

文章编号: 1001-0920(2009)09-1425-04

基于分散推理结构的加热炉钢坯温度分布模糊控制

朱丽娜, 王广军, 沈曙光
(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对钢坯加热炉系统所具有的典型分布参数特点, 提出了一种基于分散推理结构的钢坯温度分布模糊控制方案. 首先, 将炉内钢坯温度偏差分布作为模糊推理系统的输入信息; 然后, 对于每一个炉温调整点, 通过一组二维模糊控制器, 产生一组与钢坯温度偏差分布对应的炉温补偿控制分量; 最后, 综合各控制分量获得各调整点处的炉温补偿量. 仿真算例表明, 该方案能够有效地保证钢坯按理想加热曲线完成加热过程.

关键词: 加热炉; 钢坯温度分布; 分散推理; 模糊控制

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A

Fuzzy control method based on decentralized reasoning structure for billet temperature distribution

ZHU Li-na, WANG Guang-jun, SHEN Shu-guang

(School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Correspondent: ZHU Li-na, E-mail: zln2002@163.com)

Abstract: Due to the typical distributed parameter characteristics of billet reheating furnace, a fuzzy control method based on decentralized reasoning structure for billet temperature distribution is proposed. For every set-point, the furnace temperature compensation values corresponding to a set of billet temperature deviation distribution are obtained by a set of two-dimensional fuzzy controllers whose input information is the temperature deviation distribution of billets in furnace. Then the furnace temperature compensation value is acquired by integrating each compensation values. Simulation results show that this methods can ensure the billets to complete the heating process according to the ideal curve effectively.

Key words: Reheating furnace; Billets temperature distribution; Decentralized reasoning; Fuzzy control

1 引 言

轧钢加热炉的基本任务是按预定的加热曲线对钢坯进行加热. 加热炉的优化控制是提高轧钢过程产品质量和降低轧钢能耗的重要手段^[1-4].

实际生产过程中, 许多扰动都会造成钢坯温度分布偏离理想加热曲线, 必须通过动态补偿调整炉温分布的设定值. 文献[5-7]根据加热炉各段钢坯温度预报值和对应的理想值之间的偏差, 利用多个 PID 控制器对炉温设定值进行补偿. 文献[8]开发了一种带有前馈修正的炉温模糊控制系统, 将加热炉前段控制点的钢温信号作为主控制器的修正信息, 使控制系统具有一定的超前决策功能. 加热炉是典型的分布参数系统, 炉内任一空间点处的炉温, 对该

空间点附近的和该点之后的钢坯温度分布均有明显影响. 前述方法没有充分考虑本段烟温调整对控制点后钢坯温度分布的影响, 难以有效保证钢坯按照理想加热曲线完成加热过程.

本文提出了一种基于分散推理结构的钢坯温度分布模糊控制方案, 其主要特征在于: 将钢坯温度偏差分布作为模糊推理系统的输入, 对于每一个炉温调整点, 通过一组二维模糊控制器产生一组与钢坯温度偏差分布对应的炉温补偿控制分量; 最后根据各模糊控制器输入信息的重要程度对各控制分量进行综合, 获得各处的炉温补偿量. 上述分散模糊推理结构, 在控制过程中充分考虑了炉温调整点后钢温误差分布等相关信息, 为钢坯按理想加热曲线完成

收稿日期: 2008-10-22; 修回日期: 2008-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50776103).

作者简介: 朱丽娜(1982—), 女, 河南新乡人, 博士生, 从事热工过程模糊控制的研究; 王广军(1963—), 男, 黑龙江双城人, 教授, 博士生导师, 从事热力系统仿真与热工过程控制等研究.

加热过程提供了有效保证.

2 钢坯温度预报及炉温稳态优化

本文重点讨论炉温分布的动态补偿控制问题. 对于钢坯温度分布预报及炉温稳态优化设定等相关内容,直接采用已有方法加以解决^[6].

2.1 钢坯温度预报模型

在实际生产过程中,炉内钢坯温度分布在线测量难以实现,目前主要通过炉内钢坯传热模型预报钢坯温度分布,进而实现炉温设定值的动态补偿控制. 钢坯温度分布预报模型,包括钢坯非稳态导热方程及相应的初始条件和边界条件,即

$$\frac{\partial t(\tau, x, y)}{\partial \tau} = a \nabla^2 t(\tau, x, y), \quad 0 < \tau < f, 0 < x < s, 0 < y < w, \quad (1)$$

$$t(\tau, x, y) |_{\tau=0} = t_0(x, y), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial t(\tau, x, y)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial t(\tau, x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \\ \frac{\partial t(\tau, x, y)}{\partial x} \Big|_{x=s} = a_1 [t_s(z) - t(\tau, s, y)], \\ \frac{\partial t(\tau, x, y)}{\partial y} \Big|_{y=w} = a_2 [t_c(z) - t(\tau, x, w)]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: a 为热扩散率; $t(\tau, x, y)$ 为板坯的温度; τ 为系统的时间坐标; x 和 y 为钢坯断面空间坐标; s 和 w 分别为钢坯宽度的一半和厚度; $f = L/v$ 为钢坯加热时间, L 为加热炉的有效长度, v 为钢坯的运动速度; a_1 和 a_2 分别为侧表面和上表面综合换热系数; $t_s(z)$ 为炉温沿炉长的分布, $z = x - vt$ 为钢坯中心点在加热炉中的位置坐标; $t_0(x, y)$ 为入炉时刻钢坯截面温度分布.

2.2 加热炉的稳态优化

采用如下的炉温稳态优化性能指标函数:

$$J[t_s(z)] = P[t_d(L) - t_d^*(L)]^2 + Q[t_s(L) - t_c(L)]^2 + R \int_0^L t_s^2(z) dz. \quad (4)$$

其中: $t_d(L)$, $t_s(L)$ 和 $t_c(L)$ 分别为出炉时钢坯断面平均温度、表面平均温度和中心温度; $t_d^*(L)$ 为钢坯断面平均温度的理想值; P , Q 和 R 为加权系数.

在满足各关键点炉温处于允许范围的约束条件下,采用全局寻优法由式(1)~(4)确定稳态最优炉温分布为 $t_s^*(z)$,并满足

$$J[t_s^*(z)] = \min J[t_s(z)]. \quad (5)$$

由 $t_s^*(z)$ 和钢坯温度预报模型,可得钢坯表面平均温度理想曲线 $t_s^*(z)$ 和中心温度理想曲线 $t_c^*(z)$.

3 炉温分布动态补偿控制策略

3.1 炉温动态补偿的基本方案

炉温分布动态补偿控制系统的基本思想是:在

每个控制周期内,通过钢坯表面平均温度理想曲线 $t_s^*(z)$ 与其温度的预报曲线 $t_s(z)$,获得钢坯表面平均温度偏差及其变化率沿炉长的分布 $e(z)$ 和 $ec(z)$.进一步借助于分散推理模糊控制器,实现由钢坯温度偏差及其变化率分布函数到炉温应有补偿量分布 $u(z)$ 的函数映射,并根据该函数映射结果对当前的炉温分布 $t_q(z)$ 进行补偿刷新,得到补偿后的炉温分布 $t_h(z)$,以保证钢坯按照预定的加热曲线完成加热过程.

3.2 钢坯温度分散模糊推理策略

进行炉温动态补偿时,将加热炉有效炉长均分为 n 段,记对应的钢坯表面平均温度理想曲线、钢坯温度预报曲线和炉温应有补偿量分布的离散值分别为 t_{si}^* , t_{si} 和 $u_i (i = 0, 1, \dots, n)$.点 i 处的炉温对点 i 及其后各点的钢坯温度均有明显影响.因此,在确定点 i 处补偿量 u_i 时,模糊控制器的输入应该包括 i 点及其后各离散点处钢温偏差及其变化率的有关信息 e_j 和 ec_j ,有

$$\begin{aligned} e_j &= t_{sj}^* - t_{sj}, \quad ec_j = de_j/dz, \\ j &= i, i+1, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

实现由钢坯温度偏差分布到炉温补偿量分布的映射,是炉温分布动态补偿控制的关键.模糊控制规则通常来自专家和操作人员的经验,当输入维数大于3时,根据经验获得比较完善的模糊控制规则几乎不太可能.实际上,在人工控制过程中,控制者同样需要接受许多信息.此时更加有效的处理方法是,首先将接收到的信息划分为若干组,对于每一组输入信息,通过基于经验的控制规则产生一个与该组信息对应的控制分量;最后根据各组输入信息的重要程度,由各控制分量综合得到实际的控制量.

参照上述的人工控制过程,建立了如图1所示的基于分散推理结构的钢温分布模糊控制方案.在确定 i 点处的炉温补偿量 u_i 时,控制器需要处理的输入信息为 e_j 和 $ec_j (j = i, i+1, \dots, n)$.在该模糊控制方案中,将控制器的输入信息划分为 $n-j+1$ 组,每一组为 (e_j, ec_j) .利用该组输入信息驱动一个经典的二维模糊控制器,产生一个控制分量 u_{ij} .最后根

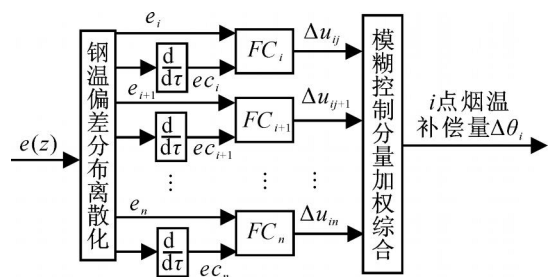


图1 基于分散推理结构的钢温分布模糊控制器

据 (e_j, ec_j) 相对于 i 的重要程度,对 u_{ij} 进行加权综合获得点 i 处的炉温补偿量 u_i .

4 钢温分布的分散推理模糊控制

4.1 炉温动态补偿控制分量

图 1 中 FC_j 为二维模糊控制器,其作用是根据离散点 $j(j = i, i + 1, \dots, n)$ 处钢温的偏差 e_j 及其变化率 ec_j ,确定为了消除不同位置 j 处钢温偏差而应对离散点 i 处炉温施加的不同补偿控制分量 u_{ij} . e_j, ec_j 和 u_{ij} 的模糊子集 E_j, EC_j 和 U_j 分别为

$$\begin{aligned}
 E_j &= \{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}, \\
 EC_j &= \{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}, \\
 U_j &= \{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

FC_j 的模糊控制规则如表 1 所示,其输出的确切值 u_{ij} 根据最大隶属度原则确定.

表 1 FC_j 的模糊控制规则

E_j	EC_j						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

4.2 动态补偿控制分量的综合

得到控制分量 u_{ij} 后,计算炉温补偿量为

$$u_i = \sum_{j=i}^n w_{ij} u_{ij}, \quad (8)$$

其中 w_{ij} 为 i 点处炉温的第 j 个控制分量的权值.

考虑到随着 j 的增加,离散点 i 处炉温对离散点 j 处钢坯温度的影响逐步减弱,根据下列条件确定 w_{ij} 的分布:

$$\begin{cases}
 w_{ij} = \frac{n-j}{n-i} w_{ii}, & i < n; \\
 \sum_{j=i}^n w_{ij} = 1.
 \end{cases} \quad (9)$$

可得

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{2(n-j)}{(n-i+1)(n-i)}, & i < n; \\ 1, & i = n. \end{cases} \quad (10)$$

获得各离散点的炉温补偿分布 u_i 之后,按下式对本次补偿前炉温分布进行补偿刷新,获得补偿后的炉温分布设定值

$$h_{.i} = q_{.i} + u_i, \quad (11)$$

其中 $q_{.i}$ 和 $h_{.i}$ 为本次补偿前炉温分布 $q(z)$ 及补偿后炉温分布 $h(z)$ 的离散值.

5 控制过程仿真

仿真实验对象由炉顶供热,有效炉长为 36 m,钢坯装炉温度为 20 . 工艺要求钢坯出炉时钢坯表面温度为 1240 ,断面允许温差 50 .

图 2 和图 3 为动态补偿控制中炉温及钢坯表面平均温度的变化过程, 为初始分布, 为 1 次补偿后分布, 为 5 次补偿后分布, 为 10 次补偿后分布. 由图 3 可见,在初始炉温下钢坯出炉时刻的温度约为 1070 ;经过 10 次补偿后,钢坯出炉温度约为 1237 ,满足工艺要求.

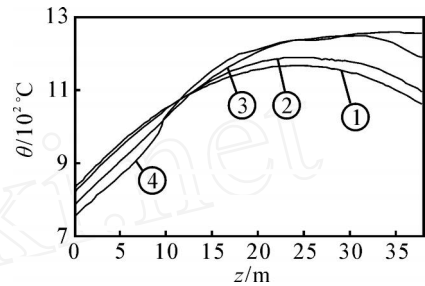


图 2 动态补偿过程中的炉温分布

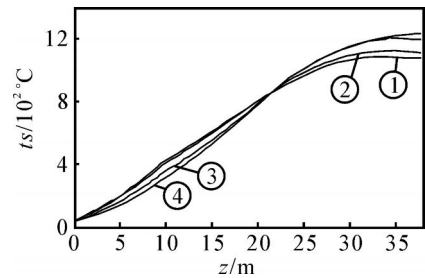


图 3 动态补偿过程中的钢坯表面平均炉温分布

图 4 给出了炉温分布动态补偿后钢坯温度分布与理想加热过程曲线的比较结果, 为钢坯表面温度理想分布, 为钢坯表面温度实际分布, 为钢坯中心温度理想分布, 为钢坯中心温度实际分布, 为补偿后炉温分布. 由图 4 可以看出,经过 10 次炉温动态补偿后,钢坯温度分布与理想加热曲线非常接近,断面最大温差约为 11 .

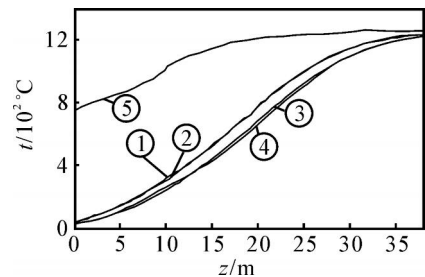


图 4 理想钢温分布与实际钢温分布比较

6 结 论

本文提出了一种基于分散推理结构的钢坯温度分布模糊控制方案,通过对钢坯温度及其变化趋势

的分布进行分散模糊推理和加权综合获得加热炉炉温动态补偿量的分布信息,为钢坯温度分布模糊控制提供了一种有效方法.

参考文献(References)

- [1] Anton Jaklic, Franci Vode, Tomaz Kolenko. Online simulation model of the slab reheating process in a pusher-type furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5/6): 5-6.
- [2] 柴天佑, 王中杰, 张莉. 加热炉的炉温优化设定模型[J]. 自动化学报, 2000, 26(4): 537-541.
(Chai T Y, Wang Z J, Zhang L. Optimal setting model of reheating furnace temperature [J]. Acta Automatic Sinica, 2000, 26(4): 537-541.)
- [3] 毕长春, 李柠, 黄道. 蓄热式加热炉钢温预报与炉温优化设定研究[J]. 自动化学报, 2004, 30(3): 476-480.
(Bi C C, Li N, Huang D. Study on billet temperature prediction and furnace temperature optimal setting of regenerative reheating furnace [J]. Acta Automatic Sinica, 2004, 30(3): 476-480.)
- [4] Man Young Kim. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace[J]. Int J of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(19/20): 3740-3748.
- [5] Wang Z J, Wu Q D, Chai T Y. Optimal-setting control for complicated industrial process and its application study[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(1): 65-74.
- [6] 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.
(Wang Z J, Chai T Y, Shao C. Multimode dynamic optimization control strategy for reheating furnaces[J]. Control and Decision, 1999, 14(5): 465-468.)
- [7] 王锡怀, 李柠, 李少远, 等. 步进式加热炉建模和炉温优化设定策略[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(9): 1306-1309.
(Wang X H, Li N, Li S Y, et al. Modeling and temperature optimal setpoint strategy for walking beam reheating furnace [J]. J of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(9): 1306-1309.)
- [8] 张卫军, 陈海耿, 吴雪琦, 等. 带有前馈修正的炉温智能模糊控制器的开发[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(12): 59-62.
(Zhang W J, Chen H D, Wu X Q, et al. Exploitation of intelligent fuzzy controller for furnace temperature with feed forward correction[J]. J of Iron and Steel Research, 2006, 18(12): 59-62.)
- [11] Thompson K, Miller G J, Wilder R. Wide-area Internet traffic patterns and characteristics[J]. IEEE Network, 1997, 11(6): 10-23.
- [12] Granger C W J, Joyeux R. An introduction to long-memory time series models and fractional Differencing [J]. J of Time Series Analysis, 1980, 1: 15-29.
- [13] Low S. Multipath optimization flow control[C]. Proc of IEEE Conf on Networks. Washington D1, 2000: 39-43.
- [14] Adas A. Traffic models in broadband networks [J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 7: 82-89.
- [15] Leland W E, Willinger W, Taqqu M S. On the self-similar nature of Ethernet Traffic [C]. Proc of SIGCOM, California, 1993:183-193.
- [16] 崔锦泰, 程正兴. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
(Chui C K, Cheng Z X. An introduction to wavelets [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995.)
- [17] 文成林, 周东华. 多尺度估计理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(Wen C L, Zhou D H. Multiscale estimation theory and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [18] Daudi K, Frakt A B, Willsky A S. Multiscale autoregressive models and wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1999, 45(3): 828-845.
- [19] Fieguth P W, Willsky A S. Fractal estimation using models on multiscale trees[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(5): 1297-1300.
- [20] Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis: Forecasting and control[M]. 2nd ed. San Francisco, 1976.
- [21] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
(Sun Z Q. Intelligent control theory and technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)
- [22] 闻新, 周露, 李翔, 等. Matlab 神经网络仿真与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
(Wen X, Zhou L, Li X. et al. Matlab neural networks simulation and application[M]. Beijing: Science Press, 2003.)

(上接第 1424 页)