

基于多模型切换控制的煤气化工业过程先进控制

张天辰, 赵 众

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要: 煤气化是煤化工生产过程的重要组成部分。煤气化过程以煤和氧气作为主要反应原料, 在高温高压条件下发生化学反应生成粗合成气。相较石油化工业, 煤气化工业过程的先进控制 (APC) 实施有较大难度, 原因在于煤气化过程中煤质不断变化, 导致传统的基于单一模型的先进控制方法会引起控制器模型失配问题, 引发生产过程中关键参数 (氧煤比、气化炉温度) 的较大波动。针对上述问题, 基于水煤浆气化炉的生产实际, 提出了一种基于多模型切换的动态矩阵控制方法。在离线状态下, 利用不同煤质工况下的过程数据, 构造多工况模型集。在线控制时, 采取累积平方误差-总平方波动 (ISE-TSV) 作为控制器性能指标表征控制器性能与模型失配程度, 同时使用多模型预测值作为模型切换准则。通过多模型切换动态矩阵控制, 实现了煤气化单元的先进控制。根据所提方法开发了多模型切换控制软件 Wisdom-Controller, 在 UniSim 平台上进行了控制模拟, 并进行了工业应用测试, 模拟及工业应用测试结果证实了所提方法能够在煤质工况波动的情况下, 实现氧煤比及气化炉温度的精准控制。对比传统的人工手动操作, 基于多模型切换控制的先进控制方法降低了氧煤比及气化炉温度均方控制偏差。同时减少了比煤耗, 增加了合成气体产量, 显著提高了装置的经济效益。从而为实现煤气化工业过程的先进控制提供了一条新的有效途径。

关键词: 煤气化; 工况变化; 多模型切换; 动态矩阵控制; 先进控制

中图分类号: TQ546

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)04-1747-12

Advanced process control of coal gasification industrial process based on multiple models switching control

ZHANG Tianchen, ZHAO Zhong

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Coal gasification is a crucial unit of coal chemical production process. Coal and oxygen are used as the main reaction raw materials in the coal gasification process and the crude syngas is generated by chemical reaction under high temperature and high pressure. Compared with the petrochemical industry, it is more difficult to implement advanced process control (APC) in the coal gasification industrial process because of the time varying disturbance of coal quality. The time varying disturbance may lead to the mismatch of the APC model that could cause some large fluctuations of key process indices (oxygen coal ratio and gasifier temperature). In view of above problems, based on the actual production of coal-water slurry gasifier, a dynamic matrix control method based on multiple models switching is proposed in this paper. The off-line process data under different coal quality conditions are used to construct a multiple working model set for on-line dynamic matrix controller. The intergral squared error-total squared variation (ISE-TSV) is used as the controller per-

收稿日期: 2022-04-20 修回日期: 2022-07-13 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0549

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (4172044)

作者简介: 张天辰 (1997—), 男, 福建福州人, 硕士研究生。E-mail: 2020200752@mail.buct.edu.cn

通讯作者: 赵 众 (1970—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士生导师。E-mail: zhaozhong@mail.buct.edu.cn

引用格式: 张天辰, 赵众. 基于多模型切换控制的煤气化工业过程先进控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1747-1758.

ZHANG Tianchen, ZHAO Zhong. Advanced process control of coal gasification industrial process based on multiple models switching control[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1747-1758.



移动阅读

formance index to monitor the controller performance and model mismatch and the multiple model prediction value is used as the model switching criterion. The advanced control of the coal gasification unit is realized through the multiple models switching dynamic matrix control. According to the proposed method, a multiple model switching control software Wisdom-Controller has been developed. The Wisdom-Controller has been tested on the UniSim simulation platform and applied to the real industrial gasifier. The simulation and industrial application results have verified that the proposed method can accurately control the change of oxygen-coal ratio and gasifier temperature under the condition of fluctuating coal quality conditions. Compared with the traditional manual operation, the mean square control deviation of oxygen-coal ratio and the gasifier temperature have been reduced obviously with the proposed advanced process control method based on multiple models switching. Also, the specific coal consumption has been reduced, the synthetic gas output has been increased and the economic benefit of the unit has been significantly improved. The industrial application results have verified that the proposed method provides a new and effective way to realize the advanced process control of coal gasification industrial process.

Key words: coal gasification; working condition change; multiple models switching; dynamic matrix control; advanced process control

煤气化是一个热化学加工过程,以煤和氧气作为主要反应原料,在高温高压条件下发生化学反应生成粗合成气^[1]。气化过程伴随着煤质的多变,引起了生产的波动性,主要表现在关键变量氧煤比及气化炉温度的波动^[2-3]。依托先进控制 (APC) 技术对气化系统进行先进控制和实时优化,结合稳态和动态模型预测生产过程等智能化方式^[4-5]可以帮助操作人员快速响应煤质及负荷等工况切换,使煤气化操作始终保持接近最优操作点的“卡边”优化运行,能为企业创造更大的效益已成为煤化工企业的共识^[6]。

相较于石油化工行业,煤化工行业在工业智能化方面发展相对落后。尤其在煤气化工业领域,APC 的应用相对较少。2015 年,神华包头煤化工公司在聚乙烯和聚丙烯装置上引进 APC 先进控制系统^[7],使工艺系统的自动化程度大大提高,但也指出了 APC 系统必须在相对稳定条件下使用,仍存在改进空间。2018 年,江凤月等^[8]将 APC 技术运用在煤制氢装置,通过单元优化煤耗降低了 1.83%。2019 年,晁澄^[9]将 APC 技术运用在 GE 单喷嘴水煤浆气化中,这次 APC 首次运用在水煤浆气化炉上,单位煤的有效气产量提高了 0.24%。同年,张成学等^[10]在四喷嘴水煤浆气化装置上运用 APC,有效减少了关键变量的波动幅度。2020 年,MIGHANI M 等^[11]将 APC 应用于气化过程,减少了生产每单位有效合成气所需的氧气 1% 以上、煤炭 3% 以上。2021 年,方薪晖^[12]介绍了 APC 技术在日投料 3 000 t 的超大型水煤浆气化炉上的应用。

工业上常用的先进控制算法主要是模型预测控制 (MPC)^[13-14],其有较好的闭环稳定性和鲁棒性(抗干扰能力)。然而传统的基于线性模型的预测控制难以适应工况的大幅变化,即应用于煤气化过程,难以

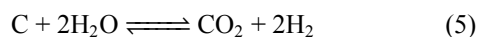
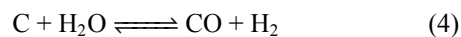
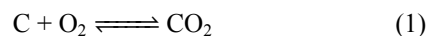
适应煤质的变化,存在一定的局限性。

笔者提出了一种基于多模型切换的动态矩阵控制方法。在离线状态下,利用不同煤质工况下的过程数据,构造多工况动态模型集。在线控制时,采取累积平方误差-总平方波动 (ISE-TSV) 作为控制性能指标^[15],用于判别煤质变化,同时使用多模型预测值作为模型切换准则。通过多模型切换动态矩阵控制,实现了煤气化单元的先进控制。所提方法在 UniSim 平台上进行了模拟,并进行了工业应用测试,模拟及工业应用测试结果证实了所提方法能够在煤质工况波动的情况下,实现对煤气化炉关键变量的精准控制。

1 煤气化工艺及控制需求

1.1 煤气化工艺

在气化炉内,煤中的碳元素主要发生如下反应^[16],其中目标产品是 CO 和 H₂。



1.2 水煤浆气化技术

常见的水煤浆气化技术是德士古水煤浆加压气化技术^[17],该工艺采用水煤浆及氧气作为原料,对其

进行加压处理,生成合成气。其工艺流程如图 1 所示。煤浆槽中的水煤浆通过高压煤浆泵加压,结合高压氧气。2 者按照一定比例混合进入气化炉上方的燃烧室,水煤浆被雾化成细小的颗粒。在高温高压条件下进行一系列反应生成粗合成气及少量残渣。反应生成的合成气进入在气化炉下部的激冷室内被激冷水冷却后从气化炉侧面的气体出口管处排出;熔渣沉降于激冷室底部,通过气化炉底部锁斗进行排渣,气化炉中下部排出的黑水排至灰水处理系统。合成气排出后进入碳洗塔内与洗涤水混合,进行洗涤除尘工艺,最终得到水煤浆气化工工艺的目标产品。

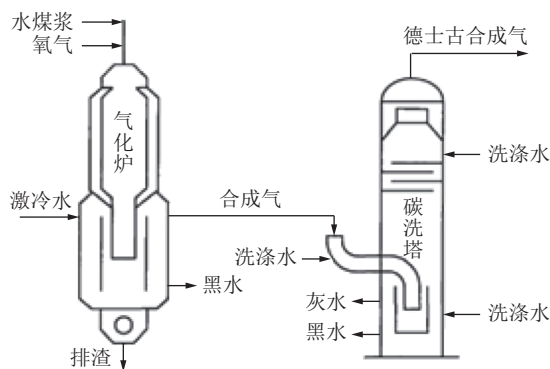


图 1 德士古煤气化工艺流程

Fig.1 Technological process of Texaco coal gasification

1.3 煤质对气化的影响

煤质是影响煤气化安全性和操作平稳性的关键指标^[18-20]。根据水煤浆气化的工艺特点,本文研究煤质的变化指标包括水分、固定碳成分、灰分、挥发分。

(1) 水分。水分主要考虑煤中的内在水分。在水煤浆制备过程中,水分影响煤浆浓度,煤的内在水分越低,煤浆浓度越高。煤浆浓度越高,进入煤气化炉内的水分越少,从而减少了蒸发水分所需的热量,气化炉温度也会有有一定程度的变化。

(2) 灰分。煤的灰分是指煤完全燃烧后的固体残渣,一般来源于矿物质。煤的灰分越高,其发热量越低,不仅影响了气化炉的经济效应,还增大了排灰的环境压力。低灰熔点的煤也会影响煤气化炉的渣口压差及气化炉的温度,对煤气化炉的安全造成较大影响。

(3) 挥发分。煤的挥发分是指煤样在隔绝空气条件下加热至一定温度后除掉外部水分,分解出的液体和气体产物。煤的挥发分影响煤气的热值,在一定程度上影响气化炉的温度。

(4) 固定碳。煤中的固定碳成分是去除水分、灰分、挥发分后剩余的残留物。煤的发热量主要由固定碳燃烧产生,固定碳成分变化对气化炉的温度将产生较大影响。

1.4 煤气化操作难点及先进控制器结构

煤气化过程中,氧煤比作为关键操作变量显著影响了工艺的安全性与产品的经济性^[21-22]。当前煤气化工艺下,氧煤比大都通过手动控制氧气流量以及煤浆流量来实现其稳定^[23],但由于阀门的滞后性与精确性,氧气流量和煤浆流量往往波动较大,造成氧煤比随之波动。氧煤比不仅受装置影响,还与煤质特性有关,主要包括固定碳成分、灰分、挥发分。

为了解决煤质对气化炉的影响,笔者提出了多模型切换动态矩阵控制的方法。煤气化炉系统是一个煤质多变的非线性对象,单一的模型难以概述这一非线性系统^[24]。因此需要在不同煤质的工况下建立模型,利用动态矩阵控制方法实现多工况煤气化过程的多变量协调先进控制。根据水煤浆气化的生产实际与工业控制需求,设计的先进控制器结构见表 1。被控变量中,氧煤比和气化炉炉温是安全性约束指标,其中氧煤比的权重更大,被控变量权重越大,代表该变量对于工艺安全来说越重要。干扰变量则选取煤质特性中不可测的固定碳成分、挥发分、灰分。表 1 中的干扰变量煤质难以实时测量^[25],用离线化验分析值来表征工况的变化。

表 1 煤气化炉先进控制器结构

Table 1 Advanced controller structure of coal gasifier

变量类型	变量名称	变量描述	单位
操纵变量(MV)	MV1	氧气流量	Nm ³ /h
	MV2	煤浆流量	t/h
被控变量(CV)	CV1	氧煤比	Nm ³ /m ³
	CV2	气化炉温度	℃
干扰变量(DV)	DV1	煤质特性—固定碳成分	%
	DV2	煤质特性—挥发分	%
	DV3	煤质特性—灰分	%

煤气化炉系统的控制目标为通过调整氧气回路和煤浆回路设定值,以保证氧煤比及气化炉温度稳定在所需的控制区间内。

2 煤气化炉多模型切换控制

常用的预测控制算法是动态矩阵控制算法,它是工业上应用最广的先进控制算法之一^[26],以稳态操作点附近的阶跃响应模型作为预测模型。煤气化炉系统作为一个非线性动态系统,具有明显的操作区域变化特征。预测控制方法具有前馈补偿性能,可以有效针对炉温热电偶的滞后特性。

2.1 多煤质模型的非线性动态表述

考虑如图 2 所示的非线性动态系统,其中, G_0 为

非线性动态对象; G_c 为控制器模型; r 为系统设定值; d 为系统扰动; u 为控制器输出; y 为系统实际输出; e 为系统的误差。

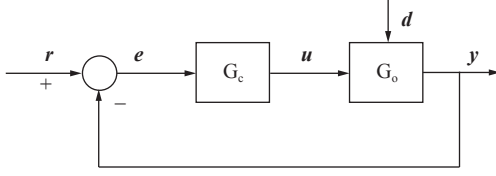


图 2 非线性动态模型

Fig.2 Nonlinear dynamic model

考虑线性时不变系统,即系统的参数不随时间变化,非线性对象及控制器的动态模型分别为

$$G_o: \begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)) \\ \mathbf{y}(k) = g(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \end{cases} \quad (8)$$

$$G_c: \begin{cases} \mathbf{w}(k+1) = p(\mathbf{w}(k), \mathbf{e}(k)) \\ \mathbf{u}(k) = q(\mathbf{w}(k), \mathbf{e}(k)) \end{cases} \quad (9)$$

式中, k 为系统的采样时刻; $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为非线性对象的状态变量; $\mathbf{w}(k) \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 为控制器的状态变量; $f(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 、 $p(\cdot)$ 、 $q(\cdot)$ 为对应的非线性稳态函数。

忽略闭环非线性系统的静态误差,即

$$\mathbf{e} = \mathbf{r} - \mathbf{y} = \mathbf{0} \quad (10)$$

对给定的设定值 \mathbf{r}_0 和扰动 \mathbf{d}_0 , 根据式 (8)、(10) 可以得到一个静态工作点 $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{w}_0, \mathbf{d}_0, \mathbf{0})$ 满足

$$f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{d}_0) = \mathbf{0} \quad (11)$$

在静态工作点泰勒展开,可以得到在该点处线性化后的模型

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}(k+1) &= \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x}(k) + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}(k) \\ \Delta \mathbf{y}(k) &= \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x}(k) + \frac{\partial g}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\Delta \mathbf{x}(k)$ 为状态变量的变化量。同理得到静态工作点线性化后的控制器模型

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{w}(k+1) &= \frac{\partial p}{\partial \mathbf{w}} \Delta \mathbf{w}(k) + \frac{\partial p}{\partial \mathbf{e}} \Delta \mathbf{e}(k) \\ \Delta \mathbf{u}(k) &= \frac{\partial q}{\partial \mathbf{w}} \Delta \mathbf{w}(k) + \frac{\partial q}{\partial \mathbf{e}} \Delta \mathbf{e}(k) \end{aligned} \quad (13)$$

由被控对象线性化模型 (式 (12)), 可以利用线性控制理论设计线性控制器 (式 (13))。

但仅通过一个静态工作点设计控制器会丢失大量 G_o 的非线性静态和动态信息,使得控制器在设定值和扰动变化情况下的性能下降^[27]。因此,需要将设定值和干扰信息考虑到控制器模型中。定义设定值 r 的变化范围,在设定值范围内选择 S 个离散点,可以得到一组闭环工作点:

$$\mathbf{Z}_r \in \mathbf{r}_i, i = 1, 2, \dots, S \quad (14)$$

对于每个工作点 \mathbf{r}_i , 定义扰动 d 的变化范围 $d \in [d_{\min}, d_{\max}]$, 并选择 N_{r_i} 个在变化范围内的扰动点,用线性子模型来描述系统在操作点附近的系统行为。

因此,可以用 $\sum_{i=1}^S N_{r_i}$ 线性系统来表示该非线性系统 G_o 。
 $\sum_{i=1}^S N_{r_i}$ 线性系统即可使用线性控制理论设计线性控制器。

上述离散化工作点的方法可以看作一个工艺操作区域的识别问题运用于煤气化炉对象的多煤质模型建立。

2.2 动态矩阵控制 (DMC)

动态矩阵控制算法是一种基于被控对象阶跃响应模型的预测算法,具有易于建模、鲁棒性强的特点^[28]。动态矩阵控制算法包括预测模型、滚动优化、反馈校正 3 个原则。

2.2.1 基于对象阶跃响应的预测模型

通过对对象的传递函数或状态空间关系可以得到系统的阶跃响应系数矩阵,也称动态矩阵。

$$\mathbf{S}^u = \begin{bmatrix} S_1^u & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ S_2^u & S_1^u & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ S_M^u & S_M^u & \cdots & \cdots & S_1^u \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ S_P^u & S_{P-1}^u & \cdots & \cdots & S_{P-M+1}^u \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{S}^u \in \mathbf{R}^{P \times M}$, $S_1^u \sim S_{P-M+1}^u$ 为对象的阶跃响应系数; P 和 M 分别为预测步长和控制步长,需定义为 $P \geq M$ 。预测步长 P 和控制器的稳定性和快速性有关,控制步长 M 影响系统的灵敏度。

基于阶跃响应系数矩阵得到被控变量在 $k+1$ 时刻的 P 步预测值:

$$\mathbf{Y}(k+1) = \mathbf{Y}(k) + \mathbf{S}^u \Delta \mathbf{U}(k) \quad (16)$$

式中, $\mathbf{Y}(k) \in \mathbf{R}^{P \times 1}$ 为被控变量的预测值; $\Delta \mathbf{U}(k) \in \mathbf{R}^{M \times 1}$ 为操纵变量的变化量。

2.2.2 滚动优化策略

控制器的理想控制目标是通过尽可能小的调整,实现被控变量实际值跟踪设定值的效果。由此定义优化求解的目标函数为

$$\min_{\Delta \mathbf{U}(k)} \|\mathbf{Y}(k) - \mathbf{R}(k)\|_{\mathbf{r}}^2 + \|\Delta \mathbf{U}(k)\|_{\mathbf{r}^u}^2 \quad (17)$$

其中, $\mathbf{R}(k) \in \mathbf{R}^{P \times 1}$ 为被控变量设定值; $\mathbf{I}^y \in \mathbf{R}^{P \times P}$ 和 $\mathbf{I}^u \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 分别为跟踪误差作用的加权对角矩阵和控制作用的加权对角矩阵,用于表征目标函数的权值。

2.2.3 反馈校正方式

阶跃响应模型不能完全准确地实现控制系统的

动态描述, 因此需要通过反馈校正, 实时对输出反馈进行处理, 改善预测值, 提高控制器的鲁棒性。将系统的预测值 $\mathbf{Y}(k+1)$ 与实际输出 $\mathbf{Y}_0(k+1)$ 比较, 得到系统的反馈校正偏差矩阵 $\mathbf{E}(k+1) \in R^{P \times 1}$ 为

$$\mathbf{E}(k+1) = \mathbf{Y}_0(k+1) - \mathbf{Y}(k+1) \quad (18)$$

将反馈校正部分代入预测值, 校正预测方程得到带有反馈校正的模型预测值为

$$\mathbf{Y}(k+1) = \mathbf{Y}(k) + \mathbf{S}^u \Delta \mathbf{U}(k) + \mathbf{H} \mathbf{E}(k+1) \quad (19)$$

式中, $\mathbf{H} \in R^{P \times P}$ 为反馈校正对角矩阵。

2.2.4 在线求解

控制作用的优化求解过程中, 考虑以下 3 种变量约束: ① 操纵变量 $\mathbf{U}(k)$; ② 操纵变量的变化量 $\Delta \mathbf{U}(k)$; ③ 被控变量 $\mathbf{Y}(k)$ 。将约束引入控制作用求解的线性二次规划问题中, 实时在线求解 DMC 的控制作用。

引理 若被控对象为渐近稳定, 且多个静态动作点能够表征整个模型, 则存在一个控制器是渐近收敛的^[29]。即可通过多模型切换策略筛选控制器, 使当前控制器保持收敛状态。

2.3 多煤质控制模型切换准则

对于煤气化工作过程, 可以由一组局部的线性模型来表述。煤质干扰对控制器的影响可以看作一个工况变化的过程。控制器模型切换的目标是从气化炉模型集中挑选出尽可能满足当前工况的控制器模型。煤质模型数据集的构建是在不影响正常工艺操作的基础上, 离线测量扰动变化, 采集离线数据构造的多工况控制器模型集。在线控制时, 通过控制器性能指标监测及模型切换准则选取合适的控制器模型。本文提出的基于多煤质控制模型的动态矩阵控制器结构如图 3 所示。

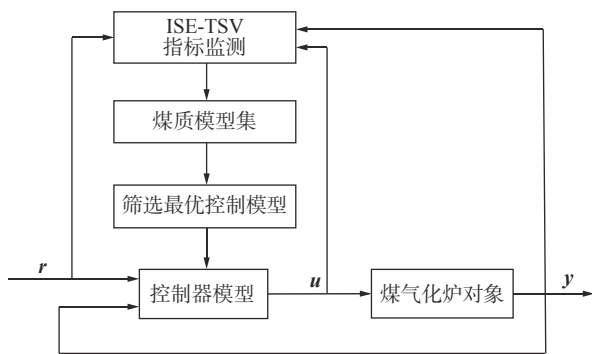


图 3 多煤质控制模型的动态矩阵控制器结构

Fig.3 Dynamic matrix controller structure of multiple coal quality control models

采用累积平方误差 (ISE) 和总平方波动 (TSV) 作为综合性能指标评价先进控制器性能^[30]。累积平方误差用于表征控制器的抗干扰性能, 它的定义为被控变量在一段时间的控制偏差, 即

$$\text{ISE} := J_1 = \sum_{i=1}^{n_{\text{CV}}} \alpha_{1i} J_{1i} \quad (20)$$

$$J_{1i} = \int_0^{T_0} [e_i(t)]^2 dt = \int_0^{T_0} [y_i(t) - r_i(t)]^2 dt \approx T \sum_{k=0}^{T_0} [y_i(k) - r_i(k)]^2 \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{CV}} \quad (21)$$

式中, n_{CV} 为被控变量个数; T_0 为控制器评价时长; T 为采样周期; $e_i(t)$ 为第 i 个被控变量的控制偏差, 定义为 $e_i(t) = y_i(t) - r_i(t)$, 即第 i 个被控变量实际值与设定值的偏差; α_{1i} 为对应被控变量的 ISE 权值。

总平方波动用于表征控制器的控制消耗, 它的定义为操纵变量在一段时间的输出波动, 即

$$\text{TSV} := J_2 = \sum_{i=1}^{n_{\text{MV}}} \alpha_{2i} J_{2i} \quad (22)$$

$$J_{2i} = \int_0^{T_0} \left(\frac{du_i(t)}{dt} \right)^2 dt \approx \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{T_0} [u_i(k+1) - u_i(k)]^2 \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{MV}} \quad (23)$$

式中, n_{MV} 为操纵变量个数; $u_i(t)$ 为第 i 个操纵变量输出; α_{2i} 为对应操纵变量的 TSV 权值。

将上述 2 个性能指标加权后得到模型切换的指标判别为

$$J = J_1 + J_2 \quad (24)$$

α_{1i} 、 α_{2i} 根据控制需求及 2 个性能指标之间的重要程度进行加权给定, J 越小代表控制器性能越优。

在煤气化炉性能监测过程中, 需定义 ISE-TSV 的评价时长 T_0 , 以及允许接受的性能指标上限 J_{max} 即可接受的最大模型失配程度。当 APC 投用过程中, 监测到的性能指标大于 J_{max} 时, 启动模型切换算法。

考虑到煤气化过程的模型失配主要由煤质改变造成, 对于模型预测控制来说, 模型失配将产生较大的预测偏差。因此本文采取最小预测偏差作为模型切换准则。预测偏差定义为一定时间内被控变量当前值与预测值之间的累积偏差, 也就是预测模型与实际模型的匹配程度。需要对 n_c 个控制器模型分别求取预测偏差, 其中对第 j 个控制器模型求解偏差过程如下:

$$E(j) = \sum_{i=1}^{n_{\text{CV}}} \alpha_{1i} e_{\text{pre},i} \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{CV}} \quad j = 1, 2, \dots, n_c \quad (25)$$

$$e_{\text{pre},i} = \int_0^{T_0} |y_i(t) - y_{\text{pre},i}(t)| dt \approx T \sum_{k=0}^{T_0} |y_i(k) - y_{\text{pre},i}(k)| \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{CV}} \quad (26)$$

其中, $e_{\text{pre},i}$ 为第 i 个被控变量的预测偏差, 定义为 T_0 时间内的实际值与预测值的累积偏差; $y_{\text{pre},i}(t)$ 为第 i 个被控变量的预测值; $y_i(t)$ 为实际值。式 (25) 中的权值同式 (22) 中 ISE 权值。

当监测到性能指标高于性能指标上限 J_{max} 时, 启动控制器切换算法。对 n_c 个控制器模型分别求取预测偏差, 在煤质模型数据集中选取最小预测偏差的控制器, 即

$$E_{\min} = \min \{E(j), j = 1, 2, \dots, n_c\} \quad (27)$$

从而得到对应的控制增量

$$\Delta U(t) = \Delta U_{E_{\min}}(t) \quad (28)$$

控制器切换过程中, 为了防止被控变量超限需要提前定义约束条件^[31]。定义切换过程中引起的被控变量的最大允许预测控制误差 $\Delta Y_{\text{pm}} \in R^{n_{\text{cv}} \times 1}$, 当该误差过大时, 说明当前工况模型切换到另一工况模型引起的装置偏差过大, 该切换将被停止, 此时需要等工况稳定后再次进行切换。限定了上述约束, 可实现控制器模型切换过程的平顺, 使得控制器投用及切换过程的波动在预设范围内。同时根据引理与性能指标权值的限定, 控制器在正常工况运行时不会因 ISE-TSV 性能指标的异常而导致频繁切换。

基于多模型切换的动态矩阵控制算法运行框如图 4 所示。

根据动态矩阵控制及模型切换理论, 北京化工大学过程监测与先进控制实验室开发了多模型动态矩阵控制软件 Wisdom-Controller(登记号: 2017SR610595)。

3 应用研究

3.1 UniSim 模型

根据煤气化原理及德士古气化工艺, 采用 Honey-

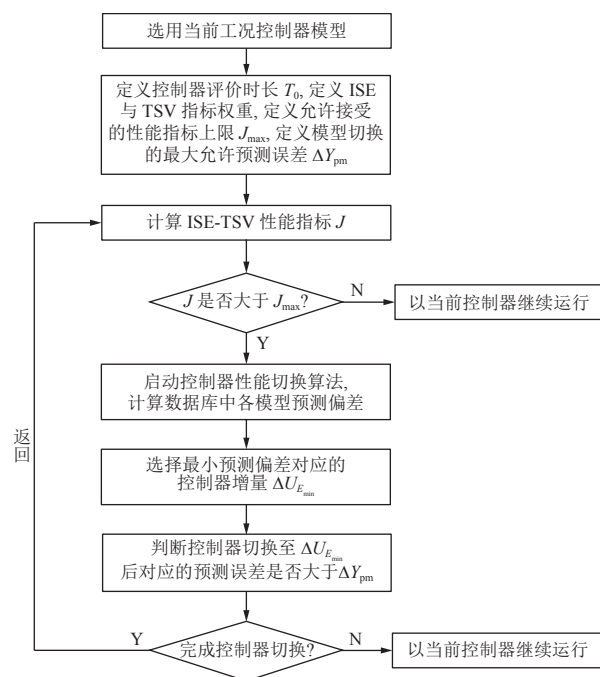


图 4 多模型切换的动态矩阵控制算法框图

Fig. 4 Block diagram of dynamic matrix control algorithm for multiple models switching

well 的 UniSim Design 软件, 搭建了水煤浆气化模型, 如图 5 所示。流程模拟了水煤浆制作、气化以及灰水处理等关键过程。气化炉内部基于物料平衡原理和能量平衡原理, 进行相关的动力学和热力学反应, 得到粗合成气等产品。

UniSim 平台提供了调整气化过程水煤浆煤质成分的模块, 如图 6 所示, 可以得到不同质量指标的煤质。由于煤质特性需要离线分析得到, 因此建模过程为离线进行。

使用 OPC 通信技术, 让 UniSim 模型点位与 Wisdom-Controller 程序点位相连接。OPC 通信技术是工

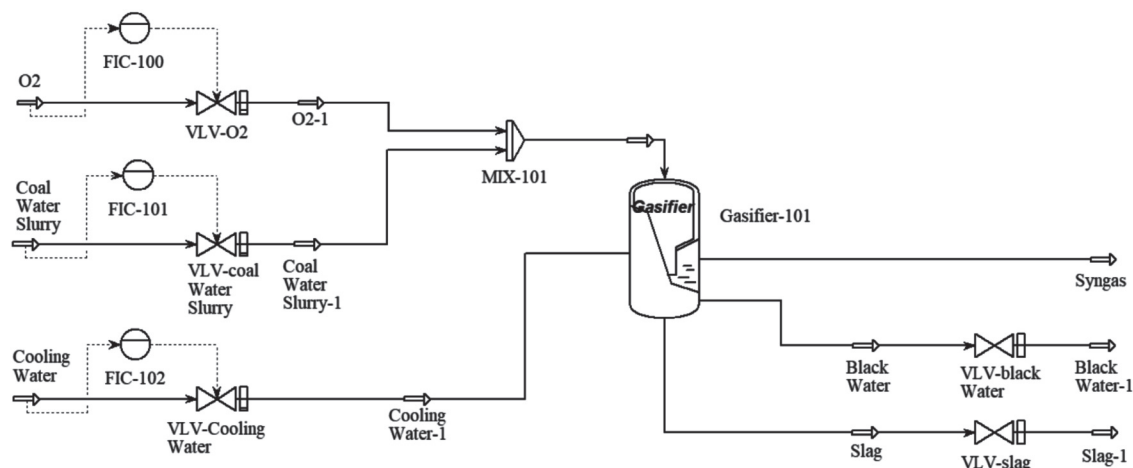


图 5 UniSim 水煤浆气化模型

Fig.5 UniSim coal water slurry gasification model

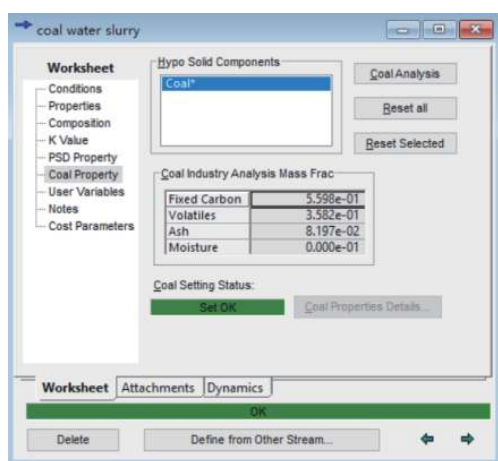


图6 UniSim 煤质质量指标调整

Fig.6 UniSim coal quality index adjustment

业领域常用的数据传输技术,相当于一个工业标准接口,能够使不同通信协议的下层现场设备中的数据得以与上位机的应用程序进行交互,主要通过 OPC-Client 与 OPC-Server 进行数据交互。采用 Matrikon 软件作为仿真的 OPC 服务器,UniSim 与 Wisdom-Controller 之间的数据传输过程如图 7 所示。



图7 OPC 数据传输过程

Fig.7 OPC Data transmission process

3.2 模型切换控制器的设计与实施

3.2.1 煤气化炉模型的建立

选取气化炉部分工况下的运行数据,通过聚类分析的方式^[32],建立 5 种煤质指标的煤气化炉运行模型,见表 2。选取目的是以 5 种指标表征数据范围内的工况。

以煤质 1 为例,根据 1.4 节中的控制需求,通过阶跃测试建立模型。即在被控变量处于稳态的前提下,保持其他操作变量不变,人为使一个 MV 发生阶跃改变(阶跃比例需要根据工艺来决定,一般为 3%~5%),从而

引起 CV 发生动态变化,直至其达到新的稳态的过程。

表2 气化炉模型煤质类型

Table 2 Gasifier model coal quality type

煤质编号	煤质指标/%		
	固定碳	挥发分	灰分
1	56	35.8	8.2
2	58	33.5	8.5
3	60	31.5	8.5
4	63	30.0	7.0
5	55	35.0	10.0

即在煤气化炉系统稳定时,在氧气回路 FIC-100 的操作面板中,提高氧气流量的 SP(设定值) 大约 3%,如图 8 所示,待被控变量稳定后截取该时间段的数据进行辨识处理。煤浆回路 FIC-101 进行相近比例的阶跃操作。

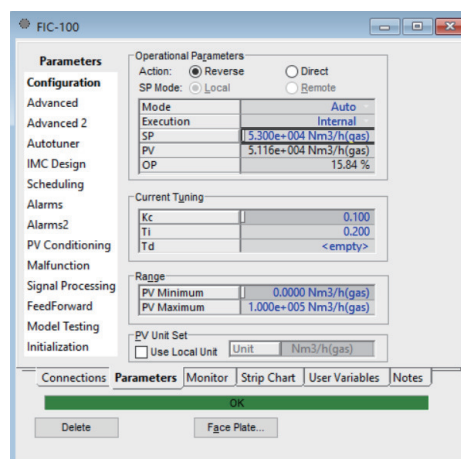


图8 氧气回路操作面板

Fig.8 Oxygen circuit operation panel

煤质 1 工况下氧气流量 (MV1) 的阶跃测试结果如图 9 所示,煤浆流量 (MV2) 的阶跃测试结果如图 10 所示。工业上先进控制实施周期一般为 1 min; CV1 表示氧煤比; CV2 表示煤气化炉炉膛温度。

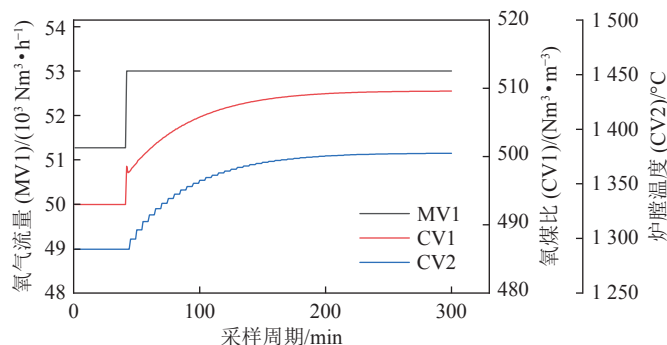


图9 MV1 氧气流量阶跃测试

Fig.9 MV1 oxygen flow step test

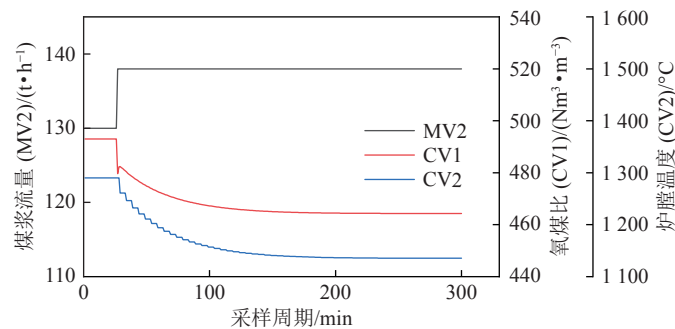


图 10 MV2 煤浆流量阶跃测试

Fig.10 MV2 coal slurry flow step test

通过 Wisdom-Controller 的离线辨识模块,将阶跃跳变数据辨识为时域下的传递函数模型,得到在当前煤质工况下,该静态工作点线性化后的煤气化炉传递函数模型,离线重复上述建模过程,最终得到基于不同煤质模型的煤气化炉模型集,见表 3,并嵌入 Wisdom-Controller 软件的煤质模型数据集。其中, $G_{12}(s)$ 为 MV1 到 CV2 的传递函数; s 为传递函数频域表达式的自变量。

表 3 气化炉煤质 1~5 工况下的传递函数模型

Table 3 Transfer function model of gasifier under coal quality 1-5 condition

煤质	MV1		MV2	
	CV1	CV2	CV1	CV2
1	$G_{11}(s) = \frac{0.009\ 2}{0.137s + 1}$	$G_{12}(s) = \frac{0.048\ 5}{0.005s^2 + 0.14s + 1}$	$G_{21}(s) = \frac{-0.621}{0.348s + 1}e^{-0.97s}$	$G_{22}(s) = \frac{-1.407s - 19.9}{0.005s^2 + 0.234s + 1}$
2	$G_{11}(s) = \frac{0.009\ 4}{0.086s + 1}$	$G_{12}(s) = \frac{0.051}{0.14s + 1}$	$G_{21}(s) = \frac{-4.24s - 3.75}{0.037s^2 + 1.18s + 1}$	$G_{22}(s) = \frac{-19.5}{0.007s^2 + 0.185s + 1}$
3	$G_{11}(s) = \frac{0.002s + 0.009}{0.003s^2 + 0.816s + 1}$	$G_{12}(s) = \frac{0.049}{0.735s + 1}$	$G_{21}(s) = \frac{-3.57}{0.444s + 1}$	$G_{22}(s) = \frac{-11.97s - 19.3}{0.329s^2 + 1.25s + 1}$
4	$G_{11}(s) = \frac{0.002s + 0.009}{0.002s^2 + 0.839s + 1}$	$G_{12}(s) = \frac{0.011s + 0.052}{0.135s^2 + 0.991s + 1}$	$G_{21}(s) = \frac{-3.24}{0.345s + 1}$	$G_{22}(s) = \frac{-3.24s - 19.5}{0.075s^2 + 0.779s + 1}$
5	$G_{11}(s) = \frac{0.002s + 0.009}{0.003s^2 + 0.845s + 1}$	$G_{12}(s) = \frac{0.008s + 0.05}{0.101s^2 + 0.95s + 1}$	$G_{21}(s) = \frac{-0.75s - 3.42}{0.003s^2 + 0.669s + 1}$	$G_{22}(s) = \frac{-2.97s - 18.7}{0.067s^2 + 0.764s + 1}$

3.2.2 煤气化炉模型切换控制的实施

气化炉运行过程中煤质未变化,即模型无失配情况的控制效果如图 11 所示。其中 PV 代表实际值,SP 代表设定值。由图 11 可以看出,在对应控制器控制效果下,调整操纵变量氧气和煤浆流量,使被控变量氧煤比和煤气化炉温度达到追踪设定值的效果,并且控制器可以达到稳定控制的目的。

在气化炉运行过程中,在线调整 UniSim 煤质属性,模拟煤质变化过程。煤质变化产生模型失配,导致控制器性能下降,甚至发散,未采用模型切换算法即单一模型的控制效果如图 12 所示。由图 12 可以看出,模型失配导致以下几个现象:阀门长周期波动、

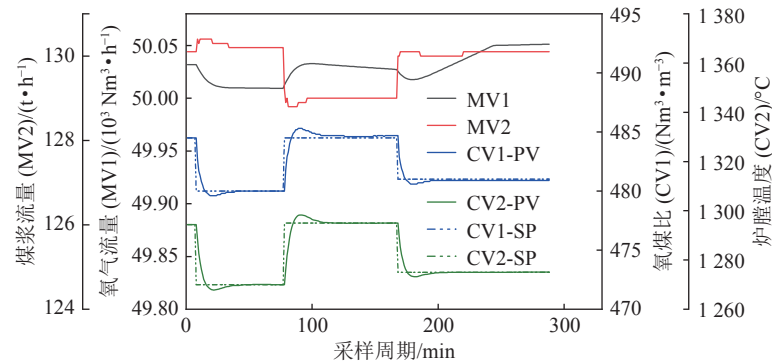


图 11 无煤质变化控制效果

Fig.11 Control effect of no coal quality change

控制器连续朝一个方向变化无法拉回、被控变量波动过大。这些情况在实际工艺过程中都有可能导致煤气化全工段波动,甚至会触发联锁停车问题。

采取本文提出的多模型切换方法应对煤质变化过程,定义控制器评价时长 T_0 为 15 个采样周期 T ; ISE-TSV 性能指标 J 中权值定义如下: $\alpha_{11} = 0.009$ 、 $\alpha_{12} = 0.003$ 、 $\alpha_{21} = 0.001$ 、 $\alpha_{22} = 10$; 性能指标上限 $J_{\max} = 50$; 模型切换最大允许误差 $\Delta Y_{\text{pm}} = [5 \ 30]^\text{T}$ 。上述权值及指标根据仿真测试,结合控制要求,试凑得到。

采取多模型动态矩阵切换策略后的气化炉控制效果如图 13 所示。图 14 展示了单一模型控制与模型切换控制的性能指标对比,可以看出,采取控制器切换算法应对煤质变化的工况时,性能指标首先会监测上升,并且在一段时间内进行监控。当达到性能指标监控周期后,启动模型切换算法,通过筛选最小预测偏差的控制器模型,得到最适用的模型输出,减少系统的模型失配程度,使控制器性能指标下降,代表控制器性能得到改善。

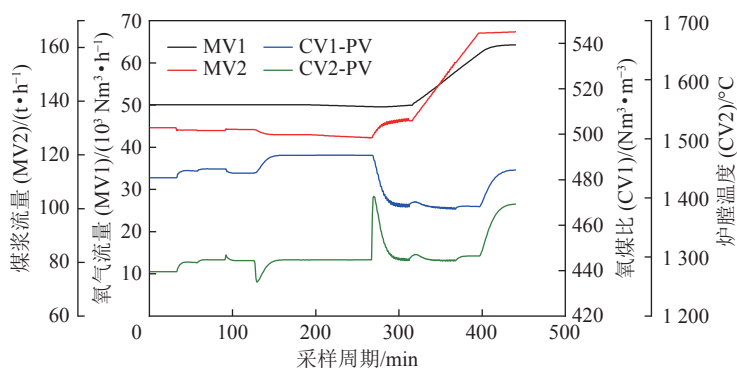


图 12 单一模型算法应对煤质变化控制效果

Fig.12 Control effect of single model algorithm on coal quality change

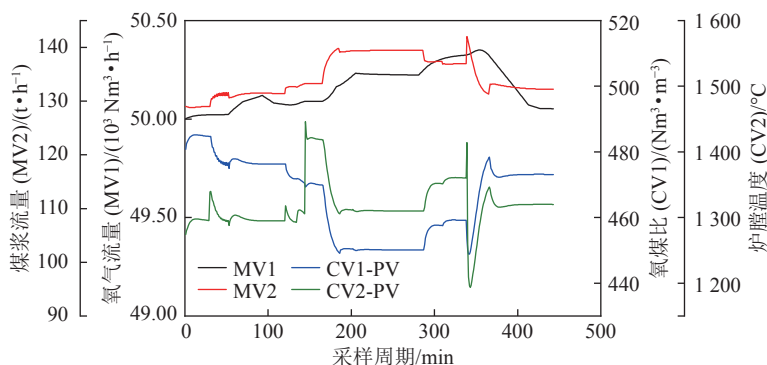


图 13 模型切换算法应对煤质变化控制效果

Fig.13 Control effect of model switching algorithm on coal quality change

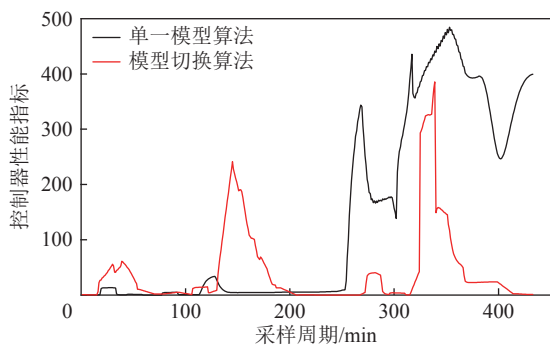


图 14 单一模型算法与模型切换算法控制器性能指标对比

Fig.14 Comparison of controller performance index between single model algorithm and model switching algorithm

3.3 工业测试

在某化工公司的煤气化炉装置上进行了工业应用标定测试,系统架构如图 15 所示,操作画面如图 16 所示。

测试过程人为改变了煤样的进料情况,控制效果如图 17 所示。APC 投用前后氧煤比及气化炉温度的方差对比、针对装置经济性分析,APC 投用前后比煤耗对比及相同负荷下的合成气流量及有效气含量(干合成气中 CO 和 H_2 所占的体积比)对比见表 4。

工业测试结果显示,APC 投用后,被控变量氧煤比及气化炉温度保持在稳定的操作区间内运行,各个指标的均方控制偏差明显降低,说明 APC 的投用能

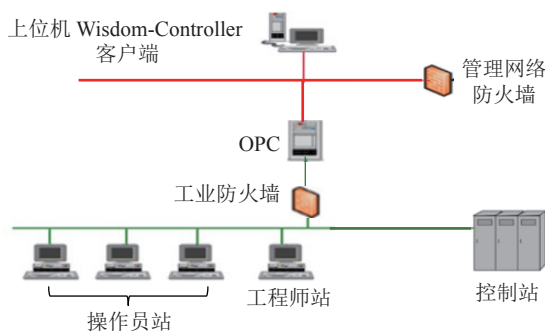


图 15 先控系统架构

Fig.15 APC system architecture

1#气化炉先控操作画面									
通讯状态		控制器投用状态	工况状态	1	检查开关	检查	投切总开关	启动	
操纵变量	位号	位号描述	单位	操纵下限	操纵上限	当前值	先控计算值	投切开关	
	APC.MV1	氧气流量SP	Nm ³ /h	-600	600	42693.6	42663.1	MV1	
被控变量	位号	位号描述	单位	被控下限	被控上限	当前值	先控设定值	投切开关	
	APC.CV1	氧煤比	Nm ³ /m ³	440	520	470.1	475	CV1	
性能指标	位号	位号描述	单位	当前值					
	APC.SCC	比煤耗	kg/1000Nm ³ (CO+H ₂)	635.2					
性能指标	位号	位号描述	单位	当前值					
	APC.SGAS	合成气流量	Nm ³ /h	29444.2					
性能指标	位号	位号描述	单位	当前值					
	APC.CO	CO含量	%	43.1					
性能指标	位号	位号描述	单位	当前值					
	APC.H2	H2含量	%	36.8					

图 16 先控操作画面

Fig.16 APC operation screen

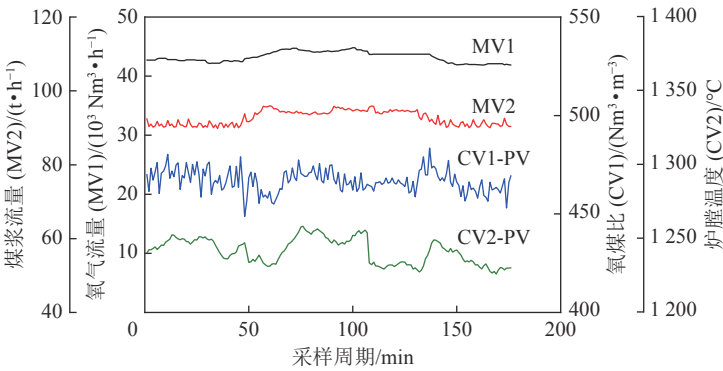


图 17 工业测试控制效果

Fig.17 Control effect of industrial test

表 4 APC 投用前后被控变量方差、比煤耗、气化产品气体量对比

Table 4 Comparison of variance of variables, specific coal consumption, gasified product gas volume before and after APC application

氧煤比方差			气化炉温度方差		
APC投用前/(Nm ³ ·m ⁻³) ²	APC投用后/(Nm ³ ·m ⁻³) ²	降低率/%	APC投用前/(°C) ²	APC投用后/(°C) ²	降低率/%
27.36	26.90	1.68	79.75	75.49	5.34
比煤耗					
APC投用前			APC投用后		降低率/%
640			632		1.25
合成气流量			有效气(CO、H ₂)体积分数/%		
APC投用前/(Nm ³ ·h ⁻¹)	APC投用后/(Nm ³ ·h ⁻¹)	提升率/%	APC投用前	APC投用后	提升率
293 991	297 368	1.15	79.68	79.91	0.29

注：比煤耗的单位为kg/1 000 Nm³(CO+H₂)。

够达到稳定控制、减少波动、减轻操作员压力的目的。对于装置经济性来说,APC 投用后比煤耗降低了 1.25%,合成气体产量提高了 1.15%,有效气含量提高了 0.29%,取得了一定的经济效益。

4 结 论

(1) 针对水煤浆气化炉的煤质特性多变,造成其生产操作波动较大的问题,提出了一种基于多模型切换

的动态矩阵控制方法,并开发了工业应用软件。在离线状态下,利用不同煤质工况下的过程数据,构造多工况动态模型集。在线控制时,采取累积平方误差-总平方波动 (ISE-TSV) 作为控制器性能指标,用于判别煤质变化,同时使用多模型预测值作为模型切换准则。

(2) 所提方法在 UniSim 平台上的煤气化炉模型进行了模拟,结果表明,相较于单一模型算法,模型切

换算法可以有效的应对煤质变化导致的模型失配问题。

(3) 在某化工公司水煤浆气化炉上进行了工业应用测试, 测试结果表明, 对比传统手工操作, 先进控制方法减少了氧煤比均方控制偏差 1.68%、气化炉温度均方控制偏差 5.34%, 有效减少了关键控制变量波动。同时, 减少了比煤耗 1.25%, 提高了合成气流量 1.15%、有效气含量 0.29%, 提升了装置的经济效应。

参考文献(References):

- [1] 张云, 杨倩鹏. 煤气化技术发展现状及趋势[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(S2): 7-13.
ZHANG Yun, YANG Qianpeng. Development status and trend of coal gasification technology[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(S2): 7-13.
- [2] 姚源朝. 基于混合模型的水煤浆气化炉氧煤比优化研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021: 10-15.
YAO Yuanchao. Study on optimization of oxygen coal ratio of coal water slurry gasifier based on hybrid model[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021: 10-15.
- [3] 唐明峰, 吴慕遥, 秦琳琳, 等. 干煤粉气化炉氧煤比预测控制系统软件的设计与实现[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(11): 895-898, 942.
TANG Mingfeng, WU Muyao, QIN Linlin, et al. Design and implementation of oxygen coal ratio predictive control system software for dry pulverized coal gasifier[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2019, 46(11): 895-898, 942.
- [4] HASSE Christian, DEBIAGI Paulo, WEN Xu, et al. Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2021, 86: 100938.
- [5] 惠龙龙, 方斌, 聂旺华. 煤化工气化系统智能控制示范成果探讨[J]. 化学工业, 2019, 37(5): 25-29.
HUI Longlong, FANG Bin, NIE Wanghua. Discussion on intelligent control demonstration results of coal chemical gasification system[J]. Chemical Industry, 2019, 37(5): 25-29.
- [6] 刘德荣. 复杂工业过程的先进控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1841-1842.
LIU Derong. Advanced control of complex industrial processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(9): 1841-1842.
- [7] 郭永增, 李亦方. APC在煤化工聚烯烃装置中的应用[J]. 能源与节能, 2015(11): 153-155.
GUO Yongzeng, LI Yifang. Application of APC in coal chemical polyolefin plant[J]. Energy and Energy Conservation, 2015(11): 153-155.
- [8] 江凤月, 任锦飞, 朱书奔, 等. 先进控制技术在煤制氢装置中的应用[J]. 自动化仪表, 2018, 39(12): 84-89.
JIANG Fengyue, REN Jinfei, ZHU Shuben, et al. Application of advanced control technology in coal hydrogen plant[J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(12): 84-89.
- [9] 晁澄. APC在GE单喷嘴水煤浆气化炉控制中的首次应用[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(10): 785-788, 805.
CHAO Cheng. The first application of APC in the control of GE single nozzle coal water slurry gasifier[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2019, 46(10): 785-788, 805.
- [10] 张成学, 周琨, 孙乐文, 等. 先进过程控制系统在水煤浆气化中的应用[J]. 大氮肥, 2019, 42(5): 325-329, 335.
ZHANG Chengxue, ZHOU Kun, SUN Yuewen, et al. Application of advanced process control system in coal water slurry gasification[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2019, 42(5): 325-329, 335.
- [11] MIGHANI M, COVELLA K, ØRS E, et al. CO₂ reduction by advanced process control in gasification processes[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2020, 48: 1279-1284.
- [12] 方薪晖. 先进控制技术在超大型水煤浆气化装置中的应用[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(S2): 190-196.
FANG Xinhui. Application of advanced control technology in super large coal water slurry gasification unit[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(S2): 190-196.
- [13] LOGUNOV P L, SHAMANIN M V, KNEILLER D V, et al. Advanced process control: From a PID loop up to refinery-wide optimization[J]. Automation and Remote Control, 2020, 81(10): 1929-1943.
- [14] 刘建帮, 孙威, 张宪霞, 等. 多变量预测控制工程应用的控制模型前馈解耦策略[J]. 控制与决策, 2020, 81(10): 1929-1943.
LIU Jianbang, SUN Wei, ZHANG Xianxia, et al. Control model feedforward decoupling strategy for multivariable predictive control engineering application[J]. Control and Decision, 2020, 81(10): 1929-1943.
- [15] 余真鹏. 单反馈回路PID控制器的性能评估[D]. 北京: 北京大学, 2014: 70-81.
YU Zhenpeng. Performance evaluation of single feedback loop PID controller[D]. Beijing: Peking University, 2014: 70-81.
- [16] 安海泉. 高灰熔点煤两段供氧气化基础研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017: 9-11.
AN Haiquan. Basic study on two-stage oxygen supply gasification of high ash melting point coal[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017: 9-11.
- [17] WANG Y, WANG J, LUO X, et al. Dynamic modelling and simulation of IGCC process with Texaco gasifier using different coal[J]. Systems Science & Control Engineering, 2015, 3(1): 198-210.
- [18] 尉迟唯, 李保庆, 李文, 等. 煤质因素对水煤浆性质的影响[J]. 燃料化学学报, 2007, 35(2): 146-154.
YUCHI Wei, LI Baoqing, LI Wen, et al. Influence of coal quality factors on properties of coal water slurry[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(2): 146-154.
- [19] 孔祥东, 陶莉莉, 钟伟民, 等. 煤质组成对水煤浆气流床气化炉性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(9): 1685-1689.
KONG Xiangdong, TAO Lili, ZHONG Weimin, et al. Effect of coal composition on performance of coal water slurry entrained flow gasifier[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(9): 1685-1689.
- [20] 彭宝仔, 方薪晖, 刘臻, 等. 煤质对水煤浆气化性能的影响研究[J]. 热科学与技术, 2021, 20(5): 488-494.
PENG Baozai, FANG Xinhui, LIU Zhen, et al. Effect of coal qual-

- ity on gasification performance of coal water slurry[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2021, 20(5): 488–494.
- [21] 王晶, 蔺伟飞. 氧煤比在水煤浆气化系统重要性分析[J]. *氮肥技术*, 2019, 40(4): 22–26.
- WANG Jing, LIN Weifei. Importance analysis of oxygen coal ratio in coal water slurry gasification system[J]. *Nitrogen Fertilizer Technology*, 2019, 40(4): 22–26.
- [22] 于海龙, 赵翔, 周志军, 等. 氧煤比对水煤浆气化影响的数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(5): 606–610.
- YU Hailong, ZHAO Xiang, ZHOU Zhijun, et al. Numerical simulation of the effect of oxygen-coal ratio in coal water slurry gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(5): 606–610.
- [23] 云涛. 先进过程控制在煤化工行业示范及应用展望[J]. *自动化仪表*, 2020, 41(8): 103–105, 110.
- YUN Tao. Demonstration and application prospect of advanced process control in coal chemical industry[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2020, 41(8): 103–105, 110.
- [24] XIE L, SU H, LU S, et al. Linear mismatched model based offset-free MPC for nonlinear constrained systems with both stochastic and deterministic disturbances and its application to CSTR[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 69172–69184.
- [25] 谭鹏, 李鑫, 张小培, 等. 基于工业分析的煤质发热量预测[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(11): 2641–2646.
- TAN Peng, LI Xin, ZHANG Xiaopei, et al. Prediction of coal heating value based on proximate analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2641–2646.
- [26] SHAH Nirali. Simulation of model predictive control using dynamic matrix control algorithm[D]. Long Beach: California State University, 2015: 1–6.
- [27] ABDELSALAM Yehia, SUBRAMANIAN Sankaranarayanan, ABOELNOUR Mohamed, et al. Adaptive tube-enhanced multi-stage nonlinear model predictive control[J]. *IFAC Papers on Line*, 2021, 54(3): 212–218.
- [28] ELNAWAWI Shams, SIANG Lim C, O'CONNOR Daniel L, et al. Interactive visualization for diagnosis of industrial model predictive controllers with steady-state optimizers[J]. *Control Engineering Practice*, 2022, 121: 105056.
- [29] ZAFIRIOU E, MARCHAL A L. Stability of SISO quadratic dynamic matrix control with hard output constraints[J]. *AIChE Journal*, 1991, 37(10): 1550–1560.
- [30] 张浩, 赵众. 基于累积平方误差–总平方波动指标的模型预测控制器性能评价及自愈[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(1): 166–176.
- ZHANG Hao, ZHAO Zhong. Performance evaluation and self-healing of model predictive controller based on cumulative square error total square fluctuation index[J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(1): 166–176.
- [31] ZHAO Z, XIA X, WANG J, et al. Nonlinear dynamic matrix control based on multiple operating models[J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13(1): 41–56.
- [32] 李晓黎, 刘继敏, 史忠植. 基于支持向量机与无监督聚类相结合的中文网页分类器[J]. *计算机学报*, 2001, 24(1): 62–68.
- LI Xiaoli, LIU Jimin, SHI Zhongzhi. Chinese web page classifier based on support vector machine and unsupervised clustering[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(1): 62–68.