

汽油调合优化模型*

李 进, 廖良才, 谭跃进

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 :为了提高炼油厂制订成品油调合方案的科学性,研究了汽油调合优化的非线性规划模型,给出了目标函数和约束条件的具体形式。根据模型特征,选用模拟退火算法对模型求解。最后,通过某炼油厂的一个应用实例验证了上述成品油调合优化模型的有效性。

关键词 :汽油调合;优化;非线性规划;模拟退火

中图分类号 :O221.2 **文献标识码** :B

The Model of Gasoline Blending Optimization

LI Jin, LIAO Liang-cai, TAN Yue-jin

(College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :In order to enhance the scientificity of making the blending plan of refineries, the nonlinear programming (NLP) models of the blending optimization problems was researched in detail, including the formulation of the objective function and constraints. The simulated annealing algorithm is selected to solve the problem according to the characteristics of the model. Finally, the validity of blending optimization model is verified by the application of a refinery.

Key words :gasoline blending; optimization; nonlinear programming; simulated annealing algorithm

油品调合是指选择从不同生产装置提炼出的或者市场上购买的组分,按一定的比例进行调合,使调合后的油品符合成品油牌号的质量指标要求。成品油调合问题是一个典型的优化问题。优化的目标是在满足成品油质量指标的前提下,使收益最大。成品油调合优化问题的解即为调合方案。

不同的调合组分有不同的性质,不同牌号的成品油有不同的指标要求。油品调合模型的核心是从调合组分的性质预测出成品油的性质。本文以汽油调合为例,给出调合优化的建模方法及模型的具体形式。

1 汽油调合优化问题的约束条件

成品汽油调合优化问题的约束条件可分为三类:成品汽油牌号质量指标约束、成品汽油调合关系和经验知识的约束。其中,第一类和第二类为必须满足的约束,而第三类约束的加入可以提高解的收敛速度。

1.1 成品汽油牌号质量指标约束

为了规范成品油市场,国家按照成品油的使用场合、用途等,对每种成品油规定了几个牌号。例如汽油的牌号有 90 #、93 #、97 # 等。炼油厂的成品油要出厂销售,必须满足相应牌号的质量指标要求。

1.2 成品汽油调合关系

在汽油调合优化模型中的调合关系模型主要考虑下述几类:

1.2.1 质量/质量类(m/m)

共计 3 个,即硫含量、硫醇硫含量和氧含量。

$$mm = mm_1 \cdot x_1 + mm_2 \cdot x_2 + \dots + mm_L \cdot x_L \quad (1)$$

* 收稿日期 2004 - 12 - 09
作者简介:李进(1978—),男,博士生。

x_i 表示第 i 种组分油参与某成品油牌号调合的质量混合比例, mm_i 表示第 i 种组分油的质量/质量类含量指标, mm 表示调合后的成品油的质量/质量类含量指标。

1.2.2 体积含量指标

包括体积/体积类(v/v)和质量/体积类(如 $m/v, g/l$ 等)。体积/体积类共计 4 个, 即残留量、苯含量、芳烃含量和烯烃含量。质量/体积类共计 5 个, 即铅含量、实际胶质、密度、锰含量和铁含量。

$$w = \left(\frac{x_1 \cdot w_1}{\rho_1} + \frac{x_2 \cdot w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{x_L \cdot w_L}{\rho_L} \right) \cdot \rho \quad (2)$$

x_i 表示第 i 种组分油参与某成品油牌号调合的质量混合比例, w_i 表示第 i 种组分油的含量指标, ρ_i 表示第 i 种组分油的密度, w 表示调合后的成品油的含量指标, ρ 表示调合后的成品油的密度。

1.2.3 辛烷值调合关系模型

辛烷值是汽油的一个关键质量指标, 也是汽油调合过程中重点考虑的指标。众所周知, 辛烷值调合不是线性的, 汽油的辛烷值不等于调合组分辛烷值的体积平均。关于辛烷值调合关系模型, 国内外已有许多学者通过大量的研究提出了各种各样的模型形式。本文使用 Twu 和 Coon 于 1996 年提出的辛烷值模型, 在 157 种组分油的 161 次汽油调合测试中, 该模型预测研究法辛烷值(RON)的平均误差为 1.00%, 马达法辛烷值(MON)为 1.19%^[1]。

该方法把汽油看作由饱和烃、芳烃和烯烃组成的混合物。两个组分油之间的二元交互参数可以通过组分油中饱和烃、芳烃和烯烃之间的二元交互参数计算得到。假设组分油 M 中饱和烃、芳烃和烯烃的含量分别为 m_1, m_2, m_3 , 组分油 N 为 n_1, n_2, n_3 。 M 和 N 之间的二元交互参数的计算公式如下:

$$K_{MN} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (m_i n_j + m_j n_i) \left[\frac{1}{2} (a_i + a_j) \right] (1 - k_{ij})}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (m_i m_j + n_j n_i) \left[\frac{1}{2} (a_i + a_j) \right] (1 - k_{ij})} \quad (3)$$

其中, i, j 为饱和烃、芳烃或烯烃, a_i, a_j 为 i, j 的 RON 或 MON, k_{ij} 为 i 和 j 之间的二元交互参数, K_{MN} 为组分油 M 和 N 之间的二元交互参数, m_i 和 n_i 为组分油 M 和 N 中 i 的含量。在得到组分油之间的二元交互参数后, 汽油调合辛烷值的计算公式如下:

$$a = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j x_i x_j (a_i + a_j) (1 - K_{ij}) \quad (4)$$

其中, x_i, x_j 为组分油 i 和 j 的体积分数, a 为成品汽油的 RON 或 MON, a_i, a_j 为组分油 i 和 j 的 RON 或 MON, K_{ij} 为组分油 i 和 j 之间的二元交互参数。为了使辛烷值模型和炼油厂中的调合数据匹配, RON 的三个交互参数和 MON 的三个交互参数由工业调合数据回归得到。

1.2.4 蒸汽压

蒸汽压作为衡量汽油挥发性的指标被广泛应用。本文使用 VPBI(vapor pressure blending indices)方法计算蒸汽压的调合关系^[2]。VPBI 法可以把每种汽油组分的雷德蒸汽压(RVP)转化成 VBPI, 它们之间的关系如下:

$$VPBI = RVP^{1.25} \quad (5)$$

成品汽油的 VBPI 等于所有组分油 VBPI 的体积平均:

$$VPBI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i VPBI \quad (6)$$

其中, x_i 为组分油 i 的体积分数, $VPBI_i$ 为第 i 种组分油的 VBPI 值。

1.2.5 蒸发温度

蒸发温度包括 10% 蒸发温度、50% 蒸发温度、90% 蒸发温度三种。本文假设汽油为理想混合物, 10%、50%、90% 的蒸馏温度用 $T_{10}\%$ 、 $T_{50}\%$ 、 $T_{90}\%$ 表示。蒸发温度模型就是要以调合组分油的体积百分比 x_i 和组分的 ASTM D86 曲线为基础计算成品汽油的 $T_{10}\%$ 、 $T_{50}\%$ 、 $T_{90}\%$ 。其计算步骤如下^[3]:

(1) 估计 $T_{10}\%$ 、 $T_{50}\%$ 、 $T_{90}\%$ 的初始值。使用该温度值和组分油的 ASTM D86 曲线计算每种组分油蒸发的体积百分比 η_i ;

(2) 全部的蒸馏体积 = $\sum_i x_i \eta_i$;

(3) 计算蒸发体积占总体积的百分比,把该值和 10%、50%、90% 比较,如果它们不匹配,使用 Secant^[4]方法计算新的温度,然后返回步骤(1),如果匹配,则该温度为成品油的 $T_{10}\%$ 、 $T_{50}\%$ 、 $T_{90}\%$ 。

1.2.6 其它指标

汽油的终馏点应该为所有参与汽油调合的组分油的终馏点中的最大值。诱导期在调合时一般不考虑,通过添加剂改善。水溶性酸或碱和机械杂质及水分这两个指标与调合的比例大小没有关系,只要某个组分油中违背这两项质量指标要求中的任意一项,则不能参与调合。铜片腐蚀和博士试验这两项指标,是组分油在从装置出来后送入成品油罐区必须满足的先决条件,因此,在进行成品油调合时可不必考虑。

1.3 经验知识的约束

经验知识的约束可用下式来表示:

$$L_i \leq x_i \leq U_i \quad (7)$$

其中 x_i 为组分油 i 参与成品油调合的比例, L_i 、 U_i 为组分油 i 参与成品油调合比例的上、下限。

2 调合优化问题的目标函数

调合优化问题的目标是使得调合生产的效益最高,目标函数为:

$$\max \sum_j (y_j \cdot p_j) - \sum_i (x_{ij} \cdot b_i \cdot c_i) \quad (8)$$

其中 y_j 为成品油牌号 j 的调合总量,是一个中间变量; p_j 为成品油牌号 j 的市场销售价格; x_{ij} 为组分油 i 参与成品油牌号 j 调合的数量占组分油 i 总量的比例; b_i 为组分油 i 的总量,即待求变量; c_i 为组分油的相对成本。

3 成品油调合优化模型的求解技术

成品油调合优化模型是一个特殊的非线性规划模型。在该模型中,目标函数为线性函数。约束条件中等式约束的数量较少,形式较为简单。大部分约束为不等式约束。针对该非线性规划模型的特点,我们分析认为,采用基于随机搜索的模拟退火法^[6]求解更为合适。实践证明,采用基于随机搜索的模拟退火法求解,容易实现,只要算法设计合理,可以具有较快的收敛速度,能够进行全局优化。

4 应用实例

笔者按照上述成品油调合优化模型形式开发了成品油调合优化软件,该软件已在中石化股份有限公司长岭分公司投用。自投用以来,系统运行情况良好。下面以该厂成品汽油调合生产的一组历史数据的分析求解结果和与当时按照人工确定的调合方案执行的测量结果的对比(如表 1 所示)为例,说明模型的有效性。该组历史数据的调合产品为 93 # 汽油,参与调合的组分油有三种,分别是罐底残留汽油(459t)、1 # 催化汽油(FCC)和 2 # 催化汽油(RFCC)。调合总量为 3301t。当时调度人员根据经验确定的调合方案为 FCC 和 RFCC 的参调数量分别为 967t 和 1875t。由于 2 # 催化汽油的辛烷值比 1 # 催化汽油的辛烷值高,故其相对成本更高。为了确定二者的优先顺序,此处分别取 3300 元/t、3200 元/t。同时,由于仅针对一个成品油牌号,故可不必考虑调合产品的价格问题。从表中数据可以看出,按照本系统提供的模型和算法进行建模求解得到的最优调合方案进行调合,预计的调合结果将比原来按照人工方式确定的调合方案执行的测量结果要好。其中汽油的关键质量指标研究法辛烷值(RON)的富裕量减少了 0.8 左右,调合成本(仅考虑 FCC 和 RFCC)从 2811 元/t 减小至 2795 元/t。

表1 模型计算优化方案预测结果与人工方案实际测量结果比较表

Tab.1 Comparison of the results obtained from model with manual work

序号	质量指标名称 或 相对成本	指标 要求	组分油质量指标			模型方案 预测结果	人工方案 测量结果
			罐底残 留汽油	1#催化 汽油 FCC	2#催化 汽油 RFCC		
0	相对成本			3200	3300	2795	2811
1	研究法辛烷值(RON)	≥ 93.5	95.2	92.9	95.3	94.615	95.4
2	抗爆指数(RON + MON)/2	≥ 88.0	88.3	86.9	88.65	88.119	88.2
3	铅含量 g/l	≤ 0.005	10^{-5}	0.0001	0.0001	$8.766e-5$	0.0001
4	10%蒸发温度 , $^{\circ}\text{C}$	≤ 69	55.5	49	53	51.743	55
5	50%蒸发温度 , $^{\circ}\text{C}$	≤ 120	90.5	80	90	86.179	87.5
6	90%蒸发温度 , $^{\circ}\text{C}$	≤ 190	153.5	150	155	152.379	149
7	蒸气压 kPa	≤ 88.0	52.4	64	52.9	56.95	50.2
8	硫含量 ,%(m/m)	≤ 0.095	0.068	0.12	0.049	0.078	0.083
9	苯含量 ,%(v/v)	≤ 2.5	0.49	1.51	0.67	0.957	0.67
10	芳烃含量 ,%(v/v)	≤ 40.0	24.7	19.3	30.5	25.549	22.7
11	氧含量 ,%(m/m)	≤ 2.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
12	锰含量 g/l	≤ 0.018	0.003	0.0001	0.0001	$4.976e-4$	0.007
13	铁含量 g/l	≤ 0.01	0.0001	0.002	0.002	0.002	0.001

5 结 论

调合是决定炼油厂效益水平的关键步骤,本文对调合优化模型进行了详细的研究。该模型可应用于不同牌号的汽油产品的调合,根据具体油品改变调合关系后,可应用于一般油品的调合优化。应用实例表明,按照该优化模型制订成品油调合方案能够提高经济效益。

参 考 文 献 :

- [1] Twu C H, Coon J E. Predict Octane Numbers Using a Generalized Interaction Method[J]. Hydrocarbon Processing, 1996, 75(2): 51-56.
- [2] Singh A, Forbes J F, Vermeer P J, et al. Model-based Real-time Optimization of Automotive Gasoline Blending Operations[J]. Journal of Process Control, 2000, 10: 43-58.
- [3] Li X. Refinery-wide Optimizatiot[D]. Texas Tech University, 2000.
- [4] Riggs J B. An Introduction to Numerical Methods for Chemical Engineers[M]. Texas Tech University Press, 1994.
- [5] 陈新志. 调合汽油研究法辛烷值模型的建立[J]. 石油炼制与化工, 1997, 28(1): 52-55.
- [6] 胡山鹰, 陈丙珍, 何小荣, 等. 非线性规划问题全局优化的模拟退火法[J]. 清华大学学报, 1997, 37(6): 5-9.

