

步进式加热炉炉温建模与优化仿真系统设计

李 柠, 王锡淮, 李少远, 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所, 上海 200030)



摘 要: 加热炉炉温建模与优化设定是保证轧钢质量, 提高企业经济效益的有效方法。本文在分析和研究步进式加热炉生产过程的基础上, 集成 Matlab 和 InTouch 平台, 开发了加热炉炉温建模与优化仿真软件包。软件包丰富的功能和友好的人机界面为加热炉炉温建模与优化的理论研究提供了良好的仿真环境, 实现了仿真与控制的一体化。

关键词: 建模与优化; 炉温优化设定; 仿真软件包

中图分类号: TP273; TG307

文献标识码: B

The Design of Simulation System for Reheating Furnaces Modeling and Optimization

LI Ning, WANG Xi-huai, LI Shao-yuan, XI Yu-geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract Furnace temperature modeling and optimization is always one of effective ways to improve product quality and profit for steel industry. Based on the analysis and study of walking beam reheating furnaces, a furnace temperature modeling and optimization software package has been developed. Plentiful functions and friendly HMI(Human-Machine Interface) provide a better simulation environment for the furnace process theory study. Matlab and InTouch are used to design this package.

Keywords modeling and optimization; furnace temperature setpoint optimization; simulation software package

引 言

步进式加热炉是轧钢工业的主要生产设备之一, 其功能是根据钢坯的入炉参数、生产工况和工艺指标, 通过控制炉温、空气燃料流量及空燃比、空气燃料压力、烟气残氧浓度以及炉膛压力, 尽可能降低能耗, 减少氧化烧损, 使钢坯在炉中均匀受热, 出炉时达到工艺要求的轧制温度^[1,6]。其中, 炉温的优化设定问题直接关系到控制质量的好坏和能耗的多少。然而, 由于钢坯的加热过程是一个复杂的工业过程, 影响炉温的因素众多且工况复杂多变, 加热炉的具体情况又不允许进行反复试验, 炉温的优化设定问题一直没有得到很好的解决^[2]; 另外, 加热炉一向是钢铁企业中的耗能大户, 因此在当前企业视效益为生命的今天, 对于提高产品质量和节能降耗应给予足够的重视。为此, 我们研究了炉温设定与钢坯温度的分布关系, 在此基础上根据加热要求动态优化分段炉温的设定值, 并集成 Matlab 和 InTouch 平台开发了仿真与控制一体化软件包。

1 系统建模与优化

实际生产中, 加热炉往往采取分段(通常分为五段)设定的控制方式实现最终出口处的温度要求。为了实现仿真

与控制的一体化, 首先应建立钢坯温度分布与加热炉各段炉温设定之间的关系模型, 并根据这一模型对钢坯温度进行估计, 进而对出口处的炉温进行预测, 并通过对各段炉温的优化设定达到节能降耗的目的。

1.1 分段炉温的优化设定

根据工艺分析, 炉温采用沿炉长方向的下凹分布曲线,

$$u(t) = d + et + ft^2 \quad (1)$$

可表示为加热时间的二次函数形式^[3],

式中, $u(t)$ 为炉膛温度, t 为加热时间。上式同时要满足下述约束条件: ① 钢坯在下加热段必须达到一定的温度要求; ② 钢坯在炉内某关键点 t_1 (通常是在均热段入口) 的温度必须达到某一要求; ③ 钢坯在出口处 t_f 必须达到开轧的温

- 1) $t=0$ 时, $u_{11} \leq d \leq u_{21}$
- 2) $t=t_1$ 时, $u_{12} \leq d + et_1 + ft_1^2 \leq u_{22}$
- 3) $t=t_f$ 时, $u_{13} \leq d + et_f + ft_f^2 \leq u_{23}$

度要求。由此建立相应的约束条件表达式:

其中, $u_{11}, u_{21}, u_{12}, u_{22}, u_{13}, u_{23}$ 分别根据实际工艺要求确定。

考虑到生产工艺对钢坯加热质量的上述要求并兼顾节能降耗, 采用在满足工艺要求的前提下尽量使各段的炉温设

$$\min J = \min \left\{ \frac{1}{2} P \cdot [T_m(t_f) - T_m^*(t_f)]^2 + \frac{1}{2} Q \cdot [T_s(t_f) - T_c(t_f)]^2 + \frac{1}{2} R \int_0^{t_f} u(t)^2 dt \right\} \quad (2)$$

定值最低的原则, 取二次型性能指标:

收稿日期: 2000-04-03

基金项目: 国家 863 重大关键技术攻关项目 (863-511-830-002)

作者简介: 李 柠 (1974-), 女, 山东淄博人, 博士, 目前研究领域为复杂工业过程建模与控制, 预测控制等。

其中, P, Q, R 为加权系数, 且 $P, Q \gg R$; $T_m(t_f)$, $T_s(t_f)$, $T_c(t_f)$, $T_m^*(t_f)$ 分别为出炉时刻 t_f 时的钢坯平均预报温度, 表面预报温度, 中心预报温度, 工艺设定的平均预报温度期望值; T_f 为炉膛温度; T_0 为钢坯的初始温度; ρ, C_p, λ, h 为钢坯的密度、比热导热系数和厚度; ϕ 为总括热吸收率; l, P ,

$$T_m(k+1) = T_m(k) \frac{k_m D t}{r C_p} \left(\frac{2}{l} + \frac{P}{A} \right) s F \left\{ T_f(x, k D t) + 273 \right\}^4 - [T_s(k) + 273]^4 \quad (3)$$

$$T_s(k+1) = T_m(k+1) + \frac{h}{k_s \cdot l} s F \left\{ T_f(x, k D t) + 273 \right\}^4 - [T_s(k) + 273]^4 \quad (4)$$

$$T_c(k+1) = T_s(k+1) - \frac{h}{k_c \cdot l} s F \left\{ T_f(x, k D t) + 273 \right\}^4 - [T_s(k) + 273]^4 \quad (5)$$

$$T_m(0) = T_s(0) = T_0$$

A 分别为钢坯的长度、横截面周长和横截面积; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; k_m, k_s, k_c 分别为计算钢坯 T_m, T_s, T_c 时的参数, 通过实验调试来获得; t 为采样间隔。

上述问题形成针对生产目标的有约束的优化问题, 用全局寻优法可解得(1)式中的最优参数 d^*, e^*, f^* , 给出炉内各段关键点 t_i , 相应的最优炉温分布为 $u(t) = d^* + e^* t_i + f^* t_i^2$ 。程序流程图见图 1。

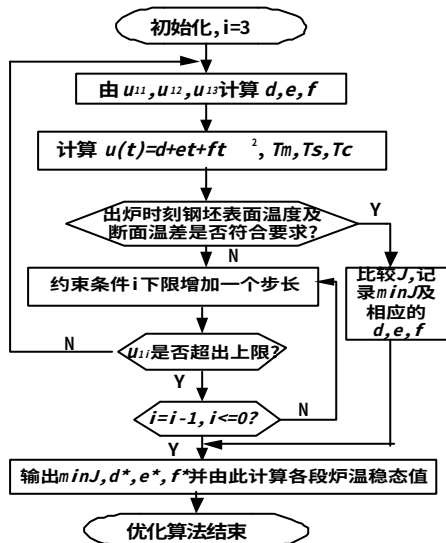


图1 优化算法流程图

1.2 炉温优化设定的动态补偿

步进梁式加热炉是一种准稳态设备, 在一定条件的稳态生产状态下, 对于具体的钢种规格以及炉子产量, 存在稳态的最优设定值和钢坯的理想加热曲线。但在钢坯的实际加热过程中, 除了钢坯的种类、规格及轧制节奏这些因素影响炉温设定之外, 其它扰动如炉压, 炉体绝缘条件及炉膛气氛的变化等最终都会造成钢坯的温度分布偏离理想加热曲线。因此, 严格的稳态工况是不存在的, 直接应用稳态最优炉温设定值来进行加热炉的控制不一定能保证钢坯的加热质量和加热炉能耗的最优化。所以必须对加热炉生产过程中

的各种扰动在控制策略上作相应的考虑, 以获得在动态工况下能够保证钢坯加热质量及最小燃料消耗的炉温设定值, 从而实现加热炉的动态优化控制, 具体可通过下面两条途径实现。

● 炉温设定值反馈控制

实际生产中针对特定的加热炉, 根据操作经验对各类钢坯制定出相应的理想加热曲线, 曲线描述了钢坯在炉内不同位置应达到的温度。每个控制周期内, 比较炉子各位置处的钢坯平均温度预报值 T_{ij} 和对应的理想加热曲线期望值 T_{ij}^* , 可得偏差值 e_{ij} , 则加热炉各段的区域偏差为

$$E_i = \left(\sum_{j=1}^m w_j \int_{l_{i1}}^{l_{i2}} e_{ij}(x) dx \right) / l_i \quad (6)$$

其中, i 为段号, E_i 为第 i 段区域偏差, m 为钢坯数, w_j 为权系数, $e_{ij}(x)$ 为第 j 块钢坯沿炉长的温差分布, l_{i1} 和 l_{i2} 分别为第 i 段的起点位置和终点位置, l_i 为第 i 段的炉长。

在求出加热炉各段的区域偏差后, 通过 PID 调节器得到新的炉温设定值 Δu_i , 如图 2 所示。

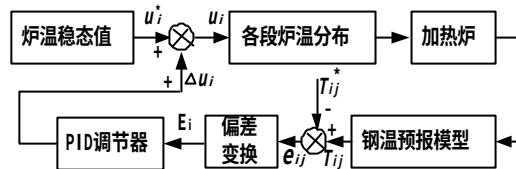


图2 炉温设定值反馈补偿原理

● 专家经验调整

PID 补偿算法是在分段可控的简化假设条件下, 以钢坯理想加热曲线为基础, 根据炉内钢坯平均温度的预报值来对稳态最优炉温设定值做出补偿, 其中未考虑钢坯的断面偏差。实际上, 加热炉各段的炉温设定并不是独立的, 而且各段炉温的设定对出炉钢坯加热质量的影响也不同。因此除周期性的利用 PID 算法对各段稳态最优炉温设定值进行动态补偿外, 还应根据出炉钢坯加热质量的好坏利用专家经验进行补偿修正, 即如果出炉钢坯的断面温差与表面温差不理想, 则分别给予各段炉温相应的补偿量。如表一所示, 当出炉钢坯的表面测量值与目标值偏差为 40°C , 断面温差为 20°C , 则应保持下加热段炉温设定不变, 上加热段炉温升高 20°C , 均左、均中、均右各段炉温降低 50°C ; 依此类推(表 1)。

表1 炉温专家经验补偿(部分)

钢坯出炉温度 表面测量值-目标值	各段炉温调整					
	断面温差	均左	均中	均右	上加	下加
+40	20	-50	50	50	-20	0
31	5	-30	3	-30	3	-10
-20	0	0	3	0	-30	0
-20	10	+10	+30	+10	-20	0
+30	10	-20	-20	-20	-20	-20

利用上述动态补偿量修正得出新的炉温优化设定值, 并可将其作为系统温度控制回路的温度设定值。

综上, 加热炉炉温优化系统结构组成见图 3。

2 软件平台与设计

经过对各流行软件的比较, 我们采用 Wonderware[®] InTouch[™] for FactorySuite[™] 2000 工业控制软件包, 它是著名的美国 Wonderware 公司推出的基于 Microsoft Windows 的面向对象的可视化人机界面 (HMI) 组件, 广泛应用于工业自动化、过程控制和实时监控中。它简便易学、组态灵活、可靠性高; 借助动态数据交换 (Data Dynamic Exchange, 简称 DDE) 技术, Intouch 还可以实现与其他应用程序之间的数据交换, 大大提高了自身的适用性。另外, 采用 InTouch 还为今后软件的扩展, 如与现场接口等提供了方便。

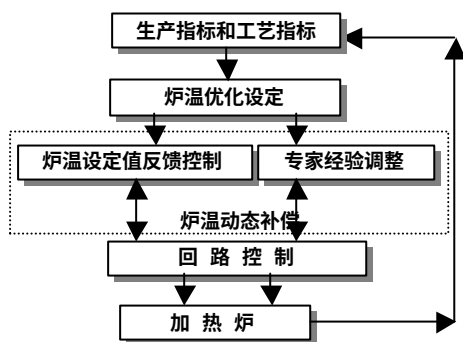


图3 系统组成

为了在 InTouch 软件中用尽可能少的变量做尽可能丰富的画面和功能, 我们采用在 InTouch 环境中编制画面、简单计算、显示数据, 而在 Matlab 环境中进行大量复杂计算的前后台软件设计方式。Matlab (Matrix Laboratory) 是一种数值计算型应用软件, 具有编程语言简单直观、计算能力强、丰富的工具箱的特点, 尤以矩阵运算能力突出著称, 曾被 IEEE 称为国际上公认的最优秀科技应用软件。Matlab 同时具有 DDE 功能, 这使得它与 InTouch 软件之间的数据通信有了技术保障。软件包结构见图 4。

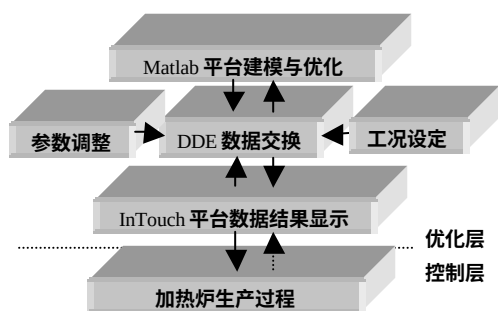


图4 系统仿真软件结构图

3 仿真与控制一体化软件包主要功能

(1) 设定工况下, 给出炉温优化设定值及加热炉内部沿炉长方向的炉膛温度分布;

(2) 修改、增加工况参数 (如轧值节奏、钢种型号规格钢坯目标温度、表面温差、断面温差等), 确定新的工况参数后, 可将其调入优化算法程序, 以备在不同工况下进行仿真研究以寻求规律;

(3) 计算新工况下, 炉温优化设定值与加热炉内部沿炉长方向的炉膛温度分布;

(4) 以实时趋势曲线形式跟踪钢坯在当前炉温设定值下当

前时刻的表面温度、平均温度及断面温差, 见图 5, 并可给出其在加热炉内部的全程趋势曲线, 根据曲线可以看出在当前炉温设定



图5 加热炉主流程及钢坯跟踪画面

值下钢坯的加热质量, 并以此对炉膛温度进行适当调整;

(5) 跟踪加热炉出口处钢坯温度, 并绘制曲线以比较当前钢坯平均温度与目标温度, 得出对钢坯质量的初步判断, 并将此作为反馈信息对炉膛温度进行适当调整;

(6) 建立了钢坯待轧策略, 根据具体待轧时间 (包括升温、保温、降温时间), 调整各段炉温大小; 并可以增加、修改待轧策略的经验规则;

(7) 建立了启发式规则库, 针对钢坯出炉时刻温度与目标值的偏差以及钢坯断面温差, 给出相应的炉温调整规则; 同时可以修改、增加库内规则, 这就使得在一般监视过程数据、画面、曲线等的基础上, 加入了人的经验指导; 由于集成了人的因素, 使得系统具有一定的智能;

(8) 建立了炉温制度, 记录在不同轧线状态 (三线、两线、一线或待轧), 不同钢种规格下各段炉温设定参考值; 并可以根据具体情况调整、保存炉温制度;

(9) 利用友好的人机界面进行人机交互, 有经验的操作人员可以向系统输入合理的经验数值, 供系统参考;

(10) 上层优化的设计值可直接作为各段炉温的设定值, 系统工况的变化等可事先通过该软件包模拟对最终产品质量的影响, 并通过优化选择满意的设定值。

4 结束语

步进式加热炉炉温建模与优化仿真系统是以加热炉炉温的优化设定为主要目的而开发的, 它为研究加热炉炉温建模与优化设定, 寻求炉温设定值与产品技术指标之间的关系提供了仿真研究环境, 为进一步提高加热炉生产过程的产品质量及节能降耗提供了一定的理论指导, 实现了优化仿真与控制的一体化。

参考文献:

- [1] Acharya A D, Chattopadhyay S. Reheat furnace temperature control and performance at Essar Steel [J]. Iron and Steel Engineer, 1996, 9: 139-149.
- [2] 杨永耀, 吕勇哉. 钢坯加热炉计算机控制动态数学模型的开发 [J]. 自动化学报, 1987, 13(4): 257-264.
- [3] 王中杰, 柴天佑, 邵诚. 加热炉多模式动态优化控制策略 [J]. 控制与决策, 1999, 14(5): 465-468, 472.
- [4] 巢海, 王伟, 李小平. 步进梁式加热炉炉温预报的数学模型 [J]. 东北大学学报, 1998, 19(5): 499-501.
- [5] Leden B. A control system for fuel optimization of reheating furnaces. [J]. Scan J Metallurgy, 1986, (15): 16-24.
- [6] Fred Shenvar. Walking beam furnace supervisory control at Inlands's 80-in. hot strip mill [J]. Iron and Steel Engineer, July 1994, 25-34.