

文章编号: 1671-7848(2007)03-0256-04

基于 Ethyl RT-70 模型的汽油调合优化

黄彩凤, 李 信, 李少远

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200240)



摘 要: 针对汽油调合过程中组分油存在的不确定性, 结合 Ethyl RT-70 汽油调合质量指标模型, 形成约束条件带随机变量的汽油调合随机规划问题。存在不确定性的情况下, 为使调合后的成品汽油更好地满足性能指标要求, 采用随机规划方法对汽油调合问题进行优化, 并做了仿真试验。仿真结果表明, 采用随机规划方法求解汽油调合优化问题是可行的, 不仅可以满足质量指标要求, 还可以获得较高的经济效益。

关 键 词: 汽油调合; 辛烷值; 随机扰动; 机会约束

中图分类号: TQ 021

文献标识码: A

Gasoline Blend Optimization Based on Ethyl RT-70 Models

HUANG Cai-feng, LI Xin, LI Shao-yuan

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: According to the uncertainty of feedstock and combining with the Ethyl RT-70 blending models of some important properties of gasoline, the gasoline blend optimization problem with uncertainty variable in the constrain is produced. The stochastic programming method is used to get better operation point under the existence of stochastic disturbance. The simulation example shows that the proposed method is feasible, and can acquire higher economic benefit as well as satisfy the quality requests.

Key words: gasoline blend; Octane number; stochastic disturbance; chance constraint

1 引 言

汽油是炼油厂最重要的产品之一, 其生产利润占炼油厂总利润的 60% ~ 70%。汽油调合是炼油厂通过用现有的多种汽油组分, 按某种比例调配出所有指标都符合要求且产生利润最大的成品汽油。汽油调合过程非常复杂, 存在着多种不确定因素, 这些不确定因素对炼油厂生产合格的汽油产品和提高炼油厂利润有重要影响。目前国内大多数炼油厂的汽油调合还靠经验操作, 文献 [1~4] 中也较少考虑不确定因素对汽油调合的影响。如果不考虑调合过程存在的不确定因素, 可能会导致调合出的成品汽油不合格, 而对于不合格的成品汽油必须进行二次调合, 这将降低炼油厂的利润。因此, 本文研究了基于 Ethyl RT-70 模型的汽油调合优化问题。

2 汽油调合过程

汽油调合是成品汽油出场的最后一道工序, 也是保证汽油质量指标满足环保和使用要求的重要手段。汽油的质量指标包括辛烷值、蒸汽压、硫含

量、芳烃含量、粘度等。由于汽油的一些性能指标如辛烷值等在调合过程中存在非线性, 调合问题因此变得非常复杂。

汽油调合主要有罐调合和管道调合两种。由于罐调合有占用储罐多、调合时间长、能耗大等缺点, 已逐步被管道调合取代。管道调合是把各种汽油和添加剂按照一定的比例和质量指标, 经过管道和混合器在管道中自动调合的方法。

自动汽油调合系统分为 3 层, 分别是离线优化调度层、在线优化层和调整控制层^[5]。3 层结构协调合作, 共同完成汽油批量调合。离线优化层的核心是离线优化调度模型设计, 炼油企业通过该模型可以确定最优产品结构, 预测汽油产量, 得到汽油调合组分的生产策略。通常情况下, 炼油厂以产值最大为目标, 制定离线优化调度方案。在线优化层首先要根据调合组分油的实时性质, 通过初始配方优化模型, 生成初始调合配方。调整控制层下载在线优化层生成的初始调合配方, 将参加调合的汽油组分按配方打入调合总管, 开始汽油在线调合操作。本文研究的是在线优化层的问题, 根据汽油调

收稿日期: 2006-04-20; 收修定稿日期: 2006-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474051); 上海市科委重大技术攻关课题资助项目(04DZ11008)

作者简介: 黄彩凤(1981-), 女, 福建沙县人, 研究生, 主要研究方向为汽油调合过程优化等; 李少远(1965-), 男, 河北衡水人, 教授, 博士生导师。

合的生产目的，初始配方优化模型建模原则为：以调合利润最大为优化目标，以质量指标限制和物料平衡限制为约束。

3 带随机扰动的汽油质量指标模型

汽油调合质量指标模型最重要的特性是预测精度和最简化。本文考虑汽油最常用也最重要的质量指标^[21]为辛烷值(ON)和雷德蒸汽压(RVP)。预测调合辛烷值的模型主要有调合辛烷值法、Ethyl RT-70 法及相关法等，其中 Ethyl RT-70 是最早出现在文献中的模型之一，被认为是把预测准确性和最简化结合最好的模型，也是衡量其他新模型的基准^[41]。所以本文采用 Ethyl RT-70 模型作为辛烷值模型，雷德蒸汽压模型则采用被广泛使用的 VPBI 模型。

1) Ethyl RT-70 辛烷值模型和 VPBI 模型 辛烷值包括研究法辛烷值(RON)和马达法辛烷值(MON)。根据美国材料测试协会的定义，RON 代表低速或加速频繁条件下的抗爆性能，MON 代表高速或重载条件下的抗爆性能。雷德蒸汽压大致等于汽油在 100 °F(38 °C)时的蒸汽压。Ethyl RT-70 辛烷值模型和 VPBI 模型描述如下：

$$RON_{\text{blend}} = f_1(\mathbf{x}) = \mathbf{r}^T \mathbf{x} + a_1(\mathbf{r}^T \text{diag}(\mathbf{s})\mathbf{x} - (\mathbf{r}^T \mathbf{x})(\mathbf{s}^T \mathbf{x})(\mathbf{e}^T \mathbf{x})) + a_2(\mathbf{o}_s^T \mathbf{x} - (\mathbf{o}^T \mathbf{x})(\mathbf{e}^T \mathbf{x})) + a_3(\mathbf{a}_s^T \mathbf{x} - (\mathbf{a}^T \mathbf{x})(\mathbf{e}^T \mathbf{x})) \quad (1)$$

$$MON_{\text{blend}} = f_2(\mathbf{x}) = \mathbf{m}^T \mathbf{x} + a_4(\mathbf{m}^T \text{diag}(\mathbf{s})\mathbf{x} - (\mathbf{m}^T \mathbf{x})(\mathbf{s}^T \mathbf{x})(\mathbf{e}^T \mathbf{x})) + a_5(\mathbf{o}_s^T \mathbf{x} - (\mathbf{o}^T \mathbf{x})(\mathbf{e}^T \mathbf{x})) + \frac{a_6}{10000}(\mathbf{a}_s^T \mathbf{x} - (\mathbf{a}^T \mathbf{x})(\mathbf{e}^T \mathbf{x})) \quad (2)$$

$$RVP_{\text{blend}} = f_3(\mathbf{x}) = \sum_1^n (RVP)^{-25} \mathbf{x} = \mathbf{p}^T \mathbf{x} \quad (3)$$

式中 \mathbf{x} 为操纵变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ，分别为 n 种组分油的流量，本文研究的是含 5 种组分油的汽油调合问题，即 n 的值为 5； RON_{blend} 、 MON_{blend} 和 RVP_{blend} 为被控变量，分别表示调合后汽油的研究法辛烷值、马达法辛烷值和雷德蒸汽压值； \mathbf{r} 、 \mathbf{m} 和 \mathbf{p} 分别为组分油的 RON 向量、MON 向量和 RVP 指数向量， $\mathbf{s} = \mathbf{r} - \mathbf{m}$ ； \mathbf{o} 为组分油的石蜡含量(体积百分比)向量； \mathbf{o}_s 为石蜡含量的平方； \mathbf{a} 为各组分油的芳烃含量(体积百分比)向量； \mathbf{a}_s 为芳烃含量的平方； $\mathbf{e}^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ ； $a_1 \sim a_6$ 、 \mathbf{r} 、 \mathbf{m} 、 \mathbf{p} 、 \mathbf{o} 以及 \mathbf{a} 都为模型参数。

2) 随机扰动 在实际过程中，由于上游装置受到各种干扰，且受测量噪声等因素的影响，各组分的质量指标在一定范围内上下波动，具有不确定性。通过灵敏度分析，重整油的质量对最终成品汽油的质量影响最大，因此本文只考虑重整油质量的随机性，而假设其他组分油的质量是不变的。文献

[4] 给出了如下重整油质量模型：

$$\mathbf{q}_{\text{ref},t} = \overline{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.85 \\ -0.10 \end{bmatrix} \xi_t \quad (4)$$

式中 \mathbf{q}_{ref} = [RON MON RVP]^T 为重整油在 t 时刻的实际质量向量； $\overline{\mathbf{q}}_{\text{ref}}$ 为重整油的标称质量向量； ξ_t 为标量扰动。

ξ_t 的形式为

$$\xi_t = \frac{(1 - 0.56)z^{-1}}{(1 - 0.56z^{-1})} \frac{1}{1 - z^{-1}} \varepsilon_t \quad (5)$$

式中， z^{-1} 为后移算子； ε_t 为服从正态分布的随机变量。

4 基于 Ethyl RT-70 模型的汽油调合优化问题

汽油调合过程的目标是使调合后的成品汽油满足各种质量指标要求，同时使利润最大化。因此形成的汽油调合优化问题的目标为利润最大化，约束包括汽油质量指标约束及其他各种经济约束和流量约束。

1) 汽油调合优化问题的描述 将汽油调合的目标函数和各种约束条件写成数学形式，有汽油调合优化问题如式(6)所示。

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} c_p(\mathbf{e}^T \mathbf{x}) - c_f^T \mathbf{x} \\ & \text{subject to } \begin{cases} f_j(\mathbf{x}, \mathbf{q}_{\text{ref}}) \leq h_j(\mathbf{e}^T \mathbf{x}) \\ b_l \leq \mathbf{A}\mathbf{x} \leq b_u \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

式中，目标函数表示利润最大，由成品汽油产生的总收入减去各组分油消耗的成本； $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_5]^T$ ； c_p 为成品汽油的价格； c_f 为各种汽油组分的价格向量；约束条件包括汽油质量指标约束和其他约束； f_j 为成品汽油的第 j 个质量模型，即式(1)~式(3)描述的 Ethyl RT-70 辛烷值模型和调合指数蒸汽压模型； h_j 为成品汽油的第 j 个目标质量指标值， $j = 1, 2, 3$ ；第二个约束是由成品汽油的需求量和组分油的可获得量构成的线性不等式约束， b_l 和 b_u 分别为成品汽油的需求量或组分油可获得量的最小和最大值。

汽油调合优化问题中的质量指标约束是非线性的，同时组分油性质存在不确定性，使得质量指标约束含有随机变量 ξ_t ，形成非线性随机规划问题。

2) 机会约束规划处理汽油调合优化问题 解决随机规划问题主要有 3 种方法^[6]：期望值模型、机会约束规划和相关机会规划。本文采用由 Charnes 和 Cooper 提出的机会约束规划^[7]，其主要特点是随机约束条件至少以一定的置信水平成立。机会约束规划方法是将优化问题中带不确定参数的约束以概率形式表示，使得随机规划问题可转化为相应的确定性规划问题进行求解。对于汽油调合问题，

先将带随机变量的约束以概率形式表示，形成汽油调合的机会约束规划问题如下：

$$\begin{aligned} & \max_{x,y} c_p^T x - c_f^T y \\ & \text{subject to } \begin{cases} \Pr\{f_j(x, y_{ref}) \leq h_j(e^T x)\} \geq \rho_j \\ b_l \leq Ax \leq b_u \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式中 $\Pr\{\cdot\}$ 为概率； ρ_j 为置信水平 $\rho_j \in (0, 1]$

由于求解非线性随机规划问题非常复杂，本文将汽油质量指标模型线性化，使汽油调合优化问题成为线性机会约束规划问题：

$$\begin{aligned} & \max_x c_p^T x - c_f^T x \\ & \text{subject to :} \\ & \begin{cases} \Pr\{\xi d_j + (M_j x + n_j) \leq h_j(e^T x)\} \geq \rho_j \\ b_l \leq Ax \leq b_u \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

定义 $L = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 则有：

$$d_j = ((\nabla_r^T f_j)_\lambda + 0.85(\nabla_m^T f_j)_\lambda - 0.1(\nabla_p^T f_j)_\lambda) L ;$$

$$M_j = (\nabla_r^T f_j)_\lambda ; n_j = (f_j)_\lambda - (\nabla_r^T f_j)_\lambda x_0 + \beta_j$$

式中 β_j 为线性模型对非线性模型的补偿。

将式(8)转化成其确定性等价形式：

$$\begin{aligned} & \max_x c_p^T x - c_f^T x \\ & \text{subject to :} \\ & \begin{cases} (M_j - h_j e^T) x \leq -n_j - \bar{\xi} d_j - \Phi^{-1}(\rho_j) \\ |d_j| \cdot (\text{Var}(\xi))^2 \\ b_l \leq Ax \leq b_u \end{cases} \quad (9) \end{aligned}$$

式中 $\bar{\xi}$ 为 ξ 的期望； $\text{Var}(\xi)$ 为 ξ 的方差； Φ 为随机变量的概率分布函数。

汽油调合优化问题就转化成确定性问题，可用内点法求解。

5 仿真实例

本文研究由 Forbes 和 Marlin 提出的汽油调合问题^[8]，如图 1 所示。

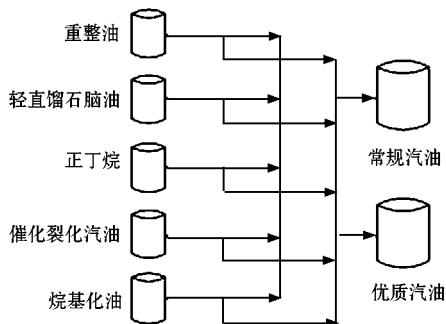


图 1 汽油调合实例

Fig.1 Flowsheet for gasoline blending case study

由重整油，轻直馏石脑油，正丁烷，催化裂化汽油和烷基化油这 5 种组分油同时调合两个等级的汽油：常规汽油和优质汽油。各等级的汽油产品必须分别满足质量指标要求，即满足各自汽油产品的

最小 RON 和 MON 限制，及最大 RVP 限制。约束条件包括产品需求，和可获得的组分油数量约束。假设调合过程没有三次调合，也就是最多经过两次调合后所有成品汽油都满足质量指标要求。对于本例来说，如果进行二次调合，则假设成本将增加第二次调合所得成品汽油总收入的 25%。调合过程所需数据见表 1~3^[8]。

表 1 组分油经济指标

Table 1 Feedstock economic data

组分油	可用量(bbl/day)	价格(\$ /bbl)
重整油	12 000	34.00
轻直馏石脑油	6 500	26.00
正丁烷	3 000	10.30
催化裂化汽油	4 500	31.30
烷基化油	7 000	37.00

表 2 产品需求

Table 2 Production requirements

指标	常规汽油	优质汽油
价格(\$ /bbl)	33.00	37.00
最大需求(bbl/day)	8 000	10 000
最小需求(bbl/day)	7 000	10 000
最小 RON	88.5	91.5
最小 MON	77.0	80.0
最大 RVP(psi)	10.8	10.8

表 3 组分油性质

Table 3 Feedstock qualities

组分油	重整油	轻直馏石脑油	正丁烷	催化裂化汽油	烷基化油
RON	94.1	70.7	93.8	92.9	95.0
MON	80.5	68.7	90.0	80.8	91.7
石蜡含量 %	1.0	1.8	0	48.8	0
芳烃含量 %	58.0	2.7	0	22.8	0
RVP(psi)	3.8	12.0	138.0	5.3	6.6

仿真过程质量指标模型采用上述辛烷值和蒸汽压线性化模型，扰动只加在重整油中的性能指标上，扰动的形式如式(4)所示， ξ_i 服从标准正态分布。 $a_1 \sim a_6$ 数值分别取值为： $a_1 = 0.032\ 24$ ， $a_2 = 0.001\ 01$ ， $a_3 = 0$ ， $a_4 = 0.044\ 50$ ， $a_5 = 0.000\ 81$ ， $a_6 = -0.006\ 45$ ， ρ_j 取为 0.95，即调合后成品汽油满足质量指标的概率大于 95%。

本文采用 <http://control.ee.ethz.ch/~joloef/yalmip.php> 网站提供的 solvesdp 函数求解该汽油调合优化问题，每两个小时优化一次，优化 120 次即 10 天后得到仿真曲线如图 2 所示，仿真结果见表 4。

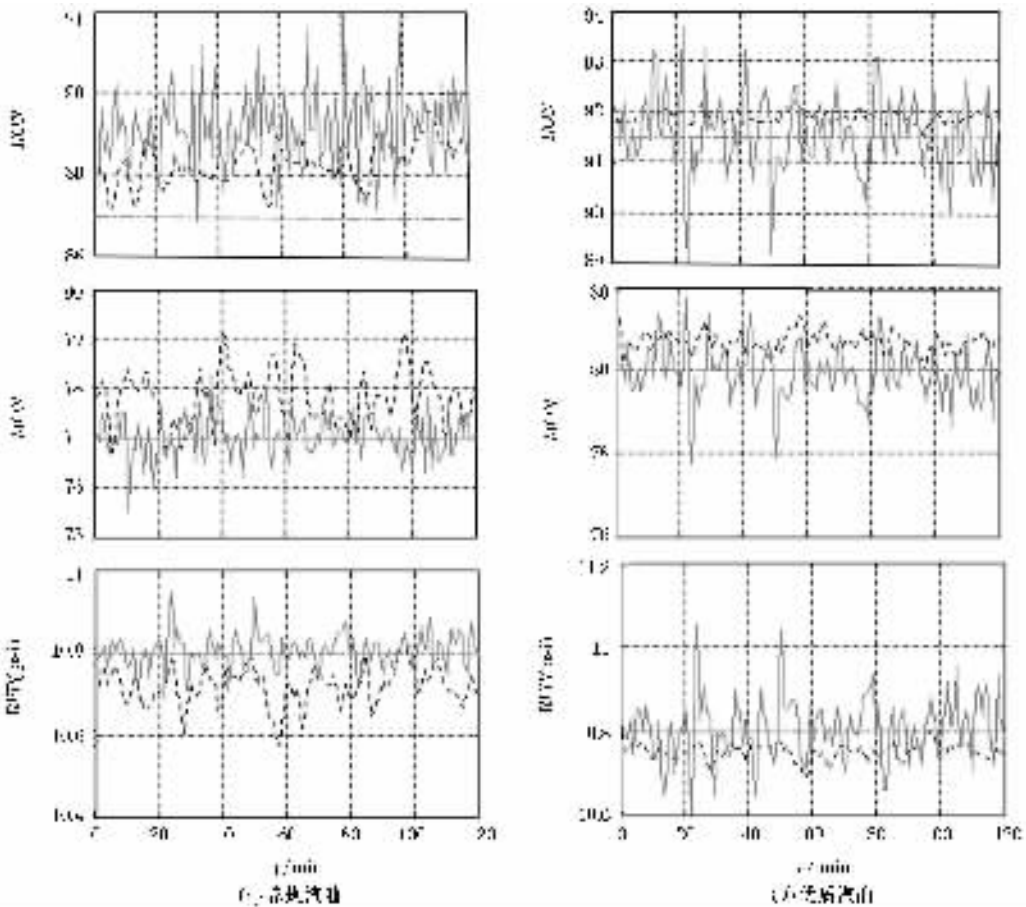


图 2 常规汽油和优质汽油质量指标

Fig.2 Qualities of regular and premium gasoline

图中，实线为优化过程不考虑组分油存在的不确定性求解得到的汽油质量指标曲线；虚线为优化过程考虑组分油不确定性，采用机会约束规划方法处理式(6)后求解得到的汽油质量指标曲线；点划线为成品汽油质量指标的目标设定值。可以看出，若调合过程不考虑组分油实际存在的不确定性，一次调合后成品汽油不合格的概率高，不合格的汽油必须进行二次调合，因此获得的利润较低；而调合过程考虑组分油的不确定性，采用机会约束规划方法进行优化，一次调合后成品汽油合格的概率大于 95%，大大地减少了成品汽油的二次调合，获得较高经济利润。

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation results

	约束满足概率	利润/(美元/天)
考虑不确定性	> 95 %	65 901.7
不考虑不确定性	≤ 50 %	54 904.5

6 结 语

本文针对汽油调合过程中组分油存在不确定性这一特点，将组分油中对调合汽油质量指标影响最大的重整油加入扰动，引入到线性化的 Ethyl RT-70

模型中，形成随机规划形式的汽油调合优化问题，并采用机会约束规划方法对汽油调合优化问题进行求解。最后应用到 Forbes 和 Marlin 提出的汽油调合实例中，仿真结果证明该方法的有效可行的。

参考文献 (References) :

- [1] 陈婕,王宁,王树青.汽油调合过程的神经内模优化控制[J].控制理论与应用,1999,16(4):532-535.(Chen Jie, Wang Ning, Wang Shuqing. Neuro-internal model based optimal control for gasoline blending processes[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(4) 525-535.)
- [2] 王继东,王万良.基于遗传算法的汽油调合生产优化研究[J].化工自动化及仪表,2005,32(1):6-9.(Wang Jidong, Wang Wanliang. Research of gasoline blending optimization based on genetic algorithm[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 32(1) 6-9.)
- [3] 郭明,王树青.基于 Kalman 预测控制的在线油品调合[J].石油学报,2003,19(2):44-49.(Guo Ming, Wang Shuqing. Research of online gasoline blending based on Kalman prediction algorithm[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 19(2) 44-49.)
- [4] 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(1):43-58.
- [5] Sullivan T L. Refinery-wide blend control and optimization[J]. Hydrocarbon Processing, 1990 (5) 93-96.
- [6] Liu B D. Uncertain theory: an introduction to its axiomatic foundation [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [7] Charnes A, Cooper W W. Deterministic equivalents for optimizing and satisfying under chance constraints[J]. Operations Research, 1963, 11(1):18-39.
- [8] Forbes J F, Marlin T E. Model accuracy for economic optimizing controllers the bias updates case[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1994, 33(8):1919-1929.