

研究论文

针对原油性质变化的常减压先进控制研究与应用

吕文祥¹, 摆 亮¹, 黄德先^{1,2}, 江永亨¹, 刘先广³, 朱朝宾⁴, 李占龙⁴, 张代欣⁴

(¹ 清华大学自动化系, 北京 100084; ² 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;

³ 北京清大腾飞公司, 北京 100084; ⁴ 中国石油锦西石化分公司, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 针对原油性质变化对常减压装置操作造成的巨大困难, 提出了一种稳定原油性质和引入原油性质参数到软测量和控制模型的先进控制综合解决方案。一方面, 对待混炼的多种原油进行调度和掺炼比优化, 使实际进入常减压装置进行炼制的调合原油性质相对稳定, 装置操作参数变化较小, 减少工作点大幅变化过程中所产生的波动。另一方面, 针对仍然存在的原油性质小幅度变化, 在软测量和预测控制建模中引入反映原油性质的馏程参数, 克服原油性质变化所引起的扰动。现场实际装置的应用结果说明了此综合方案的有效性。

关键词: 常减压装置; 原油混炼优化; 软测量; 模型预测控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 10-2522-07

Advanced process control of CDU aiming to diversity of crude oil

LÜ Wenxiang¹, BAI Liang¹, HUANG Dexian^{1,2}, JIANG Yongheng¹,

LIU Xianguang³, ZHU Chaobin⁴, LI Zhanlong⁴, ZHANG Daixin⁴

(¹ Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China;

³ Beijing TECHFLY Company, Beijing 100084, China; ⁴ Jinxi Petrochemical Company, PetroChina, Huludao 125001, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the great difficulty in crude oil unit (CDU) operation for the diversity of crude oil, an advanced process control comprehensive scheme is presented, which composed of both decreasing the property variety of crude oil feed-in and introducing parameters reflecting property into soft sensor and controller. By scheduling and blending the optimization of multiple crude oils to be refined, the blended crude oil feed-in has relatively steady properties and has small influence on parameters of the unit operation, hence the disturbance from the change in operating point is decreased remarkably. On the other hand, for the remaining small property variety of blended crude oil, the parameters reflecting property are introduced to soft sensor calculation and advanced process controller based on model predictive control to overcome the disturbance of property variety. By scheduling and blending optimization, the parameter varieties of unit operation are small, which makes it possible that the soft sensor and predictive control using linear approximate model have a great performance. Application on a CDU with multiple crude oils shows the validity of the comprehensive scheme.

Key words: crude oil unit; blending optimization of crude oil; soft sensor; model predictive control

2009-06-15 收到初稿, 2009-06-18 收到修改稿。

联系人及第一作者: 吕文祥 (1979-), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2007AA04Z193);

国家自然科学基金项目 (60574072); 国家重点基础研究计划项目 (2002CB3122002)。

Received date: 2009-06-15.

Corresponding author: LÜ Wenxiang, lwx02@mails.thu.edu.cn

Foundation item: supported by the High-tech Research and

Development Program of China (2007AA04Z193), the National Natural Science Foundation of China (60574072) and the National Basic Research Program of China (2002CB3122002).

引 言

常减压蒸馏过程是石油炼制工业的龙头装置, 从原油中直接生产汽油、煤油、轻柴、重柴和有待深加工的中间原料等产品, 在直接提高高价值产品收率和为整个石化行业提供合格的中间原料方面意义重大。在当前原油价格多变的市场环境下, 为降低成本, 原油采购同时来自多个地方, 性质各不相同, 如沿海某炼油厂炼制原油品种达十余种, 同期炼制的也有四、五种。炼制这些原油所需要的装置过程参数有较大区别, 给常减压装置平稳操作和控制带来巨大的困难。同时, 这些产品的质量指标很难或不能直接通过传感器直接测得, 采用产品质量软测量方案, 原油性质的变化也给软测量建模以及先进控制的实施带来很大的困难。在沿海、沿江的对进口原油依赖较大的各炼油企业, 这些问题尤为突出。

针对原油性质变化造成的困难, 在软测量和先进控制中采用多模型是一个主要思路^[1-3]。对于不同性质的原油, 分别建立各自的软测量模型和预测控制动态模型。在线使用时, 根据实时过程变量进行分类, 选择当前适用的模型进行软测量计算和优化控制。然而, 根据实时过程变量对模型适用性进行识别、多模型之间进行切换以及带来的稳定性问题, 始终是研究难点。

针对原油性质变化, 本文提出稳定原油性质和引入原油性质参数到软测量和控制模型的综合解决方案。一方面, 通过对原油罐区待混炼的多种原油进行调度和掺炼比优化, 实际进入常减压装置进行炼制的调合原油性质变得相对稳定, 装置操作参数变化较小, 减少工作点大幅变化过程中所产生的波动。另一方面, 针对仍然存在的原油性质小幅度变化, 在软测量计算和以此为基础的预测控制上, 引入反映原油性质的馏程参数作为干扰变量, 克服原油性质变化所引起的扰动。

1 原油混炼调度与优化

原油调度是炼油厂炼油装置的前端, 当前主要研究的原油调度问题包括: 原油到港、卸油操作、管道输送、厂区罐收油、进常减压装置等^[4-6]。优化调度的目的大多为降低各种操作费用, 包括油轮的海上等待费用、卸油费用、码头和装置罐区的库存费用、常减压装置方案切换费用。优化模型通常

是在离散化时间模型或连续化时间模型框架下建立的混合整数非线性规划模型 (MINLP)。由于现有求解软件对 MINLP 的求解难度很大, 因此求解时通常简化处理, 即把非线性问题线性化, 变成混合整数规划问题 (MILP) 来求解。

本文所提出的原油混炼调度与优化, 是针对原油混炼过程, 以增强调合原油性质的稳定性以及保证期望产品的产量为目的的原油调度问题^[7]。原油混炼, 是目前各炼油企业针对所采购原油性质多样所采取的应对方案, 即以常用原油为基础, 掺炼一种或几种其他原油, 以减少对装置的影响。由于原油罐区储存着多种原油, 要对掺炼原油的掺炼顺序和掺炼比进行调度优化。当调度方案仅凭人工经验实施的情况下, 调合原油性质仍然有较大波动, 给常减压装置操作造成了很大的困难。本文以掺炼一种原油为例, 进行原油混炼的自动在线调度优化。

原油调合模型以“馏程”作为评价原油性质的主要质量指标, “馏程”在这里指某温度区间段原油馏出产品的分率。与此同时, 为了更全面地表征原油性质, 模型采用多段馏程描述的方式, 各馏程段温度区间的划分依据蒸馏过程得到的汽油、航空煤油、柴油等各产品的馏分范围来确定。

$$\begin{cases} P_{mixed}(s_i, m) = P_{major}(m)[1 - R_{minor}(s_i)] + \\ \quad P_{minor}(s_i, m)R_{minor}(s_i) \\ R_{minor}(s_i) = F_{minor}(s_i)/F_{mixed}(s_i) \end{cases} \quad (1)$$

其中, s_i 表示第 i 次掺炼时用的掺炼原油编号, 即 $\{s_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 是集合 $\{1, 2, \dots, N\}$ 的一个排列; $m = 1, 2, \dots, M$, 为馏程段的序号。

调度优化以减小调合原油性质波动和增加期望产品产量为优化目标。对多段馏程描述, 目标函数采用加权求和的方式, 即先在各馏程段分别评价优化结果, 再将各馏程段的评价结果加权后得到最终目标值。其中, 权系数的设置通常遵循“越轻馏程段权系数越大”的原则, 达到尽量稳定轻组分的目的, 具体数值可以根据经验和需要调整。

$$\min J = \sum_{m=1}^M w(m) \left\{ v_1 \sum_{i=1}^{N-1} [P_{mixed}(s_{i+1}, m) - P_{mixed}(s_i, m)]^2 + v_2 \sum_{i=1}^N [P_{mixed}(s_i, m) - P_{mixed}^{exp}(m)]^2 \right\} \quad (2)$$

根据常减压装置的操作需要, 优化模型具有以下约束条件。

(1) 为防止因调合原油过“轻”而出现蒸馏过

程的“冲塔”现象, 调合原油中各馏程段收率存在上限

$$P_{mixed}(s_i, m) \leq P_{mixed}^{max}(m) \quad (3)$$

(2) 装置和管线正常操作时具有流量范围约束

$$\begin{cases} F_{minor}^{min}(s_i) \leq F_{minor}(s_i) \leq F_{minor}^{max}(s_i) \\ F_{mixed}^{min}(s_i) \leq F_{mixed}(s_i) \leq F_{mixed}^{max}(s_i) \end{cases} \quad (4)$$

(3) 原油罐区各品种掺炼原油的储量

$$t_{minor}(s_i) F_{minor}(s_i) = C_{minor}(s_i) \quad (5)$$

由式 (1) ~ 式 (5) 的优化模型可知, 原油混炼调度优化问题是一个非线性优化问题, 本文采用差分进化 (DE) 智能搜索算法进行求解^[8-9]。原油混炼调度的掺炼顺序和掺炼比经优化求解确定后, 要实现掺炼比在线控制, 即掺炼原油流量和主炼原油流量的比值控制。控制方案如图 1 所示。

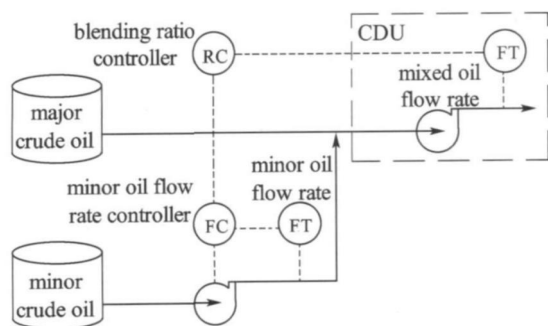


图 1 原油掺炼比在线控制方案

Fig. 1 Online control of blending ratio

通过原油混炼调度优化及掺炼比控制, 原油性质变化大幅度减小, 使得常减压装置的操作参数变化范围减小, 变化范围内模型线性化的误差明显降低, 因而软测量和控制建模中通过线性增量化方法近似, 各自只采用一个线性模型是完全可行的。

2 原油性质变化下的产品质量软测量与预测控制

通过原油混炼方法, 不可能使调合原油的每个馏程段都保持一定, 因而进入常减压装置的调合原油性质仍然会变化, 需要将这种性质变化引入软测量和控制的建模中, 才能有效克服这一干扰。

2.1 产品质量软测量

常减压装置的各种产品质量变量, 很难或不能直接通过传感器直接测得, 如果采用间接质量控制, 控制和质量相关的温度、流量等变量, 则难于实现在保证产品质量的同时获得最好经济效益的目标。随着计算机控制系统和控制理论的发展, 依据易测的过程变量与难以直接测量的质量变量之间的

数学关系, 通过各种数学计算和估计方法, 从而实现对质量变量的在线估计的软测量技术为解决这一难题提供了条件^[10]。本文采用机理分析和统计分析相结合的方法^[11], 使用基于脉冲响应模板的动态软测量模型实现常减压装置的产品质量软测量^[12], 并将原油性质作为输入变量引入软测量计算。

根据机理分析, 预先对过程变量进行预处理, 得到模型的输入变量, 以提高线性统计建模方法的适用范围^[11]。如常压一线产品终馏点的软测量输入选择为:

- ① 常压塔顶压力;
- ② 常压塔顶温度;
- ③ 常压塔顶冷回流量与进料量之比;
- ④ 常压塔顶汽油抽出量与进料量之比;
- ⑤ 常压塔一线抽出板温度;
- ⑥ 常压塔一线抽出量与进料量之比;
- ⑦ 常压塔二线抽出板温度;
- ⑧ 常压塔一中回流取热量与进料量之比

$$F_{M1, \text{retn}} (T_{M1, \text{retn}} - T_{M1, \text{draw}}) / F_{ATM};$$

- ⑨ 当前调合原油汽油段的收率估计;
- ⑩ 当前调合原油煤油段的收率估计。

基于脉冲响应模板的软测量模型描述如下

$$A(k) = \sum_{r=1}^n A_r(k) = \sum_{r=1}^n \left[\sum_{i=0}^{L_s} h_r(i) u_r(k-i) \right] \quad (6)$$

$$\begin{cases} h_r(i) = \Phi(T_1^r, T_2^r, K_p^r, \tau^r) = \\ \frac{K_p^r}{T_1^r - T_2^r} \left[\exp\left(-\frac{i-\tau^r}{T_1^r}\right) - \exp\left(-\frac{i-\tau^r}{T_2^r}\right) \right], \\ i = \tau^r + 1, \dots, L_r, r \in [1, n] \\ h_r(i) = 0, i = 1, \dots, \tau^r \end{cases} \quad (7)$$

其中, n 为软测量模型输入变量个数。

2.2 多变量预测控制

在对常减压装置产品质量进行软测量计算后, 可以实现产品质量直接控制。采用带有稳态优化的多变量预测控制方法, 可以实现对各种可测和不可测干扰的抑制, 在控制区域内达到卡边优化, 提高经济效益的目的^[13]。引入原油性质参数, 作为预测控制器的可测干扰, 可以有效对原油性质变化进行补偿和抑制。其中常压控制器的控制方案如表 1 所示。

3 应用实例分析

本文所提出的针对原油性质变化的常减压先进

表 1 常压控制方案

Table 1 Control scheme of atmosphere tower

No.	Controlled variable (CV)	Manipulated variable (MV)	Disturbed variable (DV)
1	top stage temperature of primary tower	reflux of primary tower	feed temperature of primary tower
2	100% cut point of naphtha from primary tower		feed rate of primary tower
3	top stage temperature of atmosphere tower	reflux of atmosphere tower	feed temperature of atmosphere tower
4	100% cut point of naphtha from atmosphere tower		feed rate of atmosphere tower
5	1 [#] side-draw temperature of atmosphere tower	1 [#] side-draw flow rate of atmosphere tower	naphtha yield estimation of mixed crude oil
6	10% cut point of kerosene from atmosphere tower	1 [#] pump-around flow rate of atmosphere tower	kerosene yield estimation of mixed crude oil
7	98% cut point of kerosene from atmosphere tower		light diesel yield estimation of mixed crude oil
8	flash point of kerosene from atmosphere tower		
9	2 [#] side-draw temperature of atmosphere tower	2 [#] side-draw flow rate of atmosphere tower	
10	95% cut point of light diesel from atmosphere tower	2 [#] pump-around flow rate of atmosphere tower	
11	pour point of light diesel from atmosphere tower		

表 2 各种原油基本馏程数据

Table 2 Basic data of various crude oil/%

Crude oil	HK—130℃	130—190℃	190—240℃	240—300℃	300—360℃
major oil	2. 14	1. 62	2. 96	6. 36	6. 91
minor oil					
A	4. 12	4. 51	4. 89	8. 34	7. 95
B	8. 08	8. 01	7. 28	15. 54	12. 78
C	15. 54	10. 76	8. 96	11. 33	9. 97
D	2. 25	5. 29	5. 96	10. 49	9. 74
E	11. 71	10. 05	8. 36	9. 89	10. 01
F	13. 19	14. 7	10. 05	11. 73	8. 72

表 3 原油混炼调度优化结果

Table 3 Results of blending optimization of crude oil/%

Minor oil	Blending ratio/%	HK—130℃	130—190℃	190—240℃	240—300℃	300—360℃
A	50	3. 13	3. 07	3. 93	7. 35	7. 43
F	20	4. 35	4. 24	4. 38	7. 43	7. 27
E	23	4. 34	3. 56	4. 2	7. 17	7. 62
D	38	2. 18	3. 01	4. 1	7. 93	7. 99
B	18	3. 21	2. 77	3. 74	8. 01	7. 97
C	20	4. 82	3. 45	4. 16	7. 35	7. 52

控制综合方案已成功地应用于某炼油厂常减压装置。该厂常减压装置所炼制原油以辽河原油为主，根据原油采购情况掺炼各种进口原油，长期统计的进口原油品种达到十余种，短期罐区储存的进口原油品种也有四、五种，人工经验下的原油混炼调度对装置的正常操作具有极大的干扰。

采用原油混炼自动在线调度优化后，通过对原油罐区所储存的各种原油的炼制顺序和掺炼比优化，使得调合原油的性质变化减小，降低了对装置

的干扰程度。表 2 给出了储存原油的基本数据，表 3 为调度优化结果，包括掺炼顺序和掺炼比，以及对应调合原油各馏程段的收率估计。

在将原油性质参数引入到软测量建模后，软测量计算精度也有所提高，计算结果如表 4 所示。其中原模型指未引入原油性质参数的软测量模型。

在实施了引入原油性质参数的预测控制后，装置操作平稳性明显提高。图 2 为常压控制器的主要被控变量的性能对比。

表 4 软测量计算结果
Table 4 Results of soft sensors

Soft sensor	Error/%			MSE /°C	Original MSE /°C
	≤1°C	≤2°C	≤4°C		
100% cut point of naphtha from primary tower	28.0	60.0	100.0	2.0	2.19
100% cut point of naphtha from atmosphere tower	36.0	68.0	100.0	1.69	1.78
10% cut point of kerosene from atmosphere tower	38.5	69.2	100.0	1.69	1.75
98% cut point of kerosene from atmosphere tower	30.8	61.5	100.0	1.79	1.89
flash point of kerosene from atmosphere tower	60.0	100.0	—	0.766	0.794
95% cut point of light diesel from atmosphere tower	15.40	38.50	84.60	2.57	2.76
pour point of light diesel from atmosphere tower	61.5	100.0	—	0.882	0.911

Note: MSE—mean squared error.

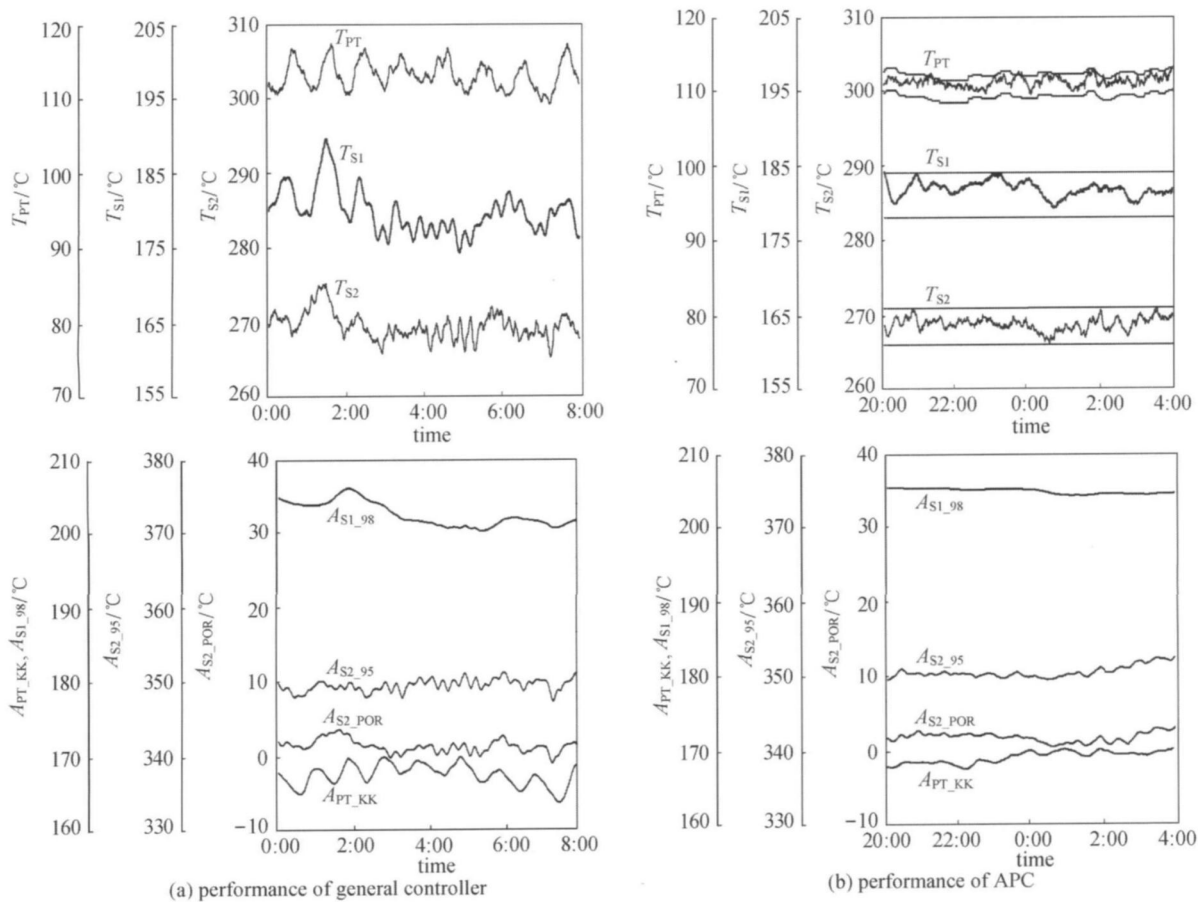


图 2 常压控制器主要被控变量性能对比

Fig. 2 Comparison of ATM controller performance (8 h)

由于原油性质，包括热容、密度等参数的变化减小，加热炉的操作难度也大为降低，操作平稳性显著提高，效果如图 3 所示。

采用针对原油性质变化的常减压先进控制综合方案后，装置的平稳性得到大幅提高，并通过卡边优化，获得了很好的经济效益。现场标定测试表明，在使用先进控制综合方案后，主要被控变量标

准差平均降低到原来的 52.7%，包括汽油、航煤和轻柴在内的轻油收率提高了 0.79% 以上。

4 结 论

本文针对原油性质变化给常减压装置操作造成的巨大困难，提出了通过原油混炼调度优化稳定原油性质，以及在软测量和控制模型中引入原油性质

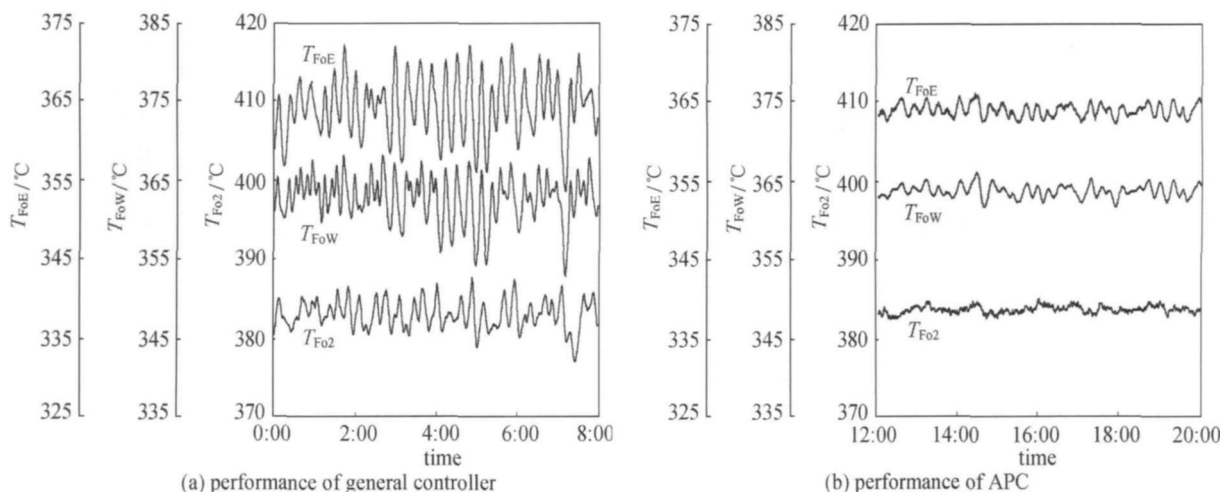


图 3 加热炉控制器性能对比

Fig. 3 Comparison of furnace controller performance (8 h)

参数的先进控制综合解决方案。此先进控制综合方案在现场装置上获得了成功应用。应用结果表明，经过原油混炼调度优化，调合原油性质变化明显减小，使得装置工作点的变化减小，利于进行软测量和先进控制实施。同时，将调合原油性质参数引入软测量模型和控制模型，也明显改善软测量计算准确度、模型预测能力和控制效果，说明此方案对于改善原油性质变化下的装置操作具有意义。

符 号 说 明

- A ——产品质量软测量值， $^{\circ}\text{C}$
 C ——原油的罐区储备量， t
 F ——流量， $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
 F_{ATM} ——常压塔进料流量， $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
 h_r ——脉冲响应模型系数
 M ——预设的馏程段总数
 m ——馏程段的序号
 N ——掺炼原油的品种数
 n ——软测量模型输入变量个数
 $P(m)$ ——原油在第 m 馏程段的收率
 R ——掺炼原油的掺炼比
 s_i ——第 i 次掺炼时用的掺炼原油编号
 T ——温度， $^{\circ}\text{C}$
 T_1', T_2', K_p', τ ——脉冲响应模板参数，分别为两个时间常数、稳态增益、纯延迟时间
 t ——原油的加工时间， h
 u_r ——软测量模型输入
 v_1, v_2 ——分别为表征提高调合原油性质平稳性和达到期望产品产量这两个目标而设置的权重

$w(m)$ ——第 m 馏程段权系数

下角标

- FoE——常压加热炉东炉室出口
 FoW——常压加热炉西炉室出口
 F2——减压加热炉出口
 M1_draw——常压塔一中回流的抽出性质
 M1_retn——常压塔一中回流的返塔性质
 major——主炼原油
 minor——掺炼原油
 mixed——掺炼后的调合原油
 PT——初馏塔顶
 PT_KK——初馏塔顶终馏点
 S1——常压塔一线
 S1_98——常压塔一线 98% 点
 S2——常压塔二线
 S2_95——常压塔二线 95% 点
 S2_POR——常压塔二线倾点

上角标

- exp——目标值
 max——上限
 min——下限

References

- [1] Tellman L D, Leahy M B. Multiple model-based control: development and initial evaluation//Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control. Tampa, 1989: 2519-2524
- [2] Aufderheide B, Prasad V, Bequette B W. A comparison of fundamental model-based and multiple model predictive control//Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, 2001: 4863-4868
- [3] Zhao Zhong, Xia Xiaohua, Wang Jingchun, Gu Jian, Jin

- Yihui. Nonlinear dynamic matrix control based on multiple operating models. *Journal of Process Control*, 2003, 13 (1): 41-56
- [4] Pinto J M, Joly M, Moro L F L. Planning and scheduling models for refinery operations. *Comp. Chem. Eng.*, 2000, 24 (9/10): 2259-2276
- [5] Joly M, Moro L F L, Pinto J M. Planning and scheduling for petroleum refineries using mathematical programming. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2002, 19 (2): 207-228
- [6] Reddy P C P, Karimi I A, Srinivasan R. A novel solution approach for optimizing crude oil operations. *AIChE Journal*, 2004, 50: 1177-1197
- [7] Huang Dexian (黄德先), Jiang Yongheng (江永亨), Bai Liang (摆亮), *et al.* A new scheduling strategy for crude oil blending based on multi-period optimization; CN, 200810112631.7. 2008-10-11
- [8] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization* II, 1997, 11 (4): 341-359
- [9] Price K, Storn R. Differential evolution (DE) for continuous function optimization [EB/OL]. <http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>, 2007
- [10] Li Chunfu (李春富). Study on data based soft sensing methods and applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004
- [11] Lü Wenxiang (吕文祥), Huang Dexian (黄德先), Jin Yihui (金以慧). Improved soft-sensor method and its applications to crude unit product quality. *Control Engineering of China* (控制工程), 2004, 11 (4): 296-298
- [12] Lü Wenxiang, Yang Qing, Huang Dexian, Jin Yihui. A dynamic soft-sensing method based on impulses response template and parameter estimation with modified DE optimization//Proceedings of the 17th IFAC World Congress-Seoul, 2008
- [13] Huang D X, Wang J C, Jin Y H. Stable MIMO constrained predictive control with steady-state objective optimization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2000, 8 (4): 332-338