

# 基于重置状态观测器的加热炉随机扰动自抗扰控制方法

王春生<sup>1</sup>, 潘明泉<sup>2†</sup>, 刘子建<sup>1</sup>, 胡玉坤<sup>3</sup>

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 软件学院, 长沙 410075; 3. 华威大学, 考文垂 CV47AL)

**摘要:** 针对钢坯加热过程中炉温控制存在严重的外部随机扰动问题, 提出一种基于重置状态观测器的加热炉随机扰动自抗扰控制方法, 其核心思想是将随机扰动对炉温控制系统状态的影响归结为对输出的影响, 并进行主动补偿. 首先, 设计一个自适应重置状态观测器来快速跟踪系统的状态; 其次, 设计一个随机扰动估计器来估量这些扰动, 并补偿于系统的输入通道; 最后, 设计基于重置状态观测器的加热炉随机扰动自抗扰控制系统, 并进行数值仿真验证所提出方法的有效性和优越性.

**关键词:** 钢坯加热炉; 随机扰动; 重置状态观测器; 自抗扰

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Methodology of active disturbance rejection control for stochastic disturbance suppression in heating furnace based on reset state observer

WANG Chun-sheng<sup>1</sup>, PAN Ming-quan<sup>2†</sup>, LIU Zi-jiang<sup>1</sup>, HU Yu-kun<sup>3</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Software, Central South University, Changsha 410075, China; 3. University of Warwick, Coventry CV47AL)

**Abstract:** This paper presents an active disturbance rejection control method for stochastic disturbance suppression in the heating furnace based on the reset state observer, aiming to solve the problem that serious disturbance exists in the temperature control of heating furnace. The main idea of this method is that the influence of stochastic disturbance on the states is reduced to that on the output and is compensated actively. Firstly, an active reset state observer is designed to track the states of plant quickly. Then, a stochastic disturbance estimator is designed to estimate the value of these disturbance which is put to the input channel. Finally, the active disturbance rejection control system for stochastic disturbance suppression in the heating furnace based on reset state observer is designed. Simulation result shows the effectiveness and superiority of the proposed approach.

**Keywords:** billet heating furnace; stochastic disturbance; reset state observer; active disturbance rejection

## 0 引言

目前,关于加热炉炉温控制的研究主要集中在燃烧控制和炉温预测模型优化上<sup>[1]</sup>. Pongam 等通过设计一个 PI 控制器对步进梁加热炉每个区域的炉温进行控制,并提出了基于遗传算法系统识别的步进梁加热炉温度控制机理模型,改善了加热炉温度的控制性能,降低了生产成本<sup>[2-3]</sup>. 一些学者通过研究氧气所占比例来增强燃料的燃烧,发现氧气含量在 21% ~ 45% 时能够获得较高的火焰温度和更高的产量<sup>[4]</sup>. 由于加热炉是一个高温、高压的封闭体,很难直接测量炉内的温度,一些学者对加热炉内的温度分布进行了大量研究<sup>[5-6]</sup>. 张丽慧等基于顺序函数法(SFSM)通过求解

二维稳态导热反问题,建立了预测加热炉内钢坯表面热流分布的热模型<sup>[7]</sup>;廖迎新等针对一种蓄热推钢式加热炉 3 个加热区的炉温稳态优化问题,提出了一种混合粒子群优化(HPSO)方法<sup>[8]</sup>. 但是,这些研究都没有将钢坯加热炉中存在的随机扰动考虑进来,对这种随机扰动的抑制很难取得令人满意的结果.

在其他控制系统中,一些学者对如何有效抑制扰动的问题进行了大量研究. 例如,在电机控制系统中,将等价输入干扰(EID)用于补偿控制系统受到的外部干扰的影响<sup>[9]</sup>,EID 是 She 等<sup>[10]</sup>提出的一种扰动抑制思想,对于控制系统的扰动抑制效果非常明显,因此在许多应用领域里得到了广泛的应用. 为了获得

收稿日期: 2016-04-30; 修回日期: 2016-11-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573381).

作者简介: 王春生(1966—),男,教授,博士,从事复杂冶金过程建模与优化控制、先进控制理论与应用等研究;  
潘明泉(1990—),男,硕士生,从事自抗扰控制方法与应用的研究.

†通讯作者. E-mail: student\_pan@csu.edu.cn

控制系统的EID,需要通过一个状态观测器对控制系统的状态进行跟踪.重置状态观测器<sup>[11]</sup>克服了线性反馈系统自身的局限性,能够同时减小超调量和调节时间,实现对控制系统的状态快速、准确地跟踪.根据EID的分离设计原理可以单独设计一个重置状态观测器来提高系统的扰动抑制控制性能.

本文将加热炉内钢坯加热过程存在的随机扰动因素表现为对系统输出的影响,提出一种基于重置状态观测器的随机扰动自抗扰主动补偿控制方法.通过设计一个重置状态观测器对控制系统的状态进行实时估计,根据观测器状态的信息估计出系统受到所有扰动的一个等效的总扰动,并补偿于系统的输入端来消除这些扰动对系统输出造成的影响.该方法不需要事先知道扰动的信息,因此很适合应用在具有复杂工况和恶劣环境的钢坯加热炉场合.

### 1 钢坯加热过程分析

步进梁加热炉是钢铁行业中对钢坯进行加热的一个重要的热处理设备.它的目的是将需要进行轧制的钢坯从常温加热至轧制工艺要求所需要的温度.所有需要加热的钢坯从入炉口处通过辊道移动到出炉口处,然后被送往热轧工序进行下一步的加工.步进梁加热炉的结构如图1所示.

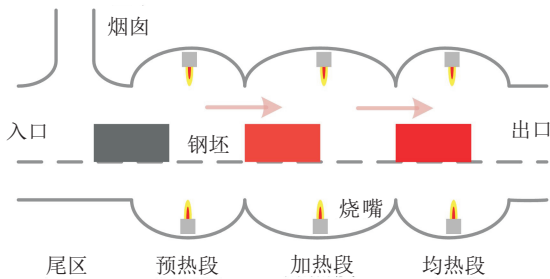


图1 步进梁加热炉

根据加热炉各区段温度的特点,加热炉被划分为4个区段:尾区、预热段、加热段和均热段.其中尾区处没有安装烧嘴,钢坯主要是在预热段、加热段和均热段进行加热.尾区的目的是回收利用烟气的余热,在这个区段内不需要对炉温进行控制.烧嘴分布在加热炉的上下两面,这样预热段、加热段和均热段把加热炉划分成6个空间,在这6个空间里对炉温进行单独控制,从而实现对整个加热炉的炉温控制.每一个空间控制模型的传递函数 $H_{ij}$ <sup>[12]</sup>表示如下:

$$H_{ij} = e^{-\tau_{ij}s} \frac{G_{ij}}{1 + \lambda_{ij}s}, \quad (1)$$

其中: $e^{-\tau_{ij}s} = \frac{1}{1 + \tau_{ij}s}$ ,  $G_{ij}$ 为比例系数常量,  $\tau_{ij}$ 为延时系数常量,  $\lambda_{ij}$ 为时间系数常量.

### 2 自抗扰主动补偿控制系统设计

钢坯加热过程存在燃气流量、压力、热值波动以及钢坯初始温度、炉门开闭等随机扰动,不利于加热炉炉温的控制,造成了钢坯加热质量的下降以及能源的浪费.因此,如何有效主动补偿钢坯加热过程存在的随机扰动是本文研究的一个主要问题.

本文设计一个基于重置状态观测器的钢坯加热过程随机扰动自抗扰主动补偿控制系统结构,用来主动补偿钢坯加热过程中的随机扰动.控制系统结构如图2所示,由4个模块组成:内模控制器模块,被控对象模块,重置状态观测器模块和扰动估计器模块.

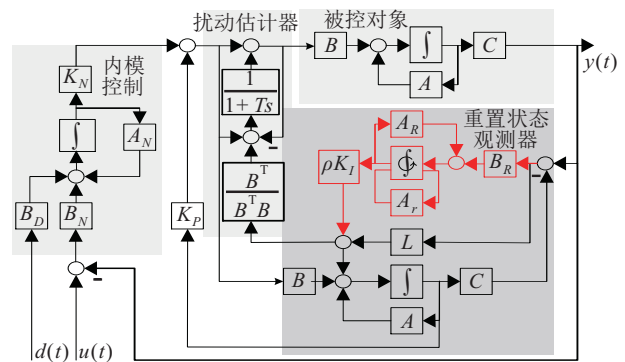


图2 基于重置状态观测器的钢坯加热过程随机扰动自抗扰主动补偿控制系统

该控制系统的核心思想是将随机扰动对炉温控制系统状态的影响归结为对输出的影响,并进行主动补偿,其中等效扰动是主动补偿随机扰动的关键.考虑如下线性时不变控制系统:

$$\begin{cases} \frac{dx_0(t)}{dt} = Ax_0(t) + Bu(t) + B_D d(t), \\ y_0(t) = Cx_0(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^n$ ,  $B_D \in R^{n \times n_d}$ ,  $C \in R^{1 \times n}$ 为常量矩阵;  $x_0(t) \in R^n$ 为状态变量;  $u(t)$ 为输入信号;  $d(t)$ 为随机扰动信号.通常情况下,矩阵 $B$ 和 $B_D$ 的维数是不一样的,因为控制系统不止受到一个扰动的影响,而且这些扰动影响控制系统的多个通道.

假设存在一个只作用于控制系统的输入通道的等效扰动信号,则系统(2)可转换成如下控制系统:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B[u(t) + d_e(t)], \\ y_0(t) = Cx_0(t), \end{cases} \quad (3)$$

其中 $d_e(t)$ 为等效扰动输入信号.

### 3 重置状态观测器

重置状态观测器是钢坯加热过程随机扰动自抗扰主动补偿控制系统的一个重要组成部分,克服了线性反馈系统自身的局限性,能够同时减小超调量和调

节时间. 本文基于扇形重置条件设计了一个重置状态观测器.

### 3.1 概述

在加热炉中, 钢坯加热过程通过状态反馈进行扰动抑制控制, 而这些状态变量不可直接测量, 因此需要状态观测器对控制系统的状态进行重构. 重置状态观测器引进了重置积分项, 重置积分器能够根据状态变量的变化进行状态重置, 提高了控制系统的快速性. 对重置状态观测器的设计主要是确定状态观测器的重置律和重置条件. 在如图2所示的钢坯加热过程随机扰动自抗扰主动补偿控制系统结构中, 重置状态观测器的状态空间模型和重置律如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu_f(t) + L\tilde{y}(t) + \rho K_I x_r(t), \\ \dot{x}_r(t) = A_R x_r(t) + B_R \tilde{y}(t), \\ \dot{\hat{y}}(t) = C\hat{x}(t), \\ \dot{\tau} = 1. \end{cases} \quad (4)$$

当  $\eta \notin \mathcal{J} \cup \tau \leq \sigma$  时, 有

$$\begin{cases} \hat{x}(t)^+ = \hat{x}(t), \\ x_r(t)^+ = A_R x_r(t), \\ \hat{y}(t)^+ = \hat{y}(t), \\ \tau^+ = 0. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $A \in R^{n \times n}, B \in R^n, C \in R^{1 \times n}, A_R \in R, B_R \in R, A_r \in R$  为常量矩阵;  $L \in R^{1 \times n}$  为状态观测器的增益矩阵;  $\rho$  为一个自适应常量;  $K_I \in R$  为重置状态增益矩阵;  $x(t) \in R^n$  为系统的状态变量;  $x_r(t) \in R$  为重置状态变量;  $u_f(t)$  为控制输入信号;  $\tilde{y}(t) = C[x(t) - \hat{x}(t)]$ ;  $\tau$  为时间系数变量;  $\sigma$  为一个小正数常量;  $\mathcal{J}$  为重置面.

扇形重置和过零重置是重置状态观测器两种常用的重置条件. 扇形重置条件是当被控系统的输出与状态观测器的输出误差  $\tilde{y}(t)$  和重置状态变量  $x_r(t)$  异号, 即  $\tilde{y}(t)x_r(t) < 0$  时发生重置; 过零重置条件则相对简单一点, 只要被控系统的输出与状态观测器的输出误差  $\tilde{y}(t) = 0$  就发生重置.

### 3.2 重置状态观测器的设计

重置状态观测器的设计主要是确定控制器的参数. 把重置状态观测器的设计问题转化为凸优化问题, 通过线性矩阵不等式方程求解获得控制器的参数. 首先, 利用李雅普诺夫稳定性原理对基于重置状态观测器的钢坯加热过程随机扰动自抗扰主动补偿控制系统的稳定性进行分析, 分析结果为一组线性矩

阵不等式方程; 然后, 利用 Matlab 工具箱对这组线性矩阵不等式方程进行求解.

记  $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ , 则重置状态观测器的状态估计误差方程可以表示如下:

当  $\eta \notin \mathcal{J} \cup \tau \leq \sigma$  时, 有

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = (A - LC)\tilde{x}(t) - \rho K_I x_r(t), \\ \dot{x}_r(t) = A_R x_r(t) + B_R \tilde{y}(t), \\ \dot{\tilde{y}}(t) = C\tilde{x}(t), \\ \dot{\tau} = 1. \end{cases} \quad (6)$$

当  $\eta \in \mathcal{J} \cup \tau > \sigma$  时, 有

$$\begin{cases} \tilde{x}(t)^+ = \tilde{x}(t), \\ x_r(t)^+ = A_R x_r(t), \\ \tilde{y}(t)^+ = \tilde{y}(t), \\ \tau^+ = 0. \end{cases} \quad (7)$$

**定理1** 对于式(6)和(7),  $\rho$  是一个已知的正数, 如果存在矩阵  $P = P^T, Q = Q^T$  满足以下两个不等式, 则系统是稳定的:

$$\begin{bmatrix} PA - WC + A^T P - C^T W^T & -\rho S + \rho C^T B_R^T Q \\ * & \rho(QA_R + A_R^T Q) \end{bmatrix} < 0, \quad (8)$$

$$\rho(A_r^T Q A_r - Q) \leq 0. \quad (9)$$

其中:  $W = PL, S = PK_I$ .

**证明** 选择如下李雅普诺夫函数:

$$V = \tilde{x}^T P \tilde{x} + \rho x_r^T Q x_r. \quad (10)$$

重置状态观测器是一个离散的系统, 为了确保系统稳定, 必须同时满足

$$\dot{V}(\tilde{x}, x_r) < 0, \eta \notin \mathcal{J}, \quad (11)$$

$$V(\tilde{x}^+, x_r^+) \leq V(\tilde{x}, x_r), \eta \in \mathcal{J}. \quad (12)$$

首先, 证明式(8)成立, 即

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{x}, x_r) &= \dot{\tilde{x}}^T P \tilde{x} + \tilde{x}^T P \dot{\tilde{x}} + \rho \dot{x}_r^T Q x_r + \rho x_r^T Q \dot{x}_r = \\ &= \tilde{x}^T [P(A - LC) + (A - LC)^T P] \tilde{x} - \\ &= \rho \tilde{x}^T P K_I x_r - \rho x_r^T K_I^T P \tilde{x} + \rho x_r^T Q B_R C \tilde{x} + \\ &= \rho \tilde{x}^T C^T B_R^T Q x_r + \rho x_r^T (Q A_R + A_R^T Q) x_r. \end{aligned} \quad (13)$$

令  $A_{11} = P(A - LC) + (A - LC)^T P, A_{12} = -\rho P K_I + \rho C^T B_R^T Q, A_{22} = \rho(QA_R + A_R^T Q)$ . 由式(11)和(13)可得

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ x_r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ * & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ x_r \end{bmatrix} < 0. \quad (14)$$

令  $W = PL, S = PK_I$ , 由式(14)可得式(8).

然后,证明式(9)成立,即

$$\begin{aligned} &V(\tilde{x}^+, x_r^+) - V(\tilde{x}, x_r) = \\ &\tilde{x}^{+T} P \tilde{x}^+ - \tilde{x}^T P \tilde{x} - \rho x_r^T Q x_r = \\ &x_r^T \rho (A_r^T Q A_r - Q) x_r. \end{aligned} \quad (15)$$

由式(12)和(15)可以推导出式(9). □

### 4 扰动估计器

扰动估计器是获得等效扰动的关键部分,一般用一个一阶低通滤波器来设计. 一阶低通滤波器的作用是使得在频带宽  $\Omega : 0 \leq \omega \leq \omega_r$  范围内,所有的  $\tilde{d}(t)$  更好地近似于等效的扰动输入信号  $d_e(t)$ , 其中  $\omega_r$  是最高扰动抑制角频率.

在图2中,  $\eta \notin \mathcal{J}$  时对于重置状态观测器有

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= A\hat{x}(t) + Bu_f(t) + \\ &LC[x(t) - \hat{x}(t)] + \rho K_I x_r(t). \end{aligned} \quad (16)$$

假设  $\hat{d}(t)$  是等效扰动输入信号, 则根据等效扰动输入信号的概念有

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A\hat{x}(t) + B[u(t) + \hat{d}(t)]. \quad (17)$$

一般地, 假设  $\frac{B^T}{B^T B} \neq 0$ , 则由式(16)和(17)可以得到

$$\begin{aligned} \hat{d}(t) &= \frac{B^T}{B^T B} \{LC[x(t) - \hat{x}(t)] + \rho K_I x_r(t)\} + \\ &u_f(t) - u(t). \end{aligned} \quad (18)$$

然后设计一个一阶低通滤波器  $F(s)$  为扰动估计器选择一定范围的扰动抑制角频率带宽.  $\hat{d}(t)$  经过一阶低通滤波器  $F(s)$  后得到  $\tilde{d}(t)$ , 经拉普拉斯变换后有

$$\tilde{D}(s) = F(s)\hat{D}(s). \quad (19)$$

结合扰动估计  $\tilde{d}(t)$  以及原始的控制律  $u_f(t)$  得到新的输入控制律, 即

$$u(t) = u_f(t) - \tilde{d}(t). \quad (20)$$

为了保证控制系统的稳定性, 一阶低通滤波器  $F(s)$  的时间常数  $T$  满足

$$T \leq \frac{1}{5\omega_r}. \quad (21)$$

### 5 数值仿真

为了证明上述所提出方法的有效性和优越性, 进行数值仿真分析. 步进梁加热炉内钢坯加热过程的温度控制模型如式(1)所示, 首先转换成温度控制状态空间模型, 然后利用 Matlab 的工具箱和 Simulink 进行数值仿真, 最后对仿真结果进行分析.

令钢坯加热炉温度控制状态空间模型  $(A, B, C)$  的矩阵为

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 2 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}, B = [0, 0, 1]^T, \\ B_D &= [0.5, 0, 0]^T, C = [1, 0, 0]. \end{aligned}$$

令重置状态观测器(4)和(5)的参数为  $A_R = -0.5, B_R = 0.125, A_r = 0$ .

利用 Matlab 工具箱进行参数求解获得重置状态观测器的反馈矩阵  $L$  和控制系统的状态反馈矩阵  $K_P$  表示如下:  $L = [66.3, 1099.1, 9334.4]^T, K_P = -[22.4349, 11.5639, 5.9496]$ .

表1是国内某钢铁公司2号和3号炉生产线上的数据信息.

表1 2号、3号炉生产线数据

炉号	钢种	目标出炉温度	出炉平均温度
3	DR06-1	1170	1194
2	DR06-1	1170	1194
3	DR06-1	1170	1171
2	DR06-1	1170	1179
3	DR06-1	1170	1175
2	DR06-1	1170	1181

表1中钢坯的目标出炉温度设置为  $1170^\circ\text{C}$ , 因此给定钢坯加热过程随机扰动控制系统的控制输入信号为  $r(t) = 1170\varepsilon(t)$ . 在表1中, 钢坯的出炉平均温度和目标出炉温度存在一定的误差, 这是由于钢坯加热过程中受到随机扰动的影响所致. 本次数值仿真中假定受到的随机扰动信号为  $d(t) = 300 \text{randomNumber}(t)$ , 如图3所示.

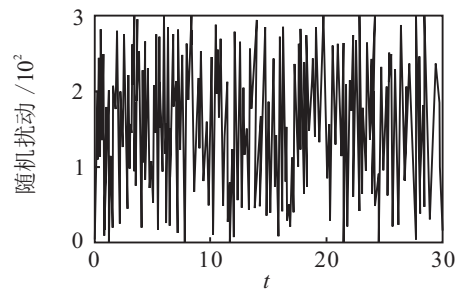


图3 随机扰动

重置状态观测器以及一般的状态观测器在受扰动和不受扰动情况下, 状态估计误差如图4所示.

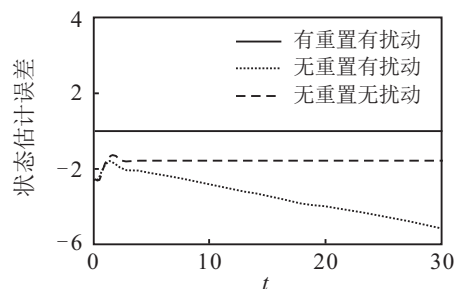


图4 状态估计误差

控制系统的初始状态为 $[-2.25, -1.3, 1.8]^T$ ,图4中实线是重置状态观测器受到随机扰动影响下的状态估计误差曲线,点线是一般的状态观测器受随机扰动影响下的状态估计误差曲线,虚线是一般的状态观测器在没有扰动影响下的状态估计误差曲线.从图4中可以看出,重置状态观测器的状态估计误差为零,并且能快速地跟踪控制系统的状态.一般的状态观测器不论受不受随机扰动的影响,其状态估计误差都不为零,而且在受到扰动影响下,一般的状态观测器是不稳定的.因此,利用重置状态观测器设计钢坯加热过程随机扰动自抗扰控制系统具有抗扰性强、跟踪系统状态效果好的优点.

为了验证基于重置状态观测器的加热炉随机扰动自抗扰控制系统改善钢坯加热过程中抑制干扰的性能,将其和一般反馈控制系统一起进行仿真,仿真结果如图5所示.

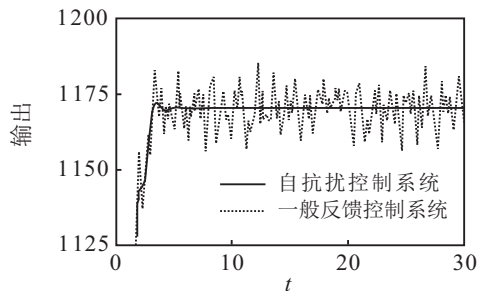


图5 控制系统输出

图5中实线是自抗扰控制系统的输出曲线,点线是一般反馈控制系统的输出曲线.从图5中可以看出,基于重置状态观测器的加热炉随机扰动自抗扰控制系统的输出曲线更加平稳,说明本文所提出的方法是有效的且优越的,并且适用于具有复杂工况的钢坯加热炉内部.

## 6 结论

本文考虑了加热炉内钢坯加热过程中存在随机扰动等复杂工况的问题,提出了一种基于重置状态观测器的随机扰动自抗扰控制方法.把重置机制引入到状态观测器来构成重置状态观测器,并基于一阶低通滤波器设计了扰动估计器,最后设计了基于重置状态观测器的随机扰动自抗扰控制系统.利用李雅普诺夫稳定性原理对控制系统进行稳定性分析,通过Matlab工具箱进行参数求解,最后仿真实例验证了所提出方法的有效性和优越性.

## 参考文献(References)

[1] Fang X K, Yu L Y, Wang Q, et al. Establishment and optimization of heating furnace billet temperature

model[C]. Proc of the 24th Chinese Control and Decision Conf. Taiyuan: IEEE, 2012: 2366-2370.

- [2] Pongam T, Srisertpol J, Khompis V. PI controller design for temperature control of reheating furnace walking hearth type in setting up process[J]. Advanced Materials Research, 2013, 748: 801-806.
- [3] Pongam T, Srisertpol J, Khompis V. System modeling and temperature control of reheating furnace walking hearth type in the setting up process[J]. J of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(8): 3377-3385.
- [4] Karimi H J, Saidi M H. Heat transfer and energy analysis of a pusher type reheating furnace using oxygen enhanced air for combustion[J]. J of Iron and Steel Research International, 2010, 17(4): 12-17.
- [5] Govardhan J, Rao G V S, Narasaiah J. Experimental investigations and CFD study of temperature distribution during oscillating combustion in a crucible furnace[J]. Int J of Energy and Environment, 2011, 2(5): 783-796.
- [6] Gu M Y, Chen G, Liu X H, et al. Numerical simulation of slab heating process in a regenerative walking beam reheating furnace[J]. Int J of Heat and Mass Transfer, 2014, 76(6): 405-410.
- [7] 张丽慧, 王广军, 罗兆明, 等. 利用二维导热反问题预测钢坯温度分布[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 2136-2139.  
(Zhang L H, Wang G J, Luo Z M, et al. Estimation of the steel slab temperature distribution using 2-D inverse heat conduction problem[J]. J of Engineering Thermophysics, 2013, 34(11): 2136-2139.)
- [8] 廖迎新, 吴敏, 余锦华, 等. 基于HPSO的钢坯加热过程炉温优化设定[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 1010-1014.  
(Liao Y X, Wu M, She J H, et al. Hybrid particle swarm optimization of temperature settings of billet-reheating process[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(6): 1010-1014.)
- [9] She J H, Xin X, Pan Y. Equivalent-input-disturbance approach—Analysis and application to disturbance rejection in dual-stage feed drive control system[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2011, 16(2): 330-340.
- [10] She J H, Xin X, Yamaura T. Analysis and design of equivalent-input-disturbance based control system[J]. Trans of the Japan Society of Mechanical Engineers C, 2009, 75(758): 2750-2756.
- [11] Zhao G L, Wang J C. Reset observers for linear timevarying delay systems: delay-dependent approach[J]. J of the Franklin Institue, 2014, 351(11): 5133-5147.
- [12] Nguyen X M, Rodriguez-Ayerbe P, Lawayeb F, et al. Temperature control of reheating furnace based on distributed model predictive control[C]. Proc of the 18th Int Conf on System Theory, Control and Computing. Sinaia: IEEE, 2014: 726-731.