

基于案例推理的层流冷却过程建模

谭明皓, 柴天佑

(东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对具有非线性, 参数时变, 分布参数等综合复杂特性的热轧层流冷却过程, 将机理建模方法与案例推理技术相结合, 通过使用层流冷却过程中带钢的运行工况构造案例, 在案例库中检索与其匹配的历史案例, 利用实际工况的特征与匹配工况的特征经过推理给出当前工况的模型参数, 从而确定层流冷却过程的动态模型. 利用这一模型可以预测整个冷却过程中带钢的温度变化过程. 通过某钢铁公司热轧层流冷却过程实际数据的实验比较表明所提出的建模方法是有效的.

关键词: 层流冷却过程; 智能建模; 机理模型; 案例推理

中图分类号: F273 **文献标识码:** A

Modeling of the laminar cooling process with case-based reasoning

TAN Ming-hao, CHAI Tian-you

(Research Centre of Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: A hybrid modeling approach integrating case-based reasoning (CBR) into the first principles process model is developed for the laminar cooling process, which is difficult to describe with accurate mathematical models due to its complex nature (e. g., highly nonlinear, time varying, and spatially varying). The past cases most similar to the current operating condition are retrieved from the case base. The model parameters of the finite difference model for the current operating condition are found by reusing the solutions of the retrieved cases. The finite difference model can predict the through-thickness temperature evolutions of the moving strip during the cooling process. Experimental studies based on the industrial data from a steel company show the effectiveness of the proposed modeling approach.

Key words: laminar cooling process; intelligent modeling; first principles model; case-based reasoning

1 引言 (Introduction)

在热轧生产中, 为保证产品具有良好的性能, 采用层流冷却装置对热轧后的板带进行冷却控制. 由于在冷却过程中带钢的温度不能在线连续检测, 层流冷却过程的建模问题成为层流冷却过程控制的关键^[1-3]. 文献[4]建立的层流冷却过程模型是冷却区温降和喷水量之间的简单代数方程; 文献[5]用统计方法建立了层流冷却过程的简化传热方程, 在一定程度上改进了精度; 文献[6]利用冷却区温降与输入量(喷水量)之间的经验模型来进行控制; 文献[7]基于总热量平衡建立了冷却过程的经验模型; 文献[8]忽略了沿板带厚度方向的热传导, 并假设层流冷却过程的模型为简单的延时环节来进行反馈控制器设计; 文献[9]建立了层流冷却过程的数值模型, 换热系数由具体冷却设备的现场实验来确定, 且随着工

况的变化而变化, 该模型只能用于离线分析.

层流冷却过程的边界条件变化剧烈, 代表过程传热特性的换热系数、导热系数等关键系数具有非线性和时变等综合复杂特性, 对其准确描述成为建立层流冷却过程模型的关键. 本文将传热过程的机理建模方法与案例推理^[10-12] (Case-Based Reasoning, 简称 CBR) 技术相结合, 使用层流冷却过程中带钢的运行工况, 采用案例推理的方法获得传热过程的参数, 从而建立当前工况下的层流冷却过程模型. 实验研究表明所提的方法明显改善了层流冷却过程的建模精度.

2 层流冷却过程简介 (Description of the laminar cooling process)

层流冷却装置的示意图如图 1 所示. 其中: D_1 为 X 射线测厚仪, P_1 和 P_2 为红外高温计, P_1 和 P_2

之间的区域为层流冷却区.带钢在 F7 精轧机架检测速度后,进入输出辊道上的冷却区域进行强制喷水冷却.在冷却区上下对称地设置了 19 组喷水架,每组喷水架由 4 个冷却单元组成,每个冷却单元的水流量恒定,由一个阀门来控制.根据每组喷水架中 4 个冷却单元的打开和关闭状态,定义喷水模式如表 1 所示.其中,“1”为相应冷却单元打开;“0”为相应冷却单元关闭.在冷却区头部有一段 4.62 m 的空冷区,在卷取测温仪 P2 之前有一段 10.10 m 的空冷区,以保证温度检测可靠.

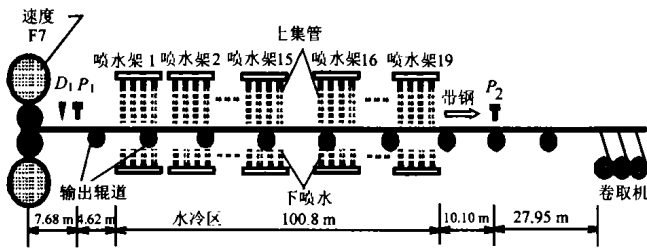


图 1 层流冷却过程示意图

Fig. 1 General layout of the laminar cooling process

表 1 喷水模式
Table 1 Spray patterns

喷水模式	冷却单元状态
A	1111
B	1110
C	1010
D	1000

层流冷却装置通过对喷水长度和分布进行控制使冷却过程中带钢内部温度随工艺设定的温度而变化,以保证成品带钢的质量.带钢内部温度场的变化受到带钢的材质、厚度、终轧温度等边界条件波动,以及冷却单元开启和冷却单元的流量等因素的影响.将带钢厚度方向上分为 M 层,则冷却系统的输入输出关系如图 2 所示.

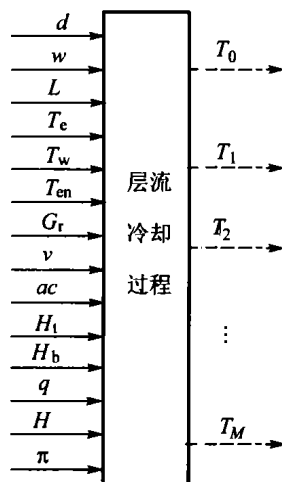


图 2 层流冷却过程输入输出关系

Fig. 2 Input/output relationship of the laminar cooling process

其中: d 为带钢厚度, w 为带钢宽度, L 为带钢长度, G_r 为带钢硬度等级, T_c 为带钢入口温度, T_w 为水温, T_{en} 为环境温度, v 为带钢速度, ac 为带钢加速度; H_i 为上起始冷却单元, H_b 为下起始冷却单元, H 为冷却单元开启数, q 为冷却单元流量, π 为喷水模式, T_0 为带钢上表面温度, T_1, \dots, T_{M-1} 为带钢内部节点温度, T_M 为带钢下表面温度.

3 层流冷却过程的机理模型 (First principles model of the laminar cooling process)

热轧层流冷却过程的传热机理非常复杂,主要分为板带表面与冷却水的热交换,板带与环境的热交换,以及板带内部的热传导过程.对于在层流冷却区中运动的板带,其传热过程服从热力学第一定律和 Fourier 定律,具体描述如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

其中: x 为板带长度方向距离, T 为板带温度, τ 为时间, y 为板带厚度方向坐标, z 为板带宽度方向坐标, λ 为导热系数, ρ 为密度, c_p 为比热容, \dot{Q} 为板带内部单位时间和单位体积的发热率.

对公式(1)进行简化,忽略板带内部产生的热量和宽度方向的热传导,并沿轧制方向对板带进行定时采样,得板带第 i 采样点在冷却过程中的温度场分布形式如下^[13]:

$$\frac{\partial T_i(y, t(i))}{\partial t(i)} = a \frac{\partial^2 T_i(y, t(i))}{\partial y^2} \quad (2)$$

初始条件为

$$T_i(y, t(i)) = T_i^1(y), \quad (3)$$

边值条件为

$$\lambda \frac{\partial T_i(y, t(i))}{\partial y} \Big|_{y=\frac{d_i}{2}} =$$

$$\alpha_0 [T_{w0}(x_{k0} + \int_{t(i)}^{t(i)} v(t) dt, t) - T(\frac{d_i}{2}, t(i))], \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T_i(y, t(i))}{\partial y} \Big|_{y=-\frac{d_i}{2}} =$$

$$\alpha_M [T_{wM}(x_{i0} + \int_{t(i)}^{t(i)} v(t) dt, t) - T(-\frac{d_i}{2}, t(i))], \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_i(y, t(i))}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0. \quad (6)$$

其中: a 为板带的导温系数, $T_i(y, t(i))$ 为板带第 i 采样点在厚度坐标为 y 时刻为 $t(i)$ 时的温度, λ 为

板带的导热系数, T_{w0}, T_{wM} 为板带上、下表面的冷却水温度, α_0, α_M 为板带上、下表面的对流换热系数, d_i 为板带在第 i 采样点处的厚度, x_{i0} 为板带第 i 采样点在其开始跟踪时刻 t_{i0} 的初始坐标.

4 基于案例推理的层流冷却过程建模策略 (Case-based modeling strategy for the laminar cooling process)

基于案例推理的层流冷却过程智能建模策略如图3所示. 系统首先提取当前运行工况的描述特征, 并根据这一描述特征在案例库中检索与当前工况相似的历史案例. 通过对所检出的相似工况的传热参数进行重用, 得到当前工况的模型参数. 由式(12)~(17)计算换热系数、导热系数和导温系数, 然后通过对卷取温度采样值与预测值进行统计误差分析, 对模型参数的有效性进行评价. 如果达不到指定的精度, 需要对其进行修正, 直至卷取温度的预测精度达到要求. 修正后的案例用于更新动态模型中的换热系数、导热系数并存入案例库中.

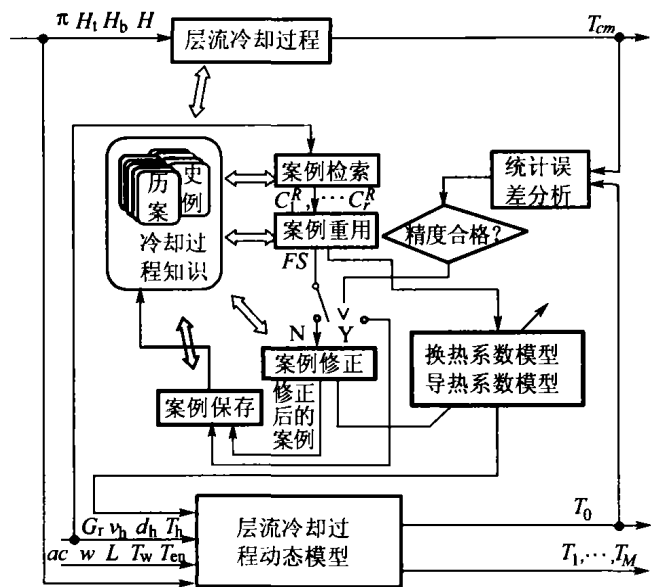


图3 基于案例推理的层流冷却过程智能建模策略
Fig. 3 Case-based modeling strategy for the laminar cooling process

4.1 层流冷却过程动态模型 (Dynamic model of the laminar cooling process)

将板带沿厚度方向分为 $M + 1$ 个节点, 对公式(2)~(6)按照厚度与时间进行有限差分处理得^[14]

$$(1 + a_0 \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2} + a_0 \frac{\Delta\Gamma\alpha_0}{\Delta y\lambda_0})T_0(n+1) - a_0 \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_1(n+1) = (1 - a_0 \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2} - \frac{a_0\Delta\Gamma\alpha_0}{\Delta y\lambda_0})T_0(n) + a_0 \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_1(n) + 2 \frac{a_0\Delta\Gamma\alpha_0}{\Delta y\lambda_0}T_w, \quad (7)$$

$$(2 + 2 \frac{a_j\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2})T_j(n+1) - \frac{a_j\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_{j-1}(n+1) - \frac{a_j\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_{j+1}(n+1) = \frac{a_j\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_{j-1}(n) + (2 - 2 \frac{a_j\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2})T_j(n) + \frac{a_j\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_{j+1}(n), \quad j = 1, 2, \dots, M-1, \quad (8)$$

$$(1 + a_M \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2} + a_M \frac{a_M\Delta\Gamma}{\Delta y\lambda_M})T_M(n+1) - a_M \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_{M-1}(n+1) = a_M \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2}T_{M-1}(n) + (1 - a_M \frac{\Delta\Gamma}{(\Delta y)^2} - a_M \frac{\Delta\Gamma\alpha_M}{\Delta y\lambda_M})T_M(n) + 2a_M \frac{\Delta\Gamma\alpha_M}{\Delta y\lambda_M}T_w. \quad (9)$$

式(7)和式(9)分别为板带上下表面的换热方程, 式(8)描述了板带内部的热传导. 其中: j 为厚度方向节点 ($j = 0, 1, \dots, M$), n 为时间节点, $\Delta\Gamma$ 为时间差分步长, Δy 为厚度差分步长, T_w 为冷却水的温度, $T_j(n)$ 为节点 j 在经过 $n\Delta\Gamma$ 时间后的温度, T_0 为上表面温度, T_M 为下表面温度, a_j 为节点 j 处的导温系数; λ_0, λ_M 为上表面和下表面的导热系数; α_0, α_M 为上表面和下表面的换热系数.

为了提高层流冷却过程模型的精度, 准确确定换热系数 α_0, α_M , 导热系数 λ_0, λ_M 和导温系数 a_j ($j = 0, M$) 是关键. 在水冷条件下, 由于带钢与冷却水的热交换系数与喷水强度、带钢表面温度、带钢速度等因素有关, 因而将上表面和下表面的水冷换热系数建模如下^[14]:

$$\alpha_0 = (2 - ((H_c - H_t)/10 + 1)^{0.12})\gamma_1 \cdot (\frac{v}{1.1v_h})^{\gamma_2} (\frac{d}{d_h})^{\gamma_3} (\frac{T_0}{T_h})^{\gamma_4} (\frac{q}{q_0})^{\gamma_5}, \quad (10)$$

$$\alpha_M = (2 - ((H_c - H_b)/10 + 1)^{0.12})\gamma_1 \cdot (\frac{v}{1.1v_h})^{\gamma_2} (\frac{d}{d_h})^{\gamma_3} (\frac{T_M}{T_h})^{\gamma_4} (\frac{q}{q_0})^{\gamma_5}. \quad (11)$$

其中: H_c 是给定冷却单元的序号; v, d, T_j ($j = 0, M$) 和 q 是在给定冷却单元处带钢的速度、厚度、表面温度和冷却水流量; v_h, d_h, T_h 是带钢头部在冷却区入口的速度、厚度、温度; $q_0 = (q_{min} + q_{max})/2$, q_{min} 为冷却单元最小流量, q_{max} 为冷却单元最大流量. $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ 是待定参数, 由于文中冷却单元的流量恒定, 所以 $\gamma_5 = 0$, 这样公式(10), (11)就

简化为如下的形式:

$$\alpha_0 = (2 - ((H_c - H_1)/10 + 1)^{0.12}) \gamma_1 \cdot \left(\frac{v}{1.1 v_h}\right)^{\gamma_2} \left(\frac{d}{d_h}\right)^{\gamma_3} \left(\frac{T_0}{T_h}\right)^{\gamma_4}, \quad (12)$$

$$\alpha_M = (2 - ((H_c - H_b)/10 + 1)^{0.12}) \gamma_1 \cdot \left(\frac{v}{1.1 v_h}\right)^{\gamma_2} \left(\frac{d}{d_h}\right)^{\gamma_3} \left(\frac{T_M}{T_h}\right)^{\gamma_4}. \quad (13)$$

上表面和下表面的导热系数计算公式如下^[1]:

$$\lambda_j = 56.43 - (0.0363 - c(v - 1.1 \cdot v_h)) \times T_j (j = 0, M). \quad (14)$$

其中: c 为待定参数, v 为带钢的瞬时速度, T_j 为节点 j 的瞬时温度.

在无喷水的区域, 上表面和下表面的空冷换热系数由下面的公式计算^[14]:

$$\alpha_0 = \sigma \times \epsilon \times \frac{(T_0^4 - T_{en}^4)}{T_0 - T_{en}} + 6.5 + 5.5 \times v^{0.8}, \quad (15)$$

$$\alpha_M = 0.8 \times \sigma \times \epsilon \times \frac{(T_0^4 - T_{en}^4)}{T_0 - T_{en}}. \quad (16)$$

其中: σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, ϵ 为黑度, $\epsilon = 0.82$.

带钢的导温系数计算方法如下^[14]:

$$a_j = g(T_j) = \begin{cases} 8.65 + (5.0 - 8.65)(T_j - 400)/250, & T_j \in [400, 650), \\ 5.0 + (2.75 - 5.0)(T_j - 650)/50, & T_j \in [650, 700), \\ 2.75 + (5.25 - 2.75)(T_j - 700)/100, & T_j \in [700, 800), \\ 5.25 + 0.00225(T_j - 800), & T_j \in [800, 1000), \\ j = 0, 1, \dots, M. \end{cases} \quad (17)$$

由于上述模型参数 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, c$ 随工况的变化而变化, 本文采用案例推理技术来确定上述参数.

4.2 案例的构造与检索 (Case representation and retrieval)

层流冷却过程的工况按照一定的结构进行组织并以案例的形式存贮于案例库中. 每个案例由工况描述和解组成. 带钢的导热系数作为物性参数, 受带钢材质和温度的影响; 同时, 厚度也影响带钢内部的热传导, 另外换热系数与带钢的运行速度和喷水强度 q 有关. 由于 q 已知, 因而将工况描述选为硬度等级 G_r 、带钢温度 T_h 、厚度 d_h 和速度 v_h , 分别用 f_1, f_2, f_3 和 f_4 表示, 案例的解 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 和 c 分别用 fs_1, fs_2, fs_3, fs_4 和 fs_5 表示. 案例的信息存贮结构见表 2.

表 2 案例结构

Table 2 Case structure

工况描述 F				解 FS				
f_1	f_2	f_3	f_4	fs_1	fs_2	fs_3	fs_4	fs_5
G_r	v_h	d_h	T_h	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	c

推理系统根据工况描述, 即硬度等级、表面温度、厚度和速度来进行案例检索和匹配. 由于硬度等级和厚度对模型参数的影响较大, 作为主索引, 速度和温度作为从索引. 在检索过程中, 利用库的索引结构, 计算相似度函数, 检索出满足匹配阈值的所有案例.

首先定义层流冷却过程的当前运行工况为 C_{in} , 定义 C_{in} 的工况描述为 $F = (f_1, f_2, f_3, f_4)$, C_{in} 的解为 $FS = (fs_1, fs_2, fs_3, fs_4, fs_5)$. 定义库中案例为 C_1, C_2, \dots, C_m , 其中案例 $C_k (k = 1, \dots, m)$ 的工况描述为 $F_k^P = (f_{k,1}^P, f_{k,2}^P, f_{k,3}^P, f_{k,4}^P)$, C_k 的解为

$$FS_k^P = (fs_{k,1}^P, fs_{k,2}^P, fs_{k,3}^P, fs_{k,4}^P, fs_{k,5}^P). \quad (18)$$

工况描述特征 f_1 与 $f_{k,1}^P$ 的相似度函数为

$$\text{sim}(f_1, f_{k,1}^P) = \begin{cases} 1, & f_1 = f_{k,1}^P, \\ 0.9, & 1 < |f_1 - f_{k,1}^P| \leq 3, \\ 0.7, & 3 < |f_1 - f_{k,1}^P| \leq 10, \\ 0.3, & 10 < |f_1 - f_{k,1}^P| \leq 25, \\ 0, & |f_1 - f_{k,1}^P| > 25. \end{cases} \quad (19)$$

工况描述特征 f_l 与 $f_{k,l}^P (l = 2, \dots, 4)$ 的相似度函数为

$$\text{sim}(f_l, f_{k,l}^P) = 1 - \frac{|f_l - f_{k,l}^P|}{\max(f_l, f_{k,l}^P)} (k = 1, \dots, m). \quad (20)$$

当前工况 C_{in} 与库中案例 $C_k (k = 1, \dots, m)$ 的相似度函数为^[10]

$$\text{SIM}(C_{in}, C_k) = \frac{\sum_{l=1}^4 \omega_l \times \text{sim}(f_l, f_{k,l}^P)}{\sum_{l=1}^4 \omega_l}, \quad (21)$$

$$\text{SIM}_{\max} = \max_{k \in \{1, \dots, m\}} (\text{SIM}(C_{in}, C_k)). \quad (22)$$

其中 ω_l 是工况描述特征的加权系数. 根据经验知识与凑试, 确定加权系数与相似度阈值 SIM_{th} 如下:

$$\omega_1 = 3, \omega_2 = 0.67, \omega_3 = 2, \omega_4 = 1.6,$$

$$\text{if } \text{SIM}_{\max} \geq 0.9$$

$$\text{then } \text{SIM}_{th} = 0.9 \quad (23)$$

$$\text{else } \text{SIM}_{th} = \text{SIM}_{\max}. \quad (24)$$

计算出相似度后, 库中与给定工况的相似度达到阈

值 sim_{th} 的所有历史工况都被检出作为匹配案例。

4.3 案例重用 (Case reuse)

由于一般情况下库中不存在与当前工况完全匹配的工况,因而检索出的匹配工况的解参数并不能直接作为当前工况的传热参数,这时就需要对检索得到的相似案例解进行重用.即 CBR 系统将根据新案例的具体情况对检索到的存贮案例解进行调整以得到输入案例的解.案例调整是根据输入工况的情况与检索到的存贮工况之间的最主要差异,利用已有的过程知识得出当前工况的传热参数.

假设在库中共检索到 r 个匹配案例, $\{C_1^R, \dots, C_r^R\}$, 其中 $C_k^R (k = 1, \dots, r)$ 与当前工况的相似度为 SIM_k , 不妨设 $SIM_1 \leq SIM_2 \leq \dots \leq SIM_r \leq 1$. 其对应的案例解为

$$FS_k^R = (fs_{k,1}^R, fs_{k,2}^R, fs_{k,3}^R, fs_{k,4}^R, fs_{k,5}^R), k = 1, \dots, r.$$

当前工况的案例解为 $FS = (fs_1, fs_2, fs_3, fs_4, fs_5)$, 其中

$$fs_l = \frac{\sum_{k=1}^r w_k \times fs_{k,l}^R}{\sum_{k=1}^r w_k}, l = 1, \dots, 5. \quad (25)$$

其中 $w_k (k = 1, \dots, r)$ 按下式确定:

$$\begin{aligned} & \text{if } SIM_r = 1, \\ & \text{then } w_k = \begin{cases} 1, & k = r \\ 0, & k \neq r, \end{cases} \\ & \text{else } w_k = SIM_k, k = 1, \dots, r. \end{aligned} \quad (26)$$

4.4 案例修正与案例保存 (Case revision and retention)

为验证案例重用所得到的换热参数的有效性,需要对其进行评价.首先根据案例重用的解计算换热系数和导热系数,并利用式(7)~(9)计算各采样点的卷取温度.然后由下式计算 ΔT :

$$\Delta T = \sum_{i=1}^N |T_0(i) - T_{cm}(i)| / N. \quad (27)$$

其中: N 为带钢的卷取温度采样次数, $T_0(i)$ 为案例重用后模型预测的卷取温度, $T_{cm}(i)$ 为采样点 i 的卷取温度采样值 ($i = 1, \dots, N$). 如果 $\Delta T < 10^\circ\text{C}$, 则直接转入案例保存. 如果 $\Delta T > 10^\circ\text{C}$, 则需要进行案例修正来改善模型的精度, 修正后的案例将保存到案例库中. 案例修正的流程图如图 4 所示. 整个系统的建模精度在运行过程中随着案例库中积累的工况和知识的增加而不断改善, 从而实现了运行工况变化的自适应.

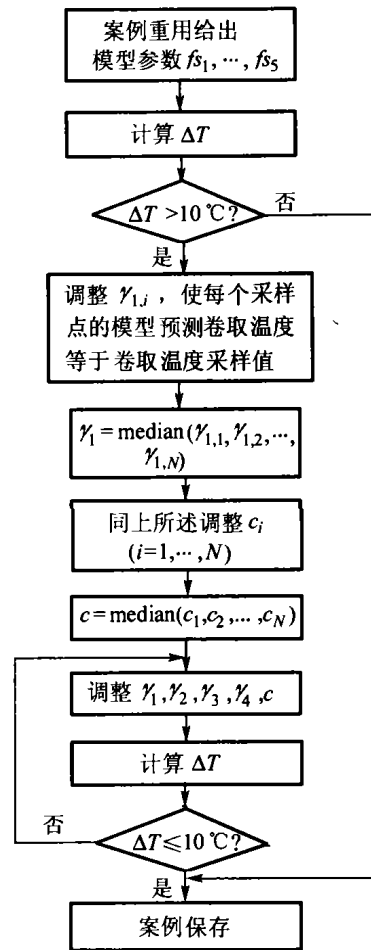


图 4 案例修正流程图

Fig. 4 Flow chart for case revision

5 实验研究 (Experimental studies)

以某钢厂的层流冷却生产过程为背景, 利用实际的冷却过程带钢采样数据 54 点, 硬度等级为 250, 环境温度为 31°C , 厚度为 15.8 mm. 在案例库中无此工况的情况下, 对本文所提出的建模方法进行了实验研究, 并与文献[15]的模型预测结果进行了比较.

表 3 工况描述特征

Table 3 Case descriptors

G_r	d_h	v_h	T_h
250	15.8	2.34	844

工况描述特征如表 3 所示, 根据上述工况描述, 在案例库中检索得到 1 个案例, 相似度为 0.37. 案例重用得到的解和模型预测的精度列于表 4, 温度预测结果如图 5 所示.

由表 4 可知在 54 个采样点中, 本文模型有 30 点达到了实测温度 $\pm 10^\circ\text{C}$ 的范围, 而文献[15]模型为 24 点, 显然本文模型的精度高于文献[15]模型, 温度预测结果的比较见图 6. 由表 4 看到, 案例重用后模型的平均温度预测误差为 11.2°C , 需要进行案例修正. 案例修正得到的解和模型预测的精度列于

表 5, 温度预测曲线的比较如图 6 所示.

表 4 案例重用的实验结果及精度比较
Table 4 Experimental results of case reuse and accuracy comparison

γ_1		γ_2		γ_3		γ_4		c	
3450		0.75		1.12		1.2		0.0054	
sim	检出案例	N	ΔT	实测温度 $\pm 10^\circ\text{C}$					
				本文模型	文献[15]模型				
0.37	1	54	11.2	30		24			

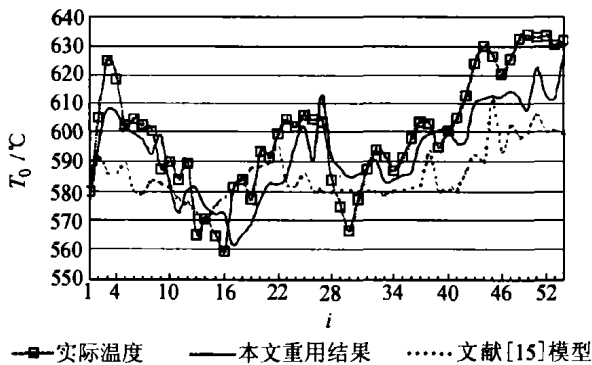


图 5 案例重用后的卷取温度预测结果

Fig. 5 Coiling temperature predictions after case reuse

由表 5 和图 6 可以看出, 经过案例修正本文模型的预测效果进一步改善. 由表 5 可以看出, 预测温度在实际温度 $\pm 10^\circ\text{C}$ 范围内的采样点由 30 点增加到了 39 点, 平均温度预测误差降到了 8.7°C . 修正后的案例将作为一个新案例存入库中. 由此仿真过程可以看出, 随着推理的进行, 所建模型对各种工况的适应能力不断增强, 模型的预测精度也得到不断的提高.

表 5 案例修正的结果及精度比较
Table 5 Results from case revision and accuracy comparison

γ_1		γ_2		γ_3		γ_4		c		ΔT	
4527		0.90		1.10		1.35		0.005		8.7	
										实测温度 $\pm 10^\circ\text{C}$	
										本文模型	文献[15]模型
										39	24

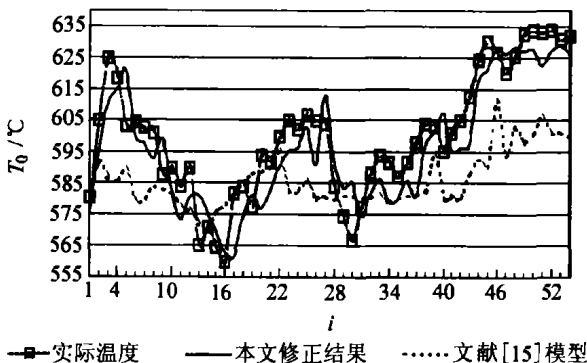


图 6 案例修正后的卷取温度预测结果

Fig. 6 Coiling temperature predictions after case revision

6 结论(Conclusion)

层流冷却装置的传热特性受喷水冷却以及工况的影响, 关键参数随生产工况而变化, 传热参数的估计是提高建模精度的关键和难点. 本文结合层流冷却过程的动态模型和案例推理技术, 利用案例推理估计模型参数, 从而建立层流冷却过程的动态模型. 通过某钢厂热轧层流冷却过程的实验研究表明, 所提的建模方法具有随工况变化的自适应自学习功能, 明显提高了层流冷却过程的建模精度. 本文提出的建模方法对解决复杂工业过程的建模问题具有重要意义.

参考文献(References):

- [1] CHAI Tianyou, TAN Minghao, CHEN Xiaoyan, et al. Intelligent optimization control for laminar cooling [C] // Proc of the 15th IFAC World Congress. Barcelona, Spain: Elsevier Science, 2002.
- [2] 关守平, 柴天佑, 高军. 中厚钢板加速冷却过程混合式优化控制模型的研究[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 529 - 533. (GUAN Shouping, CHAI Tianyou, GAO Jun. The optimal model of hybrid control for the laminar cooling process of hot rolled slab [J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(4): 529 - 533.)
- [3] 王仲初, 柴天佑. 基于模型的中厚板水幕连续冷却的前馈-反馈控制系统[J]. 自动化学报, 2000, 26(B): 163 - 167. (WANG Zhongchu, CHAI Tianyou. Model-based feedforward-feedback control system of continuous water-curtain cooling for plate [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(B): 163 - 167.)
- [4] 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.
- [5] 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(9): 16 - 20.
- [6] MOFFAT R W, MOORE M C, ROBINSON M J, et al. Computer control of hot strip coiling temperature with variable flow laminar spray [C] // AISE Year Book. Pittsburgh: [s. n.], 1985: 474 - 481.
- [7] LEITHOLF M D, DAHM J R. Model reference control of runout table cooling at LTV [C] // AISE Year Book. Pittsburgh: [s. n.], 1989: 255 - 259.
- [8] 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.
- [9] EVANS J F, ROEBUCK I D, WALKINS H R. Numerical modeling of hot strip mill runout table cooling [J]. Iron and Steel Engineer, 1993, 70(1): 50 - 55.
- [10] KOLODNER J L. Case-Based Reasoning [M]. California: Morgan Kaufmann, 1993.

- 277 - 290.
- [53] KARNIK N N, MENDEL J M. Introduction to type-2 fuzzy logic systems [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998: 915 - 920.
- [54] KARNIK N N, MENDEL J M. Operations on type-2 fuzzy sets [J]. *Fuzzy Sets Systems*, 2001, 122(2): 327 - 348.
- [55] JOHN R I, INNOCENT P R, BARNES M R. Neuro-fuzzy clustering of radiographic tibia image data using type-2 fuzzy sets [J]. *Information Sciences*, 2000, 125(1/4): 65 - 82.
- [56] FRANK Chung-hoon, HWANG Cheul. An interval type-2 fuzzy perceptron [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002, 2: 1331 - 1335.
- [57] AJIT N, Tammy M. Quantum artificial neural network architectures and components [J]. *Information Sciences*, 2000, 128(3): 231 - 255.
- [58] GOPATHY P, NICOLAOS B. Karayiannis. Quantum neural networks (QNN's): Inherently fuzzy feed forward neural networks [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1997, 8(3): 679 - 693.
- [59] CHRISLEY R L. *Bohman quantum neural networks* [R]. Brighton: School of Cognitive & Computing Sciences, University of Sussex, 2000.
- [60] RUTKOWSKI L, CPALKA K. Flexible neuro-fuzzy systems [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2003, 14(3): 554 - 574.

作者简介:

孙富春 (1964—),男,清华大学计算机科学与技术系教授,博士生导师,主要研究领域包括智能系统理论、网络控制与管理、机器人动力学与智能控制等, E-mail: sfc@s1000e.sc.tsinghua.edu.cn;

李莉 (1978—),女,2003年获西北工业大学硕士学位,现为清华大学计算机系博士研究生,研究方向主要是模糊自适应控制、神经网络控制;

孙增圻 (1943—),男,清华大学计算机科学与技术系教授,博士生导师,当前研究领域为月球探测机器人、足球机器人、空间遥操作系统和模糊神经网络理论, E-mail: szq-dcs@tsinghua.edu.cn.

(上接第253页)

- [11] WATSON I, MARIR F. Case-based reasoning: A review [J]. *Knowledge Engineering Review*, 1994, 9(4): 355 - 381.
- [12] AAMODT A, PLAZA E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations and system approaches [J]. *AI Communications*, 1994, 7(1): 39 - 59.
- [13] 王笑波,任德祥,邵惠鹤,等.一种多层次递阶建模方法[J].系统仿真学报,2001,13(S1):18-20.
(WANG Xiaobo, REN Dexiang, SHAO Huihe, et al. A hierarchical modeling method [J]. *J of System Simulation*, 2001, 13(S1): 18 - 20.)
- [14] 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].东北大学,2004.
(TAN Minghao. *Case-based modeling and control of the laminar cooling process on the runout table* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2004.)
- [15] 单旭沂.宝钢2050mm热轧层流冷却控制系统改造开发[C]//中国科技年会论文集.杭州:冶金工业出版社,1999.
(SHAN Xuyi. Transformation and development of Baosteel 2050mm hot strip mill laminar cooling control system [C]// *Proc of Chinese Conference on Science and Technology*. Hangzhou: Metallurgical Industry Press, 1999.)

作者简介:

谭明皓 (1972—),男,博士,研究方向为复杂工业过程的建模与控制, E-mail: timhowe@21cn.com;

柴天佑 (1947—),男,东北大学国家冶金自动化工程技术研究中心主任,教授,工程院院士,研究领域为自适应控制、智能控制与综合自动化系统.