

# 新编橡胶制品实用配方

及相关技术标准实用手册

主编：雍铭熙

XINBIAN XIANGJIAO

ZHIPIN SHIYONG

PEIFANG

## 第一编 橡胶配方设计

第一章	橡胶配方设计及配方性能的鉴定测试方法	(3)
第一节	橡胶配方设计的重要性	(3)
第二节	橡胶配方设计的特点	(4)
第三节	橡胶配方设计的原则与配方形式	(6)
第四节	橡胶配方的组成及表示方法	(13)
第五节	橡胶配方性能的鉴定及测试	(15)
第二章	配方设计程序	(27)
第一节	配方设计概述	(27)
第二节	配方设计程序与配方形式	(32)
第三节	配方试验方法	(40)
第三章	配合体系与橡胶性能的关系	(88)
第一节	配合体系与硫化胶物性的关系	(88)
第二节	配合体系与胶料工艺性能的关系	(115)
第四章	橡胶配方试验设计方法和计算机 CAD 技术的应用	(132)
第一节	概 述	(132)
第二节	单因素配方设计	(134)
第三节	多因素配方设计	(148)

## 第二编 橡胶制品应用配方

第一章	橡胶基础配方	(227)
第二章	轮胎应用配方	(244)
第一节	汽车轮胎应用配方	(244)
第二节	农业轮胎应用配方	(382)
第三节	工程轮胎应用配方	(404)
第四节	摩托车轮胎应用配方	(407)
第五节	力车轮胎	(414)
第三章	胶带、胶管和胶布应用配方	(504)
第一节	胶带应用配方	(504)
第二节	橡胶管应用配方	(552)
第三节	胶布制品应用配方	(568)
第四章	工业橡胶制品应用配方	(581)
第一节	橡胶密封制品应用配方	(581)

## 目 录

第二节	橡胶减震制品应用配方	(602)
第三节	橡胶板与卷材	(618)
第四节	橡胶衬里应用配方	(632)
第五节	胶辊与胶毯应用配方	(641)
第六节	纺织用橡胶制品应用配方	(648)
第七节	其他橡胶工业制品应用配方	(655)
第五章	胶鞋应用配方	(662)
第一节	布面胶鞋应用配方	(662)
第二节	胶面胶鞋应用配方	(760)

### 第三编 橡胶材料分析与处理

第一章	橡胶材料的结构特征	(783)
第一节	总 论	(783)
第二节	橡胶的微观结构	(784)
第三节	橡胶的细观结构	(810)
第四节	微观和细观结构的解析手段简介	(830)
第二章	生胶材料分析	(838)
第一节	概 述	(838)
第二节	天然橡胶	(841)
第三节	丁苯橡胶	(864)
第四节	聚丁二烯橡胶	(876)
第五节	乙丙橡胶	(884)
第三章	橡胶配合材料	(895)
第一节	硫化体系配合剂	(895)
第二节	加工添加剂	(900)
第三节	防护体系配合剂	(902)
第四节	补强 - 填充体系配合剂	(906)
第五节	特殊用途添加剂	(915)
第六节	胶乳专用配合剂	(917)
第七节	橡胶用骨架材料	(918)
第四章	橡胶材料的主要性能分析	(924)
第一节	引 言	(924)
第二节	相容性	(925)
第三节	热转变性质	(952)
第四节	高弹形变与弹性理论	(963)

第五章 弹性体共混改性分析	(997)
第一节 聚合物的相容性	(998)
第二节 聚合物共混物的形态结构	(1016)
第三节 配合剂在共混物中的分布	(1030)
第四节 共混物的共交联	(1045)

## 第四编 橡胶与橡胶制品加工制造技术

第一章 橡胶材料的加工过程与技术	(1069)
第一节 引言	(1069)
第二节 塑 炼	(1071)
第三节 混 炼	(1084)
第四节 压延和挤出	(1100)
第五节 硫 化	(1115)
第二章 橡胶产品制造技术	(1130)
第一节 轮 胎	(1130)
第二节 胶 带	(1137)
第三节 胶 管	(1140)
第四节 胶布和胶布制品	(1145)
第五节 胶 鞋	(1149)
第六节 橡胶密封制品和减震制品	(1152)
第七节 其它橡胶制品	(1160)
第八节 电线与电缆	(1172)
第九节 胶乳制品	(1176)
第三章 橡胶工业常用法定计量单位及常用公式	(1186)
第一节 橡胶工业用法定计量单位	(1186)
第二节 橡胶工业常用计算公式	(1194)
第四章 橡胶工业中的环境技术	(1248)
第一节 橡胶工业废水及其防治	(1248)
第二节 橡胶工业废气及其防治	(1251)
第三节 橡胶工业粉尘及其防治	(1255)
第四节 橡胶工业噪声及其防治	(1256)
第五节 橡胶工业其它环境危害及其防治	(1257)
第五章 计算机在橡胶加工配制中的应用	(1261)
第一节 橡胶制品配方的计算机辅助设计	(1261)
第二节 计算机在轮胎结构设计中的应用	(1280)
第三节 计算机在橡胶工业中的应用	(1285)

第四节 计算机在轮胎热力学分析中的应用 .....	(1288)
---------------------------	--------

## 第五编 橡胶配方、应用技术标准

橡胶物理试验和化学试验术语 .....	(1293)
橡胶火焰试验术语 .....	(1312)
硫化橡胶或热塑性橡胶直接自然气候老化试验方法 .....	(1320)
硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验 .....	(1329)
硫化橡胶与单根钢丝粘合力的测定 .....	(1334)
天然生胶塑性保持率的测定 .....	(1340)
硫化橡胶或热塑性橡胶试验用试样和制品尺寸的测定 .....	(1343)
硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定 .....	(1349)
硫化橡胶或热塑性橡胶撕裂强度的测定(裤形、直角形和新月形试样) ...	(1364)
橡胶袖珍硬度计压入硬度试验方法 .....	(1373)
硫化橡胶或热塑性橡胶与织物粘合强度的测定 .....	(1378)
硫化橡胶或热塑性橡胶硬度的测定 .....	(1382)
硫化橡胶赵氏及邵坡尔硬度试验方法 .....	(1398)
硫化橡胶压缩耐寒系数的测定 .....	(1401)
硫化橡胶拉伸耐寒系数的测定 .....	(1404)
硫化橡胶或热塑性橡胶低温刚性的测定(吉门试验) .....	(1408)
硫化橡胶高温拉伸强度和扯断伸长率的测定 .....	(1416)
橡胶试验胶料的配料、混炼和硫化设备及操作程序 .....	(1420)
成包合成生胶取样 .....	(1428)
合成橡胶试样制备 .....	(1435)
橡胶压缩或剪切性能的测定(扬子尼机械示波器) .....	(1438)
硫化橡胶透气性的测定恒容法 .....	(1447)
硫化橡胶透气性的测定恒压法 .....	(1453)
未硫化橡胶用圆盘剪切粘度计进行测定 第1部分: 门尼粘度的测定 .....	(1461)
橡胶胶料初期硫化特性的测定 门尼粘度计法 .....	(1470)
硫化橡胶回弹性的测定 .....	(1474)
硫化橡胶低温脆性的测定 单试样法 .....	(1479)
硫化橡胶恒定形变压缩永久变形的测定方法 .....	(1483)
硫化橡胶短时间静压缩试验方法 .....	(1486)
硫化橡胶在常温 and 高温下压缩应力松弛的测定 .....	(1490)
硫化橡胶在屈挠试验中温升和耐疲劳性能的测定 第2部分: 压缩屈挠试验 .....	(1497)
硫化橡胶伸张疲劳的测定 .....	(1504)

## 目 录

硫化橡胶耐磨性能的测定 (用阿克隆磨耗机)	(1508)
硫化橡胶耐液体试验方法	(1512)
硫化橡胶绝缘电阻率测定	(1525)
硫化橡胶工频介电常数和介质损耗角正切值的测定方法	(1534)
硫化橡胶高频介电常数和介质损耗角正切值的测定方法	(1540)
硫化橡胶工频击穿介电强度和耐电压的测定方法	(1547)
硫化橡胶或热塑性橡胶压缩应力应变性能的测定	(1551)
附录 A 非标准试样试验结果的外推法 (参考件)	(1556)
硫化橡胶低温特性的测定温度回缩法 (TR 试验)	(1559)
硫化橡胶、热塑性橡胶常温、高温和低温下压缩永久变形测定	(1564)
硫化橡胶与金属粘合的测定 单板法	(1573)
橡胶与刚性材料粘合强度的测定 圆锥形件法	(1577)
硫化橡胶耐臭氧老化试验静态拉伸试验法	(1580)
附录 A 臭氧浓度的测定方法 碘量滴定法 (补充件)	(1584)
硫化橡胶溶胀指数测定方法	(1586)
硫化橡胶或热塑性橡胶样品和试样的制备 第一部分: 物理试验	(1589)
硫化橡胶耐磨性能的测定 (旋转辊筒式磨耗机法)	(1594)
附录 A 有关砂布的说明 (补充件)	(1600)
附录 B 标准橡胶 (补充件)	(1600)
橡胶获得高于或低于常温试验温度通则	(1603)
硬质橡胶弯曲强度的测定	(1607)
硬质橡胶冲击强度的测定	(1610)
硬质橡胶硬度的测定	(1615)
硬质橡胶耐热试验方法	(1618)
硬质橡胶抗剪切强度的测定	(1622)
硬质橡胶拉伸强度和拉断伸长率的测定	(1625)
硬质橡胶压碎强度的测定方法	(1629)
硫化橡胶或热塑性橡胶 导电性能和耗散性能电阻率的测定	(1631)
附录 A 固态静电计 (提示的附录)	(1637)
橡胶试样环境调节和试验的标准温度、湿度及时间	(1640)
硫化橡胶与织物帘线粘合强度的测定 H 抽出法	(1645)
附录 A 硅橡胶覆面隔条的制备 (参考件)	(1648)
生胶和混炼胶的塑性测定 快速塑性计法	(1651)
橡胶胶料硫化特性的测定 (圆盘振荡硫化仪法)	(1660)
附录 A (提示的附录) 精密度弹性体动态试验的一般要求	(1667)
附录 A 基本概念 (补充件)	(1683)
附录 B 应力和应变之间的关系 (补充件)	(1683)
附录 C 动态性能对试验条件的依赖性 (参考件)	(1685)

## 目 录

硫化橡胶老化性能的测定 (拉伸应力松弛试验) .....	(1688)
橡胶热导率的测定瞬态热丝法 .....	(1693)
硫化橡胶老化表面龟裂试验方法 .....	(1697)
附录 A 试样龟裂等级参考照片 (参考件) .....	(1705)
硫化橡胶滑动磨耗的测定 .....	(1710)
附录 A 有关砂布的说明 (补充件) .....	(1715)
附录 B 标准橡胶试样 (补充件) .....	(1716)
附录 C 仪器常数的测定 (补充件) .....	(1717)
磁性橡胶磁性能的测定方法 .....	(1719)
附录 A 磁性橡胶制品在常温及经高、低温处理表面磁通密度的测定方法 (参考件) .....	(1724)
硫化橡胶抗静电和导电制品电阻的测定 .....	(1726)
硫化橡胶与金属粘合强度的测定 拉伸法 .....	(1733)
生胶和混炼胶塑性值及复原值的测定 平行板法 .....	(1737)
硫化橡胶弹性模数的测定方法 .....	(1742)
橡胶浆粘度测定方法 .....	(1744)
硫化橡胶中游离硫含量的测定亚硫酸钠法 .....	(1746)
硫化橡胶中炭黑含量的测定 —— 热解法 .....	(1749)
橡胶中溶剂抽出物的测定 .....	(1752)
硫化橡胶全硫含量的测定氧瓶燃烧法 .....	(1756)
橡胶灰分的测定 .....	(1762)
硫化橡胶中防老剂的测定薄层色谱法 .....	(1766)
硫化橡胶中锌含量的测定火焰原子吸收光谱法 .....	(1771)
橡胶聚合物 (单一及并用) 的鉴定裂解气相色谱法 .....	(1775)
橡胶中铅含量的测定 双硫脲光度法 .....	(1781)
橡胶中铅含量的测定 原子吸收光谱法 .....	(1785)
附录 A 标准加入法 (标准的附录) .....	(1790)
橡胶聚合物的鉴定 化学方法 .....	(1791)
橡胶燃烧性能测定 氧指数法 .....	(1799)
附录 A 氧浓度的计算 (补充件) .....	(1805)
附录 B 试验结果计算示例 (参考件) .....	(1805)
附录 C 氧浓度与氧气、氮气流量的关系表 (参考件) .....	(1808)
硫化橡胶中金属含量的测定 火焰原子吸收光谱法 第四部分: 铁含量的 测定 .....	(1818)
橡胶中铁含量的测定 1, 10-菲罗啉光度法 .....	(1822)
橡胶中锌含量的测定 EDTA 滴定法 .....	(1825)
硫化橡胶中锰含量的测定 高碘酸钠光度法 .....	(1830)
硫化橡胶中橡胶含量的测定 管式炉热解法 .....	(1834)

## 目 录

硫化橡胶中总硫量的测定 过氧化钠熔融法 .....	(1837)
硫化橡胶中金属含量的测定 火焰原子吸收光谱法 第5部分: 锰含量的测定 .....	(1840)
橡胶燃烧性能测定 垂直燃烧法 .....	(1844)
硫化橡胶中镁含量的测定 CyDTA 滴定法 .....	(1849)
硫化橡胶中钙含量的测定 EGTA 滴定法 .....	(1853)
橡胶中结合苯乙烯含量的测定 分光光度法 .....	(1857)
附录 A 吸收系数校正法(补充件) .....	(1860)
橡胶制品用原材料筛余物的测定 水冲洗法 .....	(1862)
硫化橡胶灰分的定性分析 .....	(1865)
橡胶及橡胶制品组分含量的测定 热重分析法 .....	(1869)
橡胶游离硫的测定 铜螺旋法 .....	(1875)
橡胶中硫化物型硫含量的测定 碘量法 .....	(1879)
橡胶游离硫的测定 电位滴定法 .....	(1883)
附录 A 含氰废液的处理(参考件) .....	(1887)
橡胶中聚异戊二烯含量的测定 .....	(1888)
橡胶中丁基橡胶或聚异丁烯含量的测定 .....	(1894)
橡胶、塑料软管 燃烧试验方法 .....	(1898)
不饱和橡胶中饱和橡胶的鉴定 第一部分酸消化法 .....	(1902)
橡胶与橡胶制品 化学试验方法准确度和偏差的确定 .....	(1905)
附录 A (提示的附录) 偏差类型 .....	(1912)
附录 B (提示的附录) 偏差计算举例 .....	(1913)
附录 C (提示的附录) 回归直线系数计算方程式 .....	(1915)



## 第五章 计算机在橡胶加工配制中的应用

随着新兴科学与技术的飞速发展,计算机在橡胶工业中的应用越来越广泛,迄今为止,主要的应用领域可分为下列几个方面:①橡胶制品配方的计算机辅助设计;②计算机在轮胎结构设计中的应用;③计算机在橡胶制品生产工艺过程中的应用;④计算机在轮胎热力学分析中的应用。现分别简要介绍如下。

### 第一节 橡胶制品配方的计算机辅助设计

#### 一、概述

在橡胶工业中如何提高制品性能、降低生产成本、缩短新产品的开发周期已成为迫在眉睫的问题。这一切都要求配方工作者以最少的人力、物力、财力消耗,迅速、系统、全面地掌握各种配方因子对制品性能的影响规律;而传统的以前人的现有配方为基础,根据自己的配方工作经验加以调整以期达到目的的做法是难以实现这一目标的。统计方法,如最优试验设计、数学建模与回归分析、配方优选等在橡胶配方设计与优化中的应用,克服了传统方法的盲目性,能够科学、合理地在试验空间里安排试验点,从而大大减少了试验次数,并能获得大量的信息,从而反映出性能随着因子的变化规律。

由于采用统计方法安排的配方试验的数据处理与分析较为复杂,一开始并未显示出明显的优势,因而未能受到大多数配方工作者和企业决策者的重视。计算机的出现以及各种统计软件包的应用克服了这个缺陷。自从1968年Claxton等人发表题为“计算机在橡胶研究方面的应用”一文至今,计算机在橡胶配方设计与优选方面的研究极为活跃,有关橡胶配方中统计方法应用的理论研究和实践应用也越来越多。我国在这一领域起步较晚,虽然20世纪70年代至今研究论文很多,但形成软件还很少。

一般而言,,橡胶配方计算机辅助设计包括试验设计、配方过程的数学建模和配方优选三个部分,其中试验设计是基础,好的试验设计方案应该以尽可能少的试验次数反映尽可能多的信息,即使试验点在试验空间中的分布要合理;数学建模则是关键,它关系到能否准确反映配方组分与各性能指标之间的关系,同时还应使配方的优选易于进

行；配方的优选则是配方试验的目的，最优配方应是性能、成本与工艺可行性的最佳平衡，同时还应具有稳定性（即实际生产中配方用量在偏离最佳用量后性能值不会有很大变化）。这三个方面是相互关联、不可分割的，以往的许多文献或配方工作者都有意或无意地忽视了这一点。

## 二、最优试验设计

橡胶配方试验的目的是为了对性能进行“预测和解释”。如“当炭黑用量为多少份时硫化胶硬度才能达到 60 度”，“配方中各配合剂的用量为多少时硫化胶所有性能才能满足所需的性能指标”等问题则属于“预测”（或归属决策支持问题）；另一方面，“提高炭黑结构度对拉伸强度会产生什么影响”，“促进剂 A 和促进剂 B 有无协同效应”等问题属于“解释”方面的问题（或归属专家系统知识）。

为便于理解和讨论，首先说明两个术语：

因子——对胶料性能指标有影响的一系列因素，如原材料，工艺条件等；

水平——每个因子可能所处的状态。水平可以是原材料的品种、用量、工艺参数等。

橡胶配方设计问题按其算法可分为两类：①传统试验设计法（非统计试验设计法）；②统计试验设计法。

### （1）传统试验设计法

①单因子变量设计（OVAT） 单因子变量设计（One Variable at a Time）是经典的设计方法之一，它是利用消去法原理，在变量区间内，确定性能最优的变量点。根据试验次数的多少和试验周期的长短，单因子变量设计可分为两类：序贯试验法和同时试验法。其中序贯试验法包括：黄金分割法（0.618 法）、平分法（对分法）、分数法（Fibonacci 法）等；而同时试验法包括均分分批试验法和比例分割分批试验法。单因子变量设计在同一批试验中只考虑一个变量（其它组分固定），如表 5-1 所示。从表 5-1 中可以看出：配方 2 中，白炭黑用量增加而其它组分用量不变；配方 3 中，除油的用量降低外，其它组分用量也保持不变。从上述单因素变量设计中可发现规律，随着白炭黑用量的增加，胶料硬度提高；随着油用量的降低，也存在着相同的规律。这种设计方法简单、方便，但也存在着一定的不足，即它不能反映出各种配合剂之间的交互作用对橡胶性能的影响。在实际配方中，配合剂之间也确实存在交互作用，如防老剂之间的并用会产生协同效应，使防护效果大大提高。这些特点在单因子变量试验中得不到反映，从而使得到的配方失真。

②瞄准目标法（Home Run Approach）瞄准目标法的出发点是为了满足某一目标性能，设计者根据其经验，通过改变配合剂的用量来达到目的，如表 5-2 所示。从表中可以看出，配方组分用量的变化没有明显的规律可循。该法成功的可能性与设计者的经验成正比，但也存在着缺陷。即便是发现了性能峰值，却不了解整个“峰”的形状，以此配方投入生产，一旦性能偏离目标，再要进行调整就很困难。

表 5-1 单因子变量设计

组 分	配 方	1	2	3
	SBR1502		100	100
白炭黑		40	50	40
油		10	10	5

表 5-2 瞄准目标法试验

SBR1500	100	100	100	100
白炭黑	30	50	40	60
炭黑	20	—	10	—
油	10	15	18	30
促进剂 A	1.0	0.6	0.8	2
促进剂 B	0.5	0.7	1.2	0.6
氧化锌	5	5	8	10
硬脂酸	2	3	2	4
硫黄	2	2.2	3	2.7

传统试验设计法简单, 计算机在这里的应用体现不出优势。另外, 该方法对设计者的经验依赖性较强, 而且不能建立用于解释和预测的数学模型。

(2) 统计试验设计法 在实际的橡胶配方设计中, 常常需要同时考虑几个因素, 并对各个因素进行分析, 找出主要因素, 并确定因子间是否有交互作用, 这时就需要采用多因素的变量设计, 而统计试验设计方法便能满足这一要求。

统计试验设计方法在橡胶配方中的应用, 一改传统试验设计方法试验点分布不合理、试验次数多、不能反映因子间交互作用等诸多缺点, 在将橡胶配方设计与数理统计、线性规划、运筹学等数学方法相结合的基础上, 以专业知识和配方经验为依据, 科学地设计试验计划, 大大减少了试验次数, 并通过建立描述配方与性能之间关系的数学模型, 可以迅速、准确地确定各组分的最佳用量区间, 同时能够提高最优区间的稳定性, 这可为实际生产中根据需要调整配方提供方便。

目前, 橡胶配方设计中常用的统计试验设计方法主要有正交试验设计、组合试验设计、混料回归设计及均匀设计等。

#### 第四编 橡胶与橡胶制品加工制造技术

①正交试验设计 正交试验设计是利用正交表进行整体设计、综合比较和统计分析,研究多因子试验问题的一种重要的数学方法。

其特点是将试验点在试验范围内安排得“均匀分散,整齐可比”。“均匀分散”使试验点均匀地分布在试验范围内,每个试验点都有充分的代表性;“整齐可比”使试验结果的分析十分方便,易于估计各因子的主效应和交互作用,从而可分析各因子对指标的影响大小和变化规律。

最简单的正交表是  $L_4(2^3)$ , 如表 5-3。

表 5-3  $L_4(2^3)$  正交表

试验号	1	2	3
1	1	1	1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	-1	-1	1

表中的“1”和“-1”代表定量因子的二水平或定性因子的两种方案,如温度、配合剂的用量、混炼时间等为定量因子;炭黑品种、软化剂种类等则为定性因子。对于定量因子而言,“-1”代表因子水平的下限,“1”代表因子水平的上限。

三个因子,每个因子有两个水平,按照常规通过排列组合搭配做试验需做 8 次,若三因子三水平则需做 27 次,通过正交表安排试验则只需做 4 次、9 次,大大减少了试验次数。

正交试验设计的结果分析方法有两种:一种是直观分析,另一种是方差分析。

直观分析法按所用正交表计算出各因子的水平均值和极差值(性能指标最大值与最小值的差)。从极差大小可排出各因子和交互作用的显著性顺序,按这个顺序和因子的性能水平均值优选出最佳水平组合,并可计算出最佳水平组合的预测值。

直观分析法的优点是计算简单;缺点是不能估算试验的精度,即不能区分某因子各水平的试验结果的差异是因子水平的不同引起的,还是试验误差所引起的。

方差分析方差分析是通过计算偏差平方和、自由度、 $F_{比}$  等统计量,估计试验结果的可信赖度、各配方因子对某性能的显著性,从而将因子水平变化引起的试验结果间的差异与误差波动引起的试验结果间的差异区分开来,克服了直观分析的缺点。

正交设计法的不足之处是,常用的二水平正交设计仅能得到配方因子与性能指标之间的线性关系,这种关系仅能用于“解释”;要获得能够用于“预测”的高精度非线性模型,就应增大各因子的水平数。而采用正交表安排  $m$  水平的多因子试验时,试验的数目为  $m^2$ , 即试验次数随水平数平方增加,这又为试验的实施带来困难。即使采用部

分实施 (1/2 实施、1/4 实施、1/8 实施等) 的方法, 试验次数仍然很多。

一般来说, 橡胶配方试验是多因子、多水平的试验, 而传统的正交试验设计只适用于等水平的情况。为此, 可对正交表进行改造 (并列法、拟水平法、拟因子法等), 但这又给试验结果的分析带来了困难。因此多水平正交试验设计的应用受到了一定的限制。

②组合设计 为了以较少的试验次数建立配方因子与性能之间的高精度的回归方程, 有必要把试验安排、数据处理和回归方程的精度统一起来加以考虑, 也就是根据试验目的和数据分析来选择试验点, 这样不仅使得在每个试验点上的数据含有最大的信息, 从而减少试验次数, 而且能以很快的速度建立有效的回归方程, 从而解决优化问题。后来人们提出“组合设计”的思想, 即: 在因子空间中选择几类具有不同特点的点, 把它们适当组合起来而形成试验计划。

对于  $P$  因子的配方试验, 相应二次回归方程的回归系数的个数  $q$  为:

$$q = C_{p+2}^2$$

因此, 要得到  $p$  个因子的二次回归方程, 试验次数应不小于  $q$ 。另一方面, 为计算二次回归方程的系数, 每个因子应取的水平应不小于 3, 这就需要做大量的试验。而用组合设计安排试验计划, 不但试验点比三水平全因子试验少得多, 而且仍保持足够的剩余自由度 (表 5-4)。

表 5-4 试验因子与剩余自由度的关系

$p$	参数个数 $q$	三水平全因子试验		试验数	
		剩余自由度	组合试验	试验数	剩余自由度
2	6	9	3	9	3
3	10	27	17	15	5
4	15	81	66	25	10
5	21	243	222	47	22
5 <sup>①</sup>	21	81	60	27	6

①部分实施法  $m_c = 2^{5-1}$ 。

组合设计通常包括回归正交设计、旋转组合设计和通用旋转设计, 其中以通用旋转设计最为常用。

回归正交设计 回归正交设计是利用正交表进行的试验设计。 $p$  因子的正交设计由

下列  $N$  个点组成:

$$N = m_c + 2p + m_0$$

式中,  $m_c$  表示二水平 (+1 和 -1) 的全因子试验的试验点个数  $2^p$ , 或它的部分实施的试验点个数  $2^{p-1}$ 、 $2^{p-2}$  等;  $2p$  表示分布在  $p$  维空间的星号点, 它们与中心点距离  $\gamma$  称为星号臂, 是待定参数。根据一定的要求 (如正交性, 旋转性) 调节  $\gamma$ , 就可得到各种具有很好性质的设计 (如正交设计, 旋转设计);  $m_0$  表示在各变量都取零水平的中心点的重复试验次数。它可以只做一次, 也可重复二次或多次。

为使组合设计具有正交性, 便于试验结果的统计分析, 应满足下式:

$$(m_c + 2\gamma^2) 2^{-N} \cdot m_c = 0$$

表 5-5 列出了  $p=2-10$ ,  $m_0=1-10$  各种情况下回归正交设计的  $\gamma^2$  值。

表 5-5 回归正交设计  $\gamma^2$  值表

$m_0$	$P$									
	2	3	4	5 (1/2)	6 (1/2)	7 (1/2)	8 (1/4)	9 (1/4)	10 (1/8)	
1	1.000	1.477	2.000	2.392	2.973	3.553	4.000	4.586	5.051	
2	1.162	1.657	2.198	2.583	3.183	3.777	4.222	4.819	5.282	
3	1.317	1.831	2.392	2.770	3.391	4.000	4.442	5.051	5.513	
4	1.414	2.000	2.583	2.954	3.596	4.222	4.661	5.282	5.742	
5	1.606	2.164	2.770	3.136	3.799	4.442	4.878	5.513	5.971	
6	1.742	2.325	2.954	3.314	4.000	4.661	5.094	5.742	6.200	
7	1.873	2.481	3.136	3.489	4.878	5.310	5.971	6.427	2.000	
8	2.633	3.314	3.662	4.396	5.094	5.523	6.200	6.654	2.123	
9	2.782	3.489	3.832	4.591	5.310	5.736	6.427	6.880	6.880	
10	2.243	2.928	3.662	4.000	4.785	5.523	5.947	6.654	7.106	

旋转组合设计 回归正交设计的优点是试验次数少、计算简单、消除了回归系数件的相关性，但正交设计存在着一个缺点，即：二次回归方程的预测值强烈依赖于试验点在因子空间的位置。为克服这个缺点，引入旋转设计——与试验中心点距离相等的球面上各点的回归方程预测值的方差相等。在旋转设计中，预测值的方差仅与试验点到试验中心的距离  $p$  有关，而与方向无关； $p$  越大，方差也越大。这种旋转性条件，可以帮助试验者扫除一些寻找最优工艺过程中误差的干扰，因为试验者不能预先知道最优工艺是在因子空间哪一个区域、哪一个方向出现。

根据二次旋转设计的旋转性条件和非退化条件，借助于组合设计思想，可实现旋转组合设计（见表 5-6）。旋转组合设计的  $N$  个试验点。

$$N = m_c + 2P + m_0$$

表 5-6 二次旋转组合设计的参数表

$P$	$P_c$	$P_\gamma$	$\gamma^2$	$m_c$	$2p$
2	1.414	1.414	2.000	4	4
3	1.732	1.682	2.828	8	6
4	2.000	2.000	4.000	16	8
5	2.236	2.378	5.655	32	10
5 (1/2)	2.236	2.000	4.000	16	10
6	2.450	2.828	8.000	64	12
6 (1/2)	2.450	2.378	5.655	32	12
7	2.646	3.364	11.316	128	14
7 (1/2)	2.646	2.828	8.000	64	14
8 (1/2)	2.828	3.364	11.316	128	16
8 (1/4)	2.828	2.828	8.000	64	16

通用旋转设计 在二次通用旋转设计中，对中心点试验次数  $m_0$  的选择很自由，一般情况下（即  $p_c \neq p_\gamma$ ），即使在中心点不进行一次试验也不会影响试验计划的旋转性，但这并没有充分利用组合设计的特点。从试验的角度来看，中心试验点是必须的，因为它给出了回归方程在中心点拟合情况，而中心点附近区域是试验者非常关心的区域。此外，如果适当地选取  $m_0$ ，还可使得二次旋转设计具有正交性或通用性。通用性是指一个回归设计的预测值方差在区间  $0 < p < 1$  范围内基本上为常数，即称这种设计具有通用性。

二次正交旋转组合设计和通用旋转组合设计的参数见表 5-7。

表 5-7 二次正在旋转组合设计和通用旋转组合设计参数表

P	$\gamma$	$m_0$	N		$m_0$	
			正交旋转	通用旋转	正交旋转	通用旋转
2	1.414	4	16	13	8	5
3	1.682	8	23	20	9	6
4	2.000	16	36	31	12	7
5	2.378	32	59	32	17	—
5 (1/2)	2.000	16	36	53	10	6
6 (1/2)	2.378	32	59	92	15	9
7 (1/2)	2.828	64	100	30	22	14
8 (1/2)	3.364	128	177	165	33	21
8 (1/4)	2.828	64	100	93	20	13

③均匀试验设计 每一种试验设计方法都有其局限性，正交试验也不例外，它只宜用于水平数不多的试验中。若在一项试验中有  $S$  个因素，每个因素有  $q$  个水平，用正交设计安排试验，则至少要做  $q^2$  个试验。随着  $q$  的增大， $q^2$  将更大。即使采用组合试验设计，试验次数仍然很多。对于这一类试验，均匀设计则显示出优势。

中国科学院应用数学研究所方开泰教授将数论方法用于试验设计，在正交设计的基础上，创立了适用于多因子、多水平的最优试验设计方法——均匀设计。正交试验设计具有“均匀分散，整齐可比”的特点；均匀设计则单纯从均匀性出发，只考虑试验点的“均匀分散”性，即让试验点均衡地分布在试验范围内，使每个试验点具有充分的代表性。

均匀设计的特点

- a. 每个因子的每个水平仅做一次试验；
- b. 任意两个因子的试验点都位于平面的格子点上，每行每列有且仅有一个试验点；
- c. 均匀试验表任两列组成的试验方案一般不等价，其均匀性也有差别；
- d. 当因子的水平数增加时，试验数随水平数的增加而增大（而正交试验设计的试验数按水平数的平方的比例增加）。

均匀设计表符号说明



$$U_n(q^s)$$

式中  $U$ ——均匀设计；  
 $n$ ——表示要做  $n$  次试验；  
 $q$ ——表示每个因素有  $q$  个水平；  
 $s$ ——表示该表有  $s$  列。

均匀设计表的使用 利用均匀设计表安排试验，通常有如下步骤：

- a. 根据试验的目的，选择合适的因素和相应的水平；
- b. 选择适合该试验的均匀设计表，然后根据该表的使用表从中选出列号，将因素分别安排到这些列号上，并将这些因素的水平按所在列的提示放入表格内（见表 5-8 及表 5-9）。

表 5-8  $U_7(7^6)$

试验数	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	4	6	1	3	5
3	3	6	2	5	1	4
4	4	1	5	2	6	3
5	5	3	1	6	4	2
6	6	5	4	3	2	1
7	7	7	7	7	7	7

表 5-9  $U_7(7^6)$  使用表

因素	列号		
2	1	3	
3	1	2	3
4	1	2	3

均匀设计表的灵活使用橡胶配方试验中经常遇到水平数不等的情况，在这里可借鉴正交设计对均匀设计表进行拟水平改造。如三因子试验中，因子 A、B 分别为 3 水平，