

文章编号: 1001-0920(2005)03-0299-04

层流冷却过程喷水系统的智能设定方法

谭明皓, 柴天佑

(东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对热轧层流冷却过程具有强非线性、分布参数和时变等综合复杂特性, 提出了基于案例推理技术的层流冷却过程喷水系统的智能设定方法。层流冷却过程的典型工况及喷水系统设定值以案例的形式存于案例库, 对于待冷却的带钢, 根据当前的工况描述特征在案例库中检索匹配的历史案例, 经推理完成当前工况下喷水控制系统的设定。采用某钢铁公司热轧层流冷却生产过程的实际数据进行仿真实验, 结果表明所提出的智能设定方法在工况变化时是有效的。

关键词: 层流冷却过程; 喷水系统; 智能设定; 案例推理

中图分类号: F273

文献标识码: A

Intelligent spray system setup in the laminar cooling process

TAN Ming-hao, CHAI Tian-you

(Research Centre of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China Correspondent: TAN Ming-hao, E-mail: tmhowe@21cn.com)

Abstract: An intelligent method is developed for setup of the spray system in the laminar cooling process, which is very complex in nature (e.g. highly nonlinear, time and spatially varying). Typical cases in the process control history including operating conditions and number of active cooling units are stored in the case base. The number of active cooling units for the current operating condition is found using case-based reasoning. Experimental studies with industrial data from a steel plant show the effectiveness of the method in case of varying operating conditions.

Key words: laminar cooling process; spray system; intelligent setup; case-based reasoning

1 引言

为保证热轧板带具有良好的性能, 热轧生产利用喷水系统对板带进行轧后层流冷却处理, 喷水系统的设定是层流冷却过程控制的关键。层流冷却过程具有强非线性、分布参数和时变特性, 难以建立精确的数学模型。此外, 板带在冷却过程中的温度难以连续检测, 加之板带的硬度等级、终冷温度及厚度等边界条件变化频繁, 常规的控制方法无法获得满意的控制效果。

文献[1]通过建立板带温降和所需喷水集管开启数的经验公式来确定控制量。[2]将统计方法与层流冷却过程的简化传热方程相结合, 建立控制模型

以提高温度控制精度。[3]采用板带冷却温度与喷水量之间的经验公式进行层流冷却过程控制。[4]忽略了板带厚度方向的热传导, 并假设冷却过程的模型为简单的纯延时环节, 建立了层流冷却控制模型。[5]通过现场试验建立了特定工况下板带温降的经验模型, 并采用该模型凑试确定开启喷水单元的数量, 但所建立的模型与实际的工况条件有关, 在工况变化时需要经验模型进行修正。[6, 7]采用优化设定控制技术^[8], 通过建立冷却过程的板带温度预报模型, 采用前馈和反馈补偿实现层流冷却控制。

层流冷却过程是具有综合复杂性的工业过程, 只有将智能方法^[9]与常规控制方法相结合, 才有可

收稿日期: 2003-12-16; 修回日期: 2004-04-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2002cb312201); 国家863高技术计划项目(2004AA412030)

作者简介: 谭明皓(1972—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 从事系统建模与控制的研究; 柴天佑(1947—), 男, 甘肃兰州人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、智能控制等研究。

能取得满意的控制效果 本文采用案例推理技术^[10], 提出层流冷却过程喷水系统的智能设定方法, 并采用某钢铁公司层流冷却过程的实际数据进行仿真实验研究

2 层流冷却过程简介

层流冷却装置由安装在精轧机与卷取机之间的输送辊道和上下喷水机构组成 层流冷却过程的喷水系统中设置喷水架, 每组喷水架包括若干冷却单元, 每个冷却单元的流量恒定 在层流冷却过程中通过对喷水系统中的冷却单元开启的设定, 实现对热轧带钢的喷水冷却控制

层流冷却过程的传热机理复杂, 影响冷却过程中带钢温度的因素很多, 如带钢的硬度等级 G_r , 厚度 d , 初始温度 T_e , 水温 T_w , 辊道速度 v , 喷水强度和喷水分布等 层流冷却控制的目标是通过喷水控制系统的设定使带钢的温度符合工艺要求 起始冷却单元根据工艺可以预先确定^[11].

3 喷水控制系统的智能设定方法

层流冷却过程具有典型的分布参数特性, 冷却过程中带钢的温度为时间和空间的函数, 加之冷却过程中带钢温度不能连续检测, 冷却过程的工况变化剧烈, 动态特性随工况而变化, 无法实现常规闭环控制

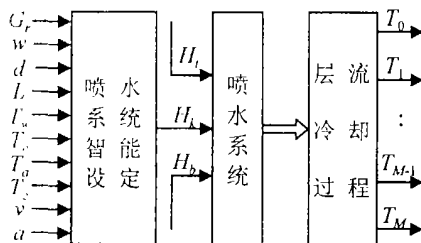


图1 层流冷却控制系统结构

层流冷却控制系统的结构如图1所示 其中: w 为带钢宽度, d 为带钢厚度, L 为带钢长度, G_r 为硬度等级, T_e 为带钢入口温度, T_w 为水温, T_a 为环境温度, v 为带钢速度, a 为带钢加速度, T_c 为目标卷取温度, H_a 为上起始冷却单元, H_b 为下起始冷却单元, H_k 为冷却单元开启数, T_0 为带钢上表面温度, $T_1 \sim T_{M-1}$ 为带钢内部节点温度, T_M 为带钢下表面温度

层流冷却过程喷水系统的智能设定方法如图2所示 这一智能设定方法根据目标卷取温度, 利用层流冷却控制的成功案例和冷却过程的专家知识, 采用案例推理技术确定冷却单元开启数, 对喷水控制系统进行设定 通过对冷却过程的喷水控制, 使带钢的温度在工艺规定的范围之内

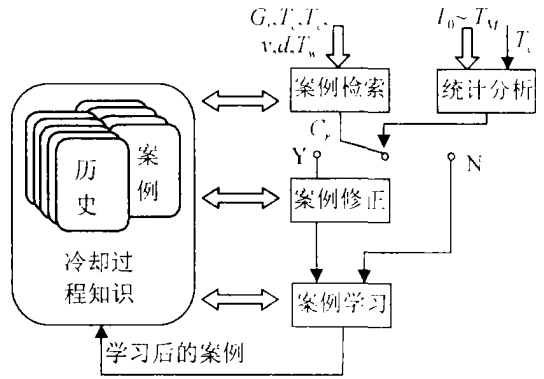


图2 层流冷却过程的智能设定方法

3.1 案例表示

层流冷却过程的控制知识按一定的结构进行组织, 并以案例的形式存储于案例库 作为过程动态控制特性的结构化描述, 每个案例都包括了带钢运行工况的描述特征及其解特征, 即由一种工况及其对应的控制量组成

冷却过程的动态特性与带钢厚度、带钢硬度等级和冷却的目标卷取温度有着密切的关系, 带钢的温度、速度、水温等工况条件的不断变化也会对冷却过程产生很大的影响 因此决定选 $(G_r, T_c, T_e, v, d, T_w)$ 作为工况的描述特征, 以层流冷却过程喷水系统的设定值(即冷却单元开启数 H_k) 作为案例的解特征 案例在案例库中的信息存储结构如表1所示

表1 案例结构

描述特征 F						解特征 S
f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	s_1
G_r	T_c	d	T_e	v	T_w	H_k

在上述案例描述特征中, 硬度等级 G_r , 目标卷取温度 T_c 和厚度 d 反映了带钢的本质特征, 对冷却过程的传热特性有显著的影响, 作为案例库的主索引, 而入口温度 T_e , 速度 v 和水温 T_w 作为从索引 从控制历史数据和专家经验中提取出冷却过程的典型工况描述特征及其控制信息, 以案例的形式存储于案例库, 从而建立了用于冷却过程喷水系统设定的初始案例库, 用于层流冷却过程中喷水系统的设定

3.2 案例检索

设带钢长度方向进行 N 次定时采样, 定义带钢第 k 采样点的工况为 $C_{in,k} (k = 1, 2, \dots, N)$, 定义 $C_{in,k}$ 的工况描述特征为 $F_k = (f_{k,1}, f_{k,2}, \dots, f_{k,6})$, $C_{in,k}$ 的解为 $S_k = (s_{k,1}) = (H_k)$. 定义案例库 $\Theta = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, 其中案例 $C_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的工况描述特征为

$$F_i^p = (f_{i,1}^p, f_{i,2}^p, \dots, f_{i,6}^p),$$

C_i 的解为

$$S_i^P = (S_{i,1}^P) = H_i^P,$$

工况描述特征 $f_{k,1}$ 与 $f_{i,1}^P$ 的相似度函数为

$$\text{sim}_{k,1} = \text{sim}(f_{k,1}, f_{i,1}^P) = \begin{cases} 1, & f_{k,1} = f_{i,1}^P; \\ 0.9, & 1 < |f_{k,1} - f_{i,1}^P| < 3; \\ 0.7, & 3 < |f_{k,1} - f_{i,1}^P| < 10; \\ 0.3, & 10 < |f_{k,1} - f_{i,1}^P| < 25; \\ 0, & |f_{k,1} - f_{i,1}^P| > 25. \end{cases}$$

$$k = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

工况描述特征 $f_{k,j}$ 与 $f_{i,j}^P$ 的相似度函数为

$$\text{sim}_{k,j} = \text{sim}(f_{k,j}, f_{i,j}^P) = 1 - \frac{|f_{k,j} - f_{i,j}^P|}{\max(f_{k,j}, f_{i,j}^P)},$$

$$k = 1, 2, \dots, N, j = 2, 3, \dots, 6, \quad (2)$$

$$\text{sim}_{k,1,\max} = \max_{i \in \{1, \dots, m\}} \text{sim}(f_{k,1}, f_{i,1}^P), \quad (3)$$

$$\text{sim}_{k,2,\max} = \max_{i \in \{1, \dots, m\}} \text{sim}(f_{k,2}, f_{i,2}^P), \quad (4)$$

$$\text{sim}_{k,3,\max} = \max_{i \in \{1, \dots, m\}} \text{sim}(f_{k,5}, f_{i,5}^P). \quad (5)$$

带钢第 k 采样点的工况 $C_{in,k}$ 与库中案例 $C_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的相似度为^[10]

$$\text{SM}_{k,i} = \text{SM}(C_{in,k}, C_i) = \omega_j \text{sim}(f_{k,j}, f_{i,j}^P), \quad (6)$$

$$\text{SM}_{k,\max} = \text{SM}(C_{in,k}, C_{i_k}) = \max_{C_i} (\text{SM}(C_{in,k}, C_i)). \quad (7)$$

其中 $\omega_j (j = 1, 2, \dots, 6)$ 是描述特征的加权系数 根据有关描述特征的经验知识, 经过凑试确定加权系数如下:

$$\omega_1 = 0.22, \omega_2 = 0.17, \omega_3 = 0.2, \omega_4 = 0.18, \omega_5 = 0.185, \omega_6 = 0.045$$

计算出相似度后, 与第 k 采样点工况的相似度最大的案例 C_{i_k} 被检出并作为匹配案例, 得到匹配案例的解特征

3.3 案例修正与保存

为验证案例检索所得喷水设定的有效性, 需要对其控制效果进行评价. 经过案例检索得到当前采样点的冷却单元开启数. 考虑到带钢厚度方向温度控制均匀性的要求, 根据层流冷却过程的模型^[11] 进行迭代计算, 求解当前采样点在卷取测量点 P_2 的厚度方向温度分布 $T_0 \sim T_M$, 然后由下式计算 ΔT 和 \bar{T} :

$$\Delta T = \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M |T_i - T_c|, \quad (8)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M T_i \quad (9)$$

其中: ΔT 是模型预测误差的统计分析值, \bar{T} 是卷取

温度的统计分析值. 如果 $\Delta T < 15$, 则认为温度控制精度合格, 转入案例保存; 如果 $\Delta T \geq 15$, 则说明温度控制误差过大, 需要对检索得到的解进行修正, 以改善控制效果.

推理系统根据当前采样点在厚度方向的卷取温度统计分析值 \bar{T} , 对案例解进行相应的修正. 如果 \bar{T} 高于目标温度 T_c , 则增加 H_k , 直到误差 ΔT 在允许范围之内; 如果 \bar{T} 低于目标温度 T_c , 则减少 H_k , 直到误差 ΔT 在允许范围之内. 当控制误差较大时, 案例修正能够改善控制效果, 提高控制精度. 案例修正的流程如图 3 所示.

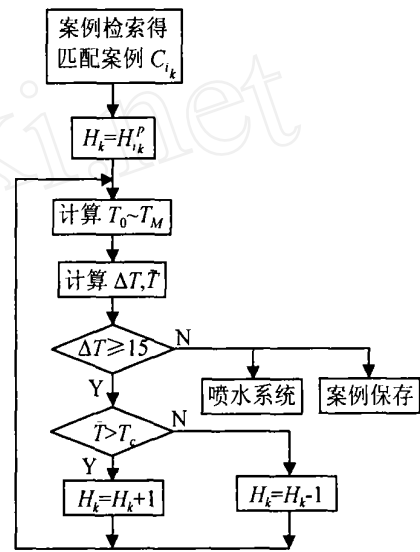


图 3 案例修正流程

案例保存依据带钢第 k 采样点的工况 $C_{in,k}$ 与存贮案例的特征相似度和案例相似度, 决定是否将其添加到案例库中. 如果 $C_{in,k}$ 对应于新的硬度等级, 则将 $C_{in,k}$ 添加到案例库中; 如果 $C_{in,k}$ 对应的目标卷取温度与现有的目标卷取温度显著不同, 则将 $C_{in,k}$ 添加到案例库中; 如果 $C_{in,k}$ 对应的厚度与现有的厚度显著不同, 则将 $C_{in,k}$ 添加到案例库中; 如果 $C_{in,k}$ 与案例库中存贮工况的相似度显著不同, 也将 $C_{in,k}$ 添加到案例库中. 上述案例保存的流程简单表示如下:

```

Begin Retention
If sim_{k,1,max} < 1 then Append
Else if sim_{k,2,max} < 0.9 then Append
Else if sim_{k,3,max} < 0.95 then Append
Else if SM_{k,max} < 0.89 then Append
End Retention
    
```

其中 Append 表示将该案例添加到案例库中. 推理系统通过案例保存机制, 根据所检索案例得到的控制结果对案例库进行更新, 从而实现了本文方法对工况变化的自适应控制.

4 实验研究

以某钢厂的层流冷却生产过程为背景, 利用实际的采样数据 45 组, 在带钢的入口温度发生大幅度波动时, 对所提出的智能设定方法进行实验研究, 并与文献[12]的结果进行比较

带钢的入口温度如图 4 所示 以第 27 个采样点为例, 对实验结果进行分析 工况描述特征如表 2 所示, 其中硬度等级为 341, 水温为 29 , 厚度为 11. 14 mm, 目标卷取温度为 600 .

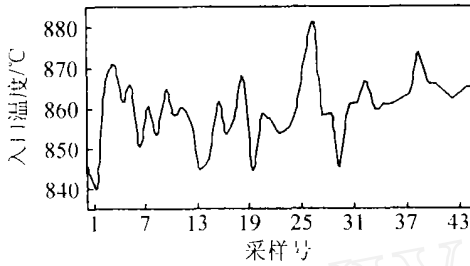


图 4 带钢的入口温度

表 2 工况描述

G_r	T_c	T_e	v	d	T_w	N	k
341	600	881	3. 14	11. 14	29	45	27

根据上述工况描述特征, 案例检索到的解和卷取温度控制的精度列于表 3 由表 2 和表 3 可以看出, 对于所考察的采样点, 没有对应于入口温度(881)的存贮工况, 在案例库中检索到的匹配案例的相似度为 0. 65, 案例相似度较低 利用匹配案例的解直接进行控制, 统计分析得到的 \bar{T} 为 616. 3 , 对应的 ΔT 为 16. 3 > 15 , 不满足精度要求, 需要进行案例修正 案例修正后带钢的卷取温度控制结果如图 5 所示

表 3 检索及控制结果

v	SM _{27,max}	H_{27}^L	\bar{T}	ΔT	H_{27}	T_0
3. 20	0. 65	34	616. 3	16. 3	40	599

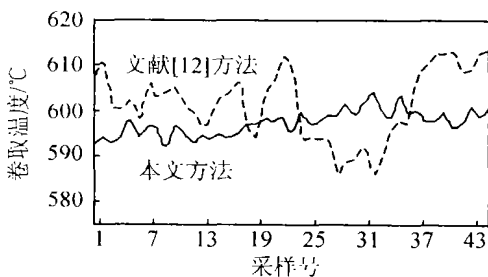


图 5 卷取温度控制结果比较

案例修正后该采样点的卷取温度为 599 , 控制精度显著提高 由图 5 可以看出, 本文方法基本可以将卷取温度控制到目标温度 ± 8 的范围之内,

控制精度明显高于文献[12], 修正后的案例将作为一个新案例存入库中 随着推理过程的进行, 系统对各种工况的适应能力不断提高, 控制精度也得到不断的改善

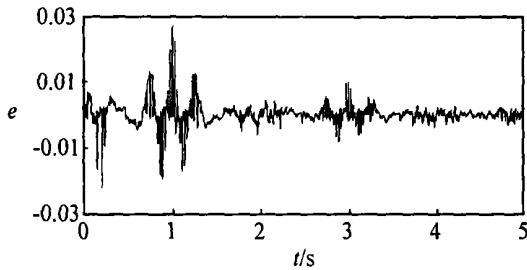
5 结 论

热轧层流冷却过程具有分布参数、非线性和时变等综合复杂特性, 动态特性随生产工况而变化, 运行带钢的温度不能连续测量, 常规控制方法难以实现直接的闭环控制 本文提出了基于案例推理的层流冷却过程喷水系统的设定方法, 根据冷却过程当前工况的案例描述特征进行推理, 以获得喷水系统的设定量 基于现场数据的实验研究表明, 所提出的智能设定方法具有随工况变化的自适应、自学习功能, 取得了良好的控制效果

参考文献 (References)

- [1] Auman P M, Griffiths D K, Hill D R. Hot strip mill run-out table temperature control[J]. *Iron and Steel Engineer*, 1967, 44(9): 174-179
- [2] Groch A G, Gubernat R, Birstein E R. Automatic control of laminar flow cooling in continuous and reversing hot strip mills[J]. *Iron and Steel Engineer*, 1990, 67(8): 16-20
- [3] Moffat R W, Moore M C, Robinson M J, et al. Computer control of hot strip coiling temperature with variable flow laminar spray[A]. *AISE Year Book* [C]. Pittsburgh, 1985: 474-481
- [4] Van Ditzhuijzen G. The controlled cooling of hot rolled strip: A combination of physical modelling, control problems and practical adaptation[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1993, 38(7): 1060-1065
- [5] Iwamoto M, Jeyerajan M, Wada H. Process control computer system of Fukuyama No2 hot strip mill[R]. Nippon Kokan Fukuyama Works Tech Rep 46. 1986
- [6] Chai T Y, Tan M H, Chen X Y, et al. Intelligent optimization control for laminar cooling[A]. *Proc of the 15th IFA C World Congress* [C]. Barcelona, 2002: 181-186
- [7] 柴天佑, 王笑波. RBF 神经网络在加速冷却控制系统中的应用[J]. *自动化学报*, 2000, 26(2): 219-225 (Chai T Y, Wang X B. Application of RBF neural networks in control system of the slab accelerating cooling process[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(2): 219-225
- [8] Chai T Y, Guan S P. Object-oriented integrated control technology of complex industrial processes[A]. *Proc IFA C 5th Symp on Low Cost Automation* [C]. Plenary, 1998: 1-3

(下转第 307 页)



(d) 网络预测对于实际输出误差序列

图2 算法3部分实验结果

上述试验结果取得了令人满意的效果。3种算法完全克服了传统的学习算法可能存在的欠学习或过学习以及局部最小点问题, 具有较快的在线学习速度和良好的抗噪声和预测性能, 网络预测输出完全能跟踪上述快速时变系统的实际输出。在这方面, 传统的算法还少有较好的应用示例。

从表1和图2可以看出, 算法3不仅在线学习速度快, 而且具有良好的预测性能, 它尤其适合实时控制等领域。

5 结 论

传统的前向神经网络在线学习算法, 大多将注意力集中于改进误差反向传播算法和提高网络学习速度, 以满足网络在线学习的要求, 理论方面进展并不大, 大多源于梯度下降的思想; 如果搜索步长选择不当, 不仅降低了网络学习的收敛速度, 而且容易陷入局部最小点, 从而降低了网络的预测性能。本文提出的算法从理论上确保了网络学习性能的优化, 通过动态调整网络结构和权值来提高网络的在线预测性能, 从而使其具有快速跟踪时变系统的能力。本文算法具有较好的理论基础和应用价值, 可以推广应用用于其他机器学习领域。

参考文献 (References)

- [1] Martin T Hagan, Howard B Demuth, Mark Beale. *Neural network design* [M]. Boston: PWS Publishing Company, 1996: 60-97.
- [2] Engozinger S, Tom sen E. An accelerated learning algorithm for multilayer perceptrons: Optimization layer by layer [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1995, 6(1): 31-42.
- [3] Robert S Scalero, Nazif Tepedelenioglu. A fast new algorithm for training feedforward networks [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1992, 40(1): 202-210.
- [4] 李冬梅, 王正欧. 提高前向神经网络泛化性能和实时性能的新算法 [J]. *电机与控制学报*, 2002, 6(3): 241-264.
(Li D M, Wang Z O. A new algorithm for improving the generalization performance and real-time ability of feedforward neural networks [J]. *Electric Machines and Control*, 2002, 6(3): 241-264.)
- [5] 叶军, 张新华. 多层前向神经网络的快速学习算法及其应用 [J]. *控制与决策*, 2002, 17(增刊): 817-819.
(Ye J, Zhang X H. High speed learning algorithm for a multilayer feedforward neural network and its application [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(S): 817-819.)
- [6] Chng E S, Chen S, Mulgrew B. Gradient radial basis function networks for nonlinear and nonstationary time series prediction [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1996, 7(1): 190-194.
- [7] 张铃. 基于核函数的SVM与三层前向神经网络的关系 [J]. *计算机学报*, 2002, 25(7): 696-700.
(Zhang L. The relationship between kernel functions based SVM and three-layer feedforward neural networks [J]. *Chinese J of Computers*, 2002, 25(7): 696-700.)
- [8] 边肇祺, 张学工. *模式识别* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 300-303.

(上接第302页)

- [9] 蔡自兴, 陈海燕, 魏世勇. 智能控制工程研究的进展 [J]. *控制工程*, 2003, 10(1): 1-6.
(Cai Z X, Chen H Y, Wei S Y. Recent advances in research of intelligent control engineering [J]. *Control Engineering of China*, 2003, 10(1): 1-6.)
- [10] Kolodner J L. *Case-based reasoning* [M]. New York:

Morgan Kaufmann, 1993.

- [11] 谭明皓. 基于案例推理的热轧层流冷却过程建模与控制研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2004.
- [12] 单旭沂. 宝钢2050mm热轧层流冷却控制系统改造开发 [A]. *中国科技年会* [C]. 杭州, 1999: 1-4.