

汽油管道调合过程的动态矩阵预测-专家控制

方勇纯¹, 王 宁², 王树青²

(1. 南开大学 信息学院, 天津 300071; 2. 浙江大学 先进控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 汽油管道调合是一个复杂的多变量非线性过程, 具有不确定性强、滞后时间长等特点. 本文针对汽油管道调合过程, 设计了一种先进控制策略, 它包括针对分析仪滞后特性的动态矩阵预测控制算法, 以及用于计算组分汽油流量的辛烷值专家控制器两个部分, 可以实现产品汽油辛烷值的闭环卡边控制, 降低了汽油的调合成本. 将所设计的先进控制系统应用于某炼油厂的管道汽油调合过程, 仿真研究和测试结果表明这种先进控制系统具有控制精度高、鲁棒性强等优点, 可以为炼油企业带来显著的经济效益.

关键词: 管道调合; 动态矩阵控制; 专家控制; 辛烷值分析仪

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

DMC-expert control of gasoline in-line blending processes

FANG Yong-chun¹, WANG Ning², WANG Shu-qing²

(1. Institute of Robotics and Automatic Information Systems, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: In-line blending of gasoline is a complex, multivariable, nonlinear process with strong uncertainty and large time-delay. For this processes, we propose an advanced control strategy which consists of a dynamic-matrix-control (DMC) part to deal with the large delay caused by the on-line octane analyzer, and an expert octane controller for calculating the flow of blending gasoline in each batch. The proposed control strategy performs a precise control of the octane quality of the resultant gasoline, thus reducing the blending cost. The designed strategy is applied to a practical in-line blending process in a refinery. Simulation and experimental results demonstrate such advantages as high-precision control for the octane quality of the resultant gasoline, strong robustness to various uncertainties, etc. It is expected that the designed control system will bring economic benefit for refineries by largely reducing the blending cost.

Key words: in-line blending; dynamic matrix control; expert control; octane analyzer

1 引言(Introduction)

炼油厂根据市场的要求, 经常需要优化使用各种组分汽油, 经过调合的方式来生产出高标号无铅汽油. 经过多年的发展, 汽油调合已经逐步由传统的配方罐调合发展到新兴的管道调合. 其中, 在管道调合过程中, 通过将各种组分汽油按照一定的流量比率送入管道调合器, 然后进行充分混合来得到所需要的产品汽油. 这种调合方式具有重复调合次数少, 储罐数量小, 油品库存费用低等优点, 因此近年来这种方式受到国内外炼油企业的日益重视.

为了提高炼油企业的经济效益, 需要对产品汽油的辛烷值进行精确控制. 一方面需要尽量减小辛烷值的富余量以降低生产成本, 另一方面要避免因辛烷值过低而造成重复调合^[1]. 但是, 汽油调合是一个

非常复杂的化工过程, 各种组分汽油之间存在复杂的调合效应^[2]; 调合过程中, 组分汽油的性能指标会随加工原油的不同而发生变化; 复杂的管道传输特性和辛烷值分析仪的滞后也将对调合过程产生很大的影响; 此外, 调合过程中还存在干扰等多种不确定因素的影响^[3]. 综上所述, 汽油管道调合是一个多变量的复杂非线性过程, 如何对其进行精确控制是挑战过程控制界的一个难题.

本文针对汽油管道调合过程, 设计了一种动态矩阵预测-专家控制方法, 它可以利用辛烷值分析仪的在线测量来实现对产品汽油辛烷值的闭环控制. 然后将本文所设计的先进控制系统应用于某炼油企业的实际调合过程, 测试结果表明该先进控制系统能够实现产品汽油辛烷值的卡边控制, 在此基础上, 将这

种先进控制系统在该炼油厂进行了现场调试, 获得了满意的控制性能。

2 汽油管道调合过程建模(Modeling of gasoline in-line blending process)

为了对管道调合过程进行精确控制, 需要建立产品汽油辛烷值关于各参调组分汽油流量分数及其辛烷值的模型, 并根据该模型来调节各种组分流量, 从而使产品汽油达到设定的辛烷值。调合过程中, 各种组分汽油之间存在复杂的调合效应, 调合过程还受到原油性质变化、测量噪声等多种不确定性因素的影响。此外, 由于采样传送及辛烷值在线分析的耗时^[4], 使得调合过程具有很大的时间滞后。考虑到以上这些复杂因素, 如图1所示, 将汽油调合过程分解为动态和静态两个部分^[5], 分别进行建模与控制^[6]。其中, 静态模型是考虑静态组分流量及辛烷值与静态产品汽油辛烷值之间的关系, 动态模型则是对管道调合过程中产品汽油辛烷值动态变化情况的建模。

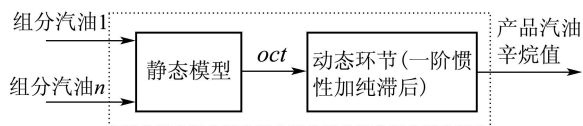


图1 汽油调合过程模型

Fig. 1 Model of gasoline blending process

考虑到本文所设计的控制系统对于过程特性的不确定性具有较强的鲁棒性, 静态模型采用常见的线性调合模型, 它直接用组分汽油辛烷值的线性组合来描述静态产品汽油辛烷值, 即

$$oct = \sum_{i=1}^n oct_i \cdot x_i, \quad (1)$$

式中: n 为参与调合的组分汽油种数, oct_i 和 x_i 分别代表各种组分汽油的辛烷值和流量分数, 静态模型的输出值以 oct 表示, 其实际意义为当忽略调合过程中纯滞后等动态特性时, 产品汽油的辛烷值。

对于调合过程中的动态特性, 可以用一个一阶惯性加纯滞后的动态环节来表示如下:

$$G(s) = \frac{e^{-\tau s}}{1 + Ts}, \quad (2)$$

式中, 调合过程的惯性时间 T 较小, 约为几十秒到几分钟, 过程纯滞后 τ 是由采样滞后和分析仪滞后造成的, 纯滞后时间可达数十分钟。

注1 由上述建模过程可以看出, 汽油调合过程中既包括具有大纯滞后的动态环节, 同时还包括具有调合效应的静态模型, 如果只采用一种控制方法来对整个复杂的调合过程进行控制具有较大的难度。所以, 在随后的控制系统

设计中, 本文将根据调合过程动、静态模型的特点, 采用一种类似于逆向递推(backstepping)的设计方法, 分别通过预测控制和专家系统对它们进行控制, 最终实现产品汽油辛烷值的卡边控制。

3 调合过程的预测-专家控制(DMC-expert control of blending process)

3.1 控制系统总体方案设计(Design of control system scheme)

调合过程中的滞后使得对汽油辛烷值的测量不能真实反映过程的动态特性, 同时也使组分汽油流量变化对产品汽油辛烷值的影响不能及时反映出来, 这很容易使系统发生震荡, 甚至不稳定。此外, 调合过程中, 产品汽油与各组分汽油之间存在着严重的关联耦合和不确定性。基于上述特点, 本文设计了一种预测-专家控制方法, 它结合图1所示的汽油调合过程模型的特点, 采用一种类似于逆向递推的设计方法, 通过两级控制方式来使产品汽油辛烷值达到设定值。为此, 首先由辛烷值设定值的动态补偿器来对调合过程中的纯滞后等动态环节(2)进行控制, 设计出期望的静态模型输出值, 并将其以信号 oct_{sp} 表示。然后将这个设定值作为辛烷值专家控制器的控制目标, 并根据静态模型(1)来设计相应的专家规则, 计算出各种组分汽油的流量设定值, 使调合过程的静态特性实现控制目标。在此基础上, 通过下层的DCS来进行组分汽油的流量控制。综上所述, 这种先进控制系统的总体结构如图2所示。

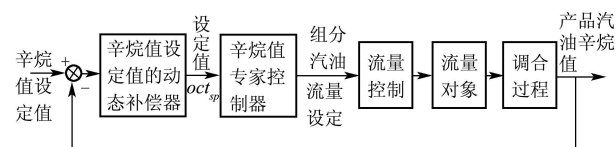


图2 先进控制系统结构图

Fig. 2 Block diagram of advanced control system

3.2 DMC算法设计(DMC algorithm design)

本文所设计的动态补偿器采用动态矩阵控制算法(DMC), 其作用是针对调合过程的动态特性来对产品汽油辛烷值进行预测控制。在设计过程中, 根据调合过程中的大纯滞后特性以及DMC算法的特性, 将首先针对与式(2)相对应的无滞后一阶惯性系统进行设计, 然后再把获得的控制律往后进行相应延伸^[7]。在设计过程中, 需要测定调合过程动态环节的模型向量, 该模型向量可以通过以下方法获得: 汽油管道调合装置稳定运行一段时间后, 突然增加某种组分的流量分数, 从而改变调合汽油的静态辛烷值, 这时测定产品汽油的辛烷值在原有基础上的

改变量, 并进行相应变换, 就可以得到所需要的模型向量, 然后对汽油管道调合系统进行DMC算法设计. 为此, 需要将在线分析仪测量得到的产品汽油辛烷值与设定值进行比较, 产生的偏差量输入设定值的动态补偿器, 在给定的产品辛烷值约束下, 根据系统的动态特性可以求得最优静态辛烷值 oct_{sp} .

参数的选择是DMC控制算法设计的关键. 由于汽油管道调合系统具有很大的纯滞后, 模型长度应该取得足够大, 但是模型长度越大, DMC控制算法中相应矩阵阶数也越高, 导致存储量和计算量的大幅度增加, 因此在实际应用时, 要兼顾到对象动态信息和计算简便两方面的要求, 对模型长度进行合理选择.

3.3 辛烷值专家控制器设计(Octane expert controller design)

通过动态补偿器得到的 oct_{sp} 将作为辛烷值专家控制器的设定值, 根据调合过程的静态模型以及生产工艺要求、各组分汽油生产状况、管道调合装置等约束来决定各组分汽油的流量值, 使得

$$\begin{cases} f(oct_i, x_i) = oct_{sp}, \\ \text{s.t. } g(x_i) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $f(\cdot)$ 表示调合过程的静态模型, oct_i 和 x_i 分别代表参与调合的各组分汽油的辛烷值和流量分数, oct_{sp} 表示根据DMC算法得到的设定值, $g(x_i) = 0$ 则代表由于工艺要求所引入的约束条件. 但是, 对式(3)进行求解来决定各组分的流量具有较大的难度, 其主要原因是难以建立高精度的静态调合模型, 而且各种约束条件很难进行明确的数学描述. 基于上述原因, 本文根据管道汽油调合过程生产工艺的要求来设计专家控制算法^[8], 以获得各种组分汽油流量的设定值.

在管道汽油调合时, 由于无组分罐, 大多数组分汽油都不能进贮罐, 因此必须将生产装置出来的这些组分汽油全部调合成产品汽油. 此外, 调合过程还受到其它条件的约束, 例如, 在调合过程中, 各种组分汽油的流量必须尽量保持平稳; 由于受到管道的约束, 在调合过程中, 需要保持各种组分汽油的总流量(即产品汽油的流量)不变. 在管道调合过程中, 各种组分对产品汽油辛烷值的影响是不同的. 在设计专家控制算法时, 为了尽量保持各组分汽油流量的平稳, 选择影响较大且具有储罐的组分汽油作为主调控制量, 优先改变它的流量值, 在此基础上, 再来依次调节其它的各种组分汽油.

根据上述基本规则以及调合工艺的其它要求, 可以设计相应的流量控制专家规则, 并通过控制软件来具体实现. 值得指出的是, 对于各个炼油厂的汽油管道调合过程而言, 它们通常具有不同的工艺特点

和基本要求, 因此而设计的专家规则也将随之变化.

4 应用实例(Application example)

某炼油厂使用3种组分汽油: 催化汽油、重整汽油以及MTBE进行管道调合来生产93号汽油. 由于无组分罐, 3种组分汽油中只有MTBE可以进贮罐, 因此必须将生产装置出来的催化汽油和重整汽油全部调合成产品汽油, 以保证生产装置的安全. 但是, 该炼油厂的MTBE产量较低, 无法将所生产的催化汽油和重整汽油全部调合成高标号93号汽油. 因此, 在调合过程中, 要求尽可能地用MTBE来多生产93号汽油, 然后用剩余的催化汽油、重整汽油、少量MTBE, 再加上其它组分来生产低标号汽油.

按照上述工艺要求, 应用本文所提出的动态矩阵预测-专家控制算法, 以MTBE作为主调量, 设计了管道汽油调合先进控制系统, 并且对控制系统的性能进行了仿真测试. 仿真时采用的调合过程静、动态模型如下:

$$oct = 91x_1 + 92x_2 + 116x_3 + 5.9x_1x_2 - 7.6x_1x_3 - 0.6x_2x_3, \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{e^{-30s}}{1 + 6.51s}. \quad (5)$$

上式中, x_1 , x_2 , x_3 分别表示催化汽油、重整汽油和MTBE的流量分数. 仿真过程中控制周期取为15分钟. 在炼油厂进行实际调合时, 为避免出现负偏差, 一般将产品汽油设定值加上一定的富余量. 在仿真时, 将富余量取为0.1, 因此, 对于汽油调合先进控制系统而言, 产品汽油辛烷值的设定值为93.1(即图2中的辛烷值设定值取为93.1). 同时假设各组分汽油的辛烷值存在1个单位的白噪声波动, 近红外辛烷值分析仪的测量误差为0.2个单位白噪声辛烷值. 为了测试系统的鲁棒性, 假设当系统运行到第100个控制周期时, 该管道调合过程特性突变为

$$oct = 90x_1 + 91x_2 + 118x_3, \quad (6)$$

$$G(s) = \frac{e^{-60s}}{1 + 5.00s}. \quad (7)$$

实验得到如图3所示的产品汽油辛烷值响应曲线. 调合过程结束后, 由累计计算得到的产品汽油辛烷值为 $\overline{oct} = 93.067$.

从仿真结果可以看出, 调合后得到的产品汽油辛烷值无负偏差, 正偏差小于0.1个单位辛烷值, 实现了产品汽油辛烷值的卡边控制, 而且当过程特性在第100个周期发生突变时, 系统能较快地恢复到原来的稳态值, 表明本文所设计的管道调合先进控制系统具有较强的鲁棒性. 此外, 在仿真过程中, 各组分汽油的流量在前后两个控制周期之间变化较小, 而且管道总流量也基本稳定, 说明该汽油调合先进控

制系统的平稳性很好。

在得到满意的仿真效果以后, 将所设计的动态矩阵预测-专家管道调合先进控制系统在该炼油厂进行了现场调试, 测试结果表明产品汽油辛烷值无负偏差, 正偏差在合理的范围之内, 而且整个调合系统运行平稳, 有望取得良好的经济效益。

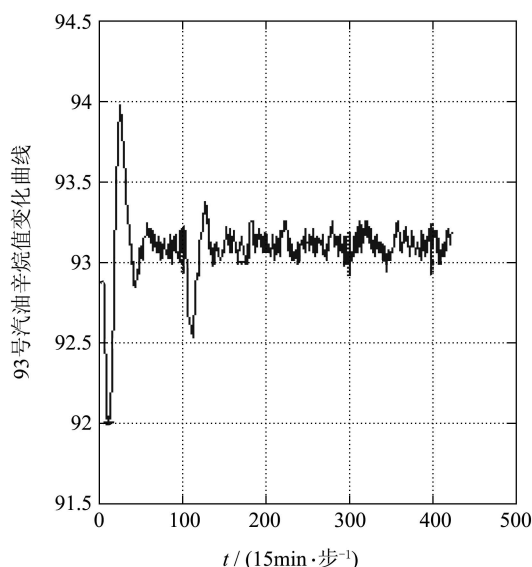


图3 产品汽油辛烷值曲线

Fig. 3 Octane curve of the resultant gasoline

5 结论(Conclusions)

针对汽油管道调合过程这种复杂的多输入单输出多变量受控对象, 本文设计了一种动态矩阵预测-专家控制系统, 实现了产品汽油辛烷值的卡边控制。然后本文以某炼油厂的汽油管道调合过程为例, 对所设计的先进控制系统进行了仿真研究及现场调试。结果表明本文设计的汽油管道调合先进控制系统, 具有控制方法简单, 精度高等优点。尤其是在存在多种干扰和大的模型摄动的情况下, 动态矩阵预测-专家控制仍然能对调合过程实施有效的控制。由于上述优点, 本文所设计的先进控制系统可以应用于对炼油厂的实际调合过程进行控制, 并取得良好的经济效益。

参考文献(References):

- [1] 伍锦荣, 章云, 隆亚新. 汽油调合自动控制系统综述[J]. 石油化工自动化, 2005, 1: 79 – 82.
(WU Jinrong, ZHANG Yun, LONG Yaxin. Summary of automatic control system for gasoline blending[J]. *Automation in Petrochemical Industry*, 2005, 1: 79 – 82.)
- [2] TWU C H, COON J E. Estimate octane numbers using an enhanced method[J]. *Hydrocarbon Processing*, 1997, 3: 65 – 68.
- [3] 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.
- [4] 韩言正, 戴连奎. 基于近红外光谱的汽油辛烷值在线分析仪[J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(3): 68 – 71.
(HAN Yanzheng, DAI Liankui. Online analyzer of gasoline octane number based on NIR spectrogram[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2005, 32(3): 68 – 71.)
- [5] YU W, MORALES A. Gasoline blending system modelling via static and dynamic neural networks[J]. *International Journal of Modeling and Simulation*, 2004, 24(3): 151 – 160.
- [6] 张建明, 王树青, 王宁. 基于专家模糊控制的汽油管道调合系统研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2005, 35(3): 1 – 4.
(ZHANG Jianming, WANG Shuqing, WANG Ning. The gasoline pipeline blending system based on expert fuzzy control[J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2005, 35(3): 1 – 4.)
- [7] 刘富春, 赵均, 钱积新. 多变量约束快速动态矩阵控制算法研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(5): 672 – 675.
(LIU Fuchun, ZHAO Jun, QIAN Jixin. Research on multivariable constrained fast dynamic matrix control algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2005, 39(5): 672 – 675.)
- [8] 张化光. 智能控制基础理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
(ZHANG Huaguang. *Elementary Theory and Applications for Intelligent Control*[M]. Beijing: Mechanical Engineering Press, 2005.)

作者简介:

方勇纯 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 主要研究方向为复杂系统非线性控制、机器人视觉控制等, E-mail: yfang@robot.nankai.edu.cn;

王宁 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物计算与智能系统、计算机控制与优化等, E-mail: nwang@iipc.zju.edu.cn;

王树青 (1939—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工业生产过程的模型化与优化控制、先进控制等, E-mail: sqwang@iipc.zju.edu.cn.