

文章编号: 1001-0920(2005)04-0434-05

模糊复合控制方法在焦炉控制系统中的应用研究

高宪文, 刘浩, 赵亚平

(东北大学 教育部流程工业综合自动化重点实验室 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对焦炉温度的大惯性、纯滞后、非线性和时变等特点, 提出了一种新的模糊复合控制方法。它将常规的前馈控制、反馈控制与具有人工智能的模糊控制相结合, 吸取了前馈控制改善系统动态响应特性、反馈控制消除稳态误差以及模糊控制能够较好地解决系统难以建立精确数学模型的优点, 解决了焦炉温度控制问题。通过模糊复合控制的理论分析和仿真试验, 证明了该控制方法的可行性和有效性。

关键词: 焦炉控制系统; 模糊复合控制; 前馈控制; 反馈控制; 仿真研究

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Application and research of the fuzzy compound control method in coke oven control system

GAO Xianwen, LIU Hao, ZHAO Yaping

(Key Lab of Process Industry Automation of Ministry of Education, School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: GAO Xianwen; E-mail: gaoxianwen1@sina.com)

Abstract: Aiming at the coke oven temperature characteristics of great inertia, pure time-delay, non-linear and time changeable, a fuzzy compound control method is proposed. It combines the routine feedforward control, feedback control and artificial intelligent fuzzy control, and obtains the merits of the improving dynamic response of feedforward control, eliminating stable error of feedback control and modelling of fuzzy control. The problem of coke oven temperature control is solved ideally. The theoretical analysis and simulation results indicate the feasibility and effectiveness of the control method.

Key words: coke oven control system; fuzzy compound control; feedforward control; feedback control; simulation research

1 引言

焦炉是结构独特的工业炉窑, 焦炉加热使用的煤气量约占炼焦厂总能耗的 70%^[1]。因此焦炉温度的最优控制对于降低焦炉能耗、提高焦炭质量、延长炉体寿命、减少环境污染等具有重要的意义。

20 世纪 70 年代以来, 随着计算机技术和自动控制理论的发展, 已开发了几十种焦炉加热自动控制系统^[1,2]。对于焦炉的温度控制, 主要采用常规

PD 控制^[3]和以经典控制理论为基础结合应用的多种控制方法, 这些方法主要适用于动态性能良好且对控制性能要求不太高的线性系统。但焦炉温度是一个具有大惯性、纯滞后、非线性和时变性的庞大而复杂的控制对象, 因此单一传统的控制手段不能解决焦炉温度的精确控制问题。

针对以上问题, 本文提出了煤气供热量前馈、立火道温度反馈和模糊控制相结合的复合控制方法。

收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2005-01-19

作者简介: 高宪文(1955—), 男, 辽宁盘锦人, 教授, 博士, 从事复杂工业生产过程的智能建模、控制与优化的研究; 赵亚平(1982—), 女, 河南驻马店人, 硕士生, 从事模糊控制理论与应用的研究。

该方法利用前馈和反馈分别消除了可测和不可测干扰的影响, 采用模糊控制解决了焦炉温度模型难以精确建立的难题, 有效地减小了炉温的波动, 提高了焦炉温度控制系统的性能和产品质量

2 控制方法的设计

2.1 焦炉生产基本流程

焦炉生产基本流程如图 1 所示, 主要包括燃烧控制操作和推焦加煤操作

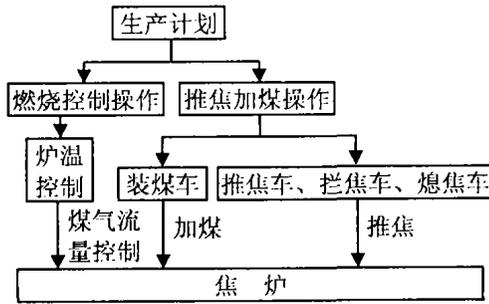


图 1 焦炉生产基本流程

1) 燃烧控制操作: 根据生产计划和配煤成份决定装煤的结焦时间, 然后确定标准立火道温度和煤气流量 操作工对立火道温度和煤气流量进行监测和调节, 以保证结焦时间和焦炭质量

2) 推焦加煤操作: 首先根据生产计划和配煤成份确定焦化时间, 然后制定推焦加煤操作计划 根据操作计划装煤车将取自煤塔的煤料装入炭化室, 燃烧室中煤气燃烧产生热量, 通过炉墙传给炭化室中的煤料, 使煤料结焦, 最终成为焦炭 推焦车将焦炭从焦侧推出, 由拦焦车拦入熄焦车内进行熄焦, 最后进行碎焦和筛焦操作

从焦炉生产过程可知: 焦炉的炼焦属于间歇式生产过程, 具有大惯性和纯滞后特性; 过程机理复杂, 具有时变性、非线性和变量间的耦合性; 生产过程中变量变化剧烈导致干扰强烈等 因此, 焦炉温度控制的难点在于: 一是建立有效的温度和结焦模型, 二是温度测量

传统的控制方法是一种保守的控制方式, 它既不能进行复杂运算, 也不具备复杂控制功能, 从而不能针对控制对象特点解决焦炉温度优化控制问题 与传统的 PD 控制比较, 模糊控制具有不需要建立数学模型, 鲁棒性较好, 过程动态响应品质较优和适应过程参数变化较强的优点^[4]. 因此, 本文提出一种基于前馈- 反馈与模糊复合控制煤气流量的方法

2.2 控制方法的整体结构^[5-7]

根据某钢厂 1 号和 2 号焦炉炉龄较长, 检测数据少等特点, 设计了煤气供热量前馈、立火道温度反馈和模糊控制相结合的控制方法, 其结构如图 2 所示 包括 6 个模块: 炼焦热量计算、前馈煤气流量计算、标准立火道温度设定、立火道温度测量、煤气流量模糊控制和残氧量控制

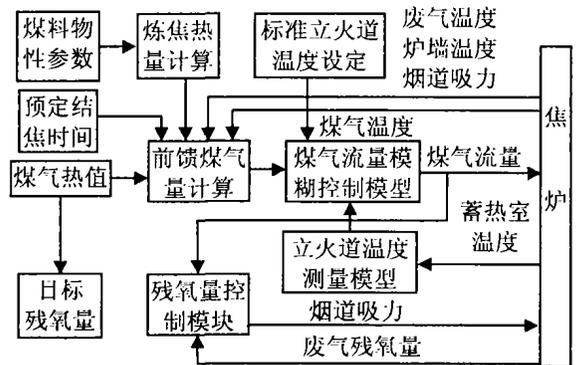


图 2 控制方法结构

首先根据煤料物性参数计算结焦所需热量, 然后由预定结焦时间、炼焦热量、废气温度、炉墙温度等参数通过热平衡方程计算煤气燃烧应提供的热量; 根据煤气热值计算前馈煤气流量 同时依据炼焦要求的立火道温度和实际立火道温度通过煤气流量模糊控制模型修正煤气流量

由于煤气流量的计算是在煤气充分燃烧的前提下进行的, 必须通过废气含氧量控制回路保证煤气燃烧时氧气充足 废气含氧量控制回路是根据煤气热值和煤气流量作为前馈控制环节, 以目标废气含氧量与实际废气残氧量的偏差作为反馈控制环节

该控制方法的优点在于既考虑到了当前立火道温度的变化, 又兼顾了未来时刻供热量的需求 在无精确温度模型的情况下实现了对焦炉温度的有效控制

2.3 前馈煤气流量的计算

若已知总炼焦热和炉体表面散热以及废气显热后, 即可得到总输出热量) 根据热平衡方程 (燃烧热 + 煤气显热 + 空气显热 + 入炉煤显热 = 总输出热量), 可计算前馈煤气流量 V_0 . 其中各参数计算如下:

1) 燃烧热

$$Q_1 = V_0 \times (1 - m \tau) \times Q_{net} \quad (1)$$

式中: m 为每小时焦炉换向次数; τ 为换向时间, h; Q_{net} 为煤气热值, kJ/m^3 .

2) 煤气显热

$$Q_2 = V_0 \times (1 - m \tau) \times T_m \times C_m \quad (2)$$

式中: T_m 为入炉煤气温度, ; C_m 为煤气比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

3) 空气显热

$$Q_3 = V_0 \times (1 - m \tau) \times \alpha \times T_k \times (C_k + \Psi_s \times W_s \times C_s) \quad (3)$$

式中: α 为理想空燃比; T_k 为空气温度, ; C_k 为空气比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; Ψ_s 为相对湿度; W_s 为空气中饱和和水分含量, m^3/m^3 ; C_s 为空气中水气比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

4) 入炉煤显热

$$Q_4 = G_m \times C_m \times T_m \quad (4)$$

式中: G_m 为入炉煤质量, kg ; C_m 为入炉煤气的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_m 为入炉煤温度, 。

根据上面的各公式, 可得到总输入热量为

$$Q_\lambda = Q_{\text{出}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (5)$$

将已知数据带入上述公式即可得到前馈煤气流量 V_a

2.4 立火道温度测量^[8]

在焦炉控制系统中, 立火道温度反馈环节的被控量通常为出炉焦饼温度, 但该钢厂 1 号和 2 号焦炉没有出炉焦饼温度检测设备, 故本控制系统中采用立火道温度作为反馈环节的检测量

立火道温度测量的方式有两种: 一种是人工直接测量方式; 另一种是通过安装在蓄热室顶部废气入口的热电偶测量入口废气温度, 然后通过立火道温度软测量模型间接计算出立火道温度

大量数据统计证明, 立火道温度与蓄热室温度存在一定相关性, 后者是前者的 0.88 ~ 0.89, 两者之间的关系可以近似为一个一元一次方程

$$T_r = k_1 + c_1 T_x \quad (6)$$

式中: T_r 为燃烧室温度; T_x 为蓄热室顶部温度; k_1 和 c_1 分别为相关系数、常数

在焦炉机焦两侧各选择 20 个蓄热室, 在其顶部插入热电偶, 并将交换机换向信号引入 DCS。在换向 10 min 和 20 min 时, 当蓄热室内下降气流的温度稳定后, 测出两组排出废气的蓄热室的温度, 并求出两次温度的平均值, 与人工测得的立火道温度进行比较。在积累了一定运行数据后, 可得 $T_{x1}, T_{x2}, \dots, T_{xn}$ 和 $T_{r1}, T_{r2}, \dots, T_{rm}$ 。由最小二乘法知, 式(6)中 k_1

和 c_1 应使

$$\sum_{i=1}^n (T_{ri} - T_r)^2 = \sum_{i=1}^n [T_r - (c_1 + k_1)]^2 \quad (7)$$

的值最小, 从而可得

$$k_1 = l_{xy}/l_{xx}, c_1 = \bar{T}_r - k_1 \bar{T}_x \quad (8)$$

式中

$$\bar{T}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{xi}, \bar{T}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ri},$$

$$l_{xx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{xi} - \bar{T}_x)^2,$$

$$l_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{xi} - \bar{T}_x)(T_{ri} - \bar{T}_r).$$

求得 k_1 和 c_1 后, 可计算出立火道温度, 并作为调节的依据

3 煤气流量模糊控制模型

3.1 煤气流量模糊控制模型分析

由于焦炉温度是一个具有大惯性、纯滞后、非线性和时变性的复杂控制对象, 通过各种测试手段和数据处理方法获得的系统数学模型往往是一种近似, 很难获得系统状态的精确传递函数或状态方程, 仅采取传统的控制方式已不能达到预期的控制效果。而有经验的操作人员进行手动控制, 却可以收到很好的效果。模糊控制就是模拟人工智能的行为, 利用模糊理论建立一些控制规则, 对生产过程进行控制, 从而达到令人满意的控制效果

模糊控制模型如下: 模糊控制模型的基本思路是根据前馈煤气流量与当前煤气流量的偏差, 标准立火道温度与实际立火道温度的偏差(其中前馈煤气流量和标准立火道温度可由前面计算得出), 以及实际立火道温度变化趋势, 通过一定的模糊控制算法调整最终煤气流量

$$\Delta V = \text{当前煤气流量} - \text{前馈煤气流量},$$

$$\Delta T = \text{实际立火道温度} - \text{标准立火道温度},$$

$$\Delta C = \text{当前立火道温度} - \text{前一时刻立火道温度}$$

其中: ΔV 包括: 大于零、近似等于零、小于零; ΔT 包括: 大于零、近似等于零、小于零; ΔC 包括: 大于零、近似等于零、小于零

最终煤气流量的控制算法采用模糊控制方式, 将 ΔV 、 ΔT 和 ΔC 作为模糊控制器的输入, 通过模糊控制算法得到煤气流量的变化量 ΔU , 加上当前煤

气流量, 作为基础级 PD 控制回路的设定值

3.2 煤气流量控制器的设计

将 ΔV , ΔT 和 ΔC 作为输入的模糊控制器采用一种新型的设计方案, 称为 27 条规则控制, 其具体实现方法如下:

将检测量与设定值的偏差值划分为 3 个等级, 分别为负、正常和正, 这样每个输入量有 3 种情况, 3 个输入量组合为 27 种情况。根据现场的实际情况, 针对每种情况采取相应的操作, 增加或减小煤气阀门的开度。27 条规则的具体内容如表 1。其中: NG 代表“负”; NM 代表“正常”; PS 代表“正”; IC 代表“增加”; DC 代表“减少”; KEEP 为“保持”。

该模型根据工人的操作经验, 将各种影响煤气

表 1 27 条控制规则

ΔV	ΔT	ΔC	ΔU
NG	NG	NG	IC 10%
NG	NG	NM	IC 10%
NG	NG	PS	IC 5%
NG	NM	NG	IC 5%
NG	NM	NM	IC 2%
NG	NM	PS	KEEP
NG	PS	NG	KEEP
NG	PS	NM	DC2 %
NG	PS	PS	DC2 %
NM	NG	NG	IC 5 %
NM	NG	NM	IC 2 %
NM	NG	PS	KEEP
NM	NM	NG	IC 2 %
NM	NM	NM	KEEP
NM	NM	PS	DC2 %
NM	PS	NG	KEEP
NM	PS	NM	DC2 %
NM	PS	PS	DC5 %
PS	NG	NG	IC 5 %
PS	NG	NM	IC 2 %
PS	NG	PS	KEEP
PS	NM	NG	KEEP
PS	NM	NM	DC2 %
PS	NM	PS	DC2 %
PS	PS	NG	DC2 %
PS	PS	NM	DC5 %
PS	PS	PS	DC10 %

流量及其变化趋势综合归纳成 27 条规则, 建立了煤气流量模糊控制模型, 从而实现了焦炉燃料控制过程的智能控制

因为炭化室焦侧宽度大于机侧宽度, 焦侧所需热量也要大于机侧, 所以在分配煤气流量时, 不能采用平均分配的方式。根据以往的实际经验, 焦侧的煤气流量为机侧煤气流量的 1.06 倍, 这样才能保证机侧与焦侧的煤料炭化程度一致

4 控制方法仿真

4.1 仿真对象模型及仿真条件

焦炉是一个十分复杂的被控对象, 目前仍没有精确的焦炉整体数学模型。根据焦炉大滞后、大惯性的特点, 以一个炭化室为被控对象, 将焦炉简化为一个带有纯滞后的一阶惯性环节, 其传递函数为

$$G(s) = K_1 e^{-Ts} / (T_1 s + 1), \quad (9)$$

仿真将对前馈控制、反馈控制及本文的模糊复合控制在被控对象炼焦不同煤质情况下的控制效果进行比较, 并根据焦炉的大滞后特性, 采样时间不能过短, 文中设为 60 s。

仿真中选用的两种煤为气煤和焦煤, 通过离线计算得到两种煤每公斤分别所需的炼焦热为 1 922.2 kJ 和 1791.1 kJ。炭化室有效体积为 2.16 m³, 堆密度为 800 kg/m³, 则炭化所需总热量为 3.32 × 10⁶ kJ 和 3.1 × 10⁶ kJ。

设定使用高炉煤气进行加热, 所使用的高炉煤气低发热值为 3 500 kJ/m³。根据离线煤气流量计算, 得到两种煤炼焦时所需要的标准煤气流量分别为 166.7 m³/s 和 160 m³/s。设定炼焦时间为 17 h, 根据现场工艺要求, 两种煤所需标准立火道温度分别为 1 250 和 1 200。

由于两种炼焦用煤的成份不同, 即气煤比焦煤所需的炼焦热大。炼制气煤的数学模型中的惯性系数较大, 气煤和焦煤的数学模型分别为

$$G(s) = 7.5 e^{-50s} / (120s + 1), \quad (10)$$

$$G(s) = 7.5 e^{-50s} / (100s + 1). \quad (11)$$

4.2 仿真结果

根据前面所设定的条件和仿真模型, 在两种煤质情况下得到的仿真结果如图 3~ 图 5 所示。

通过仿真结果的比较, 可得到如下结论: 前馈控制可较好地消除被控对象滞后对系统的影响, 但前馈控制的过渡时间比较长; 反馈控制过渡时间相对较短, 但对于大滞后的被控对象却有较大的超调; 在模糊控制中, 由于引入了前馈控制参数, 在合理的

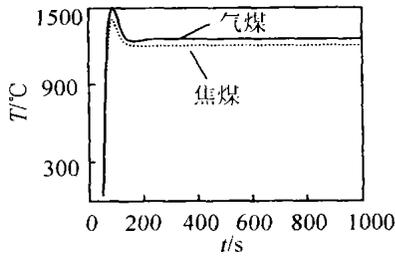


图3 气煤、焦煤反馈控制曲线

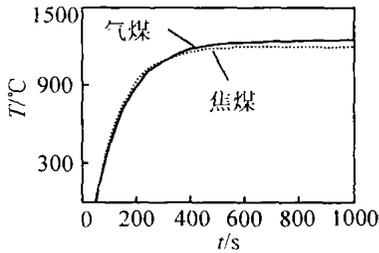


图4 气煤、焦煤前馈控制曲线

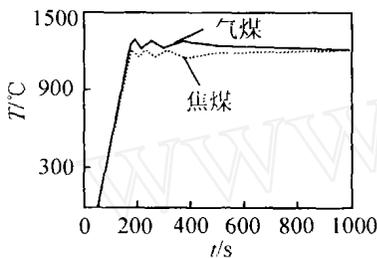


图5 气煤、焦煤模糊控制曲线

选择模糊控制规则参数的情况下,既缩短了过渡时间,又减小了超调,有效地控制了温度的波动,达到了较好的控制效果

5 结 论

本文基于某钢厂1号和2号焦炉的特点,提出了以前馈、反馈和模糊控制相结合的模糊复合控制方法。该方法的优点在于既考虑到了当前立火道温度的变化,又兼顾未来时刻供热量的需求。利用前馈和反馈分别消除了可测和不可测干扰的影响,并且由于模糊控制模块的引入解决了焦炉温度控制模型难以精确建立的问题,有效地减小了炉温的波动。通过仿真结果可以看出,该控制方法能达到较好的控制效果,既消除了系统稳态误差,又加快了其动态响

应,对于解决复杂的焦炉温度控制问题具有很大的实用价值

参考文献(References)

- [1] 吴宏博,朱宏祥,王新立,等. 焦炉加热过程计算机控制的现状与发展[J]. *冶金自动化*, 2000, (6): 7-10
(Wu H B, Zhu H X, Wang X L, et al. Present state and development of computer control for coke oven battery heating process [J]. *Metallurgy Automation*, 2000, (6): 7-10)
- [2] 李天平,李德瑾. 焦炉炼焦加热过程控制最优化系统综述[J]. *山东冶金*, 1999, 21(5): 10-14
(Li T P, Li D J. Summarize for optimization of coke-ovens battery's coking process heating control system [J]. *Shandong Yejin*, 1999, 21(5): 10-14)
- [3] Qiao W Z, Mizumoto M. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 78(1): 23-35
- [4] 郑东明,严文福. 焦炉加热自动控制系统评述与应用[J]. *华东冶金学院学报*, 1999, 16(3): 211-217.
(Zheng D M, Yan W F. Comment and application on the automatic control system for coke oven heating [J]. *J of East China University of Metallurgy*, 1999, 16(3): 211-217.)
- [5] 陈东,温治,霍芳,等. 焦炉直行温度和火落时间双反馈控制策略[J]. *燃料与化工*, 2003, 34(4): 182-185.
(Chen D, Wen Z, Huo F, et al. Dual-feedback control strategy for coke oven longitudinal temperature and coking end time [J]. *Fuel and Chemical Processes*, 2003, 34(4): 182-185.)
- [6] Euntai Kim. A new approach to numerical stability analysis of fuzzy control systems [J]. *IEEE Trans on Systems*, 2001, 31(1): 107-113
- [7] Fang K L, Shen Z J. A neural-fuzzy control in resistance furnace [A]. *The 1997 IEEE Int Conf on Intelligent Processing Systems* [C]. Beijing, 1997: 200-204
- [8] 郑东明,宁方青. 焦炉立火道温度控制研究[J]. *大连理工大学学报*, 2001, 41(4): 442-445.
(Zheng D M, Ning F Q. Research on coke oven heating control system [J]. *J of Dalian University of Technology*, 2001, 41(4): 442-445.)