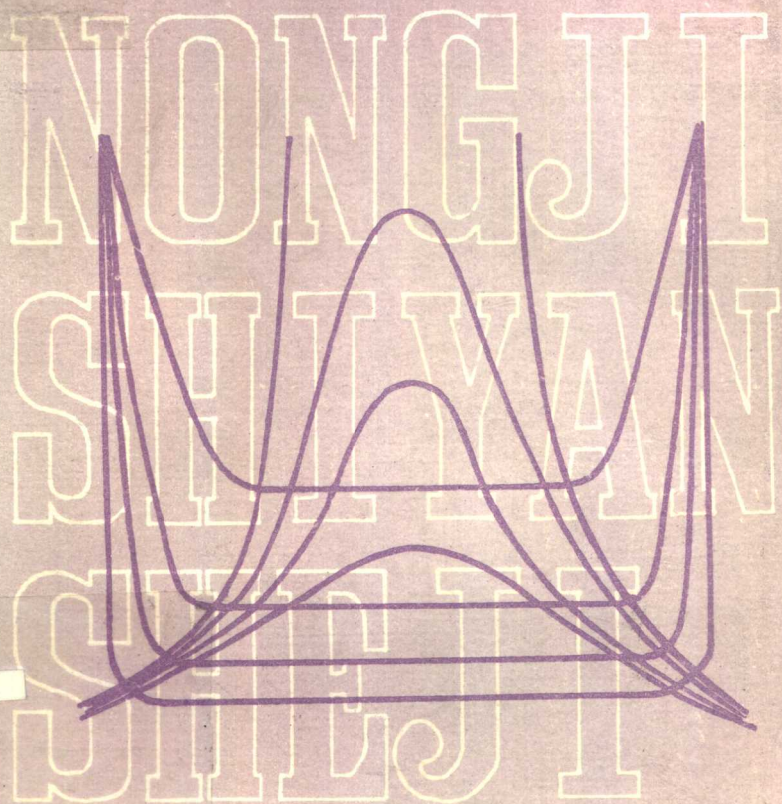


农机试验设计

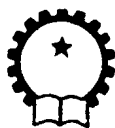
何月娥 杨孝文 张梧邨 编



机械工业出版社

农 机 试 验 设 计

何月娥 杨孝文 张梧邨 编



机 械 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书主要介绍农机试验时如何科学而合理地编制试验计划,如何用统计分析方法分析试验结果,从而得到尽可能多的信息。内容包括农机试验设计的基本原理和方法、正交试验设计、区组设计、回归正交设计及极差分析、方差分析、回归分析等。讲解时以概念和应用为主,尽量减少纯数学推导。每种方法都举有应用实例。对一些繁杂的计算还附有计算框图或计算程序。本书初稿经几年来的教学实践证明,内容深浅得当,清晰易懂,还适于自学。

本书读者对象是大专院校农机专业师生及工程技术人员,也可作机械专业《试验设计》课的参考书。

农 机 试 验 设 计

何月娥 杨孝文 张悟邨 编

责任编辑:王存新

封面设计:田淑文

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

东北师范大学校办印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张8.8 · 插页 · 字数15.54千字

1986年12月北京第一版·1987年1月长春第一次印刷

印数 00,001—3700 · 定价:1.90元

统一书号:15033·6734H

前 言

本书主要介绍在农机试验时，如何科学地、合理地编制试验计划，如何用统计分析方法分析试验结果，从而得到尽可能多信息的基本原理和方法。

内容包括：正交设计法、区组设计法、回归正交设计法和极差分析法、方差分析法、回归分析法等。这些内容以讲解概念和应用方法为主，尽量减少纯数学推导，每种方法都举出农机试验的应用例题，对一些繁杂的计算还列有计算框图和计算程序。

本书底稿经几年来的教学实践证明，内容深浅得当、清晰易懂，还适于自学。

本书适作大专院校农机专业高年级学生的选修课教材，也可作机械专业“试验设计”课的参考书，还可作工程技术人员更新知识的自学读物。

本书共八章，第一章由洛阳工学院张梧邨老师编写，第二章至第四章由吉林工业大学杨孝文老师编写，第五章至第八章由吉林工业大学何月娥老师编写，全书由何月娥老师统稿、定稿。

限于编者水平，难免有缺点和错误，诚恳地希望读者批评指正。

作 者

一九八六年五月

绪 言

《农机试验设计》是研究如何科学地、合理地编制试验方案，如何对其试验结果进行统计分析，从而使试验工作达到又好又省的效果的一门学问。它是近代迅速发展起来的一个应用数学的分支。

试验要进行设计，是现代化进行试验工作的要求。任何一种新产品、新工艺、新材料和新品种的产生，任何一项科研成果的获得，往往要经过多次反复地试验研究工作。凡要做试验，就存在着如何安排试验和如何分析试验结果的问题。试验安排得好，既可减少试验次数，缩短时间和避免盲目性，又能得到有效的结果；试验安排得不好，即使做了大量试验，仍得不到满意的结果，反造成人力、物力和时间的浪费。

例如我们研究某收割机切割器的性能，考察的试验结果是割茬高度。试验选择的参数和状态如下表所列。

参 数	机速 (m/s)	曲柄转速 (r/min)	割刀类型	刀片状态	作物湿度
试 验 状 态	1	450	I 型	锐	15%
	1.2	500	II 型	一般	20%
	1.5	550	小刀片	钝	25%

试验中共考察五个参数，每个参数有三种状态。将每个参数取一种状态进行组合，组成一种试验条件，这样全面组合共得 243 种试验条件。要弄清切割器的性能，就要测得

每种试验条件下的割茬高度，然后进行数据的分析比较，才能了解其性能。一共有 243 种试验条件，这些试验条件都要逐一地在田间进行，而田间试验要受自然条件的影响，即要受到土壤情况、气候等参数的影响。为了使试验结果具有可比性，必须使这 243 次试验都在相同的土壤情况、气候等条件下进行。要满足这个要求实际上是很难做到的。而且象这种全面试验法，往往由于误差难以估计，使试验得不出正确结论。因此要求以尽可能少的试验来获得较全面的足够多的信息。

又如某农机试验站对甲、乙、丙三种犁头进行性能对比试验。试验时用耕作阻力作为试验考察的结果。每种犁头做了四次试验。试验所测得的耕作阻力 (0.1MPa) 如下表所列。

试 验 序 号	犁 头		
	甲	乙	丙
1	60	60	54
2	54	60	52
3	52	51	53
4	48	52	55
平均值	53.5	54.5	53.5

根据这组数据，要比较三种犁头的性能好坏，就要看同一号试验中，三种犁头耕作阻力的大小：第 1、2 号试验以丙犁头耕作阻力最小，甲犁头耕作阻力最大。这说明丙犁头性能较好，甲犁头性能较差；但第 3、4 号试验却得出与第 1、2 号试验完全相反的结果。如果用通常的办法，取四次试验的平均值来对比分析，甲犁头和丙犁头耕作阻力的平均值

又相等，判断不出哪种好，哪种坏。因此仅就本试验所能测得的这组试验数据，用简单的数据处理方法是不能对三种犁头的性能好坏做出正确结论的。这就要求用科学的统计方法，对试验数据进行分析处理，从而得出较正确的结论。

此外，耕作阻力变化不仅与犁头性能好坏有关，与地势、土壤状态及含水量有关，还与获取数据所采用的测试仪器、设备的精度和操作人员的技术水平有关。

在试验过程中除改变犁头外，这些参数也在不同程度地变化，而且其变化又是人们难以控制和预测的随机变化。这就可能造成试验条件的不均一性。这类试验实际必然要求设法在试验条件不均一的情况下，对试验结果做出正确的判断。

综上所述，如何能以最少的试验次数来获得足够的有效数据，并对其进行科学的统计分析，从而得出比较可靠的结论？如何能在不均一的试验条件下，对试验结果作出正确的判断？这些都是本书所研究和解决的问题。

又在科学试验中，人们为了表示各参数之间的关系，往往希望通过对一组试验数据的分析，能建立参数间的关系式，以进行预报和控制。试验设计对解决科学试验中建立数学模型获得最佳工艺条件和质量控制等问题是一种有效的工具。

又由于农业机械的服务对象和工作环境是有生命的生物和自然环境，因此农机试验的特点是影响试验结果的不可控制因素多而复杂，且变动大；试验受季节制约，因而试验时期一般都很短，而又要安排重复试验；试验消耗人力、物力大，因此在农机试验研究中推广应用试验设计方法，具有特别重要的意义。

《农机试验设计》的内容十分丰富，应用非常广泛。这里限于篇幅，只能介绍部分常用方法，并且以实用为原则，

IV

着重讲述其原理和方法，并通过农机试验的实例加以说明。对于它们的数学原理的理论论证，乃至很多公式的严格数学推导，本书不详加论述。

为了以后讲述方便，这里先介绍试验设计中常用的术语。

试验指标 在一项试验中，根据试验目的，所考察的试验结果的特征量或者现象称为试验指标。可以用数量表示的试验指标，称为定量指标。例如绪言举例中的割茬高度、耕作阻力等。不能直接用数量来表示的试验指标称为定性指标。如颜色、外观等。

因素 在试验中需要考察的、对试验指标可能有影响的原因称为因素。如前面举出的切割器性能试验中，曲柄转速、机速、割刀类型等都对试验指标割茬高度有影响，都称因素，常用大写字母 A 、 B 、 C …等表示。

水平 因素在试验中所选取的状态或条件称为水平。如曲柄转数取 450r/min 、 500r/min 、 550r/min 三种状态试验，这三种转数称因素曲柄转数的三个水平。常用该因素字母加上下角标来表示。例如 A_1 表示 A 因素的一水平； B_3 表示 B 因素的三水平，等等。在试验中需要考察某因素的几种状态时，则称该因素为几水平的因素。如要考察的机速为 1m/s 、 1.2m/s 、 1.5m/s ，则称机速为三水平的因素。

多因素试验 在一项试验中需要考察多个因素，而每个因素又有多个水平的试验称为多因素试验。前面举出的切割器性能试验，就是多因素试验问题，简称为五个三水平因素试验。

交互作用 通常在一项试验中，不仅各个因素单独起作用，而且因素之间有时会联合起来影响某一试验指标，这种作用称为交互作用。

目 录

绪 言	(I)
第一章 农机试验的正交试验设计法	(1)
第一节 农机正交试验设计的基本方法和极差分析	(1)
第二节 有交互作用的正交试验设计	(12)
第三节 因素水平数不等的正交设计	(19)
第四节 多指标试验的分析	(24)
第二章 试验数据的结构	(30)
第一节 试验数据的结构式	(30)
第二节 用数据结构式说明几个问题	(35)
第三章 农机试验的区组设计	(45)
第一节 区组和区组设计	(45)
第二节 农机非田间试验的区组设计	(47)
第三节 农机田间试验的区组设计	(50)
第四章 方差分析	(69)
第一节 单因素试验的方差分析	(70)
第二节 双因素试验的方差分析	(79)
第三节 正交试验的方差分析	(83)
第四节 不等水平正交试验的方差分析	(93)
第五章 一元回归分析	(101)
第一节 一元线性回归	(103)
第二节 回归方程的显著性检验	(109)
第三节 利用回归方程进行预报和控制	(126)
第四节 化非线性回归为线性回归及计算框图	(131)
第六章 多元线性回归分析及计算程序	(141)
第一节 多元线性回归方程的一般求法	(141)
第二节 多元线性回归问题的显著性检验	(149)

第三节	多元线性回归的应用和计算框图与计算程序·····	(160)
第四节	逐步回归分析及其计算程序·····	(172)
第七章	回归的正交设计 ·····	(190)
第一节	一次回归正交设计·····	(190)
第二节	一次回归正交设计在农机试验上的应用·····	(204)
第三节	二次回归正交设计及计算框图·····	(213)
第八章	正交多项式回归设计 ·····	(236)
第一节	一元正交多项式回归·····	(236)
第二节	多元正交多项式回归·····	(245)

参考文献

附表

I	常用正交表·····	(253)
II	F 分布表·····	(259)
III	t 分布表·····	(267)
IV	相关指数检验表·····	(768)
V	正交多项式表·····	(268)

第一章 农机试验的正交试验设计法

第一节 农机正交试验设计的基本方法和极差分析

正交试验设计，就是应用数学工作者编制的正交表来编排多因素试验，并应用数理统计理论来分析试验数据，从而以较少的试验次数，得到全面信息的一种方法。

一、正交表——正交试验法的基本工具

正交表的种类很多，已制成不同规格供选用（详见附表）。

正交表的通用符号： $L_n(t^q)$

L ——正交表的代号；

n ——正交表的横行数，可表示用该表安排试验条件的数目；

q ——正交表的纵列数，可表示最多可能安排因素的数目；

t ——字码数，可表示每个因素可以取的水平数目；

t^q ——全面试验搭配试验条件的数目。

n 、 t 、 q 都有具体数字。将通用符号代以具体数字成为各种正交表的代号： $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 、 $L_{16}(2^{15})$ 、 $L_9(3^4)$ 、 $L_{27}(3^{13})$ …等等。

每一个表号都对应一个表格。最简单的正交表是 $L_4(2^3)$ 表，如表 1-1 所示。

表 1-1 $L_4(2^3)$ 正交表

列号 试验号	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

下标 $n = 4$ 表示这个表有四横行，每行是一种试验条件，应用该表共要做四种不同条件的试验，它们分别由试验号 1~4 表示；括号内的指数 $q = 3$ 表示该表有三个纵列，最多可安排三个因素；括号中底数 $t = 2$ 表示该表的主要部分只有二种数字，即每个因素可取二个水平。

在试验号右面的一组字码，表示该号试验条件由不同因素水平具体组成。如第 2 号试验由 1、2、2 组成，即由第一因素的 1 水平，第二因素的 2 水平，第三因素的 2 水平组合成一种试验条件。

任何一张正交表都有下列两个特点：

1. 每一列中，不同的字码出现的次数相等。如表 $L_4(2^3)$ 中，字码“1”和“2”各出现 2 次。

2. 任意两列中，将同一横行的两个字码看成有序数对时（即左边的数放在前，右边的数放在后，按这一次序排出的数对），则必然组成完全有序数对，而且每种数对出现的次数相等。如表 $L_4(3^3)$ 中第 1、3 列组成一个完全有序数对：(1, 1)、(2, 2)、(1, 2)、(2, 1)，其中每种数对均出现一次。

正交表的“正交”二字是从几何学中两个向量正交的定义借用过来的，这里表示均衡的意思。

正交表中每纵列所包括的字码种数相同时，称为同水平正交表，如 $L_4(2^3)$ 、 $L_9(3^4)$ 等等。正交表中每列所包含的字码种数不相同，称为混合水平正交表，如 $L_8(4^1 \times 2^4)$ 、 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$ 、……。用 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$ 表可安排4个四水平因素和3个二水平因素，共需做16种不同组合的试验。

二、正交试验设计的基本方法

1. 试验方案的设计

如何设计试验方案是正交试验法的关键之一。现通过实例来说明。

例 1-1 在 5 HN—1.5 暖风粮食烘干机的研究中，为了提高单位时间的粮食脱水率，降低烘干耗电量，对烘干机的导向管的结构参数进行试验研究。我们假设因素之间没有交互作用。

正交试验方案的设计步骤如下：

(1) 明确试验目的，确定试验指标

该例试验目的是为了提高单位时间的粮食脱水率，降低烘干耗电量，所以确定试验指标是耗电量 ($kW \cdot h$)，指一次装500kg高粱的耗电量。

(2) 选因素、定水平

指标确定后，再确定影响试验指标的因素及水平。对耗电量有影响的导向管结构参数有：管开孔率(%)、导向管直径(mm)、导向管长度(mm)。因此可以确定三个因素(A：导向管直径、B：导向管长度、C：导向管开孔率)。又根据已掌握的资料和经验，决定对三个因素各考察两个状态。即各为二个水平(A_1 ：190mm、 A_2 ：210mm、 B_1 ：3020mm、 B_2 ：3500mm、 C_1 ：0.6%、 C_2 ：0.9%)。具体列出因素、水平表如表 1-2。

表 1-2 粮食烘干机械试验的因素水平表

因素 水平	A 导向管直径 (mm)	B 导向管长度 (mm)	C 管开孔率 (%)
1	190	3020	0.6
2	210	3500	0.9

(3) 选择合适的正交表

根据该例是选定三个 2 水平因素，又不考虑交互作用，因此可选用最简单的 $L_4(2^3)$ 表。一般尽可能选用较小的正交表，以减少试验工作量。

(4) 确定试验方案表

先作表头设计。即把要考察的因素分别排到正交表的各列上，各列号改成各因素符号。再将表中的各列字码换成对应因素的 1 水平、2 水平，得到表 1-3 这样的试验方案表。

表 1-3 烘干机试验方案

因素 试验号	A 直径 (mm) (1)	B 长度 (mm) (2)	C 开孔率 (%) (3)	指标耗电量 (kW·h) y_i
1	A_1 190 (1)	B_1 3020 (1)	C_1 0.6 (1)	
2	A_1 190 (1)	B_2 3500 (2)	C_2 0.9 (2)	
3	A_2 210 (2)	B_1 3020 (1)	C_2 0.9 (2)	
4	A_2 210 (2)	B_2 3500 (2)	C_1 0.6 (1)	

试验方案表，具体给出 4 个组合处理方案，即第 1 号试验条件为导向管直径 190mm，导向管长度 3020mm，管开孔率 0.6%；第 2 号试验条件为导向管直径 190mm，导向管长度 3500mm，管开孔率 0.9%；……。试验方案确定后，要严格按照试验号后面规定的试验条件进行试验，试验后将试验结果填在试验指标栏内。须指出：①试验号是某种试验条

件的代号，而不是试验顺序。所以可以按照号码顺序进行试验，也可以打乱这个顺序，随机地进行试验。为了减少外界条件所引起的误差，应尽可能将试验顺序随机化。②试验号的数目与试验次数是两个概念。在无重复试验的情况下，试验次数等于试验号数。在有重复试验的情况下，试验号数等于试验号数乘以重复次数。为了减少随机误差对试验指标的影响，一般将每号试验至少重复一次，用它们的均值作为指标值。

从这个试验方案里我们可看出按正交表安排试验有以下几个特点：

(1) 在每一列中每个因素的各个水平，在试验中出现的次数相同（本例各出现两次）；

(2) 在任意两列间，同一横行的任意两因素的不同水平所有可能搭配组合都出现了，且出现次数相等（本例各出现一次）。

(3) 当因素 A 取 A_1 时， $\begin{bmatrix} A_1 \\ A_1 \end{bmatrix} \begin{cases} B_1C_1 - (\text{试验点 } 1) \\ B_2C_2 - (\text{试验点 } 2) \end{cases}$ ， B 、 C 两因素的两个水平都出现了，且各出现一次。当因素 A 取 A_2 时： $\begin{bmatrix} A_2 \\ A_2 \end{bmatrix} \begin{cases} B_1C_2 - (\text{试验点 } 3) \\ B_2C_1 - (\text{试验点 } 4) \end{cases}$ ， B 、 C 两因素的两个水平也都出现了，且也各出现一次。这样来看 A 因素由 A_1 变化到 A_2 时，其它因素 B 和 C 对指标的影响是相等的。因此比较这两组数的差异，可以认为主要是由 A 因素的不同水平变化造成的。同样，对因素 B 和 C 也有类似的情况。这就是所谓正交试验法的综合可比性。

(4) 这是一个 3 个二水平因素的试验，全面试验有八种组合，可用一立方体表示所做试验的范围，每个因素的水

975040

平都用立方体的相应平面表示。见图 1-1。左、右两平面表示 A_1 、 A_2 ，上、下两平面表示 B_2 、 B_1 ，前、后两平面表示 C_1 、 C_2 ，各平面形成的八个顶点，表示八个全面组合试验条件。按正交表来编排试验只需做四次，这四号试验点的分布特点是每个面上都有两个对角点，每个点在每个平面上都独立占有两个边。显然这四个点在立方体上是均衡分布的，使每个试验点都有很强的代表性。正因为这种试验安排法有这些特点，才能做到试验次数少，而信息不少，达到用部分组合试验条件的试验代表全面试验的效果。

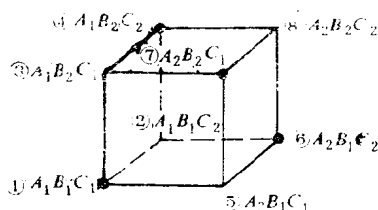


图1-1 3个三水平因素全面试验立方体图

2. 试验结果的极差分析

经过试验测得全部试验数据后，如何科学地分析这些数据，从中得出正确的结论，这是正交设计法的另一重要内容。下面介绍一种综合比较的极差分析法，也称直观分析法。

通过对试验结果的分析，要解决四个问题：

(1) 确定因素的主次，即被考察的因素中各个因素对指标影响的大小情况。

(2) 分清水平的优劣，即各因素哪个水平对试验指标影响为最好。

(3) 初选较优生产条件（或较优设计方案）。

(4) 展望进一步试验方向并确定最优生产条件。

先分析各因素的不同水平对试验指标的影响。也以 A 因素为例：如果从 4 个试验结果数据中直接比较 A_1 和 A_2 的优劣是不行的，因为这 4 个试验的组合条件中除 A 因素外， B 、 C 因素的水平组合没有相同的，所以没有比较的基础。但把这 4 个试验数据适当组合相加后，就可利用正交试验法所特有的综合可比性，对 A 因素的两个水平对指标影响的大小进行比较。将 4 个试验数据分成两组， A 因素的 1 水平的两次试验为 I 组， A 因素 2 水平的两次试验为 II 组。然后把每组的两次试验结果相加起来，这时便会发现：在 I 组的指标和中，仅是 A 因素的 A_1 水平出现两次， B 、 C 两因素的各水平 B_1 、 B_2 和 C_1 、 C_2 均出现一次的影响；在 II 组的指标和中，仅是 A 因素的 A_2 水平出现两次， B 、 C 两因素各水平 B_1 、 B_2 和 C_1 、 C_2 均出现一次的影响。对于条件 A_1 下的两次试验和 A_2 条件下的两次试验，虽然其它条件（ B 、 C ）在变动，搭配情况并不相同，但在 B 、 C 两因素没有交互作用的条件下，这种变动是“平等”的。因此如果每组把两次试验结果加起来，即

$$\text{第 I 组 } K_{A1} = y_1 + y_2 = 4.15 + 3.70 = 7.85$$

$$\text{第 II 组 } K_{A2} = y_3 + y_4 = 3.20 + 3.50 = 6.70$$

然后对两组进行比较，若 K_{A1} 、 K_{A2} 之间有差异，则说明此差异是 A 因素的不同水平对指标产生的影响。所以 K_{A1} 、

K_{A2} 或它们的平均值 $k_{A1} = \frac{K_{A1}}{2}$ 、 $k_{A2} = \frac{K_{A2}}{2}$ 的大小，反映了

A 因素的二个水平对指标的影响程度。由于 $K_{A1} = 7.85 > K_{A2} = 6.70$ ，或 $k_{A1} = 3.93 > k_{A2} = 3.35$ ，从题意整体上看，导向管长度，开孔率的条件都一样，只有直径不一样，因此