

均匀试验设计法在轮胎配方设计中的应用

邹明清 蔡大扬 李永炽

(广州珠江轮胎有限公司 510828)

丁新林

(广州天河凯迪科技发展有限公司 510630)

摘要 均匀试验设计法是只考虑试验点在试验范围内均匀分布的一种试验设计方法,具有试验次数少、周期短、结果分析精确的特点;应用该设计法试验优选出来的配方完全达到了配方设计要求,当胎面胶中胶粉用量扩大到20份后,胶料及成品胎的物理机械性能均较好,成品胎的耐久性能良好,实际行驶里程基本接近正常生产胎水平,并降低了胶料成本。

关键词 均匀试验设计, 配方设计, 胎面胶, 胶粉

试验设计在橡胶新配方的开发和老配方的改进中具有重要的作用。随着计算机新技术的推广应用,选用理想的试验设计方法越来越重要。目前在橡胶配方设计试验方法中,借助计算机和数理统计分析,常用的方法有正交设计试验法和回归分析试验法。本文介绍的是一种全新的试验设计法——均匀试验设计法。我们应用该试验设计法对胎面胶进一步扩大胶粉用量进行了较全面的试验考察。

1 均匀试验设计法简介

均匀试验设计法是由中国科学院应用数学研究员方开泰和中国科学院学部委员王元将数论与多元统计相结合而创立的一种全新的试验设计方法,其特点是多因素、多水平,只考虑试验点在试验范围内充分地“均匀分布”,而不考虑正交设计中的“整齐可比”性,试验次数随水平增加有连续性^[1],因而其试验点的代表性很强,可以大幅度地减少试验次数,缩短试验周期,并最大程度地反映试验

的各种信息。随着计算机的普及,这一理论很快付诸了实践。本文所介绍的均匀试验设计法,专用于橡胶配方设计,通过计算机进行试验设计安排、结果回归分析及配方优选。

1.1 程序流程图

本系统为珠江轮胎公司与广州凯迪科技发展有限公司共同开发的产品,共包括均匀试验设计法、正交试验设计法、回归分析法、帮助四大功能模块。其中均匀试验设计法又根据试验中所选取的水平数分为同水平数的均匀试验设计法与不同水平数的均匀试验设计法。考虑到篇幅,我们只选水平数相同中的有约束的均匀设计为流程图(见附图)。

1.2 运行环境及编程技巧

本系统适合于 IBM 系列原装机或 286 以上兼容机,2MB 以上内存,40MB 以上硬盘,适合任何中文系统(最佳为 UCDO S),共计 5MB 左右。用 C++ 语言编程,编程时需要对数学中行列式、不等式的求解等有相当程度的了解,如在编制有约束的均匀试验安排表中就需运用不等式的数值逼近法。

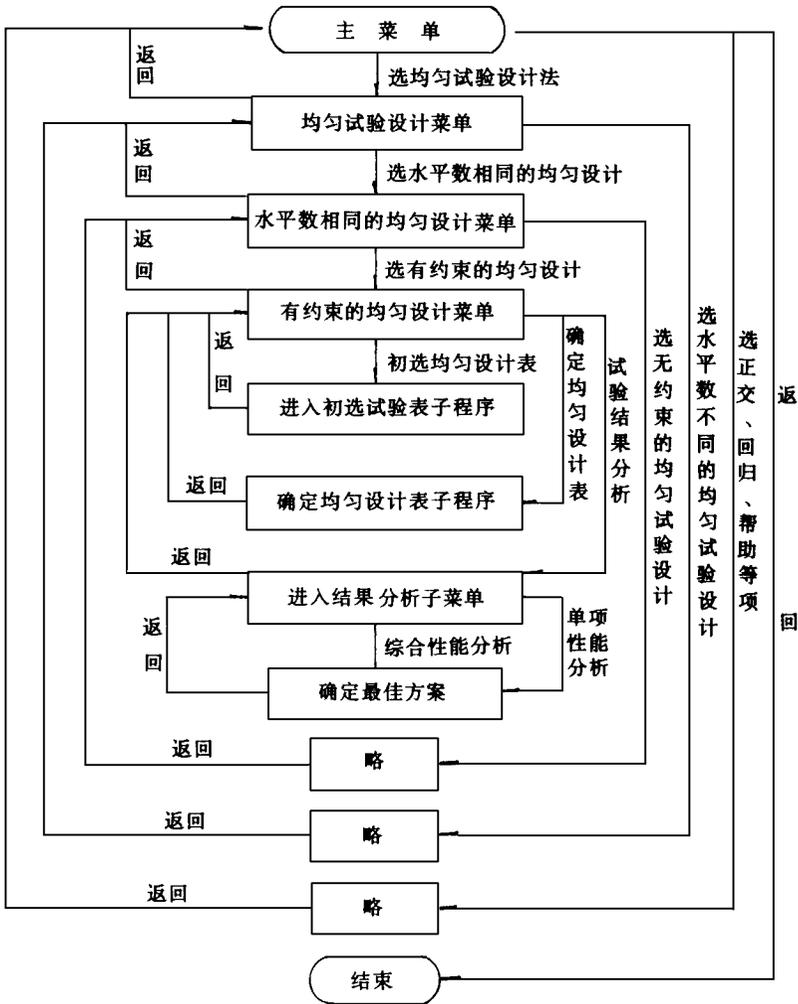
1.3 理论依据^[1]

理论依据见如下几个公式:

(1) 均匀试验表第 j 列产生法

$$U_{ij} = ih_j [\text{modn}]$$

作者简介 邹明清,男,1966年10月出生。工程师,1989年毕业于华南工学院高分子系橡胶工程与塑料工程专业,从事轮胎配方设计工作。已在《轮胎工业》上发表论文4篇。



附图 程序流程图

(2) 均匀设计表第 i 行第 j 列产生依据

$$U_{i+1,j} = \begin{cases} U_{ij} + h_j & (U_{ij} + h_j \leq n) \\ U_{ij} + h_j - n & (U_{ij} + h_j > n) \end{cases} \quad i = 1, \dots, n-1$$

式中, U 表示均匀设计; n 表示试验次数; $[\text{mod}n]$ 表示同余运算; h 表示生成向量。

(3) 均匀设计的误差分析

$$D(x_1, \dots, x_n) = \sup |n_x/n - U(x)|$$

式中, D 表示点集 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 在 C^m 中的偏差; x 表示任一向量, $x = (x_1, \dots, x_m) \in C^m$;

m 表示 m 维空间; $U(x)$ 为矩形 $[0, X]$ 的体积; n_x 为 x_1, \dots, x_n 中落入 $[0, X]$ 的点数。

(4) 有约束的均匀试验设计

$$C_{ki} = (2q_{ki} - 1)/2n \quad k = 1, \dots, n$$

$$X_{ki} = [1 - C_{ki}^{1/(s-i)}] \prod_{j=1}^{i-1} C_{kj}^{1/(s-j)}$$

$$i = 1, \dots, s-1,$$

$$X_{ks} = \prod_{j=1}^{s-1} C_{kj}^{1/(s-j)} \quad k = 1, \dots, n$$

式中, q_{ki} 表示均匀设计表 $U_n(n^{s-1})$ 中的元素; s 表示因素; $\{x_{ki}\}$ 表示对应于 n 和 s 的配方均匀设计。

以上试验表设置为均匀设计表的试验安排及本试验的均匀性误差分析。试验后进行的数据回归的理论依据略。

1.4 应用均匀试验设计进行橡胶配方设计步骤

(1) 根据试验的目的, 选择合适的因素和相应的水平。

(2) 初选适合该试验的均匀设计表。给试验者提供同因素下的各种试验安排, 包括试验使用表代号、试验次数及误差。

(3) 确定适合该试验的均匀设计表。根据所选的试验使用表及所考察因子给定的水平值范围来安排试验方案。

(4) 试验结果分析。根据试验结果进行计算机回归分析, 它包括回归系数的计算, 回归方程系数的显著性试验, 回归方程的显著性检验、复相关系数、标准偏差的无偏估计、实验值与计算值的对照及它们的偏差、单项性能预测以及综合性能的预测与配方优选。

2 应用均匀试验设计法扩大胎面胶胶粉用量试验

目前, 国内多数厂家认为活化胶粉在胎面胶中的掺用量不宜超过 10 份, 否则将导致胎面胶物理性能的严重下降, 尤其是耐磨性能, 但也有报道说胎面胶掺用 20 或 40 份胶粉后其耐磨性能反而提高^[2,3]。据资料介绍, 掺用胶粉后配方的配合体系, 尤其是硫化体系应作适当调整, 这样才能保证胶料的拉伸强度下降较小, 橡胶的耐疲劳和弹性滞后性能得到提高^[3]。针对这些报道, 我们决定利用均匀试验设计法, 作进一步扩大胶粉用量对胎面胶性能影响的试验, 分析有关因素的影响。

2.1 配方设计要求

通过均匀试验设计, 全面考察胶粉、油、硫磺及促进剂对胶料性能的影响。所设计的配方要求: 拉伸强度 17.0M Pa; 扯断伸长率 440%; 老化后磨耗 0.3; 压缩疲劳温升

46; 工艺性能良好, 成品胎实际使用性能不下降。

2.2 基本配方

NR/BR/SBR 100; 活性剂 7; 防老剂 3; 炭黑 55; 胶粉(细度为 60~80 目) 0~50; 油 5.0~12.5; 硫磺 1.0~2.5; 促进剂 NOBS 0.85~1.60。

2.3 均匀试验设计表选取

利用均匀试验设计考察上述 4 个因素, 试验最少可做 6 次, 最多可做 37 次, 如表 1 所示。考虑到试验结果分析的准确性和试验的劳动强度, 决定选用 A 117 试验表, 试验次数为 16 次。A 117 试验使用表如表 2 所示。

2.4 试验安排

根据所给油、胶粉、硫磺及促进剂的范围, 由表 2 安排试验, 如表 3 所示。

2.5 工艺与成品试验

小配合试验在 $\Phi 150\text{mm}$ 开炼机上进行。加料顺序为: 生胶、胶粉 小料 炭黑 油 硫磺。大料一段混炼采用 F-270 密炼机, 二段混炼加硫磺采用 XM-140/30 密炼机。物理性能测试在我公司实验室内按常规试验方法进行, 成品胎进行解剖、耐久试验以及实际里程试验。

2.6 结果与讨论

利用计算机回归进行单项性能及综合性能分析预测的过程省略。经过分析, 发现硫磺和促进剂对各项性能均有显著作用, 其次为胶粉, 而油仅对拉伸强度有显著作用。根据配方设计要求, 由计算机预测出的最佳组合有 8 组, 考虑到胶料的工艺性能, 确定试验配方为: 胶粉 20; 油 6; 硫磺 2.1; 促进剂 NOBS 1.2。在此条件下计算机预测的胶料性能: 拉伸强度 17.02M Pa, 扯断伸长率 447.1%, 撕裂强度 $90.122\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 压缩疲劳温升 45.78, 老化系数 0.6, 老化后磨耗量(1.61km) 0.298 cm^3 。

2.6.1 胶料的物理性能

按照上面所选定的试验配方, 小配合胶

表 1 初选均匀设计使用表

代号	试验次数	标准偏差
A 102	6	0.2990
A 103	7	0.4760
A 104	7	—
A 105	8	0.2709
A 106	9	0.4066
A 107	9	—
A 108	10	0.2236
A 109	11	0.3528
A 110	11	—
A 111	12	0.2233
A 112	13	0.3107
A 113	13	—
A 114	14	0.2091
A 115	15	0.2772
A 116	15	0.1551
A 117	16	0.1705
A 118	17	0.2501
A 119	17	0.1785
A 120	18	0.1754
A 121	19	0.2277
A 122	19	0.1807
A 123	20	0.1915
A 124	21	0.2089
A 125	21	0.1381
A 126	22	0.1392
A 127	23	0.1930
A 128	23	0.1310
A 129	24	0.1441
A 130	25	0.1793
A 131	25	0.1210
A 132	26	0.1311
A 133	27	0.1673
A 134	27	0.1189
A 135	28	0.1074
A 136	29	0.1596
A 137	28	0.1050
A 138	30	0.1325
A 139	31	0.1477
A 140	31	0.1100
A 141	37	0.1255

表 2 A117 试验表

序号	1	2	3	4
1	1	5	6	8
2	2	10	12	16
3	3	15	1	7
4	4	3	7	15
5	5	8	13	6
6	6	13	2	14
7	7	1	8	5
8	8	6	14	13
9	9	11	3	4
10	10	16	9	12
11	11	4	15	3
12	12	9	4	11
13	13	14	10	2
14	14	2	16	10
15	15	7	5	1
16	16	12	11	9

表 3 试验安排

序号	硫黄	促进剂	胶粉	油
		NOBS		
1	1.000	1.050	16.667	8.500
2	1.100	1.300	36.667	12.500
3	1.200	1.500	0.000	8.000
4	1.300	0.950	20.000	12.000
5	1.400	1.200	40.000	7.500
6	1.500	1.450	3.333	11.500
7	1.600	0.850	23.333	7.000
8	1.700	1.100	43.333	11.000
9	1.800	1.350	6.667	6.500
10	1.900	1.600	26.667	10.500
11	2.000	1.000	46.667	6.000
12	2.100	1.250	10.000	10.000
13	2.200	1.500	30.000	5.500
14	2.300	0.900	50.000	9.500
15	2.400	1.150	13.333	5.000
16	2.500	1.400	33.333	9.000

撕裂强度、扯断永久变形及磨耗量均下降,尤其是扯断伸长率下降明显,压缩永久变形和生热明显降低。

2.6.2 成品胎面胶的物理性能

成品胎面胶的物理性能见表 5。

由表 5 可知,试验胎面胶扯断伸长率较对比方案胎有明显下降,硬度及 300% 定伸应力明显提高,其它性能基本相近。

料和车间大料的物理性能见表 4。

由表 4 可知,无论是小配合试验还是车间大料试验,试验配方胶料性能均达到了配方设计要求。与对比方案配方相比,胶料的正硫化时间及焦烧时间均有所缩短;硬度和 300% 定伸应力提高,拉伸强度、扯断伸长率、

表4 小配合胶料和车间大料的物理性能对比

性能	小配合胶料						车间大料					
	对比配方			试验配方			对比配方			试验配方		
硫化仪数据(142)												
$t_{s2}/\text{m in}$	8.8			7.4			12.4			10.1		
$t_{90}/\text{m in}$	20.9			18.0			25.2			21.1		
门尼焦烧时间/ m in	24.5			22.5			47.0			33.5		
硫化时间(142)/ m in	40	50	70	40	50	70	40	50	70	40	50	70
邵尔A型硬度/度	68	68	67	66	66	66	68	68	69	68	70	70
拉伸强度/ M Pa	20.0	19.4	18.8	16.9	17.2	16.8	19.5	19.3	18.4	18.0	17.3	17.5
扯断伸长率/%	572	512	480	464	468	444	588	548	524	472	464	460
300%定伸应力/ M Pa	9.4	9.8	10.3	9.9	9.9	10.1	8.0	8.2	8.1	12.5	12.8	12.6
扯断永久变形/%	22	16	12	16	12	10	20	16	12	12	11	10
回弹值/%	—	33	—	—	34	—	—	36	—	—	35	—
撕裂强度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	109	—	110	99	—	98	103	—	102	115	—	108
磨耗量(1.61km)/ cm^3	0.195	—	0.241	0.178	—	0.194	0.160	—	0.165	0.110	—	0.147
伸张疲劳系数	0.95	—	—	0.88	—	—	0.94	—	—	1.02	—	—
压缩疲劳试验												
永久变形/%	—	7.48	—	—	5.91	—	—	8.25	—	—	7.67	—
温升/	—	49.5	—	—	39.0	—	—	51.5	—	—	37.0	—
100 × 24h 热空气老化后												
拉伸性能变化率/%	- 44	—	- 36	- 44	—	- 41	- 45	—	- 34	- 43	—	- 32
撕裂强度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	103	—	104	83	—	80	81	—	81	80	—	78
磨耗量(1.61km)/ cm^3	0.259	—	0.313	0.198	—	0.231	0.265	—	0.265	0.176	—	0.204

注: 对比配方: 生胶 100; 活性剂 7; 防老剂 3; 炭黑 55; 油 8; 胶粉 10; 硫化剂 2.5, 合计 185.5。

表5 9.00- 20 14PR 成品胎面胶的物理性能

性能	对比方案胎			试验胎		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层
拉伸强度/ M Pa	18.5	19.0	18.6	18.5	18.3	18.1
扯断伸长率/%	492	492	500	464	448	464
300%定伸应力/ M Pa	8.9	9.4	9.4	11.5	12.5	12.5
邵尔A型硬度/度	62	61	62	66	66	66
扯断永久变形/%	12	12	10	8	9	9
70 × 24h 老化后						
强伸性能变化率/%	- 6	- 5	- 12	16	+ 3	+ 1
磨耗量(1.61km)/ cm^3	—	0.077	—	—	0.074	—
胎面胶与缓冲层间						
粘合强度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	—	扯不开	—	—	扯不开	—

2.6.3 9.00- 20 14PR 成品胎耐久性

9.00- 20 14PR 试验胎耐久性试验累计行驶时间 117h, 累计行驶里程 6 435km, 未损坏, 与同期正常生产胎接近(耐久性试验 119.67h 因肩空而损坏)。

2.6.4 工艺性能

采用两段混炼, 一段用 F-270 密炼机, 二段加硫磺用 XM-140/30 密炼机, 混炼工艺均

与正常胎面胶相同, 胶料成团性好, 与正常生产胶相比, 其脱辊的趋势有所增大, 但不影响工人操作, 所出胶片表面也显粗糙些。

胎面挤出采用机外复合挤出, 工人反映热炼时易操作, 挤出温度稍有降低, 胎面尺寸稳定性好, 重量均一, 无焦烧现象, 符合施工表设计要求。

成型时胎面接头牢固, 无脱开现象。硫化

后的成品表面光亮, 工艺正常。

2.6.5 里程试验

为了进一步验证掺用 20 份胶粉后, 轮胎的实际使用情况, 我们特试制了一批 9.00-20 14PR 轮胎, 发往广东省汽车站、广东揭阳汽车站、广东饶平汽车站做实际里程考察试验。

气候特点: 全年炎热时间长, 平均气温高, 上半年尤其是春季气候潮湿、雨水多。

广东省汽车站: 装用在 45 座解放牌普通客车及 38 座卧铺客车上, 日行里程较高, 一般在 280km 以上, 最高达 574km, 平均速度为 $85 \sim 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 路面以水泥路面为主。

揭阳汽车站: 装用在 40 座的东风大客车上, 行驶路线主要是: 广州、深圳、韶关、福建、江西等地, 日行里程高, 路面多以水泥、沥青

为主, 少部分山区有沙石路。

饶平汽车站: 车型以扬州东风卧铺为主, 行驶路线为饶平、广州、深圳、珠海, 日行里程不低于 400km, 路面均为水泥路面。

3 个试验点的具体试验结果如表 6 所示。

由表 6 可知, 试验胎与对比方案胎相比, 总行驶里程及累计磨损均稍低于对比方案胎。从表 6 数据来看, 广州与饶平两站试验胎与对比方案胎总行驶里程预计可达到 11 万 km 以上, 试验胎在两站各有一辆车累计磨损超过 $10 \text{ 500 km} \cdot \text{mm}^{-1}$, 估计总行驶里程将达到 14.5 万 km。3 个车站以及试胎司机均对试胎结果表示满意。可以说, 从实际使用情况来看, 该优选配方完全达到了配方设计的要求。

表 6 里程试验结果对比

试验点	试验方案	新胎花纹	行驶里程/	单位磨损/	尚余花纹
		深度/mm	km	$\text{km} \cdot \text{mm}^{-1}$	深度/mm
广州	试验胎	16.3	68 212	8 404	8.0
	对比方案胎	16.5	75 406	8 988	7.9
揭阳	试验胎	16.2	84 013	5 664	1.4
	对比方案胎	16.3	85 362	5 823	1.5
饶平	试验胎	16.1	75 198	8 786	7.4
	对比方案胎	16.3	82 614	9 180	7.0

3 结论

(1) 应用均匀试验设计法进行轮胎配方设计, 具有试验次数少、劳动强度低、试验点在试验范围内“均匀分布”、结果分析准确的特点。

(2) 用均匀试验设计法优选出来的配方, 经小配合、车间大料、成品性能试验以及实际里程试验, 基本达到了设计要求, 其工艺性能良好, 实际使用总行驶里程稍低于同期对比方案胎, 未发现其它使用质量问题。

(3) 从此次的初步试验情况来看, 胎面胶掺用 20 份胶粉是可行的, 并可降低胶料成本 $0.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 按珠江公司 1995 年生产量计, 预计一年可节约资金 240 万元以上, 经济效

益显著。

要说明的是, 此次试验是第一次用均匀试验设计法进行轮胎配方设计, 某些不成熟的地方有待于今后进一步完善。胶粉在轮胎配方中的进一步扩大应用, 此次也只是一个初步尝试, 有待于今后更深入、更全面地研究、试验、考察。

参考文献

- 1 方开泰. 均匀设计与均匀设计表. 北京: 科学出版社, 1994: 14~61
- 2 李春田. 活性胶粉的表面处理方法及其应用. 橡胶工业, 1992; 39(12): 756
- 3 D . 江皖兰, 刘润祺译. 含硫化胶粉胶料的性能及应用. 橡胶工业, 1995; 42(2): 105~107

Application of Uniform Experimental Design Method to Tire Formula

Zou Mingqing, Cai Dayang and Li Yongchi

(Guangzhou Pearl River Tire Corp. Ltd 510828)

Ding Xinlin

(Guangzhou Tianhe Kaidi Science and Technology Development Corp. Ltd 510630)

Abstract The uniform experimental design method in which only the uniform distribution of the test points in the test scope is considered features less test times, shorter period and more precious analytical result. An optimal tire tread formula with high level of crumb is obtained with the said method. A tread compound with 20 phr of crumb shows good physical properties and lower cost resulting in a good endurance of finished tire and a similar tread life to that of the existing product.

Keywords uniform experimental design, formula design, tread compound, crumb

荣成市橡胶厂两个技改项目 通过省级验收

山东成山橡胶集团荣成橡胶厂完善子午线轮胎生产线和斜交轮胎优质轻量化两个技术改造项目日前通过省级验收。

斜交轮胎优质轻量化项目于1995年11月至1996年11月进行全系统满负荷试生产1年,共生产斜交轮胎321万套,产品全部达到DOT标准,轮胎成本每条降低19.5元,全年可为企业增加利润2828万元,轮胎使用寿命可延长15%,节油7%,每年可间接为社会多创效益2亿元。完善后的子午线轮胎生产线可新增产优质子午线轮胎30万套,新增工业产值1.5亿元,利润2250万元,出口创汇200美元。其中“60”和“65”两个系列的43种规格低断面无内胎子午线轮胎分别于1990,1992和1994年通过化工部鉴定,并被国家科委、经贸委授予1992~1993年度国家

级新产品奖,同时获得1994~1995年度化工部科技进步二等奖和山东省科技进步二等奖,并被列入1994年化工部重大科技成果,1996年又被评为国家级科技二等奖。

最近,负责这两个项目验收的委员会在听取了该厂有关部门的验收汇报并进行实地考察以后认为:两个技术改造项目新增和引进的设备精良、自动化程度高、生产效率高;完善后的子午线轮胎生产线完整健全,产品设计和生产工艺属国内先进水平,且质量稳定、用户满意,产品通过化工部鉴定和ISO9000质量认证,“三废”处理得当,符合劳动保护、岗位卫生、消防安全等诸方面的要求,而且投资收益理想,经济效益和社会效益显著,达到和超过了预期的效益指标。经验收委员会审议同意一次性验收合格。

(成山报社 王茂生供稿)