

回归分析法在橡胶配方试验中的应用

姚钟尧, 林惠音, 梁士慧*
(华南理工大学 高分子系 广东 广州 510641)

摘要: 应用均匀设计法设计橡胶配方, 研究胶粉、白炭黑、炭黑和棕色树脂粉 4 种填料对 SBR 胶料密度、硬度、弯曲屈挠、耐磨耗等 7 项性能的影响。采用回归分析法拟合试验数据, 得到优选的定量描述性能与填料变量之间关系的诸回归方程, 利用它们优化和预测配方。验证试验表明, 所优选的配方密度小、硬度高、其它性能基本达到要求。全面显示了回归分析法在橡胶配方试验中应用的全过程, 着重说明了使用回归分析法时不能忽略的几个问题: 试验总数、回归模型、回归方程和回归系数的显著性检验、剩余标准离差、回归方程的优选和验证试验。

关键词: 回归分析; 均匀设计; 橡胶配方; SBR; 填料
中图分类号: T Q330. 6⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-890X(2001)07-0393-06

橡胶配方试验是多因素、多目标试验, 现代橡胶配方设计和试验应当而且必须借助试验设计、回归分析、多目标最优化等, 因而也必须借助计算机和计算机技术。试验设计、回归分析和多目标最优化这三者在橡胶配方试验中是相互联系和相互促进的, 而随着试验设计的发展(例如均匀设计法的创立和应用^[1]及计算机应用日益普及, 回归分析法在其中的基础性和重要性更加凸现。前文^[2~4]包含回归分析法的计算机辅助试验研究系统(简称 CAR 系统)及其应用。参考文献[3]和[4]实际上是学习回归分析法和均匀设计法的体会, 使用的是他人的试验数据, 然而, 这些数据不能满足全面说明回归分析法应用的需要。最近做了一些均匀设计的橡胶配方试验, 积累了一批数据, 足可比较全面说明回归分析法的应用。本文正是利用这批数据着重展示在橡胶配方试验中怎样全面应用回归分析法。

1 试验数据说明

应用均匀设计法的橡胶配方试验数据如表

* 华南理工大学高分子系 1999 届毕业生。
作者简介: 姚钟尧(1945-) 男, 广东潮阳人, 华南理工大学副教授, 工学硕士, 从事橡胶应用科技、试验设计应用和计算机应用教学和研究工作。

1 所示, 这次配方试验是改性 SBR 填充胶粉等 4 种填料(变量)的试验, 它们的变化范围是: 胶粉用量(X_1) 8~20 份; 白炭黑用量(X_2) 4~16 份; 炭黑用量(X_3) 4~12 份; 棕色树脂粉用量(X_4) 8~16 份。

希望通过试验得到轻而硬的 SBR 胶料, 期望的诸性能指标和优先考虑顺序如下: 密度(Y_1) < 1.15 ; 邵尔 A 型硬度(Y_2) 85~90 度; 屈挠疲劳寿命(Y_3) ≥ 5 万次; 阿克隆磨耗量(Y_4) $< 0.115 \text{ cm}^3$; 撕裂强度(Y_5) $\geq 50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$; 扯断伸长率(Y_6) $\geq 300\%$; 拉伸强度(Y_7) $\geq 12 \text{ MPa}$ 。上述性能要求是根据经验和主观愿望初定的, 首先要保证胶料轻而硬, Y_1 和 Y_2 指标不可改变, 其次考虑耐屈挠和耐磨耗性, 最后兼顾其它性能。

表 1 中数据由三部分组成, 前 10 个配方是用混合水平均匀设计表 $U_{10}(10^2 \times 5^2)$ 设计的; 第 11~16 号配方是“优选和验证配方”; 19 号配方是根据下文的回归方程式(7)和(10)优选的配方, 0^{*}号配方是预测配方, 19 号和 0^{*}号配方的各项性能预测值是用第 6 节的方程式计算的, 并放在括号中以示区别。

2 回归模型、试验总次数和逐步回归分析

要得到橡胶配方性能-组分关系的经验公

表 1 以 $U_{10}(10^2 \times 5^2)$ 设计为主体的试验配方及其性能测试结果

试验序号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7
1	8	8	6	12	1.128	85	2.46	0.153	25.34	140	9.15
2	9	12	10	16	1.160	88	3.26	0.134	26.96	230	14.14
3	10	15	4	10	1.145	86	3.30	0.175	25.25	178	10.09
4	11	4	8	16	1.129	85	3.64	0.154	24.82	190	10.78
5	12	10	12	10	1.152	86	1.46	0.157	24.75	221	14.54
6	13	13	4	14	1.141	86	5.93	0.171	25.60	275	13.08
7	14	16	8	8	1.146	86	4.55	0.099	27.56	203	12.09
8	15	6	12	14	1.149	88	5.43	0.121	28.47	156	9.80
9	16	11	6	8	1.134	84	3.82	0.142	26.19	260	13.74
10	17	14	10	12	1.158	87	6.64	0.134	27.74	257	14.25
11	16	4	8	15	1.128	85	4.24	0.217	25.16	199	11.11
12	16	8	10	15	1.149	87	5.23	0.154	25.50	235	14.42
13	17	8	9	16	1.145	87	7.73	0.163	25.76	248	14.12
14	17	12	10	16	1.162	89	7.51	0.146	26.73	251	14.67
15	18	6	11	16	1.148	88	6.41	0.139	27.55	225	13.39
16	20	10	7	15	1.137	86	11.64	0.157	27.39	281	12.95
19	20	9	9	14	1.144	86	7.51	0.188	25.17	234	11.23
					(1.144)	(86.5)	(10.69)	(0.151)	(27.01)	(248)	(14.03)
0*	20	16	9	8	(1.154)	(85.8)	(10.69)	(0.122)	(28.22)	(292)	(14.68)

式,必须借助回归分析法拟合配方数据。这时应当首先考虑采用什么回归模型、至少要做多少次试验。如果不注意或忽视这一点,便不够分析或不可分析,枉做试验。

一般认为橡胶配方性能用二次多项式模型拟合便足够了,因此,多元线性模型和多元二次模型是橡胶配方试验常用的回归模型。

多元线性模型:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \cdots + b_pX_p + \epsilon \tag{1}$$

多元二次不含交叉乘积项模型:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^p b_iX_i + \sum_{i=1}^p b_{ii}X_i^2 + \epsilon \tag{2}$$

多元二次模型:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^p b_iX_i + \sum_{i=1}^p b_{ii}X_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij}X_iX_j + \epsilon \tag{3}$$

式中 ϵ 是随机误差。

确定了回归模型之后便可确定试验总数 N 。根据数理统计原理:

$$N = 1 + \text{全部因子自由度之和} + \text{误差自由度} \tag{4}$$

p 个变量的二次完全方程包括常数项共有 q 个回归系数。

$$q = 1 + C_p^1 + C_p^1 + C_p^2 = C_{p+2}^2$$

要求

$$N > q \text{ 或 } N > 1 + p(p+3)/2 \tag{5}$$

就本例来说有 4 个变量,如果采用四元线性模型,则表 1 中第 1 部分的数据,即 $U_{10}(10^2 \times 5^2)$ 表设计的 10 次试验数据就足够了。如果采用四元二次不包含交叉乘积项的方程拟合,包括常数项共有 9 个回归系数,10 次试验理论上也认为可以。如果采用四元二次完全方程分析,包括常数项共有 15 个回归系数,10 次试验便不可能估计 15 个回归系数,至少需做 16 次试验。因此,首先做 $U_{10}(10^2 \times 5^2)$ 表设计的 10 次试验进行均匀设计法和回归模型的尝试和探索。分析结果表明,有些性能需要采用四元二次完全方程模型拟合。然后补做一些试验以满足分析的需要,这就是产生表 1 中第 2 部分数据的原因之一。由于采用了均匀设计法设计试验,因此,可以随意把表 1 中第 1 部分和第 2 部分的数据合并(第 1~16 号配方)进行分析。本文诸性能的回归方程正是用这 16 个配方数据拟合得到的。

在采用多元线性或二次回归模型时,往往使用逐步回归分析法,其原因有 2 个。一是当回归方程显著而有回归系数不显著时,则应考虑在回归方程中剔除不显著的变量项,重新用

最小二乘法估计回归系数,建立新的回归方程,但这又需要重新进行大量的计算。若需要多次剔除变量,这种计算便更麻烦。另一个原因是,当 p 较大时, N 通常不能满足式(5),于是有必要从式(3)中选择贡献显著的项和剔除不重要的项。这两种情况常常使用逐步回归分析法而不使用通常的回归分析法。

逐步回归分析法是回归分析中的一种筛选变量的技术。使用它必须预先确定把变量引入方程和把变量剔除方程的 F 值 (F_Y 和 F_T),通常令 $F_Y = F_T$ 。在本文中用逐步回归分析法得到的回归方程都注明 F_Y 和 F_T 值。

方开泰先生在他的专著^[1]中用 $U_7(7^6)$ 表设计的 7 次试验做了三元二次型逐步回归;和用 $U_{17}(17^{16})$ 表设计的 17 次试验做了六元二次型逐步回归。仿照这种做法,我们曾用 $U_{10}(10^2 \times 5^2)$ 表设计的 10 次试验(即表 1 的第 1 部分数据)做了四元二次型逐步回归。然而,我们不知道为什么可以这样做。为了稳妥和对比,本文改用表 1 中的 16 次试验数据进行回归分析。

3 回归方程和回归系数的显著性检验

本文采用了式(1)、(2)和(3)所表征的回归模型,既使用通常的回归分析,也使用逐步回归分析。这些方法的原理、计算方法和计算过程以及本文涉及的其它回归分析内容可参阅文献[1]和[5~7]。

用观测数据拟合求得回归方程的目的之一就是要利用回归方程进行预测或控制。只有经检验显著的回归方程才有应用价值。预测或控制则要讲究精度,这涉及标准剩余离差。应当强调回归方程和回归系数的显著性检验,明确方程的标准剩余离差 σ 的作用。在本文中,每个回归方程都附有对回归方程和回归系数作显著性检验的 F 值和 t 值、回归自由度 f_H 和剩余自由度 f_S 、标准剩余离差 σ 值,都对回归方程和回归系数作了显著性检验。

为了对回归方程和回归系数作显著性检验,查表可得有关的 F 临界值 $F_\alpha(f_H, f_S)$ 和 t 临界值 $t_\alpha(f_S)$ 如下: $F_{0.10}(4, 11) = 2.54$,

$$\begin{aligned} F_{0.05}(4, 11) &= 3.36, F_{0.01}(4, 11) = 5.67; \\ F_{0.05}(1, 14) &= 4.60, F_{0.01}(1, 14) = 8.86; \\ F_{0.05}(3, 12) &= 3.49, F_{0.01}(3, 12) = 5.95; \\ F_{0.01}(2, 13) &= 6.70; t_{0.1}(11) = 1.796, \\ t_{0.05}(11) &= 2.201, t_{0.01}(11) = 3.106. \end{aligned}$$

显著性水平 α 可取 0.1, 0.05 和 0.01。显著性水平 α 越小,结论越可靠。在数理统计中,回归方程和回归系数在 $\alpha = 0.01$ 和 0.05 下显著,分别叫做很显著和显著。在本文中,如果回归方程和回归系数在 $\alpha > 0.1$ 下才显著,则称为不显著。回归方程不显著则意味着回归方程不可信。回归系数不显著就是该变量项对 Y 的作用可忽略,它的回归系数可取为零。

4 回归模型的选择

用胶粉、白炭黑、炭黑和棕色树脂粉填充 SBR,以便得到密度小、硬度高及其它性能良好的胶料,根据专业知识或经验可用四元线性或二次型模型求得性能组分关系回归方程。下面以获得磨耗性能回归方程为例,说明回归模型的使用。

首先用四元线性模型式(1)拟合表 1 中前 16 个配方的磨耗性能数据得到回归方程(6):

$$Y_4 = 0.2032 + 3.8549 \times 10^{-4} X_1 - 3.0644 \times 10^{-3} X_2 - 6.0004 \times 10^{-3} X_3 + 1.7272 \times 10^{-3} X_4 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F &= 2.0976, f_H = 4, f_S = 11, \sigma = 0.0227; \\ t_1 &= 0.2286, t_2 = 1.9573, t_3 = 2.5877, t_4 = 0.8585. \end{aligned}$$

因为 $F < F_{0.10}(4, 11)$, 所以方程(6)不显著,因此没有必要作回归系数的显著性检验。不过从上述 t 值可看出 X_1, X_2 和 X_4 是不显著的。

改用四元线性逐步回归分析法拟合这批数据,令 $F_Y = F_T = 3.46$, 则无一变量可引入方程。对照方程(6)下的统计值,不难理解这种结果。由此可知不能用多元线性模型拟合磨耗与所设定的 4 个变量之间的关系。

试用四元二次不含交叉乘积项模型式(2)和使用逐步回归分析法拟合这批数据,令 $F_Y =$

$F_T=3.46$, 无一变量可引入方程, 说明模型式(2)不合适。使用四元二次完全方程模型式(3)和逐步回归分析法拟合, 同样令 $F_Y = F_T = 3.46$, 则可得方程(7):

$$Y_4 = 0.1871 - 4.517 \times 10^{-4} X_2 X_3 \quad (7)$$

$$F=8.22, f_H=1, f_S=14, \sigma=0.0212.$$

因为 $F_{0.05}(1, 14) < F < F_{0.01}(1, 14)$, 所以方程(4)在 $\alpha=0.05$ 下显著。于是选定方程(7)描述磨耗性能与填料变量之间的关系, 方程(7)表示只有 X_2 和 X_3 的乘积项(即白炭黑和炭黑的交互作用)影响磨耗性能。

5 回归方程的选择

如前所述, 只有用四元二次模型的逐步回归分析才能符合磨耗性能的经验公式, 这是一种情况。另一种情况是用模型式(1)、(2)和(3)回归分析都能得到显著的回归方程, 这时就涉及到优选回归方程的问题, 下面以密度性能回归方程的选择为例说明。

用四元线性回归分析法拟合表1中前16个配方的密度性能数据得到线性回归方程(8):

$$Y_1 = 1.070 - 1.8509 \times 10^{-4} X_1 + 2.8087 \times 10^{-3} X_2 + 3.3239 \times 10^{-3} X_3 + 1.5971 \times 10^{-3} X_4 \quad (8)$$

$$F=35.579, f_H=4, f_S=11, \sigma=0.0034, t_1=0.7275, t_2=11.889, t_3=9.500, t_4=5.261.$$

因为 $F > F_{0.01}(4, 11)$, 所以方程(8)在 $\alpha=0.01$ 下显著。

因为 $t_1 < t_{0.1}(11)$, $t_2 > t_{0.01}(11)$, $t_3 > t_{0.01}(11)$, $t_4 > t_{0.01}(11)$, 所以 X_1 不显著, X_2 , X_3 和 X_4 在 $\alpha=0.01$ 下显著。

由于方程(8)很显著而 X_1 不显著, 故改用四元线性逐步回归分析法拟合这些数据, 令 $F_Y = F_T = 3.46$, 得回归方程(9):

$$Y_1 = 1.069 + 2.7975 \times 10^{-3} X_2 + 3.2625 \times 10^{-3} X_3 + 1.5540 \times 10^{-3} X_4 \quad (9)$$

$$F=48.3138, f_H=3, f_S=12, \sigma=0.0034.$$

因为 $F > F_{0.01}(3, 12)$, 所以方程(9)在 $\alpha=$

0.01 下显著。

由于方程(9)已剔除了不显著项 X_1 , 故各回归系数大小有了变化, 方程的 F 值增大, 方程式的表述变得简洁和明朗, 变量的影响是否显著一目了然。比较方程(8)和(9), 应当选择方程(9)。

再看分别用模型式(2)和(3)逐步回归分析同样的数据获得的回归方程(10)和(11)(两方程: $F_Y = F_T = 3.46$):

$$Y_1 = 1.0799 + 2.7671 \times 10^{-3} X_2 + 1.6252 \times 10^{-3} X_4 + 2.0424 \times 10^{-4} X_3^2 \quad (10)$$

$$F=79.22, f_H=3, f_S=12, \sigma=0.0027.$$

因为 $F > F_{0.01}(3, 12)$, 所以方程(10)在 $\alpha=0.01$ 下显著。

$$Y_1 = 1.1044 + 1.2629 \times 10^{-3} X_4 + 2.9030 \times 10^{-4} X_2 X_3 \quad (11)$$

$$F=26.9896, f_H=2, f_S=13, \sigma=0.0052.$$

因为 $F > F_{0.01}(2, 13)$, 所以方程(11)在 $\alpha=0.01$ 下显著。

方程(10)和(11)都很显著, 但方程(10)的标准剩余离差 σ 值比较小, 用方程(10)预测或控制的精度将会比较高, 因此可选方程(10)。而比较方程(10)与(9), 前者的 σ 值比后者小, 故最终选定方程(10)。这是从数理统计的角度来选择方程。也可多角度选择, 例如选择所描述的变量与专业知识或经验吻合的回归方程等。然而无论从什么角度选择, 方程必须是显著的。

6 最终选定的7项性能-组分关系的回归方程

按照前面所述回归模型和回归方程的选择原则, 各性能最终选定的回归方程及其显著性检验结果如下:

密度 Y_1 选择方程(10), 磨耗 Y_4 选择方程(7), 对所有各式: $F_Y = F_T = 3.46$ 。

$$\text{硬度: } Y_2 = 78.10 + 0.552 X_2 + 1.260 \times 10^{-2} X_3^2 - 3.591 \times 10^{-2} X_2 X_3 + 4.204 \times 10^{-2} X_3 X_4 \quad (12)$$

$$F=49.32, f_H=4, f_S=11, \sigma=0.4.$$

因为 $F > F_{0.01}(4, 11)$, 所以方程(12)在 $\alpha = 0.01$ 下显著。

屈挠疲劳寿命: $Y_3 = 11.088 - 1.616\ 0X_1 + 0.079\ 8X_1^2$ (13)

$F = 22.11, f_H = 2, f_S = 13, \sigma = 1.267.$

因为 $F > F_{0.01}(2, 13)$, 所以方程(13)在 $\alpha = 0.01$ 下显著。

撕裂强度: $Y_5 = 23.570 + 6.922 \times 10^{-3} X_2^2 + 1.601 \times 10^{-2} X_1 X_3$ (14)

$F = 5.29, f_H = 2, f_S = 13, \sigma = 0.946.$

因为 $F_{0.05}(2, 13) < F < F_{0.01}(2, 13)$, 所以方程(14)在 $\alpha = 0.05$ 下显著。

扯断伸长率: $Y_6 = 93.87 + 0.267X_4^2 + 0.564X_1X_2$ (15)

$F = 9.598, f_H = 2, f_S = 13, \sigma = 28.$

因为 $F > F_{0.01}(2, 13)$, 所以方程(15)在 $\alpha = 0.01$ 下显著。

拉伸强度: $Y_7 = 7.744 + 1.126 \times 10^{-2} X_1 X_4 + 3.420 \times 10^{-2} X_2 X_3$ (16)

$F = 7.38, f_H = 2, f_S = 13, \sigma = 1.380.$

因为 $F > F_{0.01}(2, 13)$, 所以方程(16)在 $\alpha = 0.01$ 下显著。

上述 7 项性能方程都是显著的, 除了磨耗量(Y_4)和撕裂强度(Y_5)两方程的显著性水平 α 为 0.05, 其它方程的均是 0.01(很显著)。

7 优选和验证

有了上列 7 项性能方程便可优选和预测配方。分析这些方程式可知: 多项性能对配方组分的要求是相互矛盾的, 特别是密度和硬度、密度和磨耗这两对矛盾比较突出, 可调整的范围很窄。本例的优选和预测配方实际上涉及多目标的优化。表 1 中的 19 号配方就是应用密度和磨耗两性能的回归方程式(10)和(7), 根据对密度和磨耗两性能的要求, 采用虚拟目标法进行优选出的“优化配方”: $X_1 = 20, X_2 = 9, X_3 = 9, X_4 = 14$ 。虚拟目标法是一种多目标的优化方法, 将另文阐述。将这些变量值分别代入上述 7 项性能方程, 就可得到各项性能预测值 Y_0, Y_- 和 Y_+ , 见表 2。

表 2 19 号配方各项性能预测值和实测值

项 目	Y_0	Y_-	Y_+	实测值
密度/($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.144	1.139	1.145	1.144
邵尔 A 型硬度/度	86.5	85.7	87.3	86.0
屈挠疲劳寿命/万次	10.69	8.15	13.22	7.51
阿克隆磨耗量/ cm^3	0.151	0.109	0.193	0.188
撕裂强度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	27.01	25.12	28.90	25.17
扯断伸长率/%	248	192	304	234
拉伸强度/MPa	14.03	11.54	16.79	11.23

根据回归分析原理, 将这些变量值代入回归方程计算得到的是预测值 Y 的平均值 Y_0 , 预测值 Y 实际上以 Y_0 为中心对称分布, 愈靠近 Y_0 的地方出现的机会愈大, 而离 Y_0 较远的地方出现的机会就较小, 并且与剩余标准离差 σ 之间有下列关系: 落在 $Y_0 \pm 0.5\sigma$ 的区间内约占 38%; 落在 $Y_0 \pm \sigma$ 的区间内约占 68%; 落在 $Y_0 \pm 2\sigma$ 的区间内约占 95%; 落在 $Y_0 \pm 3\sigma$ 的区间内约占 99.7%。

一般用 $Y_0 \pm 2\sigma$ 进行预测和控制。在表 2 中, $Y_- = Y_0 - 2\sigma, Y_+ = Y_0 + 2\sigma$ 。

以密度式(10)来讲, 取 $X_1 = 20, X_2 = 9, X_3 = 9, X_4 = 14$, 则得 $Y_0 = 1.144$ 。由于 $\sigma = 0.002\ 7$, 故 $Y_- = 1.139, Y_+ = 1.148$, 因此预测值 Y 在 $1.144 \pm 2 \times 0.002\ 7$ 范围内, 即 $1.139 \leq Y \leq 1.149$ 的几率是 95%, 故可以把剩余标准离差 σ 作为衡量预测精度的标志。本文中所讲的性能预测值 Y 的范围是指用 $Y_0 \pm 2\sigma$ 计算的, 故预测的可信度是 95%。回归方程是在观测数据基础上得到的, 观测数据难免有误差, 甚至有不明或不定因素混入, 因此一般应做验证试验。19 号配方在本次试验中不单是优选配方, 还把它作为验证配方, 各项性能实测值列在表 1 和 2 中。从表 1 和 2 中可以看到, 这些实测值除了屈挠疲劳寿命和拉伸强度稍微偏离之外, 其它 5 项均落在预测范围之内, 特别是密度和硬度两性能的预测值和实测值是很接近的。

8 结语

均匀设计是多水平多因素试验的新设计方法, 数据分析必须使用回归分析法, 因此, 我们将均匀设计叫做“回归的均匀设计”。

本文采用不同数学模型的回归分析法拟合

均匀设计法设计及其衍生的16个试验配方数据,得到优选的描述性能与填料变量之间定量关系的7项性能方程式。由式(14)可知,撕裂强度即使不受其它性能指标的约束,最大值也不过是 $(29.18+2\sigma)\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 而已,不可能达到初定期望值 $50\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。类似地,扯断伸长率单项性能最大值也难得达到300%。因此可断言,在试验范围内难以满足初定的对撕裂强度和扯断伸长率的期望。

利用这些性能的回归方程式可优选和预测配方,例如得到19号和0*号配方。19号配方: $X_1=20$, $X_2=9$, $X_3=9$, $X_4=14$ (即胶粉、白炭黑、炭黑和棕色树脂粉用量分别为20,9,9和14份)。其7项性能的实测值除了屈挠疲劳寿命和拉伸强度稍有偏离之外,其它5项均落在预测范围之内。预测和实测都表明该胶料密度小而硬度高,这两项性能完全达到要求,而磨损、撕裂强度和扯断伸长率3项性能未满足初定的期望。通过均匀设计在轻而硬的SBR配方试验中的应用,显示和说明了均匀设计法也

是适用于橡胶配方试验的一种好方法。本文还借助这项试验比较全面地显示了回归分析法在橡胶配方试验中应用的全过程,着重说明了使用回归分析法时容易被忽视或不能忽略的几个问题:试验总数、回归模型、回归方程和回归系数的显著性检验、剩余标准离差、回归方程的优选和验证试验。

参考文献:

- [1] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] 姚钟尧, 林惠音. 计算机辅助试验研究系统与试验设计[J]. 橡胶工业, 1997, 44(10): 583-587.
- [3] 姚钟尧. CAR系统的回归分析法应用及其他[J]. 特种橡胶制品, 1997, 18(6): 40.
- [4] 姚钟尧. 回归分析在均匀设计数据分析中的地位[J]. 特种橡胶制品, 1998, 16(2): 35-41.
- [5] 冯士雍. 回归分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1974.
- [6] 上海师范大学数学系概率统计教研组. 回归分析及其试验设计[M]. 上海: 上海教育出版社, 1978.
- [7] 方开泰, 全辉, 陈庆云. 实用回归分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

收稿日期: 2001-01-28

Application of regression analysis to rubber formulation experiment

YAO Zhong-yao, LIN Hui-yin, LIANG Shi-hui
(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The effects of four fillers, such as rubber crumb, silica, carbon black and brown resin powder on the properties of SBR compound, such as density, hardness, bending flexure, wear resistance and so on were investigated by designing the rubber formula with the uniform design method. The optimized regression equations describing the relationship between the properties of rubber compound and the variables of fillers quantitatively were obtained by fitting the experimental data with the regression analysis, and the equations were used to predict and optimize the rubber formula. The results of confirmation test showed that the optimized formula featured lower density, higher hardness and other acceptable properties. The whole process of applying the regression analysis to the rubber formulation experiment was revealed with focus on some unnegligible issues: total number of experiments, regression model, notability test of regression equation and regression coefficient, remained standard deviation, and optimization and confirmation test of regression equation.

Keywords: regression analysis; uniform design; rubber formula; SBR; filler

售书启事 《实用橡胶配方大全》共收录了包括轮胎、胶管、胶带、胶鞋及其它橡胶制品配方约1500例,分为15个类目编纂成册。本书取材于中外橡胶技术期刊和资料,并根据实用性进行逐一筛选,着力选取了那些在生产中已获得实际应用的配方,或经试验证明确有改善效果的配方。本书每册售价150元(含邮费),如有订购者请将款从邮局汇给北京西郊半壁店《橡胶工业》编辑部张川收,邮编100039。款到寄书。

《橡胶工业》《轮胎工业》编辑部