

竖炉焙烧过程运行优化控制系统的开发及实验研究

周平, 代伟, 柴天佑

(东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为解决具有综合复杂动态特性的竖炉焙烧(shaft furnace roasting, SFR)过程运行优化控制问题, 基于研制的流程工业一体化运行控制平台, 开发了具有可伸缩、可扩展、可复用以及模块化、组态化特点的SFR过程运行优化控制(operational optimization control, OOC)系统. 该系统支持MATLAB、动态链接库等多种算法实现方式, 并采用非编译融合算法方式实现算法与系统功能模块的解耦. 基于开发的OOC系统, 建立了具有运行控制层、过程控制层以及虚拟对象层的半实物仿真实验平台, 开展了相应的仿真实验研究. 结果表明OOC系统在正常工况和局部故障工况下均能取得满意的控制性能.

关键词: 竖炉焙烧(SFR); 优化控制; 运行优化控制(OOC)系统; 一体化运行控制平台; 半实物仿真实验系统
中图分类号: TP273.1 **文献标识码:** A

Exploration of operational optimization control system for shaft furnace roasting process and its experiment study

ZHOU Ping, DAI Wei, CHAI Tian-You

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: To realize the optimal operation control for the complex shaft-furnace roasting (SFR) process, we develop an operational optimization control (OOC) system on the incorporated operational control platform for process industries. This system is characterized with flexibility, expandability, reusability, openness and modularity. It can support a variety of algorithm realization ways, such as Matlab and Dynamic Link Library (dll). Moreover, algorithm and the system functional modules can be decoupled by embedding algorithm into systems without coupling. Based on this developed OOC system, a hardware-in-loop simulation experiment platform which comprises an operational control layer, a process control layer, and a virtual plant layer has been established for experimental studying. The experiment results show that the OOC system can achieve satisfactory control performances for the SFR process in both normal and partially faulty working conditions.

Key words: shaft furnace roasting (SFR); optimal control; operational optimization control (OOC) system ; incorporate operational control platform; hardware-in-loop simulation experiment system

1 引言(Introduction)

复杂工业过程的运行指标往往难以用常规仪表在线测量, 与回路控制的关键过程变量间的动态特性具有多变量耦合、严重非线性、工况时变等综合复杂动态特性. 同时, 还有许多难以测量的过程参数和外界干扰也影响着生产过程, 表现出不可控性, 它们对过程运行性能的影响难以定量和定性评估. 传统的以分布式控制为主的过程回路控制系统难以达到复杂工业生产对产品质量、生产效率等运行指标的最终需要. 究其原因是单一的过程回路控制系统难以适应复杂工况的变化, 难以找到与期望运行指标相对应的过程控制的合适设定值. 长期以来, 尤其在中国, 这类复杂工业过程运行主要由操作员依据

领域知识和多年积累的经验进行判断与决策以及各种手工操作, 因而过程运行的最优性、稳定性和安全性难以保证. 为此, 需要研究能够根据实时工况的变化对过程控制系统给出合适设定值的技术和相应的实现系统^[1].

随着自动化技术的进一步发展以及人们对节能降耗的日益关注, 工业过程运行优化控制的理论、方法与技术引起国内外学者越来越广泛地关注, 相关理论和算法也相继提出^[1]. 由于运行控制指标和回路控制的被控变量间表现为多变量耦合和大时滞特性, 文[2-3]将常规多变量解耦控制技术在过程运行控制中进行综合和推广, 提出了基于扩展多变量解耦和模型近似的工业过程运行反馈控制方法, 并对

由过程控制和运行控制构成的混合闭环控制系统的鲁棒稳定性进行了分析. 针对难建模的复杂工业过程, 基于数据与智能技术的运行控制方法也相继提出^[4-9], 如文[1]将设定值优化、动态调节和软测量等技术相结合, 采用数据、知识以及智能方法, 提出了复杂工业过程运行优化的混合智能控制方法, 并在竖炉焙烧过程、强磁选过程、磨矿过程进行了成功的工业应用^[1,8-9].

运行控制理论的发展带动了过程控制界对专业性运行控制系统的需求. 目前, 国际上开发了用在化工过程的实时优化控制(real-time optimization, RTO)软件和模型预测控制(model predictive control, MPC)软件, 如美国Aspentech公司的Aspen DMCplus软件以及Honeywell的RMPCT等^[10-11]. 由于以RTO和MPC为主体的运行控制系统需要建立过程精确模型, 因而难以应用于冶金、选矿行业的难建模工业过程^[1]. 在国内, 针对具体工业过程开发了基于监控组态软件的优化设定系统^[12-15]. 虽然这些系统对于保证产品质量、提高生产率、降低能耗具有重要意义. 然而, 基于组态软件运行控制系统开发模式由于需要专用的监控软件, 一种型号的监控软件(如Rockwell的RSView32)开发的优化系统很难移植到另一种型号的监控软件上(如Siemens的Wincc), 从而极大地影响运行优化控制的推广应用. 另外, 目前各监控组态技术主要被国外大公司(如AB, Siemens, Honeywell等)所垄断, 那么在监控机上开发的运行优化控制系统不能摆脱对国外DCS生产厂商的依赖. 因此, 亟待开发脱离于监控组态软件并且具有自主知识产权的运行优化控制系统, 以服务于我国过程工业界, 促进国民经济的发展.

针对上述实际问题和需求, 以选矿领域的竖炉焙烧过程为研究对象, 自主开发了流程工业一体化

运行控制平台, 在此基础上开发了集开放性、灵活性、可视化、可组态、可扩展为一体的竖炉焙烧运行优化控制系统. 为了进行实验研究, 开发了由过程运行系统、过程监控系统、过程控制系统、过程虚拟对象、过程虚拟仪表与执行机构等组成的半实物仿真实验平台. 最后, 在该实验平台上开展了竖炉焙烧过程运行优化控制的仿真实验. 结果表明竖炉焙烧运行优化控制系统能够较好的发挥控制作用, 在正常工况和故障工况下均能确保焙烧过程质量指标进入期望目标范围.

2 竖炉焙烧过程及其运行优化控制策略 (SFR process and its OOC strategy)

2.1 竖炉焙烧过程及其运行控制问题(SFR process and its operational control problem)

选矿领域中, 竖炉焙烧过程(如图1所示)的作用就是将低品位矿石进行高温还原磁化焙烧, 使弱磁性矿物变成强磁性矿物, 经过磁选得到铁精矿. 竖炉焙烧过程中, 磁选管回收率(magnetic tube recovery ratio, MTRR) r 是反映矿石焙烧质量与效率的关键运行指标, 它与底层过程控制的燃烧室温度 y_1 、矿石搬出时间 y_2 、还原煤气流量 y_3 直接相关. 由于 r 不能连续测量且与 y_1, y_2, y_3 之间的动态特性具有强耦合、严重非线性、随运行工况变化而变化, 只能靠操作员根据生产边界条件 B , r 的目标值 r_1 、化验值 r_3 , 凭经验给出控制回路设定值 y_1^*, y_2^*, y_3^* , 通过 y_1, y_2, y_3 的控制回路跟踪设定值来控制 r , 使其进入目标值范围. 实际生产中, 矿石大小、种类、成分频繁变化, 人工设定控制通常不能及时准确地调整设定值, 难以将 r 控制在目标范围内, 常常造成冒火 S_1 、上火 S_2 、炼炉 S_3 、欠还原 S_4 、过还原 S_5 等故障工况 $S^{[1]}$.

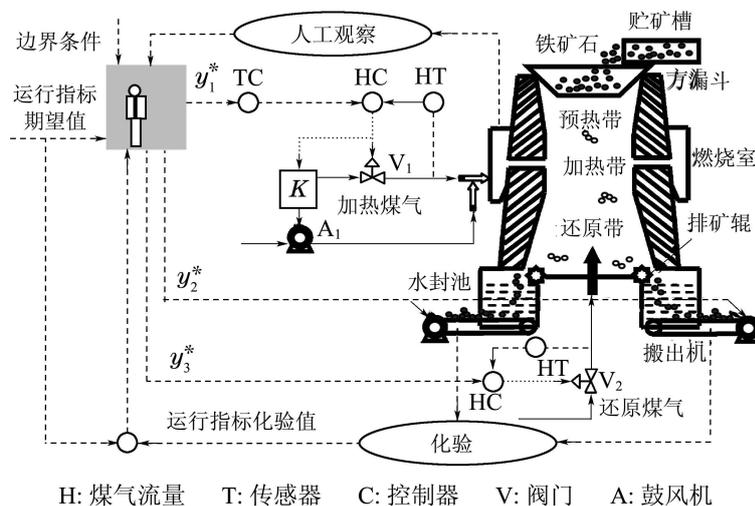


图1 竖炉焙烧系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SFR system

长期以来, 竖炉焙烧运行操作主要由操作者通过观察炉体表面的现象依据经验知识进行判断与决策, 在此基础上人工改变控制回路设定值. 由于人工监视往往操作不当或不及时, 因而常常造成故障工况的发生, 严重影响矿石焙烧质量和生产的安全.

2.2 竖炉焙烧过程的运行优化控制策略(OOC strategy for SFR process)

针对上述竖炉焙烧过程运行控制问题, 文[1]提出了实现竖炉焙烧过程优化运行的混合智能控制方法, 根据期望的运行指标及工况变化自动调整回路设定值, 通过过程控制系统的输出跟踪给定的设定值, 从而将运行指标控制在目标范围内. 文[1]提出的竖炉焙烧过程运行优化控制方法包括控制回路预设、前馈、反馈补偿、故障诊断、自愈控制及磁选管回收率软测量等部分(如图2所

示), 具体说明如下:

1) 控制回路预设模块. 用于根据运行指标期望值 r_1 以及边界条件 B 等信息, 采用案例推理(case-based reasoning, CBR)技术产生控制回路的预设值.

2) MTRR软测量. 采用神经网络软测量技术给出磁选管回收率 r 的在线估计值 r_2 .

3) 前馈补偿器和反馈补偿器. 分别根据控制偏差 $\Delta r_F = r_1 - r_2$ 和 $\Delta r_B = r_1 - r_3$, 采用PI补偿算法产生回路控制设定值的前馈补偿量 Δy_F 和反馈补偿量 Δy_B .

4) 故障工况诊断模块. 根据 $r_2, y, \Delta y$ 、控制量 u 、过程变量 P 等信息, 采用专家推理技术对故障工况 S 进行诊断.

5) 自愈控制器. 综合 S, P 等信息, 采用CBR技术给出控制回路设定值的自愈修正量 Δy_S .

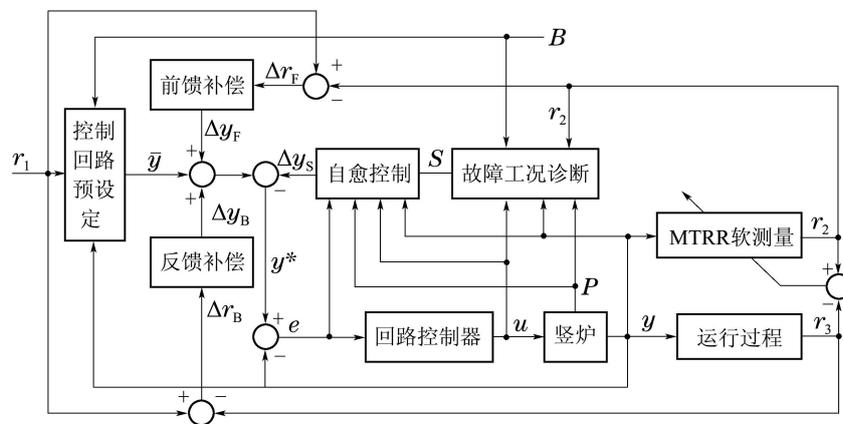


图 2 竖炉焙烧混合智能运行控制策略

Fig. 2 Hybrid intelligent operational control of SFR process

底层过程控制系统跟踪新的控制回路设定值, 使系统逐渐远离故障工况, 实现过程安全、稳定和优化运行. 竖炉焙烧过程运行优化控制的具体算法参见文[1].

3 竖炉焙烧过程运行优化控制系统(OOC system for SFR process)

3.1 一体化运行控制平台(Incorporate operational control platform)

为了摆脱已有国内运行控制系统或软件对监控组态软件的依赖, 将控制、软件工程、计算机等先进技术相融合, 基于.Net组件技术, 自主开发了以实现复杂工业过程产品质量最优、生产效率最高以及消耗最小为目标的流程工业一体化运行控制平台.

运行控制平台在集成开发环境 Visual Studio 2010下, 充分利用 Microsoft 的 WPF (windows presentation foundation) 用户界面框架与历史数据库 SQL Server 2005 等基础支撑软件, 采用 C#, XML 语言以用户控件的组件形式开发各功能模块. 利用反射、脚本等技术设计算法接口, 并提供对 MATLAB 引擎的调用与数据交互. 为了降低平台的耦合性, 提高可扩展与可维护性能, 平台采用可扩展管理框架(managed extensibility framework, MEF)实现功能模块的热插拔. 另外, 运行控制平台采用3层结构设计, 如图3所示: 表现层提供人机交互的界面; 业务逻辑层为用于系统的具体功能实现; 模型层用于提供业务逻辑层运行所需算法模型和数据.

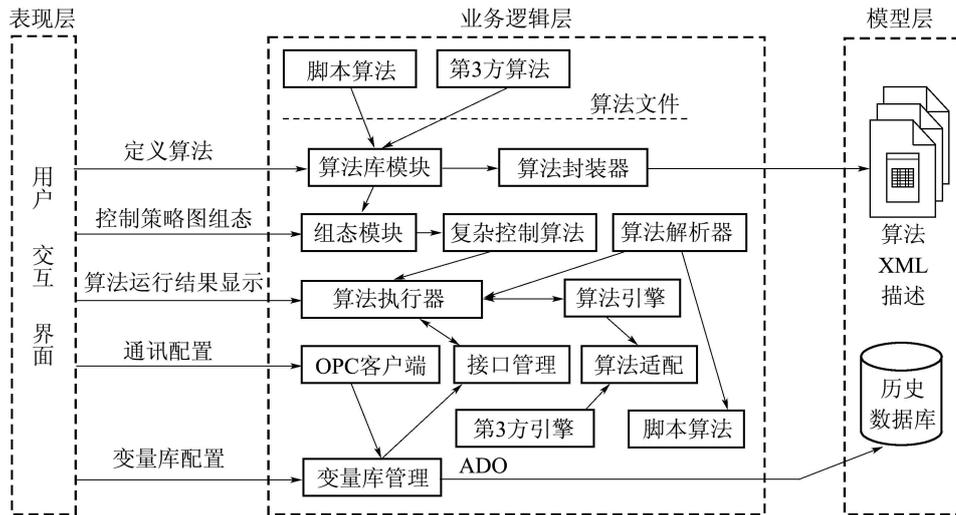


图3 运行控制平台体系架构

Fig. 3 Architecture of the operational control platform

运行控制平台的功能模块构成如图4所示, 主要包括系统管理模块、变量库管理模块、算法库管理模块、算法组态模块、算法运行模块、数据通讯模块、数据管理模块等. 这其中, 算法管理模块是核心, 用于实现控制算法分组管理、算法注册封装与维护等功能. 为了满足算法的可扩展性, 提供算法自定义功能, 这包括绘制图元、指定算法文件、定义数据接口、配置运行结果显示表格等.

算法文件可采用动态链接库(dll)、MATLAB脚本以及VBScript/Jscript脚本3种实现机制.

为了使平台能和不同厂家的DCS/PLC进行通讯, 采用OPC技术设计数据通讯模块. 首先, OPC Client异步读取服务器数据, 通过变量映射模块将相关数据保存到系统实时数据库; 若算法计算完毕, 实时数据库中的优化设定数据发生改变, 变量映射模块就通过OPC Client进行异步操作.

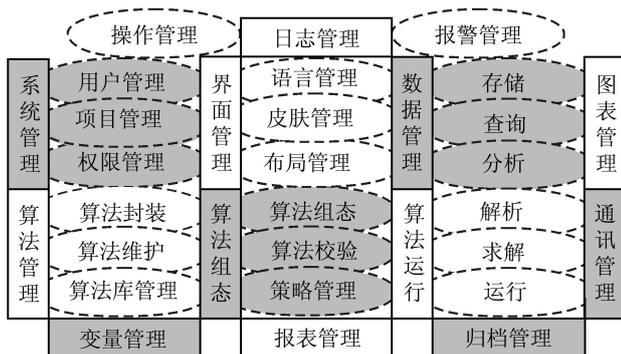


图4 运行控制平台功能模块构成

Fig. 4 Functional modules of the operational control platform

3.2 竖炉焙烧过程运行优化控制系统的开发 (exploration of OOC system for SFR process)

基于一体化运行控制平台, 以非编译方式嵌入文[1]的运行优化控制策略和算法, 开发了竖炉焙烧过程运行优化控制系统, 具体开发组态流程如图5所示, 主要包括如下几个关键步骤:

- 1) 将文[1]算法采用MATLAB进行程序实现和测试;
- 2) 在运行控制平台上通过算法管理器对各算法模块进行注册与封装, 生成相应的系统可识别的标准算法模块, 并经算法管理器提供给组态模块, 使其通过拖拽方式将各个算法模块以搭积木的形式组态为优化控制算法策略;
- 3) 解析优化控制算法策略, 并创建系统变量;
- 4) 对OPC通讯模块进行配置, 并与OPC Server建立链接;
- 5) 建立需要通讯的系统变量(运行指标、设定值与过程变量)与OPC数据项的映射关系.

图6为组态配置好的竖炉焙烧过程运行优化控制系统的主界面, 其主要负责运行优化控制策略的监视以及对相关关键参数进行数字和趋势图显示. 界面中的各个组成部分均可通过配置实现, 且在运行中可修改和置换. 系统运行时, 首先由优化控制策略管理器将有关模型内部算法的信息传递给算法执行器, 随后算法执行器将有关变量的信息从变量管理器读取, 同时变量管理器通过通讯管理器访问外部数据, 并更新当前值. 执行器调用求解器对算法模块进行运算以及对数据监控模块进行结果输出, 并更新变量管理器中的当前值, 由变量管理器处理输出数据和存储数据.

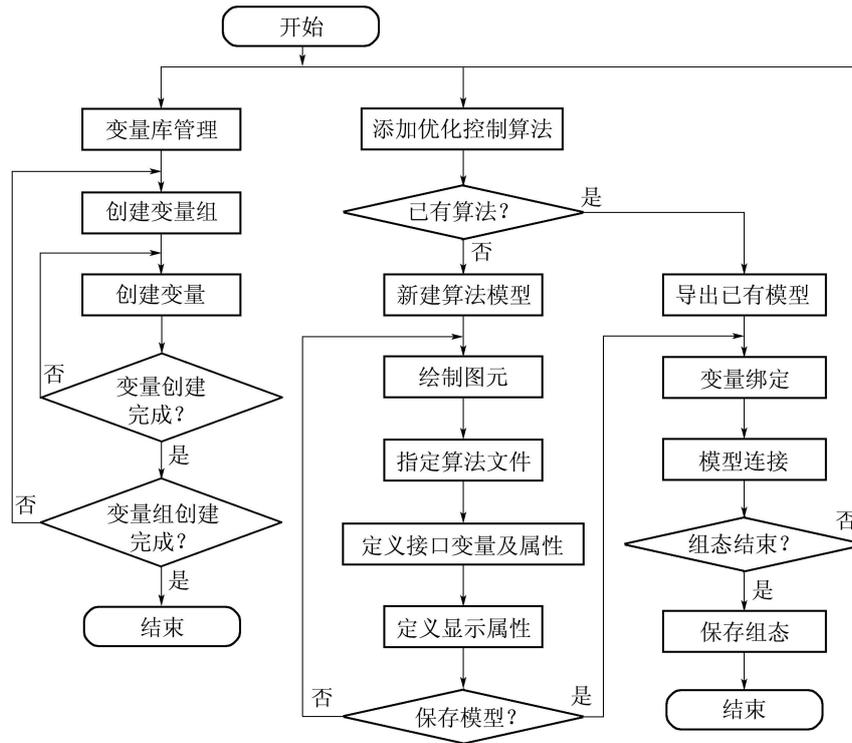


图 5 竖炉焙烧过程运行优化控制系统开发流程

Fig. 5 Development flowsheet of OOC system for the SFR process

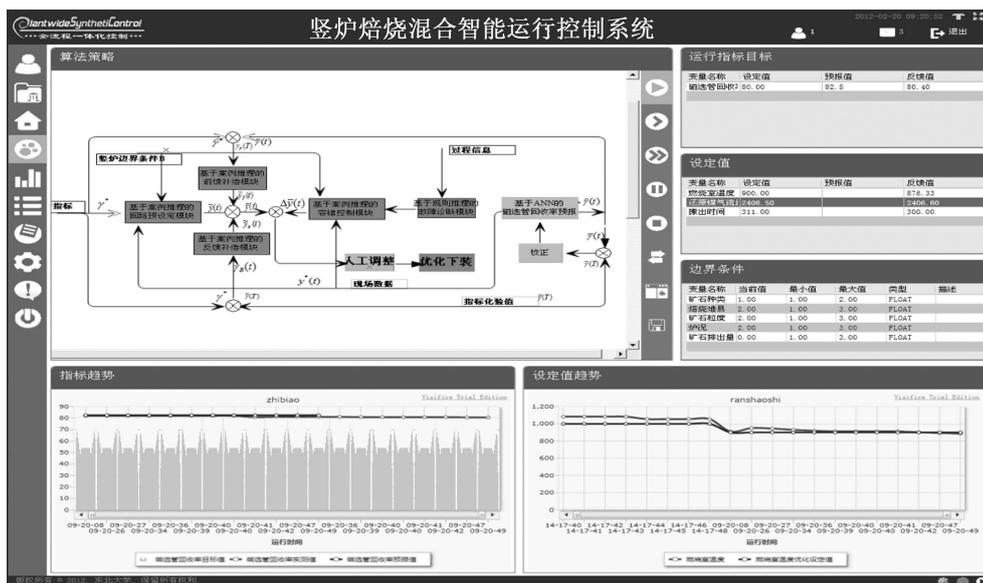


图 6 竖炉焙烧过程运行优化控制系统界面

Fig. 6 Interface of OOC system for the SFR process

4 实验研究(Experiments)

4.1 实验环境(Experimental environment)

为了实现对竖炉焙烧过程运行优化控制系统接近工程实际的验证研究,建立了具有3层结构的半实物仿真实验平台(如图7所示):

1) 运行优化控制层的运行优化控制系统计算

并给出过程控制系统的回路设定值;

2) 过程控制层由Controllogix5000 PLC和PC监控计算机构成, 主要实现过程回路控制、监控、趋势图显示和报警等功能;

3) 过程虚拟对象层由过程虚拟仪表与执行机构装置以及过程虚拟对象构成. 过程虚拟仪表与执行机构的前台界面上为虚拟仪表和执行机构

的人际交互画面;后台程序用MATLAB建立了执行机构与虚拟仪表的动态特性模型,可模拟仪表的漂移、噪声和执行机构的非线性、饱和、死区等故障特性.过程虚拟对象的前台界面能够修改竖

炉焙烧过程边界条件并能够模拟冒火、上火、炼炉、欠还原、过还原等故障工况;后台MATLAB程序以非线性方程组的形式描述竖炉燃烧温度、还原煤气流量等动态模型.

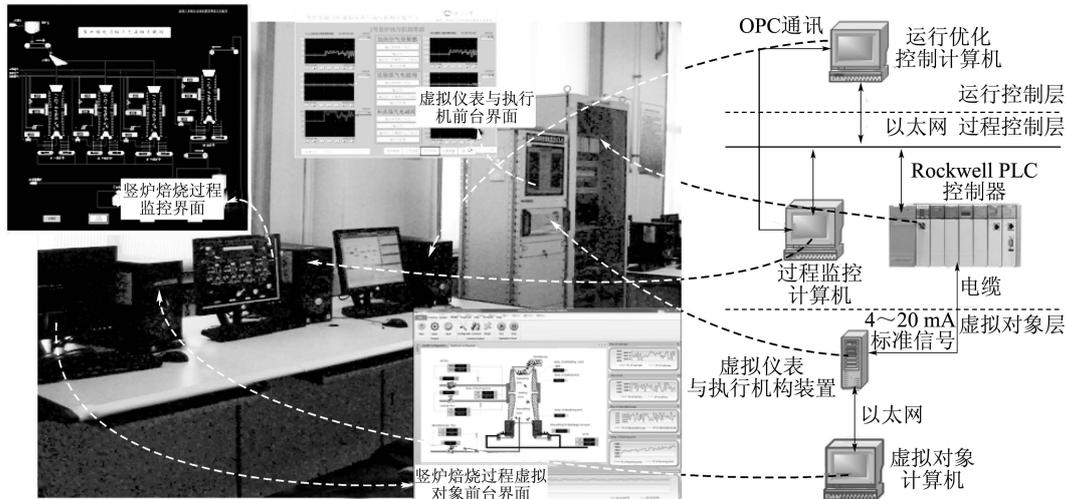


图7 半实物仿真实验系统及其网络结构

Fig. 7 Hardware-in-loop simulation experiment system and its network structure

实验系统的通讯方式如下:运行优化控制系统与过程控制监控计算机之间通过以太网远程OPC的方式进行通讯;过程PLC系统与监控计算机之间通过以太网通讯;虚拟仪表与执行机构装置与PLC通过电缆、I/O板卡,以标准的4~20mA工业电信号进行数据交互.

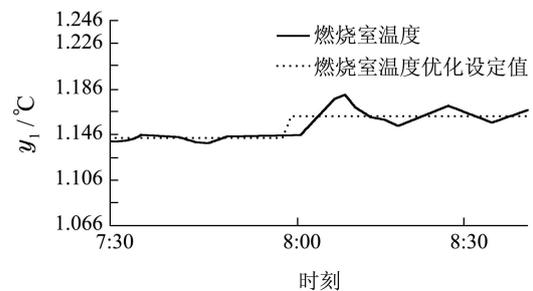
4.2 实验结果与分析(Results and analysis)

为了验证竖炉焙烧过程运行优化控制系统的有效性及其合理性,设计了竖炉正常工况和故障工况下的两组实验:

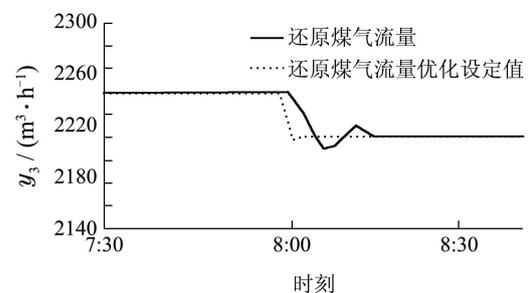
图8为正常工况时竖炉焙烧过程运行优化控制作用下的控制效果.竖炉焙烧过程的初始工作点为

$$y_1^* = 1142^\circ\text{C}, y_2^* = 2245 \text{ m}^3/\text{h}, y_3^* = 280 \text{ s},$$

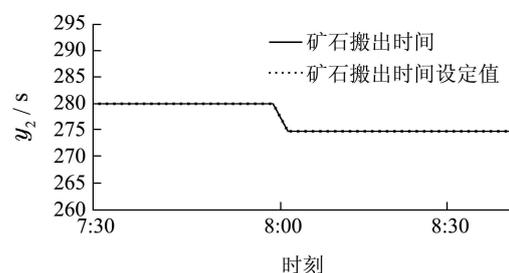
磁选管回收率的期望值为 $r_1 = 82\%$. 8:00时刻,在竖炉虚拟对象对煤气热值、炉膛负压等过程变量施加干扰,使得竖炉焙烧过程的煤气热值、炉体内部负压、加热空气压力发生变化,观测到磁选管回收率软测量值为 $r_2 = 81.7\%$. 由于软测量值与期望值有较大偏差,前馈补偿器根据该偏差对回路设定值进行修正,得到竖炉焙烧过程新的运行工作点为 $y_1^* = 1146^\circ\text{C}$, $y_2^* = 2212 \text{ m}^3/\text{h}$, $y_3^* = 275 \text{ s}$. 可以看出:通过底层控制系统输出跟踪修改后的设定值,磁选管回收率经过一段运行时间后又重新回到目标范围内.



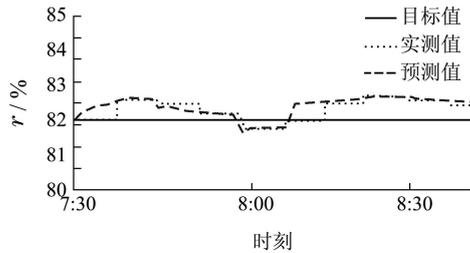
(a) 燃烧室温度趋势



(b) 还原煤气流量趋势



(c) 矿石搬出时间趋势

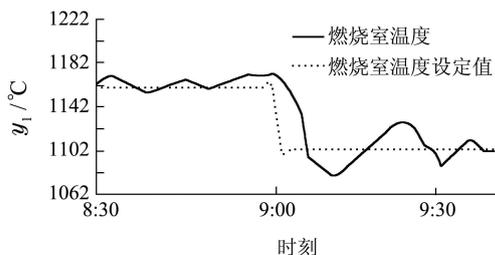


(d) 磁选管回收率趋势

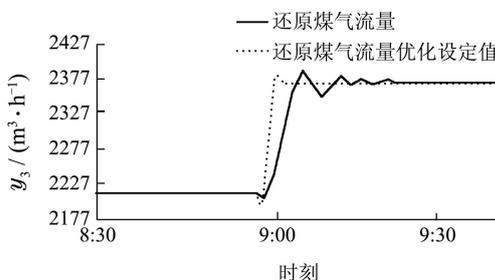
图 8 正常工况下的控制效果

Fig. 8 Control results under normal working conditions

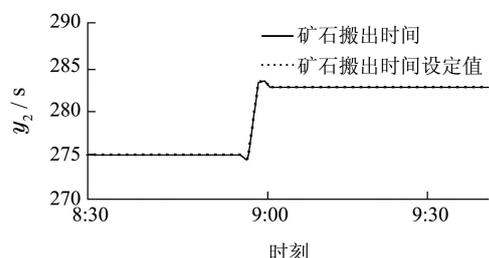
图9为故障工况时,运行优化控制下的竖炉焙烧过程各控制曲线图。8:50时刻,改变竖炉虚拟对象边界条件:矿石粒度由“大”变成“中”,矿石种类由“小”变为“中”,造成竖炉焙烧的炉顶废气温度、炉体内部负压、煤气热值等过程变量均发生变化。9:00时刻,检测到磁选管回收率值变为81.4%,燃烧室温度为1170℃大于上限值1150℃,炉顶废气温度为134℃大于上限100℃,因此故障诊断结果为:上火、欠还原。自愈控制器对回路设定值进行修正得到竖炉焙烧过程新的工作点为 $y_1^* = 1106^\circ\text{C}$, $y_2^* = 2370 \text{ m}^3/\text{h}$, $y_3^* = 283 \text{ s}$ 。之后,故障排除,竖炉焙烧过程重新恢复稳定并且磁选管回收率进入期望目标范围。



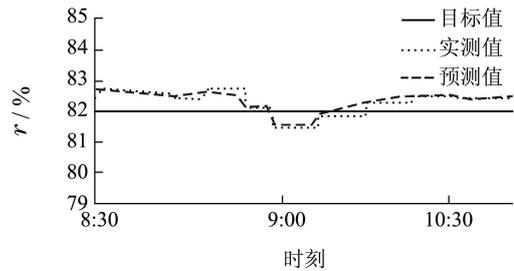
(a) 燃烧室温度趋势



(b) 还原煤气流量趋势



(c) 矿石搬出时间趋势



(d) 磁选管回收率趋势

图 9 故障工况下的控制效果

Fig. 9 Control results under fault working conditions

5 结论(Conclusions)

研发的竖炉焙烧过程运行优化控制系统可以较为有效的解决竖炉焙烧生产条件多变、未建模干扰、产品化验时间长等传统控制系统棘手问题,将运行指标控制在期望范围之内。该系统可以在MATLAB环境下验证的运行优化算法以最快速、最灵活的方式应用到工程实践中。由于算法模块与策略图通过封装与注册方式实现,很容易对各算法模块进行改进与再次开发,因而具有高度的开放性。研制的系统对新的运行控制算法和方法的研究以及实际应用均具有较高的推广价值。

参考文献(References):

- [1] CHAI T Y, DING J L. Hybrid intelligent control for optimal operation of shaft furnace roasting process [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(3): 264 – 275.
- [2] ZHOU P, CHAI T Y. Grinding circuit control: a hierarchical approach using extended 2-DOF decoupling and model approximation [J]. *Powder Technology*, 2011, 213(3): 14 – 26.
- [3] 周平, 柴天佑. 多变量解耦控制的工业过程运行层次控制方法 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(2): 199 – 206. (ZHOU Ping, CHAI Tianyou. Hierarchical control approach for industrial process operation based on multivariable decoupling control [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(2): 199 – 206.)
- [4] BLOCH G, SIROU F, EUSTACHE V, et al. Neural intelligent control for a steel plant [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1997, 8(4): 910 – 917.
- [5] WU M, GAO W H, HE C Y, et al. Integrated intelligent control of gas mixing-and-pressurization process [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2009, 17(1): 68 – 77.
- [6] WANG Z J, WU Q D, CHAI T Y. Optimal-setting control for complicated industrial processes and its application study [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(1): 65 – 74.
- [7] LI H X, GUAN X P. Hybrid intelligent control strategy supervising a DCS-controlled batch process [J]. *IEEE Control Systems Magazine* 2001, 21(3): 36 – 48.
- [8] CHAI T Y, LIU J X, DING J L, et al. Hybrid intelligent control for hematite high intensity magnetic separating process [J]. *Measurement and Control*, 2007, 40(6): 171 – 175.

- [9] ZHOU P, CHAI T Y, WANG H. Intelligent optimal-setting control for grinding circuits of mineral processing process [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(4): 730 – 743.
- [10] QIN S J, BADGWELL T A. A survey of industrial model predictive control technology [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(7): 733 – 764.
- [11] ZANIN A C, GOUVEA M T D, ODLOAK D. Integrating realtime optimization into the model predictive controller of the FCC system [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(8): 819 – 831.
- [12] 丁进良, 耿丹, 岳恒, 等. 竖炉焙烧过程优化操作运行与控制仿真实验平台 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(5): 609 – 612. (DING Jinliang, GE Dan, YUE Heng, et al. Simulation platform for optimal operation and control of roasting process in shaft furnace [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, 30(5): 609 – 612.)
- [13] 杨善升, 陆文聪, 陈念贻. DMOS优化软件及其在化工过程优化中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(4): 36 – 38. (YANG Shansheng, LU Wencong, CHEN Nianyi. DMOS software and its application in chemical process optimization [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2005, 32(4): 36 – 38.)
- [14] 片锦香, 柴天佑, 贾树晋, 等. 层流冷却系统过程优化控制仿真实验平台 [J]. 系统仿真学报, 2009, 19(24): 5667 – 5671. (PIAN Jinxiang, CHAI Tianyou, JIA Shujin, et al. Simulation platform for optimal control of laminar cooling system [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 19(24): 5667 – 5671.)
- [15] 铁鸣, 范玉顺, 柴天佑. 磨矿流程优化控制的分布式仿真平台 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 4000 – 4005. (TIE Ming, FAN Yushun, CHAI Tianyou. Distributed simulation platform for optimizing control of mineral grinding process [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(15): 4000 – 4005.)

作者简介:

周平 (1980–), 男, 讲师, 博士研究生, 目前研究方向为工业过程优化运行的反馈控制方法、软测量、多变量解耦控制及其应用等, E-mail: zhouping@mail.neu.edu.cn;

代伟 (1984–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为复杂工业过程优化运行的反馈控制方法及其软件开发, E-mail: daiwei_neu@126.com;

柴天佑 (1947–), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 目前研究方向为流程工业一体化运行优化控制、自适应控制、多变量智能解耦控制等, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.