

文章编号:1671-6833(2007)03-0091-04

钢坯加热炉炉温仿人智能控制策略的研究

张翠英¹, 田建艳²

(1. 太原科技大学 化学与生物工程学院, 山西 太原 030021; 2. 太原理工大学, 信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对钢坯加热炉炉温控制现状及存在的问题, 依据仿人智能控制原理, 建立炉温的仿人智能控制策略, 并利用 MATLAB 仿真软件对仿人智能控制算法与常规 PID 控制算法进行对比仿真实验, 结果表明仿人智能控制策略在炉温控制方面有较好的控制效果和更强的适应性。

关键词: 仿人智能控制; 炉温控制; 钢坯加热炉

中图分类号: TF 703.7 **文献标识码:** A

0 引言

钢坯加热炉是带钢热连轧生产线上一个重要组成部分, 其主要任务是进行钢坯轧制前的加热。钢坯的加热质量直接影响成品钢材的质量、产量以及轧机的寿命^[1-3]。由于难以在线测量并控制钢坯的表面温度及中心温度, 通常是根据热电偶检测的炉温信息间接实现对钢坯温度的控制。只要能保证加热炉各段炉温的相对稳定, 就能保证出炉钢坯温度的相对稳定^[4]。由于加热炉是一个典型的非线性、纯滞后、强耦合复杂工业系统, 传统的控制方法难以取得良好的控制效果。目前国内研究最多的是双交叉限幅控制, 但这种控制方式的缺点是响应速度缓慢, 不能满足加热炉实时纠偏的要求^[5]。国内大多数轧钢企业加热炉的温度控制还依赖人工控制, 完全国有化并且实现真正意义上的温度自动控制的钢坯加热炉还未见报道。作者根据仿人智能控制理论(Human-Simulated Intelligent Control, HSIC), 建立了炉温的仿人智能控制策略, 通过仿人、仿智来实现加热炉炉温的优化控制^[6]。

1 仿人智能控制理论

仿人智能控制理论的基本思想是在宏观结构上和行为功能上对人进行模拟, 最大限度地识别和利用控制系统动态过程所提供的信息特征, 进行启发和直觉推理, 从而实现了对缺乏精确数学模型的对象进行有效控制的目的^[7-9]。仿人智能控

制的分层信息处理与决策机构是求解控制问题的一种高阶产生式系统结构, 按层次高低可分为: 中枢司令级 CC、组织协调级 OC 和单元控制级 UC。单元控制级面对实时控制问题, 每一个单元控制级又是由一个 2 阶产生式系统结构组成, 其中包括: 运行控制级 MC 和参数自校正级 ST 和任务适应级^[9]。在钢坯加热炉的炉温控制系统中, 运行控制级的输出将直接作用在加热炉各段燃气流量调节阀上, 直接实现对炉温的控制。

控制问题的求解, 对整个仿人智能控制器的每一级来说, 都是一个具有二次映射关系的信息处理与决策过程, 即:

$$\begin{aligned} \Omega_j: \Phi_j \rightarrow \Psi_j, \Omega_j &= \{\omega_{j1}, \omega_{j2}, \omega_{j3}, \Lambda, \omega_{jr}\} \\ \omega_{ji}: IF \phi_{ji} THEN \psi_{ji} \\ \Psi_j: R_j \rightarrow U_j, \Psi_j &= \{\psi_{j1}, \psi_{j2}, \psi_{j3}, \Lambda, \psi_{jr}\} \\ \psi_{ji}: u_{ji} &= f_{ji}(e, \Delta e, \Lambda) \\ \text{或 } f_{ji} &\rightarrow IF \text{ 条件 THEN 操作} \end{aligned}$$

式中: $\Phi_j = \{\phi_{j1}, \phi_{j2}, \phi_{j3}, \Lambda, \phi_{jr}\}$ 为炉温特征模型集, 它是炉温控制系统所有特征状态的集合;

特征状态又是由一些特征基元 q_{ji} 的组合来描述, 特征基元集为 $\Omega_j = \{q_{j1}, q_{j2}, q_{j3}, \Lambda, q_{jr}\}$;

$\Psi_j = \{\psi_{j1}, \psi_{j2}, \psi_{j3}, \Lambda, \psi_{jr}\}$ 为控制模式集;

$\Omega_j = \{\omega_{j1}, \omega_{j2}, \omega_{j3}, \Lambda, \omega_{jr}\}$ 为推理规则集。

对加热炉炉温控制系统的设计就是根据炉温的特征模型选择相应控制策略的过程, 即加热炉炉温满足条件 ϕ_{ji} , 则采用控制模式 ψ_{ji} 。

2 加热炉控制系统概述

笔者以某轧钢厂的高效节能步进式加热炉为

收稿日期: 2007-03-18; 修订日期: 2007-05-31

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2006011033); 山西省科技攻关项目(041100)。

作者简介: 张翠英(1971-), 女, 河北石家庄人, 太原科技大学讲师, 主要从事复杂工业过程的建模与控制等研究。

研究对象,建立了加热炉炉温的仿人智能控制策略.该加热炉结构如图1所示.炉体沿炉长方向分为预热段、I加热段、II加热段、均热段.其中预热段不设有烧嘴,只是利用烟气中的热量对钢坯进行预热,不参与控制.而I加热段、II加热段和均热段每段分为上下两个区,因此炉子共有6个温度控制区,即I加热段上部、I加热段下部、II加热段上部、II加热段下部、均热段上部和均热段下部.每个控制区的炉温进行独立控制,当炉温的检测值与设定值之间存在误差时,通过炉温仿人智能控制系统进行控制与调节.



图1 加热炉结构示意图
Fig.1 Furnace structure

3 炉温仿人智能控制策略

根据热连轧厂提供的钢坯加热过程中可能出现的炉温状况,绘制系统炉温误差曲线,如图2所示.根据误差曲线上的炉温信息对系统动态模型进行模态识别及控制决策.

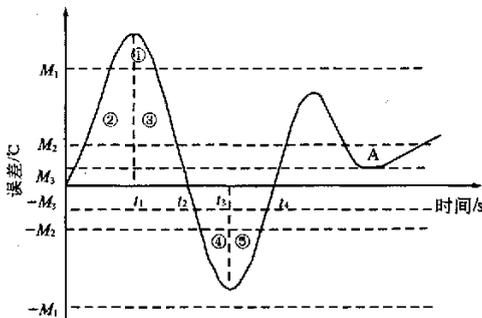


图2 系统误差曲线
Fig.2 System error curve

3.1 模态识别

(1) 炉温误差很大

当炉温误差绝对值很大,即 $|e_n| > M_1$ 时,如图2中的区域①.为了尽快将炉温调整到设定值附近,使炉温误差以最大速度减小,此时不论误差变化趋势 Δe 如何,都应采用尽可能大的控制作用,因此选用Bang—Bang控制模式进行控制,控制规则为:

$$\text{IF } |e_n| > M_1 \text{ THEN } u_n = \pm U_{\max} \quad (1)$$

式中: e_n 为第 n 次误差值; Δe 为误差变化; u_n 为控制器的第 n 次输出; U_{\max} 为控制器最大输出量; M_1 是根据现场人工控制规则设定的误差阈值.

(2) 炉温误差不太大

当炉温误差在一定范围之内,即 $|e_n| \leq M_1$ 时,此时根据误差 e_n 和误差变化趋势 Δe 进行综合分析,得出相应的控制模式如下:

① 炉温误差在增大

对应于图2中误差曲线上区域②和④,炉温误差 e_n 及误差变化 Δe 的乘积大于零,即 $e_n \cdot \Delta e > 0$,此时炉温误差 e_n 有增大趋势,炉温正在偏离设定值,应加大控制量以便尽快地纠正误差,使炉温回调,此时采用比例模式.比例增益 K_p 可以取得相当大.控制规则为

$$\text{IF } e_n \cdot \Delta e > 0 \text{ 且 } M_3 \leq |e_n| \leq M_1 \text{ THEN } u_n = u_{(n-1)} + K_p e_n \quad (2)$$

② 炉温误差在减小

如图2误差曲线上区域③和⑤,此时炉温误差及误差变化乘积小于零, $e_n \cdot \Delta e < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} > 0$,说明炉温误差正在减小,炉温正在接近设定值,此时不需要继续加大控制量,只需维持控制器原来的输出量,即保持燃气流量不变,一直到炉温回到设定值为止.控制规则为

$$\text{IF } e_n \cdot \Delta e < 0 \text{ 且 } \Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} > 0 \text{ THEN } u_n = u_{(n-1)} \quad (3)$$

③ 炉温的局部极小值

如图2中的A点,相邻两次误差变化的乘积小于零, $e_n \cdot \Delta e < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} < 0$,说明误差曲线将有极值出现,说明在炉温回调过程中没有到达设定值而再次出现反方向变化,此时应立即切换到比例控制模式,以使炉温继续回调.因为炉温的极值出现在炉温回调过程中,此次极值比前次极值小,即 $e_{\min} < e_{\min(n-1)}$,所以应在原来比例控制模式上增加抑制系数 K_2 ($0 < K_2 < 1$),即:

$$\text{IF } e \cdot \Delta e < 0 \text{ 且 } \Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} < 0 \text{ THEN } u_n = u_{(n-1)} + K_2 K_p e_{\min} \quad (4)$$

其中: e_{\min} 为第 n 次误差极值; K_p 为比例增益; K_1 为增益放大系数,且 $K_1 > 1$; K_2 为抑制系数,且 $0 < K_2 < 1$; M_2 是根据现场人工控制规则设定的第二个误差阈值.

(3) 炉温在精度要求范围内

当炉温的误差很小,在对应钢种所要求的精度范围内,即 $|e_n| \leq M_3$,此时不需要再对炉温进行调节,只需维持这种能量平衡即可,保持燃气流量

不变,等待并观察炉温的变化情况,若炉温有变动,再做出新的判断与决策,即:

$$\text{IF } |e| < M_3 \text{ THEN } u_n = u_{(n-1)} \quad (5)$$

式中: M_3 是根据现场人工控制规则设定的第三个误差阈值,且 $M_1 > M_2 > M_3$.

3.2 仿人智能控制算法

根据模态识别结果,建立炉温的仿人智能控制算法,作者采用2级结构算法,即运行控制级和参数校正级.具体算法如下:

(1) 运行控制级

① 特征基元集

$$Q_1 = \{q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{14}, q_{15}\}$$

式中: $q_{11}: |e_n| > M_1$

$$q_{12}: e_n \cdot \Delta e_n > 0$$

$$q_{13}: |e_n| < M_2$$

$$q_{14}: \Delta e_n = 0$$

$$q_{15}: \Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} > 0$$

② 特征模型集

$$\Phi_1 = \{\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{14}, \phi_{15}, \phi_{16}\}$$

式中: $\phi_{11} \Rightarrow q_{11}$

$$\phi_{12} \Rightarrow \bar{q}_{11} I q_{12}$$

$$\phi_{13} \Rightarrow \bar{q}_{11} I \bar{q}_{13} I q_{14}$$

$$\phi_{14} \Rightarrow \bar{q}_{11} I \bar{q}_{12} I q_{15}$$

$$\phi_{15} \Rightarrow \bar{q}_{13}$$

$$\phi_{16} \Rightarrow \bar{q}_{11} I \bar{q}_{13} I \bar{q}_{15}$$

③ 控制模态集

$$\Psi_1 = \{\psi_{11}, \psi_{12}, \psi_{13}, \psi_{14}\}$$

式中: $\psi_{11} \Rightarrow u_n = \pm U_{\max}$

$$\psi_{12} \Rightarrow u_n = u_{(n-1)} + K_p e_n$$

$$\psi_{13} \Rightarrow u_n = u_{(n-1)}$$

$$\psi_{14} \Rightarrow u_n = u_{(n-1)} + K_2 K_1 e_{(mn)}$$

④ 推理规则集

$$\Omega_1 = \{\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}, \omega_{14}\}$$

式中: $\omega_{11}: \text{IF } \phi_{11} \text{ THEN } \psi_{11}$

$\omega_{12}: \text{IF } \phi_{12} \text{ 或 } \phi_{13} \text{ THEN } \psi_{12}$

$\omega_{13}: \text{IF } \phi_{14} \text{ 或 } \phi_{15} \text{ THEN } \psi_{13}$

$\omega_{14}: \text{IF } \phi_{16} \text{ THEN } \psi_{14}$

(2) 参数校正级

① 特征基元集

$$Q_2 = \{q_{21}, q_{22}\}$$

式中: $q_{21}: |e_n| \leq M_1$

$$q_{22}: |e_n| \geq M_2$$

② 特征模型集

$$\Phi_2 = \{\phi_{21}, \phi_{22}\}$$

式中: $\phi_{21} \Rightarrow q_{21} I q_{22}$

万方数据

$$\phi_{22} \Rightarrow \bar{q}_{22}$$

③ 控制模态集

$$\Psi_2 = \{\psi_{21}, \psi_{22}\}$$

式中: $\psi_{21} \Rightarrow K_p = K_i K_p$

$$\psi_{22} \Rightarrow K_p = K_p$$

④ 推理规则集

$$\Omega_2 = \{\omega_{21}, \omega_{22}\}$$

式中: $\omega_{21}: \phi_{21} \Rightarrow \psi_{21}$

$$\omega_{22}: \phi_{22} \Rightarrow \psi_{22}$$

4 仿真及结果分析

根据文献[8, 11]提供的加热炉模型并结合钢坯加热炉的实际情况,作者对一大惯性、纯滞后系统 $G(s) = \frac{1.16e^{-32s}}{680s + 1}$ 进行了 MATLAB 仿真实验,

其中 PID 控制器的 K_p, K_i, K_d 是通过 SIMULINK 优化所得的最优参数,仿真结果如图3所示.由仿真结果可以看出,HSIC 可以几乎无超调地跟踪输入,有着比常规 PID 更优良的品质.对于钢坯加热炉的炉温控制系统,超调量是一个很重要的性能指标.在炉温的上升过程中,超调就意味着钢坯过烧,会造成能源的浪费,钢坯氧化烧损严重,成品钢材的产量下降;对于某些特殊钢种,过烧就意味着产品质量的下降甚至是生产出废品.

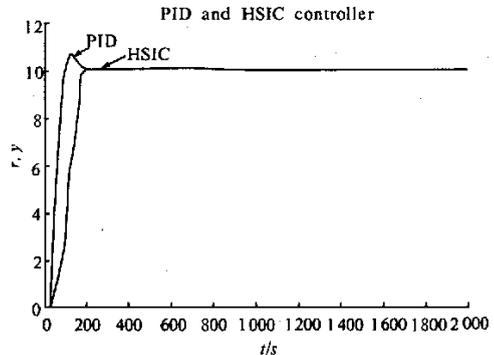


图3 仿真结果

Fig.3 Simulation result

5 结论

在钢坯加热炉的炉温过程控制中,由于难以建立精确的数学模型,因而难以用传统的控制理论来解决其控制问题.而仿人智能控制理论可以不依赖于对象的数学模型,通过仿效人的智能行为实现对系统的控制与决策.实验证明,仿人智能控制器可以较好地实现钢坯加热炉的温度控制.

参考文献:

- [1] 陈军,吴敏,曹卫华. 工业加热炉燃烧过程的模糊专家控制策略[J]. 计算技术与自动化,2004,23(3):16-18.
- [2] 毕春长,李柠,黄道. 钢坯加热炉仿真系统研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(4):663-666.
- [3] 陈军. 步进式加热炉燃烧过程智能控制策略及应用[D]. 中南大学,2004:3-12.
- [4] 杨英华,李东. 轧钢加热炉燃烧自动控制系统的运行机制[J]. 中国冶金,2005,15(11):28-30.
- [5] 杨伟. 马钢H型钢轧机加热炉燃烧控制系统[J]. 马钢职工大学学报,2000,10(1):27-30.
- [6] 李祖枢,涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京:国防工业出版社,2003:98-115.
- [7] 高岩. 锅炉燃烧系统的仿人智能控制[J]. 北京理工大学学报,2002,22(3):215-217.
- [8] 何光宏,李祖枢. 仿人智能控制在煤炉燃烧系统中的应用[J]. 2003,11(8):597-599.
- [9] 牛鹏辉,涂亚庆. 过程控制中的仿人智能控制算法[J]. 计算机测量与控制,2005,13(10):1061-1063.
- [10] 付珺. 大延迟控制对象仿人智能控制的研究[J]. 山西电力技术,2000,(1):49-52.
- [11] 张东波,朱建林. 用于加热炉的专家模糊温度控制器[J]. 机电工程,2002,19(1):51-55.

Study on the Temperature Control in Rolling Reheating Furnace Based on Human - simulated Intelligent Control

ZHANG Cui-ying¹, TIAN Jian-yan²

(1. Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030021, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To solve the problems of the temperature control in rolling reheating furnace, the strategy of human-simulated intelligent control is constructed on the basis of its principles. The MATLAB simulated software is used for simulation test to compare the human-simulated control algorithm of furnace temperature with the conventional PID control. The method has been proved to be more effective and more adaptive in the temperature control in rolling reheating furnace.

Key words: human-simulated intelligent control; temperature control; rolling reheating furnace