

文章编号: 1001-0920(2002)02-0207-04

基于动态数学模型的冶金加热炉实时仿真器的研究

徐立云¹, 张斌¹, 王景成¹, 邵惠鹤¹, 张健明², 郑海康², 沈际海², 任德祥²

(1. 上海交通大学自动化系, 上海 200030; 2. 宝山钢铁公司自动化研究所, 上海 201900)

摘要: 由于钢铁企业生产现场的复杂性和其本身所具有的特点, 很多先进控制算法不能在实际生产中进行应用调试, 致使理论与实际应用脱节。为此, 对某热轧厂步进式加热炉建立实时动态数学模型, 提出一种冶金加热炉实时仿真器结构, 并用实际数据验证了数学模型的准确性。

关键词: 加热炉; 先进控制算法; 动态数学模型; 仿真器

中图分类号: TF 068

文献标识码: A

Research on reheating furnace simulator based on dynamic mathematical model

XU Li-yun¹, ZHANG Bin¹, WANG Jing-cheng¹, SHAO Hui-he¹,
ZHANG Jian-ming², ZHENG Hai-kang², SHEN Ji-hai², REN De-xiang²

(1. Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Institute of Automation, Baosteel Group, Shanghai 201900, China)

Abstract: Owing to the complexity and characteristic of the steel industry, many advanced control algorithms could not be applied easily. This makes the difference between the theory research and application. A dynamical mathematical reheating furnace model is presented, which consists of three submodels. A kind of structure of real-time reheating furnace simulator is shown based on the dynamic mathematical model. The mathematical model is proved to be satisfactory. The practical data show the exactitude of the method.

Key words: reheating furnace; advanced control algorithm; dynamical mathematical model; simulator

1 引言

在钢铁行业中, 冶金加热炉的能量消耗占有很大比例, 许多学者针对加热炉的节能控制问题展开研究, 各种优化控制策略相继应运而生^[1~6]。但是, 由于钢铁行业本身所具有的特点, 使得人们在进行加热炉优化控制设计时, 经常遇到参数不可测, 或高级控制算法不能直接在生产车间进行测试修整的问

题。针对这种情况, 开发一种基于数学模型的加热炉动态仿真器, 不但能利用实际工程数据确定某些不可测参数, 而且可以方便地进行各种先进控制算法的离线仿真, 为进一步在线控制奠定基础。

本文建立了步进式加热炉的动态数学模型, 提出一种冶金加热炉仿真器结构, 并用实际数据验证了动态数学模型的准确性, 结果表明该模型能较好地反映加热炉的动态特性。

收稿日期: 2000-12-04; 修回日期: 2001-03-07

作者简介: 徐立云(1973—), 男, 浙江衢州人, 博士生, 从事工业生产对象建模与调度、算法优化研究; 邵惠鹤(1936—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业建模、优化算法等研究。

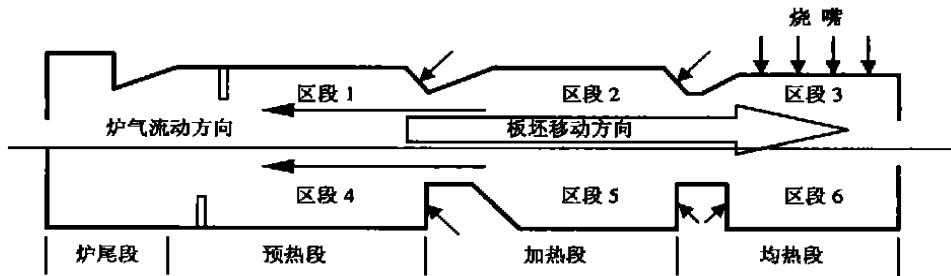


图1 步进式加热炉的结构

2 步进式加热炉简介

步进式加热炉是板坯进入热轧工序之前所使用的一种大型设备,主要作用是对放入其内的板坯进行升温加热,使板坯的内部温度和均匀度在板坯出炉时满足轧制要求。步进式加热炉的典型结构如图1所示。炉子一般沿炉长方向分为4段:炉尾段、预热段、加热段和均热段。炉尾段没有燃料和空气烧嘴,从预热段流出的炉气对炉尾段内的板坯进行一定的预加热。在其它3段,由烧嘴喷进的燃料和空气进行充分燃烧,所放出的热量主要用于板坯加热。预热段内,由于板坯的初始温度和该段的炉气温度相差很大,板坯在该段吸收很大一部分热量,温升幅度很大。对于加热段,板坯温度和该段炉气温度相差不大,板坯在此段内的升温速度没有预热段明显。均热段对板坯内部温度梯度进行调整,使其均匀度满足一定的要求。为了确保板坯的正确升温,依据轧制节奏和加热炉的结构特性,必须使各段实际炉气温度与优化设定的温度接近。因此,合理控制加热炉内板坯的升温过程,对钢铁企业的增产减耗具有重大意义。

3 加热炉动态数学模型

本文建立的动态数学模型以能量平衡为基础,实时地计算出炉子内部动态炉气温度、钢坯温度和炉墙温度,确立温度与各区段流量之间的关系。炉内的热交换由炉膛辐射、对流换热、金属内部导热和炉墙导热几部分组成,求解时是相互耦合、互为边界条件的,炉气温度预测计算、钢坯实时温度跟踪和炉墙温度计算3个模块必须同时联立求解。

如图1所示,步进式加热炉可沿长度方向划分为4段。由于炉尾段没有燃料喷嘴,故本文主要考虑后3段。后3段又可分为上部段和下部段,即预热段上段,加热段上段,均热段上段,预热段下

段,加热段下段,均热段下段。

首先作如下假设:1)始终保持最佳空燃比;2)燃料在流进炉内的瞬间完成充分燃烧,且燃烧后的炉气均匀地分布在各区段,即各区段的炉气温度分布均匀;3)各区段燃烧后的炉气成分是相同的。则整个加热炉动态数学模型可分成板坯温度跟踪模型、炉壁温度计算模型和炉气温度计算模型。

3.1 板坯温度跟踪计算模型

板坯在炉内的吸热过程是一个复杂的过程。由于炉子的高温特性和结构特性,目前很难用常规检测手段直接测得板坯的温度。板坯在炉内的热交换过程可分为两大部分:一是板坯与炉气以及炉壁之间的热交换过程,二是板坯内部的热传导过程。炉墙、炉气和板坯的辐射传热以及炉气对板坯表面对流传热构成了边界传热。

假设:1)板坯温度沿长度方向的分布是相同的,只在沿板坯厚度方向存在温度梯度;2)板坯吸热主要通过板坯与炉气之间的热辐射进行,忽略板坯与炉气之间的对流传热和板坯与炉壁之间的辐射传热;3)忽略板坯由于相变而引起的参数特性变化。根据上述假设,可列出如下方程

$$\begin{cases} c\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \theta_0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_B / \lambda \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=h} = q_U / \lambda \end{cases} \quad (1)$$

其中, θ 为板坯内部温度($^{\circ}\text{C}$), x 为钢坯沿厚度方向的厚度分割(m); c 为钢坯的比热, λ 为钢坯的导热系数,Boltzman常数 $\sigma = 4.88 \times 10^{-8}$ 。

板坯的边界条件是描述板坯表面层热流量传递的动态关系,如式(1)所示, q_B 和 q_U 分别为上、下表面的热流束,而

$$q_B = \epsilon_B \sigma [(T_B + 273)^4 - (\theta_B + 273)^4] \quad (2)$$

$$q_U = \epsilon_U \sigma [(T_U + 273)^4 - (\theta_U + 273)^4] \quad (3)$$

其中, ϵ_U 和 ϵ_B 分别为上、下表面的辐射系数, θ_U 和 θ_B

分别为板坯上、下表面的温度。

采用中心差分法对式(1) 不稳定导热方程及其边界条件进行时间和空间上的离散化处理, 可写成

$$\begin{bmatrix} m + \lambda & -\lambda & & & \\ -\lambda & 2(m + \lambda) & -\lambda & & \\ & -\lambda & 2(m + \lambda) & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1^r \\ \theta_2^r \\ \theta_3^r \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m - \lambda)\theta_1^l + \lambda\theta_2^l + 2d_x q_U \\ \lambda\theta_1^l + 2(m - \lambda)\theta_2^l + \lambda\theta_3^l \\ \lambda\theta_2^l + 2(m - \lambda)\theta_3^l + \lambda\theta_4^l \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $m = C_p \gamma d_x^2 / \Delta t$, γ 为密度, d_x 为钢坯厚度, Δt 为差分计算对象时间, θ^r 为本次钢坯内部各层温度, θ^l 为上次钢坯内部各层温度, q_U 为钢坯上表面热流束, q_B 为钢坯下表面热流束, C_p 为板坯的比热, λ 为各层之间等价热传导率。

差分计算的时间步长是当前值的计算时刻与上一次值的计算时刻之差, 计算步长是在满足边界上的值不发生振荡的情况下, 即 $\Delta t / C_p \gamma d_x^2 > 0.25$, 进行适当取值。

3.2 炉壁温度计算模型

炉壁的温度分布是沿炉长方向进行分割, 对炉壁厚度方向建立一元热传导方程, 计算步骤与板坯温度跟踪相似, 可解得本时刻炉壁温度与上次时刻炉壁温度的关系表达式。

3.3 炉气温度计算模型

本文在建立模型时, 主要考虑辐射传热, 即炉气与炉壁之间的辐射传热和炉气与钢坯之间的辐射传热, 而炉气与炉壁和炉气与钢坯之间的对流传热则忽略不计。加热炉内某一典型区段 i 的热量平衡如图 2 所示。

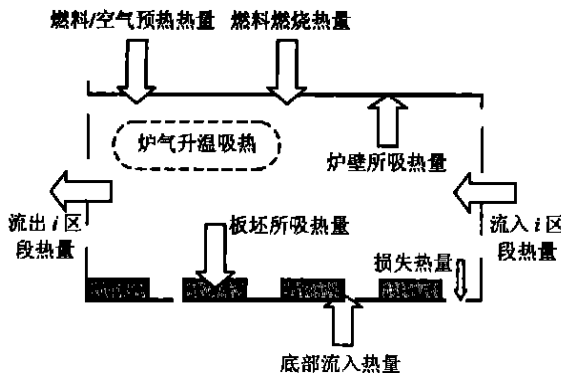


图 2 区段 i 热量平衡

在 $\Delta t = dT_j / dt$ 内, 可对每 i 区段建立动态热平

衡方程如下

$$C_{pg} V_j \frac{dT_j}{dt} = BF_j C_{pA} \theta_A + F_j C_{pf} \theta_f + H_n F_i + C_{pg} \gamma_g G_{j+1} \theta_{g,j+1} - C_{pg} \gamma_g G_j \theta_{g,j} - \sum_k RIFW_{k,j} S_{wk} \sigma (T_{g,j}^4 - T_{w,k}^4) - \sum_k RIFS_{i,j} S_{si} \sigma (T_{g,j}^4 - T_{s,i}^4) + C_{pg} \gamma_g G_B \theta_B - Q_{wloss,j} \quad (5)$$

其中, F_i 为加热炉 i 区段 Δt 内流进的燃烧煤气流量, H_n 为燃烧煤气的燃烧热值, B 为预热空气与燃料的比值, C_{pA} 为空气的比热, θ_A 为预热空气的温度, C_{pf} 为煤气的比热, θ_f 为预热混合煤气的温度, G_{j+1} 为上一区段流进本区段的炉气流量, $\theta_{g,j+1}$ 为第 $j+1$ 区段的炉气温度, G_B 为从某区段下部流到上部的流量, θ_k 为某区段下部的炉气温度, N 为 i 区段内所有板坯的数量, A_k 为第 k 块板坯的表面积, $q_{k,u}$ 为第 k 块板坯单位面积的热流束, G_j 为本段流到下一段的炉气流量, $\theta_{g,j}$ 为本段 j 的炉气温度, ϵ 为 i 区段的炉墙的辐射系数, $A_{L,i}$ 为 i 区段炉墙表面积, T_i 为 i 区段炉温, θ 为 i 区段炉外温度, C_{pg} 为炉气的比热, V_j 为 j 区段的体积。

利用实际生产中取得的数据得到各个区段的热损失项 $Q_{wloss,j}$, 联立 6 个区段的方程, 根据实际输入变量可计算出炉气温度。

基于该数学模型, 不但可以较为准确地描述出该加热炉的动态特性, 而且可以利用它来评价某些不可测量的值, 如黑度系数等。

4 冶金加热炉仿真器结构

设备仿真器是利用计算机强大的计算能力, 实时地模拟某一生产对象的运行过程, 为实际生产设备和控制系统的设计提供有效的工具, 其核心是对该生产对象建立数学模型。

本文以宝钢热轧厂一实际步进式加热炉为对象, 建立冶金加热炉实时仿真器。如图 3 所示, 该仿真器在结构上分为炉温优化层、先进控制层、底部回路层和加热炉数学模型。炉温优化层根据轧制节奏、板坯的初始信息(如板坯规格、种类和初始温度等)对加热炉各区段炉温进行优化设定; 先进控制层根据输入的各区段优化炉温, 运用多变量约束控制(MCC)或鲁棒控制理论, 将设定炉温转化为各区段的流量设定, 输出到底层控制回路中; 底层控制回路一般是串级控制, 直接将设定的流量转化为阀门开



图3 冶金加热炉仿真器结构

度作用于加热炉对象;加热炉数学模型由炉内板坯温度跟踪计算模型、炉壁温度计算模型和炉气温度计算模型组成,它以板坯的入口参数和各区段燃料的投入流量等为输入变量,实时地计算加热炉内所有板坯任意时刻的温度分布以及各区段炉气温度,并将计算结果反馈到先进控制层进行调节。

5 系统仿真

本文对该加热炉仿真器的核心部分——加热炉的动态数学模型进行仿真研究。该加热炉全长42 300 mm,有效炉长41 000 mm,炉膛内宽12 000 mm;加热的板坯规格如下:厚度230~250 mm,宽度900~1 450 mm,长度4 200~11 000 mm。步进式的步进周期为48 s。

系统仿真时,直接将炉温优化层的结果输出到底层控制回路,利用实际生产数据对所建立的数学

模型进行仿真校验。板坯装炉温度为20℃,出炉温度为1 140~1 220℃,仿真结果如图4和图5所示,其它区段也有类似结果。仿真结果表明,板坯的温升曲线能保证轧制正常进行,该数学模型与实测数据吻合得较好,可以较为准确地反应出该步进式加热炉的动态特性,为下一步先进控制算法的应用奠定了基础。

6 结语

如何在保证生产安全的基础上,将先进的控制技术运用于实际生产中是现代钢铁行业所面临的实际问题。本文建立了加热炉实时动态模型,并提出了冶金加热炉仿真器的结构。这样既可以充分发挥计算机的潜力,又可以离线仿真加热炉的运行状况,为在线控制奠定了基础,最终达到节能增效的目的。

参考文献(References):

- [1] Staalman, Dirk F J, Kusters Arend. On-line slab temperature calculation and control[A]. Proc of the 1996 ASME Int Mechanical Engineering Congress and Exposition[C]. Atlanta, 1996. 307-314.
- [2] Yoshitani N, Ueyama T, U sui M. Optimal slab heating control with temperature trajectory optimization [A]. Proc of the 20th Int Conf on Industrial Electronics [C]. Los Alamitos, 1994. 1567-1572.
- [3] 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(Acta Automatica Sinica), 1987, 13(4): 257-264.
- [4] 徐用懋,谢洪. 连续加热炉数学模型的建立与计算机仿真[J]. 控制与决策(Control and Decision), 1988, 4(1): 36-39.
- [5] Lü Yongzai. Meeting the challenge of intelligent system technologies in the iron and steel industry[J]. Iron and Steel Engineer, 1996, 73(9): 139-149.
- [6] 杨永耀,梁军. 加热炉多模式控制[J]. 冶金自动化(Metallurgical Industry Automation), 1991, 15(5): 15-19.

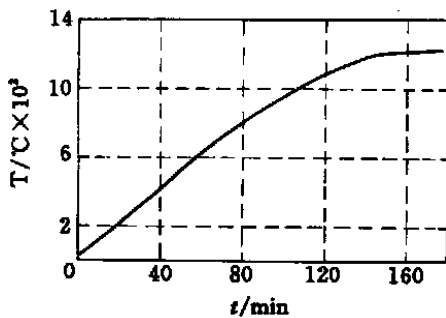


图4 板坯升温曲线

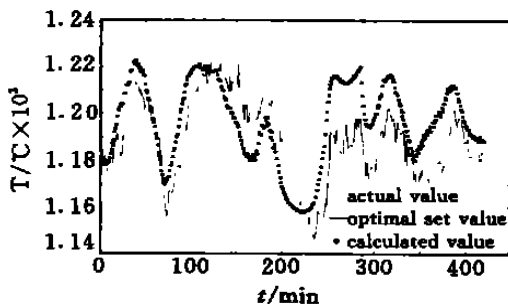


图5 设定炉温、实测炉温与计算炉温比较