

热轧带钢层流冷却过程混合智能控制方法

片锦香, 柴天佑

(东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 现有热轧带钢层流冷却过程缺少对卷取温度的直接反馈机制, 难以将卷取温度控制在一定范围内。将机理模型与案例推理智能技术相结合, 提出了由冷却区喷水集管开启阀门总数预设模型、卷取温度预报模型、前馈补偿模型与反馈补偿模型四个模块组成的混合智能控制方法, 并利用某钢厂的实际运行数据进行实验研究。实验结果表明即使在工况条件频繁变化时, 提出的层流冷却混合智能控制方法也能够及时、自动调整喷水集管阀门开启总数的设定值, 最终将实际卷取温度控制在工艺要求的范围内, 从而提高热轧带钢的组织性能。

关 键 词: 层流冷却; 卷取温度; 案例推理; 混合智能; 前馈补偿; 反馈补偿

中图分类号: TG 111.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3026(2009)11-1534-04

Hybrid Intelligent Control Method for Laminar Cooling Process of Hot Rolled Strip

PIAN Jin-xiang¹, CHAI Tian-you^{1,2}

(The Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: PIAN Jin-xiang, E-mail: jxpian@hotmail.com)

Abstract: It is hard to control the coiling temperature in a certain range since the existing laminar cooling process lacks the direct feedback during strip hot rolling. A hybrid intelligent control method was therefore proposed combining the mechanism models with case-based reasoning technology, i.e., composed of four modeling modules: to preset the number of valves of spray header to be opened in cooling zone, to forecast coiling temperature, to compensate for feedforward, to compensate for feedback. The method proposed was simulated with the actual operating data provided by a steel plant and the results showed that the setting value of the number of spray header valves to be opened can be readjusted automatically and timely according to the changing operation conditions, thus controlling the coiling temperature in the range the technical schedule requires so as to improve the microstructure and mechanical properties of the rolled strip.

Key words: laminar cooling; coiling temperature; case-based reasoning; hybrid intelligence; feedforward compensation; feedback compensation

热轧带钢层流冷却装置通过控制喷在热轧带钢上的冷却水流量与带钢速率,使带钢从终轧温度(800~900)按一定温降速率冷却到工艺要求的卷取温度(550~700),从而获得性能良好的热轧带钢产品^[1]。卷取温度与喷水集管阀门开启总数之间的动态特性具有非线性、难以用精确

的数学模型表达的复杂特性,且由于强制水冷产生的大量高温水气导致没有合适的检测装置逐点检测冷却区的带钢温度,难以采用常规控制方法实现反馈控制。目前层流冷却过程常用控制策略表格或者基于温度模型的开环设定方法^[2],当工况条件频繁变化时,常需要经验丰富的操作员调

收稿日期: 2008-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB320601); 国家自然科学基金资助项目(60534010); 国家创新研究群体科学基金资助项目(60521003); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0421)。

作者简介: 片锦香(1974-),女,吉林柳河人,东北大学博士研究生; 柴天佑(1947-),男,甘肃兰州人,东北大学教授,博士生导师,中国工程院院士。

整喷水阀门开启总数的设定值。这种人工设定方法不能及时准确地调整阀门开启总数的设定值，难以将卷取温度控制在目标值范围内。

虽然智能技术的引入缓解了对温度模型的依赖^[3-6]，然而目前的研究成果中大部分是基于预测思想的前馈控制，缺乏基于卷取温度的直接反馈控制机制。本文提出机理模型与案例推理技术相结合的混合智能控制方法，利用某钢厂的实际运行数据进行实验。实验结果表明，即使在操作条件波动较大的情况下，该方法也能够自动调整喷水集管开启总数设定值，将实际卷取温度控制在

工艺要求的范围内。

1 层流冷却过程描述

一个典型的热轧带钢层流冷却系统如图 1 所示，离开最后一个精轧机架的带钢，经过一段喷水冷却区的强制水冷后被卷取机咬入并卷取。冷却区中上下对称布置了 19 组喷水架，前 17 组喷水架为主冷区，后 2 组喷水架为精冷区。每组喷水架上有 4 个喷水集管，辊道上部喷水集管流出的水落到带钢表面上，以层流水的形式进行带钢冷却。喷水集管是否供水由阀门控制。

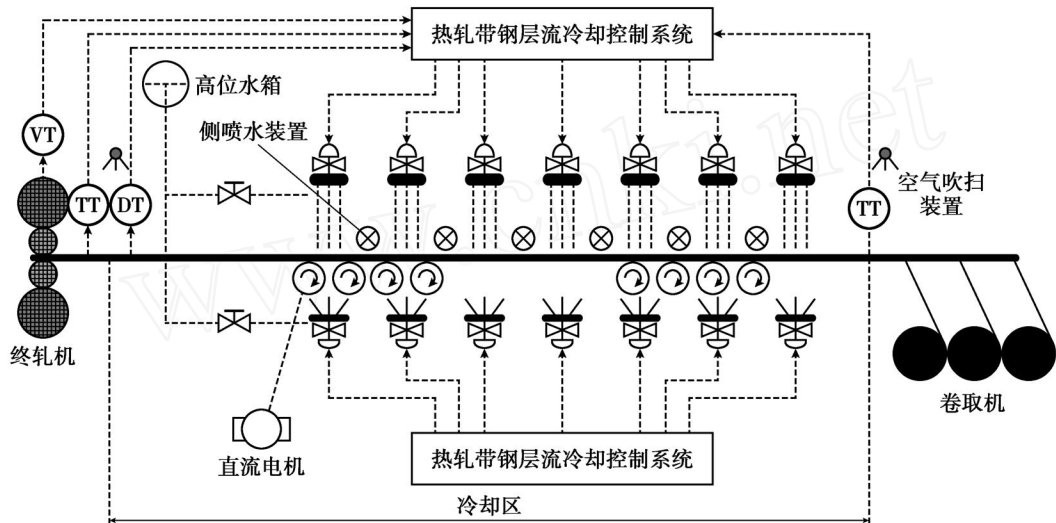


图 1 热轧带钢层流冷却过程工艺流程图

Fig. 1 Schematic of laminar cooling process for hot strip
VT—脉冲计数器；TT—温度检测；DT—厚度检测。

2 混合智能控制方法

2.1 控制策略

本文以将卷取温度控制在目标范围内为目标，提出了如图 2 所示的由卷取温度预报模型、阀

门总数预设模型、前馈补偿模型、反馈补偿模型四部分组成混合智能控制方法，其中卷取温度预报模型采用文献[3]的方法对卷取温度进行预报，预设模型利用带钢硬度等级、终轧温度、终轧厚度及带钢头部终轧速度对冷却区需要开启的集管

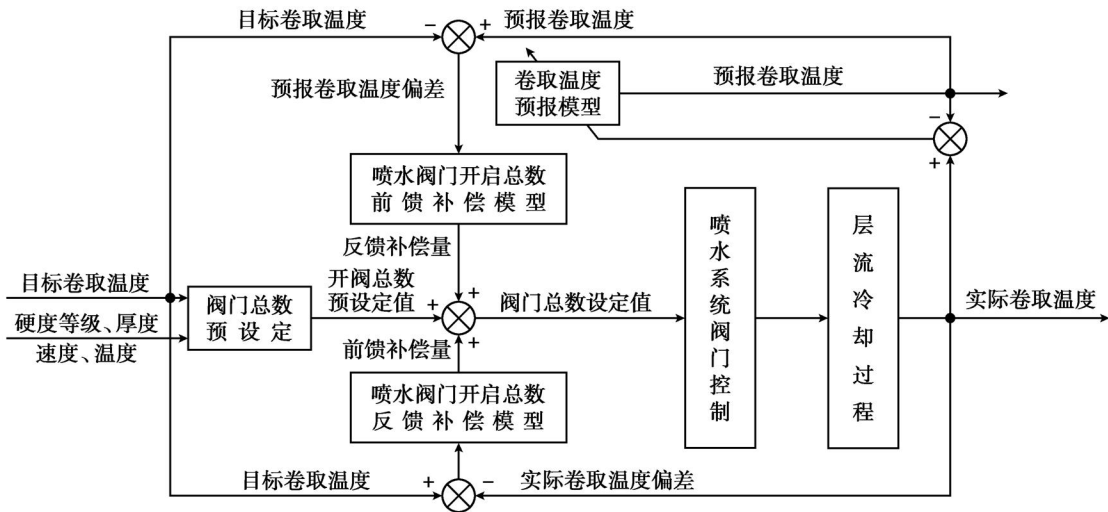


图 2 层流冷却过程的智能控制方法

Fig. 2 Intelligent control method for laminar cooling process

阀门总数进行预设,前馈补偿模型以卷取温度预报值与目标卷取温度之间的偏差为调节参数补偿实测干扰,反馈补偿模型以实际卷取温度与目标温度之间的偏差为调节参数,补偿卷取温度预报模型误差和未知干扰。

2.2 控制算法

1) 喷水集管阀门开启总数预设模型输入输出关系可以表示为

$$N_0 = f(T_g^*, G, d_f, T_f, v_f, N_t, N_b,) \quad (1)$$

其中: G 为硬度等级; d_f 为终轧厚度; T_f 为终轧温度; v_f 为终轧速度; N_t, N_b 为上下起始阀位置;

为喷水模式, 预设模型算法是利用文献[3]中建立的卷取温度预报模型反算获得。

2) 前馈补偿模型输入输出关系为

$$N_f = f(G, T_f, d_f, v_f, T_{in}^n, v_{in}^n) \quad (2)$$

其中: T_{in}^n, v_{in}^n 代表第 n 个采样点实测温度和运行速度; N_f 为前馈补偿阀门数, 用来调整预设阀门开启总数, 并只调整主冷区阀门数。前馈补偿模型采用案例推理技术和 PI 控制相结合的计算法, 开启总数的前馈补偿阀门数 N_f 的公式为

$$N_f(k) = K_{fp} e_f(k) + K_{fi} \sum_{i=1}^k e_f(i) \quad (3)$$

$$e_f(k) = T_g^* - T_{fc}(k) \quad (4)$$

其中: k 为调整次数; $e_f(k)$ 为目标卷取温度值 T_g^* 与预报值 $T_{fc}(k)$ 之间的偏差; K_{fp}, K_{fi} 分别代表随工况条件变化的比例积分参数。

为了保证在各种工况下均具有较优的调节性能, 并充分利用现场专家经验, 本文采用案例推理技术[7]经过案例产生、案例检索、案例重用、案例修正和案例储存五个过程[8]动态整定参数值 K_{fp}, K_{fi} , 使 J_f 尽量小:

$$J_f = w_1 / e_f + w_2 k_f \quad (5)$$

其中: $|e_f|$ 为偏差; $w_1 + w_2 = 1$; k_f 为调整次数。案例推理过程如下:

案例表示, 利用满足上述性能指标(5)的 PI 参数及工况数据建立初始案例库。如表 1 所示案例由检索特征和解特征组成, 检索特征由 G, d_f, T_{in}^n 和 v_{in}^n 组成, 解特征为 PI 参数。

表 1 案例结构

Table 1 Case structure

检索特征				解特征	
x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
G	d_f	T_{in}^n	v_{in}^n	K_{fp}	K_{fi}

案例检索 案例检索采用层次检索与近邻

检索相结合的方法, 首先在历史案例库中查找与问题案例硬度等级相同的第一层节点, 然后在该节点下进行近邻检索。近邻检索时相似度函数计算采用欧几里德距离定义:

$$d_{pq}^w = \left[\sum_{j=1}^3 \mu_j^2 X_j^2 \right]^{1/2} = \left[\sum_{j=1}^3 \mu_j^2 (x_{pj} - x_{qj})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

其中: x_{pj}, x_{qj} 分别代表案例 p, q 的第 j 个描述特征, μ_j 为第 j 个特征的加权系数, 表征其重要程度。则案例 p, q 的相似度定义为

$$SM_{pq}^w = \frac{1}{1 + \mu d_{pq}^w}, \mu = 0.05 \quad (7)$$

案例重用 案例重要阶段采用最大相似度法, 即直接重用与当前案例最相似的历史案例解作为问题案例解。

案例修正 案例修正阶段首先将重用后的 PI 参数值代入式(3)计算得当前段的前馈补偿阀门数, 再将补偿后的阀门总数代入文献[3]的卷取温度预报模型, 根据式(5)计算对应的 PI 参数的控制性能, 如果 $J_f < J_h^1$, 认为合格, 否则需要离线调整 PI 参数, J_h^1 由经验确定。

案例存储 如果案例的硬度等级为新硬度等级, 则将调整后的案例作为新案例直接存储; 如果与库中案例最大案例相似度小于 0.9, 则作为新案例存储。

3) 预设模型与前馈补偿模型结合在一起实际是一种前馈控制, 无法保证实际的卷取温度等于目标卷取温度, 且温度预报模型本身存在偏差, 为了提高控制精度还需要加入反馈校正控制, 弥补前馈控制的不足。

反馈模型输入输出函数关系为

$$N_b = f(d_f, T_{in}^n, v_{in}^n, e_b) \quad (8)$$

热轧带钢层流冷却过程是一个重复性的间歇生产过程, 适合采用迭代学习的方法[9]。本文提出 PI 型迭代学习的集管阀门开启总数的反馈补偿方法, 利用当前带钢的实测卷取温度偏差进行下一条带钢的反馈补偿, 则第 $j+1$ 条带钢的开阀总数反馈补偿量可以表示为

$$N_b(j+1) = N_b(j) + K_{bp} e_b(j) + \sum_{i=1}^j K_{bi} e_b(i) \quad (9)$$

$$e_b(j) = T_g^* - T_c^{(m)} \quad (10)$$

其中: $e_b(j)$ 代表第 j 条带钢的实测卷取温度偏差值, K_{bp}, K_{bi} 代表随工况条件变化的比例积分参数, 由案例推理系统给出, 使性能指标 $J_b < J_h^2$, 其

中 $J_b = |e_b| + k_b$.

3 实验研究

为了验证本文提出的混合智能控制方法,采用国内某大型钢厂实际运行数据进行实验研究 .

3.1 控制方法参数确定

用于验证实验的带钢硬度等级为 513 ,共 58 个采样数据 ,目标卷取温度为 550 ,允许控制偏差为 20 ,终轧厚度为 10.38 mm ,实测的初始入口速度在 2.54 ~ 3.14 m/s 之间波动 ,入口初始温度在 796.1 ~ 854.8 之间波动 .

前馈补偿性能指标 f 取 10 ;案例推理检索阶段的检索权重 j 对应终轧厚度、采样点速度、采样点温度分别取 0.43,0.36,0.21 ;前、反馈补偿器补偿性能指标 J_h^1 和 J_h^2 分别取 6.5,9 .

3.2 实验结果及分析

将本文提出的混合智能控制方法与在某钢厂采集到实际控制曲线相比较 ,如图 3 所示 ,某钢厂带钢的中间位置实际控制效果较好 ,而带钢的头尾部分控制效果较差 ,有些点的卷取温度控制偏差超出了 20 .采用本文设计的控制方法后 ,带钢的中间和头尾部分 ,卷取温度的控制偏差均在要求范围内 .

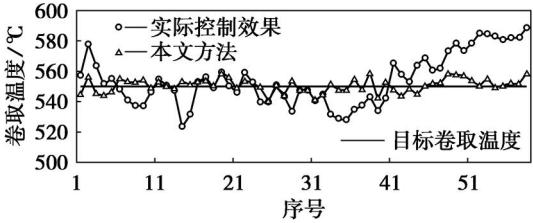


图 3 卷取温度控制效果比较

Fig. 3 Comparison of controlling effects of coiling temperature

4 结 语

本文针对目前热轧带钢层流冷却过程中缺少反馈机制这一问题 ,将反馈控制思想及案例推理技术结合 ,提出层流冷却过程混合智能控制方法 ,采用某钢厂的实际运行数据进行实验研究 ,结果

表明 ,即使在工况条件频繁变化时 ,本文提出的智能控制方法也能够及时、自动调整开阀总数的设定值 ,将实际卷取温度控制在工艺确定的范围内 .

参考文献 :

[1] Kumar R, Sinha S, Lahiri A. An online parallel controller for the runout table of hot strip mills[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(6): 821 - 830.

[2] 吴毅平 . 宝钢热轧层流冷却卷取温度控制的改进[J]. *冶金自动化*, 1997, 1: 15 - 17 .
(Wu Yi-ping. Improvement of the coiling temperature control of Baosteel 's hot strip mill [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 1997, 1: 15 - 17.)

[3] Pian J X, Chai T Y, Wang H, et al. Hybrid intelligent forecasting method of the laminar cooling process for hot strip [C]. *American Control Conference*. New York: ACC, 2007: 4866 - 4871.

[4] Chai T Y, Tan M H, Chen X Y. Intelligent optimization control for laminar cooling[C]. *Proceeding of the 15th IFAC World Congress*. Barcelona: Elsevier, 2002: 181 - 186.

[5] Guan S P, Li H X, Tso S K. Multivariable fuzzy supervisory control for the laminar cooling process of hot rolled slab[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(2): 348 - 356.

[6] 谭明皓 , 柴天佑 . 层流冷却过程喷水系统的智能设定方法[J]. *控制与决策*, 2005, 20(3): 299 - 304 .
(Tan Ming-hao, Chai Tian-you. Intelligent spray system setup in the laminar cooling process [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(3): 299 - 304.)

[7] Aha D W, Marling C, Watson I. Case-based reasoning commentaries: introduction [J]. *Knowledge Engineering Review*, 2005, 20(3): 201 - 202.

[8] De Mantaras R L, Mcsherry D, Bridge D, et al. Reuse, revision and retention in case-based reasoning [J]. *Knowledge Engineering Review*, 2005, 20(3): 215 - 240.

[9] 李书臣 , 徐心和 , 李平 . 分批重复过程迭代学习广义预测控制[J]. *东北大学学报 : 自然科学版*, 2004, 25(8): 734 - 737 .
(Li Shuchen, Xu Xin-he, Li Ping. Iterative Learning of generalized predictive control for repeatable batch process[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2004, 25(8): 734 - 737.)