

# 均匀设计在橡胶配方研究中的应用

高齐圣 隋树林 孟宪德

(青岛化工学院 266042)

**摘要** 运用均匀设计法,通过多属性决策方法,定量地求得综合性能好的橡胶配方。对三因素九水平的 IR 配方的优化表明,仅进行 9 次配方试验就可得到综合性能较好的橡胶配方。

**关键词** 均匀设计,橡胶配方,多属性决策法

橡胶配方优化是一个多因素多指标问题。为了找到某橡胶制品的最佳配方,需进行相应的试验设计,以使用尽量少的试验次数达到预期的目的。

以往,橡胶配方试验设计一般采用正交设计和组合设计的方法,其中尤以二次通用旋转设计为配方工程师所常用<sup>[1]</sup>。正交设计和组合设计的特点是在各因素的考察范围内使试验点“均匀分散,整齐可比”。“均匀分散”可使所选取的少量试验点均匀散布在所考察的范围内,各试验点具有代表性,以此减少试验次数。“整齐可比”可使试验结果的分析非常方便,便于找出主要因素和次要因素及最优试验条件。基于上述原因,采用多因素及多水平的正交设计和组合设计时,其试验次数比较多,在实际应用过程中实现起来较困难。如三因素五水平试验,若采用二次通用旋转试验设计方法,需做 20 次配方试验。

“均匀设计”是中科院数学所方开泰教授将数论用于试验设计而创立的一种新的试验方法<sup>[2]</sup>,其基本思想就是抛开正交设计中“整齐可比”性而只考虑试验点的“均匀分散”性,即让试验点在所考察的试验范围内尽量均匀地分布。由于不再考虑“整齐可比”性,因而用均匀设计安排配方试验可大大减少试验次数,且试验次数与各因素所取的水平数相同。

## 1 均匀设计及均匀表的使用

与正交设计、组合设计类似,均匀设计也

是通过设计均匀表来安排试验。均匀表的表头形式是  $U_n(t^s)$ ,  $U$  表示均匀表,  $n$  表示试验次数,  $t$  表示水平数,  $s$  表示最多可安排的因素数。这里  $n=t, s=t-1$ , 即试验次数与所取因素的水平数相同,最多可安排的因素数比水平数少 1。如三因素配方试验可有如表 1—3 所示的表头设计。

## 2 利用多属性决策寻找最佳配方

按上述均匀表做橡胶配方试验得到试验数据后,即可用以下两种方法寻找橡胶制品的最佳配方<sup>[3]</sup>。

表 1 水平数  $t=5$  时,  $U_5(5^3)$

试验配方	配合因素		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
①	1	2	3
②	2	4	1
③	3	1	4
④	4	3	2
⑤	5	5	5

表 2 水平数  $t=7$  时,  $U_7(7^3)$

试验配方	配合因素		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
①	1	2	3
②	2	4	6
③	3	6	2
④	4	1	5
⑤	5	3	1
⑥	6	5	4
⑦	7	7	7

表3 水平数  $t=9$  时,  $U_9(9^3)$ 

试验配方	配合因素		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
①	1	4	7
②	2	8	5
③	3	3	3
④	4	7	1
⑤	5	2	8
⑥	6	6	6
⑦	7	1	4
⑧	8	5	2
⑨	9	9	9

(1) 利用多属性决策方法(MADM), 从已做过的试验方案中挑选综合性能最好的试验配方作为最佳橡胶配方。这种方法一般会得到满意的结果。

(2) 将试验数据作回归分析。建立胶料性能和配合剂组分之间的回归方程, 进而用最优化方法寻找最佳橡胶配方。这种方法有希望得到更为满意的橡胶配方, 但所需要的数学基础较多, 本文不作讨论。

对方法(1)作如下的讨论。

设  $n$  次试验数据矩阵如下:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1k} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nk} \end{pmatrix}$$

其中  $k$  表示所考察胶料的性能指标项数,  $y_{ij}$  代表胶料第  $j$  项性能指标的第  $i$  次试验结果。

$$\text{记 } y_j^* = \max_{1 \leq i \leq n} \{y_{ij}\} \quad y_j^- = \min_{1 \leq i \leq n} \{y_{ij}\}$$

根据橡胶配方工艺实际, 胶料性能指标类型分为效益型、成本型和区间型。

将试验数据矩阵  $Y$  作如下规范化处理:

(I) 第  $j$  项指标为效益型时

$$g_{ij} = \frac{y_{ij} - y_j^-}{y_j^* - y_j^-}$$

(II) 第  $j$  项指标为成本型时

$$g_{ij} = \frac{y_j^* - y_{ij}}{y_j^* - y_j^-}$$

(III) 第  $j$  项指标为区间型时, 记标准值为  $[L_j, R_j]$

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{L_j - y_{ij}}{\max\{L_j - y_j^-, y_j^* - R_j\}}, & y_{ij} < L_j \\ 1, & L_j \leq y_{ij} \leq R_j \\ 1 - \frac{y_{ij} - R_j}{\max\{L_j - y_j^-, y_j^* - R_j\}}, & y_{ij} > R_j \end{cases}$$

再作归一化处理, 得

$$g_{ij} = g_{ij} / \sum_{j=1}^k g_{ij}$$

定义如下信息效用函数作为橡胶配方的综合性能评分<sup>[4]</sup>:

$$I_i = - \frac{1}{\ln k} \sum_{j=1}^k g_{ij} \cdot \ln(g_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$\{I_i\}$  的大小即反映了橡胶配方综合性能的优劣。若  $I_k = \max_{1 \leq i \leq n} \{I_i\}$ , 则第  $k$  号配方即为综合性能最好的橡胶配方。

### 3 橡胶配方实例

以 IR 配方为例, 主要考虑的配合剂为半补强炭黑( $x_1$ )、硫黄( $x_2$ )和促进剂 TMTD( $x_3$ ), 其它配合剂都固定在某一标准上。考虑的胶料性能为拉伸强度  $y_1$  (MPa)、扯断伸长率  $y_2$  (%), 撕裂强度  $y_3$  (kN · m<sup>-1</sup>) 和扯断永久变形  $y_4$  (%)。

配合剂用量(份)范围为:

$$20 \leq x_1 \leq 40$$

$$0.8 \leq x_2 \leq 2$$

$$0.8 \leq x_3 \leq 2.2$$

选取均匀设计表头为  $U_9(9^3)$ , 相应试验方案安排及试验结果见表 4。

胶料性能的要求值为:

$$y_1 \geq 12 \text{ (MPa)}$$

$$y_2 \geq 600 \text{ (%)}$$

$$y_3 \geq 40 \text{ (kN} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$$

$$y_4 \leq 33 \text{ (%)}$$

表 4 中  $y_1, y_2, y_3$  和  $y_4$  项指标的前 3 项为“效益型”, 后 1 项为“成本型”。将其分别按下式处理:

$$g_{ij} = \frac{y_{ij} - y_j^-}{y_j^* - y_j^-} \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad j = 1, 2, 3$$

表 4 配方均匀试验设计方案及结果

试验配方	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
①	20	1.25	1.85	13.920	690.64	42.91	32.72
②	22	1.85	1.50	13.704	703.23	45.36	32.96
③	25	1.10	1.15	14.921	751.36	54.60	31.30
④	27	1.70	0.80	15.193	763.43	57.80	34.10
⑤	30	0.95	2.025	14.242	729.44	47.85	35.51
⑥	32	1.55	1.675	13.531	700.58	47.78	35.93
⑦	35	0.80	1.325	13.504	746.66	50.02	33.85
⑧	37	1.40	0.975	13.281	726.30	50.71	36.83
⑨	40	2.00	2.20	12.431	606.54	39.96	43.70

$$g_{ij} = \frac{y_j^{**} - y_{ij}}{y_j^{**} - y_j^*} \quad i=1,2,\dots,9 \quad j=4$$

其中  $y_j^{**} = \max_{1 \leq i \leq 9} \{y_{ij}\}$ ,  $y_j^* = \min_{1 \leq i \leq 9} \{y_{ij}\}$

得到

$$(g_{ij})_{9 \times 4} = \begin{pmatrix} 0.5391 & 0.5360 & 0.1654 & 0.8855 \\ 0.4609 & 0.6163 & 0.3027 & 0.8694 \\ 0.9015 & 0.9230 & 0.8206 & 1.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.7742 \\ 0.6557 & 0.7260 & 0.4423 & 0.6605 \\ 0.3983 & 0.5994 & 0.4383 & 0.6266 \\ 0.3885 & 0.8931 & 0.5639 & 0.7944 \\ 0.3077 & 0.7633 & 0.6026 & 0.5540 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

然后作归一化处理

$$g_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sum_{j=1}^4 g_{ij}} \quad i=1,2,\dots,9 \quad j=1,2,3,4$$

得到

$$(g_{ij})_{9 \times 4} = \begin{pmatrix} 0.2536 & 0.2521 & 0.07778 & 0.4165 \\ 0.2049 & 0.2740 & 0.1346 & 0.3865 \\ 0.2473 & 0.2532 & 0.2251 & 0.2743 \\ 0.2650 & 0.2650 & 0.2650 & 0.2051 \\ 0.2639 & 0.2922 & 0.1780 & 0.2659 \\ 0.1931 & 0.2906 & 0.2125 & 0.3038 \\ 0.1472 & 0.3383 & 0.2136 & 0.3009 \\ 0.1381 & 0.3426 & 0.2705 & 0.2487 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

最后按

$$I_i = -\frac{1}{\ln 4} \sum_{j=1}^4 g_{ij} \cdot \ln(g_{ij}) \quad i=1,2,\dots,9$$

计算均匀设计方案中信息效用值,得到试验方案中 9 个配方的综合性能值为:0.9082, 0.9504, 0.9982, 0.9959, 0.9886, 0.9867, 0.9665, 0.9668, 0.

配方优劣顺序为:

$$\textcircled{3} > \textcircled{4} > \textcircled{5} > \textcircled{6} > \textcircled{8} > \textcircled{7} > \textcircled{2} > \textcircled{1} > \textcircled{9}$$

其中 3 号配方最好,为

$$x_1=25, x_2=1.10, x_3=1.15$$

### 参考文献

- 1 朱伟勇. 最优试验设计理论与应用. 沈阳:辽宁人民出版社,1981:296—308
- 2 方开泰. 均匀设计. 应用数学学报,1980;(3):363—372
- 3 梁守智等. 橡胶工业手册(第四分册). 北京:化学工业出版社,1989:520—555
- 4 载昌均. 信息效用函数与 Wundt 曲线. 高校应用数学学报,1991;(2):101

收修改稿日期 1996-03-18

## Application of Uniform Design to Study of Rubber Formulation

Gao Qisheng, Sui Shulin and Meng Xiande

(Qingdao Institute of Chemical Technology 266042)

**Abstract** The rubber formula with good comprehensive properties could be quantitatively obtained by using Uniform Design Method and Multi-attribute Determination Method (MADM). The optimization of the IR formula with 3 factors and 9 levels showed that a formula with better comprehensive properties could be obtained with only 9 formulation tests.

**Keywords** uniform design, rubber formula, multi-attribute determination method

### 我国汽车用橡胶制品发展前景

据统计,目前我国汽车工业用胶粘剂和密封胶年消耗量已达2.998万t,并且将逐年增多。预计2000—2005年,我国汽车工业共需各种类型的胶粘剂和密封胶49种,其中车身用胶10种,内饰胶17种,发动机和底盘胶16种,压敏胶带6种,总需求量将达到5.636万t。其中PVC塑溶胶的需求量占首位,为总需求量的35.1%。其余依次为NBR占1.94%,环氧胶占1.52%,聚氨酯胶占1.08%,有机硅胶占0.9%。

近10年来,我国汽车工业发展速度骤然加快,引进了一些车型,相继从组装转入国产化,装配生产一些高性能、高质量的客车及轿车,也开始生产这些车型在原设计中大量使用的胶粘剂和密封胶,而且将对材料品种和质量的要求提高到接近当代世界水平。

但目前我国汽车用胶仍然是落后的,品种单一,选择余地小,难以满足需求,导致了大量进口。即使到2000—2005年,我国胶粘剂和密封胶的生产虽然会有较大发展,但汽车工业用胶仍会处于一般水平,并以普通型为主。

据有关方面预测,今后需要重点发展的胶粘剂和密封胶的品种及项目有:风挡玻璃胶粘剂、点焊密封胶、顶篷胶粘剂、次结构型防震胶、折边胶粘剂、IIR胶粘剂、车身焊边密封胶、微胶囊厌氧胶、刹车蹄片胶粘剂、热熔胶、高剥离强度压敏胶带、PVC塑溶胶等。

(摘自《中国化工报》,1996.6.17)

### LCBR工业试验获得成功

由北京燕山石油化工公司研究院研究开发的高抗冲聚苯乙烯用低顺式聚丁二烯橡胶(LCBR)技术,最近在燕山石化合成橡胶厂成功地进行了万吨级工业试验。

LCBR是一种性能优良的合成橡胶,具有优异的回弹性、低温抗屈挠性、动态性能和补强填充性,以色泽浅、透明、凝胶含量低而著称,也是塑料抗冲改性的首选材料。燕山石化开发的LCBR经使用表明,完全可以取代进口产品。LCBR的开发成功,不仅将大大改变我国LCBR长期以来依赖进口的局面,而且也为我国塑料改性用胶提供了来源。

(摘自《中国化工报》,1996.7.1)