秀教材奖。

光阴荏苒,过去的 10 年里,试验设计方法不仅应用于农业、林业,还广泛用于工业、食品、电子、医学、航空、机械制造等领域,已形成一门较为完整的专业基础学科。随着科学技术的发展,统计数据的分析方法在不断发展与丰富,试验设计数据分析与优化方法不断丰富和完善,如遗传算法、人工神经网络等人工智能的算法广泛应用于试验数据分析。试验设计这一学科知识具有极强的应用性,所以需要一部讲清原理、易于操作、学习案例的专著,以满足科技工作者实践应用的要求。为此,作者编著新作《试验设计与分析——原理·操作·案例》一书。全书分 18 章,结合编著者科研实践,以原理、操作、案例为主线,除了介绍常用试验设计方法方差分析、回归分析、完全随机化试验和随机区组试验、拉丁方设计、平衡不完全区组设计、裂区设计、协方差分析外,着重叙述均匀设计、回归正交设计、回归旋转设计、饱和 D-最优设计、混料试验设计、三次设计以及基于人工神经网络的试验设计分析模型和遗传算法在试验设计统计分析中应用等内容。

本书在编著过程中,得到了我国林业界著名专家俞新妥教授、林杰教授、陈伯贤教授,以及陈平留教授、林思祖教授、陈辉教授、刘金福博士、何东进博士、闫淑君老师等的支持与关心。谨此,对支持和关心本书编著与出版的同志们表示衷心感谢!

由于编著者水平有限,书中错误及不妥之处,敬请广大读者批评指正。

洪 伟 吴承祯

2004. 3. 20 于福州金山

AUTHOR'S PREFACE

Experimental design is a subdiscipline of applied statistics developed gradually based on mathematical statistics. It is attached importance to more and more and owns increasingly wide range of field in application, especially as the computer application is going deep into every science. Experiment design has become a necessary instrumentality to formulate project of scientific research and analyze experimental data. A scientific and correct experiment design can help to economize experimental cost farthest, improve experimental effect, shorten experimental period, and meanwhile, also obtain knowable conclusion.

Professor Hong Wei had written the book of *The technique and method of forest experiment design* when teaching at Fujian Forestry College in the early nineties of twenty century. The book was used to the course of learning by science and technology workers, graduates and undergraduates with the favorable comment. In addition, it was quoted by science and technology experts frequently, the number more than 300 times. The work won the excellent schoolbook award for the middle and youth age of the National Forest Department in 1996.

Time elapses quickly, and experiment design method had formed a integrated professional basic science, which was applied not only to agriculture and forest, but also industry, food, electronics, medicine, aeronautics, machine facture, etc, in the past ten years. Analytic approach of statistical data is developing and analytical and optimizing method of experiment design data is improving increasingly with together beyond expectation, for example, the algorithms of artificial intelligence, genetic algorithms, the artificial neural network and so like, has been employed to analyze the experiment data extensively. The science of experiment design has so strong applicable characteristics that a monograph with clear principles, easy to operate and with learning cases is necessary to meet the demand of practical application for science and technology workers. For this, the authors composed this new work *Experiment design and analysis—principles, operation and cases*. Integrated with the authors' scientific research practice, and taken principles, operation and cases as cardinal line, this book which divides into 18 chapters puts stress on the recitation of application of uniform deisgn, regression orthogonal design, combinatory design, regressive rotation analysis design, saturated D-optimal design, mixture medium design, three design, experiment design and analysis model based on the artificial neural network and genetic algorithms to the statistical analysis of experiment design besides introduction of experiment design method such as variance analysis, regression analysis, complete randomization experiment and randomized blocks experiment, latin square design, balanced incomplete block design, split-plot design, covariance analysis.

Professor Yu Xintuo, Lin Jie, Chen Boxian, Chen Pingliu, Lin Sizuo, Chen Hui and Doctor Liu Jinfu, He Donjin and Ms. Yan Shujun *et al.*, gave their support and help to the edition of this work. Here the authors express appreciation to the people who supported and concerned the edition and publication of this book.

Limited to the authors' qualification, there could be some mistakes in the book. Hope readers could point out and offer comments.

Hong Wei, Wu Chengzhen

At Jinshan, Fuzhou

20 March, 2004

目 录

第一章 试验设计概述	(1)
第一节 试验设计的几个基本概念.....	(1)
第二节 试验设计的基本原理.....	(2)
第三节 试验设计的基本要求.....	(4)
第四节 试验设计的基本程序.....	(4)
第五节 试验设计中的小区技术.....	(5)
第二章 异常数据的剔除	(7)
第一节 拉依达(PanTa)准则.....	(7)
第二节 肖维勒(Chauvenet)准则.....	(7)
第三节 格拉布斯(Grubbs)准则.....	(9)
第四节 t 检验准则.....	(9)
第三章 方差分析	(13)
第一节 单向分组的方差分析.....	(13)
第二节 两向分组的方差分析.....	(29)
第三节 系统分组的方差分析.....	(44)
第四节 两个以上因素的方差分析.....	(47)
第五节 数据转换与漏失数据的弥补.....	(51)
第四章 回归分析	(55)
第一节 一元回归模型.....	(55)
第二节 一元非线性回归.....	(68)
第三节 多元回归.....	(74)
第五章 完全随机化试验和随机区组试验	(86)
第一节 完全随机化试验.....	(86)
第二节 随机区组设计.....	(87)
第六章 拉丁方设计和希腊拉丁方设计	(90)
第一节 拉丁方设计.....	(90)
第二节 希腊拉丁方设计.....	(92)
第七章 正交试验设计	(95)
第一节 正交试验设计法.....	(95)
第二节 交互作用的试验设计与统计分析.....	(101)
第三节 有重复试验的正交试验.....	(104)
第四节 水平数不等的试验设计.....	(106)
第五节 单纯形最优化方法的应用.....	(109)
第六节 案例——稀土、氮、磷、钾肥对锥栗苗木生长的影响研究.....	(112)

第八章 平衡不完全区组设计	(116)
第一节 平衡不完全区组设计.....	(116)
第二节 平衡格子设计.....	(121)
第三节 部分平衡格子设计.....	(123)
第九章 裂区设计	(126)
第一节 裂区设计.....	(126)
第二节 林木多点多年试验设计.....	(131)
第十章 协方差分析	(136)
第一节 协方差分析方法.....	(136)
第二节 随机区组设计的协方差分析.....	(142)
第三节 多个协变量的协方差分析.....	(145)
第十一章 均匀设计	(148)
第一节 试验设计与均匀设计.....	(148)
第二节 配方均匀设计.....	(155)
第十二章 回归正交设计	(160)
第一节 一次回归正交设计.....	(160)
第二节 二次回归正交设计.....	(166)
第十三章 回归旋转设计	(179)
第一节 回归旋转设计的几个重要问题.....	(179)
第二节 二次正交旋转组合设计的统计方法.....	(184)
第三节 通用旋转组合设计的统计方法.....	(188)
第四节 案例1——旋转组合设计在杉木人工林林分收获建模中的应用.....	(191)
第五节 案例2——毛竹营养液开发与应用效果分析.....	(197)
第十四章 饱和 D—最优设计	(201)
第一节 D —优良性.....	(201)
第二节 一次饱和 D —最优设计.....	(204)
第三节 二次饱和 D —最优设计.....	(206)
第十五章 混料试验设计	(213)
第一节 单形格子设计.....	(213)
第二节 单形重心设计.....	(222)
第三节 极端顶点设计.....	(226)
第四节 案例1——毛竹专用复合肥研制.....	(228)
第五节 案例2——马尾松轻型基质容器育苗技术的研究.....	(237)
第十六章 三次设计	(244)
第一节 三次设计.....	(244)
第二节 三次设计在参数优化中的应用.....	(245)
第三节 案例——三次设计在人工林优化经营中的应用.....	(247)
第十七章 基于人工神经网络的试验设计分析模型	(251)
第一节 神经网络概述.....	(251)

第二节 神经网络理论.....	(253)
第三节 案例 1——杉木壮苗培育措施的神经网络模拟	(256)
第四节 案例 2——BP-MSM 混合算法及其在森林自疏规律研究中的应用	(258)
第十八章 遗传算法在试验设计统计分析中应用	(264)
第一节 遗传算法及其数学基础.....	(264)
第二节 遗传算法在参数优化设计中的应用.....	(271)
第三节 案例——遗传算法在杉木人工林自疏规律统计分析中的应用.....	(273)
附录:常用数理统计用表	(278)
附表 1 正态分布的密度函数表	(278)
附表 2 正态分布表	(279)
附表 3 正态分布的双侧分位数(u_α)表	(281)
附表 4 二项分布表	(282)
附表 5 二项分布参数 p 的置信区间表	(284)
附表 6 泊松(Poisson)分布表	(288)
附表 7 泊松(Poisson)分布参数 λ 的置信区间表	(294)
附表 8 χ^2 分布表	(295)
附表 9 χ^2 分布的上侧分位数表	(296)
附表 10 t 分布表	(296)
附表 11 t 分布的双侧分位数表	(298)
附表 12 F 检验的临界值表	(299)
附表 13 随机数表	(304)
附表 14 多重比较中的 q 表	(306)
附表 15 多重比较中的 s 表	(307)
附表 16 Harley 检验临界值表	(308)
附表 17 检验相关系数 $\rho=0$ 的临界值表	(309)
附表 18 r 与 z 的换算表	(310)
附表 19 趋势检验临界值表	(311)
附表 20 游程数检验的临界值表	(312)
附表 21 k 个总体方差齐性考克伦(Cochran)检验临界值表	(313)
附表 22 邓肯(Duncan)多重比较临界值表	(314)
附表 23 维尔科克松(Wilcoxon)临界值表	(315)
附表 24 克拉斯魁-瓦立斯检验临界值表	(316)
附表 25 秩相关的斯皮尔曼(Spearman)检验临界值表	(317)
附表 26 快速方差分析检验法之临界值表(Link and Wallace)	(318)
附表 27 曼-惠特尼(Mann-Whitney)检验临界值表	(319)
附表 28 正交表	(322)
附表 29 正交拉丁方表	(338)
附表 30 平衡不完全区组设计表	(340)
附表 31 样本标准差分布的矩系数 c_4 、 c_5 表	(349)

附表 32	百分数的 $\arcsin \sqrt{P}$ 变换	(350)
附表 33	由百分率坐标变为概率坐标表	(353)
参考文献		(354)

CONTENTS

Chapter 1	Introduction of experiment design	(1)
Section 1	Several basic concepts of experiment design	(1)
Section 2	Basic principle of experiment design	(2)
Section 3	Basic requirement of experiment design	(4)
Section 4	Basic procedure of experiment design	(4)
Section 5	Plot technique of experiment design	(5)
Chapter 2	Elimination of the anomaly data	(7)
Section 1	PañTa Principle	(7)
Section 2	Chauvenet Principle	(7)
Section 3	Grubbs Principle	(9)
Section 4	t-test Principle	(9)
Chapter 3	Variance analysis	(13)
Section 1	Variance analysis of one—way classification	(13)
Section 2	Variance analysis of two—way classification	(29)
Section 3	Variance analysis of systematic classification	(44)
Section 4	Variance analysis of more than two factors	(47)
Section 5	Data transformation and reparation of missing data	(51)
Chapter 4	Regression analysis	(55)
Section 1	Simple regression model	(55)
Section 2	Simple nonlinear regression	(68)
Section 3	Multiple linear regression	(74)
Chapter 5	Complete randomization experiment and randomized blocks experiment	(86)
Section 1	Complete randomization experiment	(86)
Section 2	Randomized blocks experiment	(87)
Chapter 6	Latin square design and Greco-Latin square design	(90)
Section 1	Latin square design	(90)
Section 2	Greco-Latin square design	(92)
Chapter 7	Orthogonal experiment design	(95)
Section 1	Orthogonal experiment design method	(95)
Section 2	Experiment design and statistical analysis with interaction	(101)
Section 3	Orthogonal experiment with repetitive test	(104)
Section 4	Experiment design with unequal horizontal number	(106)
Section 5	Application of simplex optimization method	(109)
Section 6	[Case]Study on the effect of rare earth, nitrogenous, phosphate and	

potash fertilizer on growth of seeding tree of <i>Castanea henryi</i>	(112)
Chapter 8 Balanced incomplete block design	(116)
Section 1 Balanced incomplete block design	(116)
Section 2 Balanced lattice design	(121)
Section 3 Partially balanced lattice design	(123)
Chapter 9 Split-plot design	(126)
Section 1 Split-plot design	(126)
Section 2 Experiment design of multiple points and years of forest	(131)
Chapter 10 Covariance analysis	(136)
Section 1 Covariance analysis method	(136)
Section 2 Covariance analysis of randomized block design	(142)
Section 3 Covariance analysis of multiple concomitant variables	(145)
Chapter 11 Uniform design	(148)
Section 1 Experiment design and uniform design	(148)
Section 2 Prescription uniform design	(155)
Chapter 12 Regressive orthogonal design	(160)
Section 1 Single regressive orthogonal design	(160)
Section 2 Quadric regressive orthogonal design	(166)
Chapter 13 Regressive rotation design	(179)
Section 1 Several important problems on regressive rotation design	(179)
Section 2 Statistical method of quadric orthogonal rotation combinatory design	(184)
Section 3 Statistical method of universal rotation combinatory design	(188)
Section 4 [Case 1] Application of the rotation combinatory design in modeling of stand harvest of <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantation	(191)
Section 5 [Case 2] Study on the exploitation and application effect of nutrient solution for <i>phyllostachys heterocycla</i> cv. <i>pubescens</i>	(197)
Chapter 14 Saturated D-optimal design	(201)
Section 1 D-goodness	(201)
Section 2 Single saturated D-optimal design	(204)
Section 3 Quadric saturated D-optimal design	(206)
Chapter 15 Experiment design of mixture medium	(213)
Section 1 Simplex lattice design	(213)
Section 2 Simplex core design	(222)
Section 3 Extreme vertex design	(226)
Section 4 [Case 1] Study on the compound fertilizer for <i>phyllostachys heterocycla</i> cv. <i>Pubescens</i>	(228)
Section 5 [Case 2] Research into light mediums container nursery technique for <i>Pinus massoniana</i>	(237)

Chapter 16	Three designs	(244)
Section 1	Three designs	(244)
Section 2	Application of three designs in parameter optimization	(245)
Section 3	[Case]Application of three designs in optimal management of plantation	(247)
Chapter 17	Model of experiment design and analysis based on the Artificial Neural Network	(251)
Section 1	Summary of neural network	(251)
Section 2	Theory of neural network	(253)
Section 3	[Case 1]Study on the law of oriented cultivation of Chinese fir stocky plants by artificial neural network	(256)
Section 4	[Case 2]Neural network based on modified simplex method and its application in studying forest self-thinning	(258)
Chapter 18	Application of genetic algorithm in statistical analysis of experiment design	(264)
Section 1	Genetic algorithm and its mathematical foundation	(264)
Section 2	Application of genetic algorithm in parameter optimization	(271)
Section 3	[Case]Application of genetic algorithm in statistic analysis of self-shinning of <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantation	(273)
Annexed table:	Usual mathematical statistics table	(278)
Annexed table 1	Density function table of normal distribution	(278)
Annexed table 2	Normal distribution table	(279)
Annexed table 3	Bilateral quantile table of normal distribution	(281)
Annexed table 4	Binomial distribution table	(282)
Annexed table 5	Confidence interval table of parameter p of binomial distribution	(284)
Annexed table 6	Poisson distribution table	(288)
Annexed table 7	Confidence interval table of parameter λ of Poisson distribution	(294)
Annexed table 8	χ^2 distribution table	(295)
Annexed table 9	Upper quantile table of χ^2 distribution	(296)
Annexed table 10	t-distribution table	(296)
Annexed table 11	Bilateral quantile table of t-distribution	(298)
Annexed table 12	Marginal value table of F-test	(299)
Annexed table 13	Random number table	(304)
Annexed table 14	q-table of multiple comparisons	(306)
Annexed table 15	s-table of multiple comparisons	(307)
Annexed table 16	Marginal value table of Harley test	(308)

Annexed table 17	Marginal value table of test for correlation coefficient $\rho=0$	(309)
Annexed table 18	Conversion table between r and z	(310)
Annexed table 19	Marginal value table of trend test	(311)
Annexed table 20	Marginal value table for test of traveling distance number	(312)
Annexed table 21	Marginal value table for Cochran test of homogeneity of k population variance	(313)
Annexed table 22	Marginal value table of Duncan multiple comparison	(314)
Annexed table 23	Marginal value table of Wilcoxon	(315)
Annexed table 24	Marginal value table of Kruscal-Wallis test	(316)
Annexed table 25	Marginal value table for Spearman test of rank correlation	(317)
Annexed table 26	Marginal value table of express variance analysis test	(318)
Annexed table 27	Marginal value table of Mann-Whitney test	(319)
Annexed table 28	Orthogonal table	(322)
Annexed table 29	Orthogonal Latin square table	(338)
Annexed table 30	Balanced incomplete block design table	(340)
Annexed table 31	Table of moment coefficient C_4 and C_5 of sample standard deviation distribution	(349)
Annexed table 32	Transformation of $\arcsin \sqrt{P}$ of percent	(350)
Annexed table 33	Table of coordinate transformation from percentage into probability	(353)
References		(354)

第一章 试验设计概述

在林业生产和科学试验中,要经常研究哪些生产措施和外界条件对林木生长有影响,以寻求优质、高产、低消耗的生产方案。培育林木良种,确定防治森林病虫害的措施等,这些都离不开试验,而试验与数据是分不开的。有经验的试验者为了使试验结果具有真实性、客观性,总是在试验前就根据统计学的要求制定出一套完整的试验方案。试验过程就是方案的实施过程,依靠合理的试验设计得出正确的判断和结论。

进行试验的目的是为了获得条件与结果之间规律性的认识。一个好的试验设计可以最大限度地节约成本,缩短试验周期,同时又能迅速获得确切的科学结论。

试验设计的广义理解是指整个试验研究的课题设计^[1]。它应当包括三个组成部分:

- (1)确定(设计)试验处理方案(包括小区技术)。
- (2)观察资料的搜集与整理。
- (3)统计分析方法。

首先要明确几点:试验的目的是什么,考核和评价的指标是什么,考察的因素是什么。然后根据试验的目的来合理设计试验方案,组织试验具体实施,最后对试验结果进行统计分析。

试验设计作为统计学的一个分支,内容十分丰富,本书将阐述在林业生产和科研中常用的试验设计方法:完全随机化试验、随机区组试验设计、拉丁方设计、BIB设计、裂区设计、协方差分析、均匀设计、回归正交设计、回归旋转设计、饱和 D-最优设计、混料试验设计、三次设计以及基于人工神经网络的试验设计分析模型和遗传算法在试验设计统计分析中应用等。

试验设计是为实验服务的,试验者必须有实事求是的科学精神。为了达到不同的目的,应该采取不同的试验设计方法,根据试验要求灵活掌握,不能生搬硬套。

第一节 试验设计的几个基本概念

要掌握试验设计具体原理和方法,首先涉及到几个基本概念,这些基本概念有助于我们对后续知识的了解。

一、指 标

在试验设计中把判断试验结果好坏所采用的标准称为试验指标,简称为指标。例如试验目的为判断杀虫剂杀虫效果时,可用昆虫的死亡率作为试验指标;当试验目的在于了解不同的树种的速生丰产性质时,可用单位面积蓄积量作为试验指标。

二、因 素

有可能影响试验指标的条件称为因素或因子。例如施肥量、栽植密度等都是可能影响苗木产量这一指标的条件。又如药剂种类、昆虫对药剂的抗性等都可能影响昆虫死亡率这一指标的条件。因此,施肥量、栽植密度、药剂种类、昆虫对药剂的抗性都可以作为分析试验的因素。

因素可分为数量因素和非数量因素。数量因素——依数量划分水平的因素,如栽植密度、