

结合 BFO 及 CBR 的层流冷却水量优化设定方法*

片锦香^{1,2} 朱云龙¹ 刘金鑫¹ 柴天佑³

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所信息服务与智能控制研究室 沈阳 110016;

2. 沈阳建筑大学信息与控制工程学院 沈阳 110168; 3. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110189)

摘要: 层流冷却过程控制目标是保证带钢卷取温度进入目标范围内并尽量提高精度以保证带钢质量,其本质是目标优化问题。同时,层流冷却过程处于频繁变化操作工况的动态环境之下,现有控制方法很难实现有效的实时控制。本文针对现有层流冷却过程控制方法很少引入优化思想这一问题,提出基于改进菌群优化算法(BFO)的层流冷却过程冷却水量优化设定方法。并针对动态变化工况,引入案例推理(CBR)机制,提出离线优化—在线推理双层结构的动态优化设定控制结构。基于实际运行数据的实验结果说明,本文提出的方法能够有效搜索冷却水量的优化设定值,而且在变更带钢规格的变化工况条件下,能够及时调整冷却水量的设定值,最终使带钢卷取温度进入目标范围内。

关键词: 层流冷却; 菌群算法; 案例推理; 设定控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Optimization setting control based on bacterial foraging optimization and case – based reasoning for laminar cooling water consumption

Pian Jinxiang^{1,2}, Zhu Yunlong¹, Liu Jinxin¹, Chai Tianyou³

(1. Laboratory of Information Service and Intelligent Control, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Information and Control engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. State Key Laboratory of Integrated Automation for Process Industry, Northeastern University, Shenyang 110189, China)

Abstract: The function of laminar cooling control system is to control the strip coiling temperature into the allowed range, and the closer to the target temperature, the better strip quality is. Essentially, this is a target optimization problem. Laminar cooling operating condition is always varying and the process is in the dynamic environment, which is leading the difficulty of effective real-time control. Aiming at no optimization in the laminar cooling control methods, this paper proposed optimization setting control method of cooling water consumption, by introducing the improved bacterial foraging optimization (BFO). On the other hand, aiming at the dynamic operating condition, two layers structure of dynamic optimization setting is proposed with the mode of offline optimization and online reasoning, where case-based reasoning (CBR) is applied. The simulation results with industrial operating data showed the effectiveness in searching optimized cooling water consumption. Moreover, in the condition of varying working condition, the proposed method has the ability to adjust the water consumption setting value in time. As a result, the strip coiling temperature is controlled in the target range.

Keywords: laminar cooling; bacterial foraging optimization (BFO); case-based reasoning (CBR); setting control

收稿日期: 2014-12 Received Date: 2014-12

* 基金项目: 国家自然科学基金 (61174164 61440004) 资助项目

1 引言

经终轧机轧制的带钢由轧机进入层流冷却区域,经强制水冷将终轧带钢从终轧温度冷却到工艺要求的卷取温度,最后进入卷取机。这一过程称为层流冷却过程,是带钢生产的最后一道工序,且带钢卷取温度直接影响带钢组织性能,因此,层流冷却过程控制对提高带钢质量至关重要^[1]。

层流冷却过程控制目标是保证带钢卷取温度进入目标范围内并尽量提高精度,其本质是目标优化问题。这一过程具有频繁变化操作工况、缺乏连续检测的带钢温度、难以采用精确模型描述过程的复杂工业特性,常规闭环控制难以直接应用。目前层流冷却过程现场常用基于控制策略表格的方法,当出现表格之外的带钢批次时,需要人工设定或者重新设定模型参数以适应新的操作工况。文献中多提出基于模型的水量设定方法^[2-5],但控制效果依赖于冷却水量设定模型的精度。虽然文献[6-10]引入智能技术,试图缓解对冷却水量设定模型精度的依赖,然而未考虑冷却水量的优化设定问题。文献[11]采用遗传算法寻找优化的阀门开启阵列,然而对于高速运行的带钢很难实现在线实施,特别是当工况发生变化时,很难及时找到合适的优化解。

由于群智能算法通过模仿自然界生物进化机制的随机全局搜索和优化方法在很多领域得到了成功应用^[12]。本文针对现有层流冷却过程控制方法很少引入优化思想这一问题,采用预测机制,以优化与带钢质量相关的指标函数为目标,提出基于改进的菌群优化算法(bacterial

foraging optimization, BFO)的层流冷却过程冷却水量优化设定方法。另一方面,针对频繁变化的操作工况,引入案例推理(case-based reasoning, CBR)机制,设计双层结构的动态优化设定控制结构,离线采用菌群优化算法,在线采用案例推理系统的动态优化控制策略。基于某钢铁公司热轧层流冷却过程实际运行数据的实验结果说明,本文提出的方法不仅能够有效搜索冷却水量的优化设定值,而且在发生变更带钢规格的变化工况条件下,能够及时调整冷却水量的设定值,提高了带钢卷取温度的控制精度。

2 层流冷却过程带钢温度控制问题描述

2.1 过程描述

如图1所示,一个典型的热轧带钢层流冷却过程由喷水控制系统、高压水箱、供水管道、冷却区、气动阀门、带钢厚度、速度、温度检测仪、卷取机等组成^[6]。经过轧机轧制的带钢进入层流冷却区,在一百米多长的冷却区域中运行。辊道上下对称设置了喷水集管,喷水控制系统进行带钢定位跟踪并通过控制阀门开闭时刻控制集管喷射在带钢相应位置上的冷却水量,使带钢温度在冷却区内迅速下降,并控制带钢在离开冷却区时的卷取温度进入理想的范围内,最终被卷取机咬入并卷取成为成品。在冷却区的入口位置设置了带钢厚度、运行速度、温度的检测仪表,冷却区的出口位置设置了带钢卷取温度的检测仪表,但在冷却区内,由于大量的高温蒸汽存在且带钢处于高速运行状态,不能设置合适的温度检测仪表。

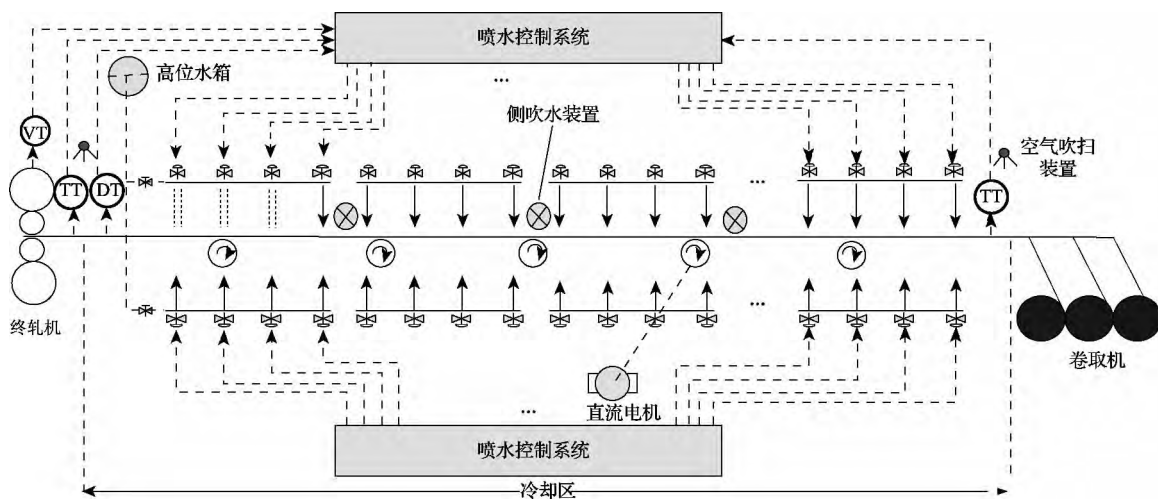


图1 层流冷却过程示意图

Fig. 1 General layout of the laminar cooling process

层流冷却系统中沿着带钢宽度方向均匀设置一排排的喷水阀门,每排阀门同时关闭或打开,因此,喷水阀门开启总数的设定即为冷却水量。每个喷水架上装置了4排阀门,共有5种喷水模式,“AAAA”,“ABAB”,“AB-BA”,“ABBB”和“BBBB”,“A”表示打开,“B”表示关闭。如果确定了辊道上下起始开阀位置、开启总数、喷水模式,就可以确定带钢经过整个冷却区时的喷水阵列。

2.2 控制目标

热轧带钢层流冷却过程控制目标可以采用如下式表示:

$$-\sigma \leq T_c - T_c^* \leq \sigma, \sigma > 0 \min\{|T_c - T_c^*|\} \quad (1)$$

式中: T_c 代表实际带钢卷取温度, T_c^* 代表目标卷取温度; σ 由钢的内部金相组织决定。

由于市场需求的变化常导致产品批次的变化,而且国内工艺生产条件落后,终轧带钢的终轧厚度、温度、运行速度等经常发生变化,即使对同一条带钢,其不同位置的带钢温度、运行速度等也在一定范围内频繁波动。同时,对于不同批次的产品,其控制目标不尽相同;因此,对应不同操作工况其冷却水量优化设定值理应不同。由于层流冷却过程处于一个变化的动态环境之中,且变化工况与设定水量之间是强非线性关系。因此我们要解决的

是在这样一个变化的、非线性环境中设定合适的喷水阀门开启总数、辊道上表面阀门开启位置、辊道下表面阀门开启位置及喷水模式,以满足上述控制目标。

3 结合BFO及CBR的冷却水量优化设定方法

3.1 冷却水量优化设定策略

本文采用如图2所示的离线—在线两层结构的冷却水量优化设定策略。离线运行过程中采用菌群优化算法进行冷却水量的优化设定,在线运行过程采用案例推理系统进行在线推理设定冷却水量。两层结构既保证了菌群算法的寻优过程完整有效运行,又实现了针对变化工况的在线运行的实时要求。具体流程为:首先采用菌群算法进行冷却水量寻优,成功寻优得到的优化设定水量和对应的初始操作条件需要存储到案例库中,完成案例推理系统的初始案例库的建立。接着在线运行案例检索、案例重用几个在线推理步骤,将合适的案例作为解输出到控制系统执行。待喷水控制系统结束带钢冷却过程后,根据实际带钢卷取温度的控制效果,采用菌群算法对案例进行调整,对案例库进行维护。

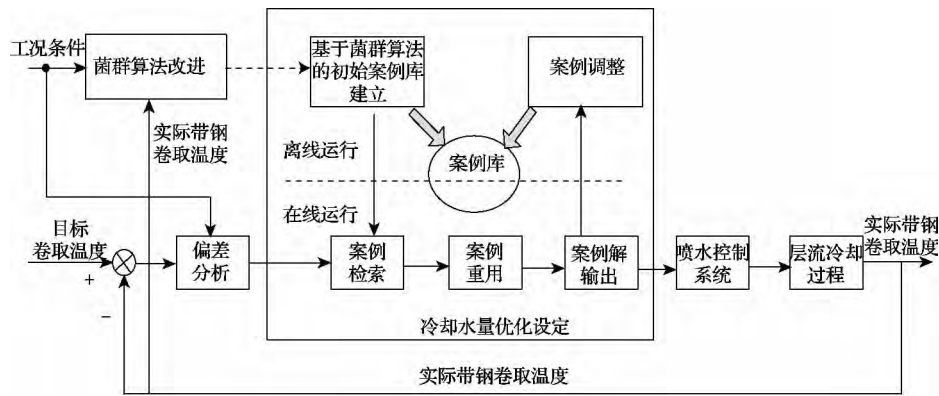


图2 离线—在线两层结构的冷却水量优化设定策略

Fig. 2 Two layers structure of optimization setting with the offline-online mode for water consumption

3.2 冷却水量优化设定算法

3.2.1 基于BFO的设定水量离线寻优算法

由于菌群算法提供了一种求解动态环境下的复杂系统优化问题的通用框架^[13],本文借助菌群优化算法,建立层流过程冷却水量的优化模型。另一方面,由于预测机制可以通过预测环境的变化趋势,提前做出响应的行为反应,提高对动态环境的自适应能力^[14-15],因此,在菌

群迁徙阶段,引入预测机制,预测在新工况条件下的新的冷却水量优化解,提高跟踪变化工况条件下新的优化解的能力。具体算法流程如图3所示,图中左侧为菌群的主程序流程图,右侧为菌群各步骤的子程序流程图。菌群寻优算法主要包括细菌个体的趋化行为、群体的繁殖行为和群体的迁徙行为,最后获得层流冷却过程冷却水量的优化解。

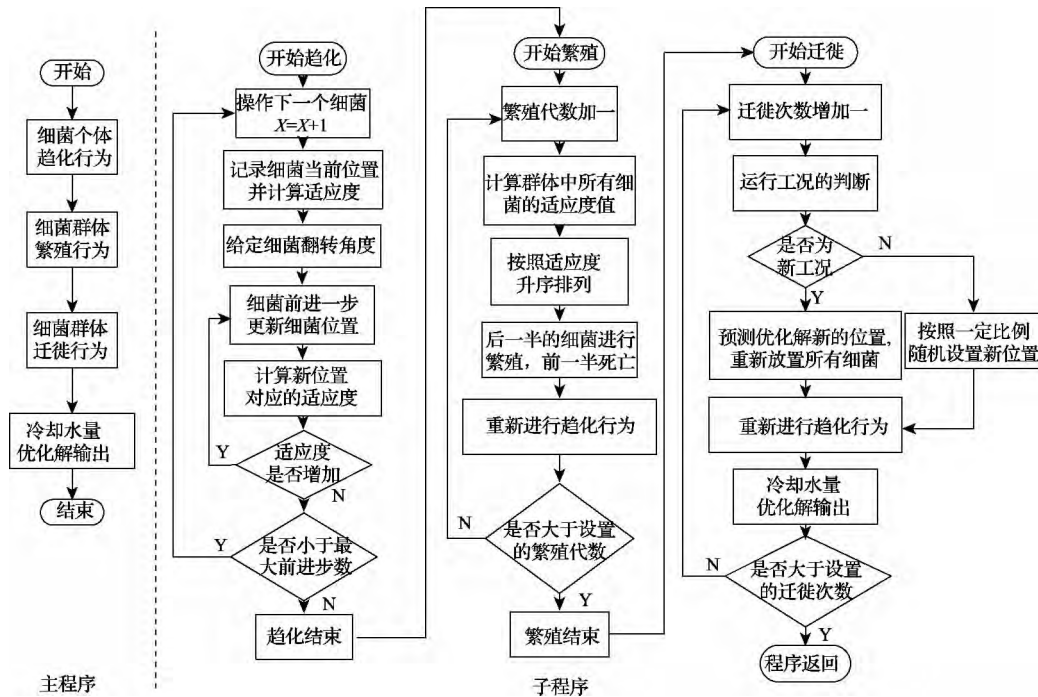


图 3 基于菌群优化算法的冷却水量设定算法流程

Fig. 3 Water consumption setting program flow chart based on BFO

1) 细菌结构化定义

细菌 C 定义采用结构化框架定义,由细菌属性 S、环境描述 Ω、细菌位置 Y 构成。即 C{S, Ω, Y}。具体定义如下:

$$\begin{aligned}
 S &= \{ \theta, \Delta Y, E \} \\
 \Omega &= \{ G, V, D, T_f \} \\
 Y &= \{ y_1, y_2, y_3, y_4 \}^T \quad y_2 > y_1 \\
 y_1 &= 1, \dots, 44 \\
 y_2 &= 1, \dots, 44 \\
 y_3 &= 1, 2, 3, 4, 5 \\
 y_4 &= 8, \dots, 152
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中: θ 代表翻转角度, ΔY 代表移动步长, E 代表适应度值, G 代表带钢硬度等级, V 代表终轧机出口带钢头部运行速度, D 代表终轧厚度, T_f 代表终轧带钢温度, y₁、y₂ 分别代表喷水系统中表辊道上下方对应的上、下起始打开水阀的位置序号,且 y₂ > y₁, y₄ 代表阀门开启总数(冷却水量)。y₃ 代表五种水模式,“1”代表“AAAA”,“2”代表“ABAB”,“3”代表“ABBA”,“4”代表“ABBB”,“5”代表“BBBB”。

2) 细菌个体的趋化行为

在细菌个体的趋化行为中,首先需要记录当前细菌位置 Y,并按照公式(3)进行位置更新,并按照公式(4)计算细菌适应度,判断更新后的适应度是否增加,如果增加则细菌再依据公式(3)更新位置,直至到达最大更新步长,完成细菌个体的趋化步骤。其中位置更新公式为:

$$Y(k) = Y(k-1) + \Delta Y \cdot \theta(k) \tag{3}$$

其中: ΔY = {1, 1, 1, 1}^T, 分别代表 y₁、y₂、y₃、y₄ 4 个方向上的前进步长 θ(k) 为细菌翻转角度,由“0”和“1”组成的任意 4 × 1 向量 ΔY · θ(k) 代表两个向量点乘。

结合层流冷却过程控制目标,评价偏差 E 越大的适应度值越小,偏差 E 的计算公式如下:

$$E = \sqrt{(T_c - T_c^*)^2} \tag{4}$$

T_c 由式(5)获得,将向量解 Y(k) 及工况条件代入 f_m,即可获得带钢各时刻温度, f_m 代表文[16]中建立的温度模型。

$$T_c = f_m(Y(k), \Omega) \tag{5}$$

3) 细菌个体的繁殖行为

完成菌群中所有细菌的趋化之后,进入菌群的繁殖过程。首先将所有细菌的适应度进行升序排列,将后一半的细菌进行繁殖,即“一分为二”,新个体继承相同的位置和步长。后一半的细菌则消亡,繁殖之后再继续进行趋化行为,直至繁殖代数达到设置的阈值。

4) 引入预测机制的细菌迁徙行为

在菌群的迁徙过程中引入预测机制。首先判断运行工况是否为新工况,判断公式如下:

如果 G(t+1) ≠ G(t), 则当前工况为新工况

如果 G(t+1) = G(t) 且 SM^m < 0.9, 则工况未变

式中: 相似度 SM^m 定义如下:

$$\tag{6}$$

$$SM^w = \frac{1}{1 + \mu d^w}$$

$$d^w = [w_1^2(\Delta D)^2 + w_2^2(\Delta V)^2 + w_3^2(\Delta T_f)^2]^{1/2}$$

$$\Delta D = |D(t+1) - D(t)|$$

$$\Delta V = \Delta V(t+1) - \Delta V(t)$$

$$\Delta T_f = \Delta T_f(t+1) - \Delta T_f(t) \quad (7)$$

t 为当前时刻。如果判断当前时刻的运行工况未发生变化,则按照一定的比例 α 随机更新细菌的位置,重新进行趋化行为。如果判断当前工况发生变化,为新工况,则进行预测机制下的细菌迁徙。首先采用下式进行带钢温度的粗略计算^[17]:

$$T_c = T_e + (T_f - T_e) \exp(-pt) \quad (8)$$

式中: p 为与开阀总数相关的量,判断带钢卷取温度与目标温度的偏差,如果计算偏差大于设定阈值 β ,则将阀门开启总数 y_4 加 1,如果小于设定阈值 β ,则将当前开阀总数作为新的 y_4 更新当前向量 Y 。并取不同的 y_1, y_2, y_3 , 作为该工况条件下的可能的细菌位置,重新放置新的细菌在该预测值附近。

3.2.2 基于 CBR 的设定水量在线寻优算法

由于案例推理技术具有动态响应迅速、不依赖精确模型的特点,本文在采用上述菌群算法获得优化设定水量、完成初始案例库的建立之后,采用案例推理技术进行在线推理。

1) 案例结构定义

定义案例如表 1 所示的结构,即案例由检索特征和解特征组成,检索特征为细菌的环境描述,即 $\Omega = \{G, V, D, T_f\}$,解特征为对应当前的环境的细菌位置 $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}^T$ 。

2) 案例检索及最大重用法

在案例检索阶段采用近邻检索方式,如果与当前带钢的硬度等级不同,则直接视为相似度 $SM^w = 0$,如果与当前钢种相同,则采用相似度计算式(7),找出与当前案例最为相似的案例。在案例重用阶段,直接采用最大相似度案例重用,并作为解输出。

表 1 案例结构

Table 1 Case structure

检索特征	解特征
$\Omega = \{G, V, D, T_f\}$	$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}^T$

3) 案例存储及案例调整

当案例重用解作为实际水量设定值输出并由控制系统执行后,获得实际带钢卷取温度后,更新细菌位置 $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}^T$,对应当前工况条件 $\Omega = \{G, V, D, T_f\}$ 直接存入案例库中。在菌群优化的初始种群位置设置及迁徙过程中,如果与该工况条件相似,可以直接进行初始种群位置和迁徙位置的设置,即完成案例的调整,并

为菌群提供了合适的细菌位置,提高细菌寻优效率。

4 基于实际运行数据的实验研究

实验中采用的数据为某钢厂实际运行数据,其生产的低碳钢硬度等级为 500 个,层流冷却过程处理的带钢厚度范围为 1.1 ~ 28 mm。实验中对象模型采用文献[16]提出的被控对象模型,对本文提出的设定方法进行了实验研究。

1) 实验 1

选择一段带钢进行验证,其硬度等级为 250,终轧温度为 843.5 °C,终轧运行速度为 2.41 m/s,终轧厚度为 15.79 mm,目标卷取温度为 580 °C。设定菌群大小为 20 个,细菌移动步长为 1 个阀门,细菌环境描述为 $\Omega = \{250, 2.41, 15.79, 843.5\}$,细菌的初始位置任意设置,本实验中设置为 $Y_0 = \{1, 1, 1, 45\}^T$,对应初始位置的适应度为 85.2。式(7)中的权重表征了各项参数在工况相似度上的重要性,依次取权重值如下: $\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.15, \omega_3 = 0.35$ 。

实验结果如图 4 所示,采用本文提出的 BFO 离线冷却水量优化算法,大约经过 28 代菌群寻优找到对应该环境的设定水量,具体为: $Y = \{9, 11, 1, 66\}$ 。寻优过程中,其适应度变化如图 5 所示,与遗传算法(GA)比较,初期的寻优速度相差不多,但在遗传算法进入局部极小值之后不再进化,而菌群算法仍能继续进化直至找到最优解。与粒子群算法(PSO)相比,在初期的寻优过程中,菌群算法显示较快的收敛速度,但在最后的寻优精度上相差不多。

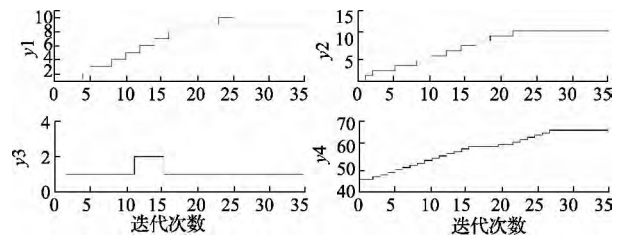


图 4 基于 BFO 离线冷却水量优化结果

Fig. 4 Offline BFO optimization results for water consumption

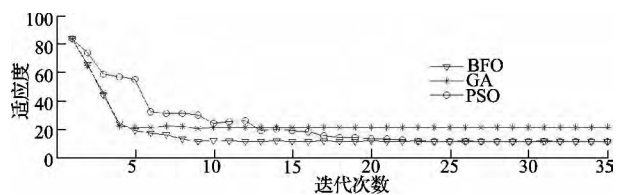


图 5 冷却水量寻优过程中适应度变化曲线

Fig. 5 Fitness curves of the water consumption optimization

2) 实验 2

选择一条硬度等级为 316, 终轧厚度为 11.84, 长度为 238.67 米的带钢进行该实验。定义每秒运行的长度为一带钢。由于在历史运行结果中可以采集得到实际卷取温度对应的实际冷却水量, 因此, 在本实验中将实际卷取温度设置为目标卷取温度, 再利用菌群优化算法搜索冷却水量, 与实际冷却水量进行对比。

如图 6 所示, 即使对同一条带钢, 其终轧厚度和终轧速度在一定范围内波动, 对该条带钢, 采用本文提出的算法获得上起始阀门位置 $y_1 = 8$, 下起始阀门位置 $y_2 = 10$, 喷水模式 $y_3 = 1$, 对应整条带钢上每段寻优得到的开阀总数如图 7 所示。与实际开阀总数比较, 最大阀门偏差为 5 个, 平均偏差为 2.2 个。

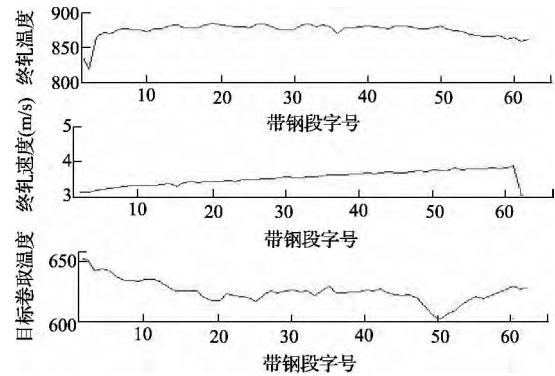


图 6 带钢变化工况及目标卷取温度

Fig. 6 The changing curves of operating condition and target coiling temperature

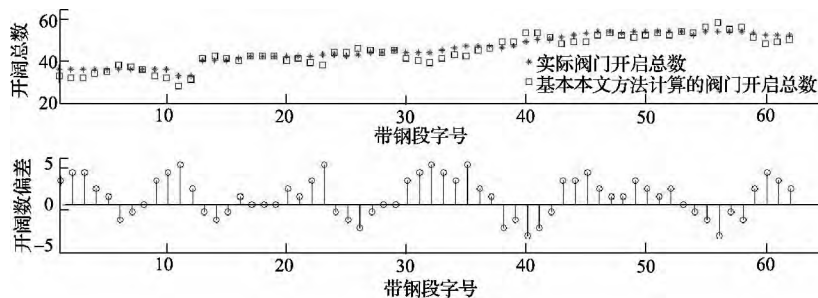


图 7 实际开阀总数与计算开阀总数的比较

Fig. 7 The comparisons between the real number and computed one of active valves

3) 实验 3

本实验验证当带钢规格发生变化时, 本文提出的结合 BFO 和 CBR 的层流冷却水量优化设定方法是否能够自动调整设定水量。如图 8 所示, 图中显示了两条带钢的卷取温度控制效果, 前 39 段代表第一条带钢, 其硬度等级为 134, 终轧厚度为 7.83 mm, 目标卷取温度为 630 °C。第二条带钢共划分为 67 段, 其硬度等级为 513, 终轧厚度为 10.38 mm, 目标卷取温度为 550 °C。

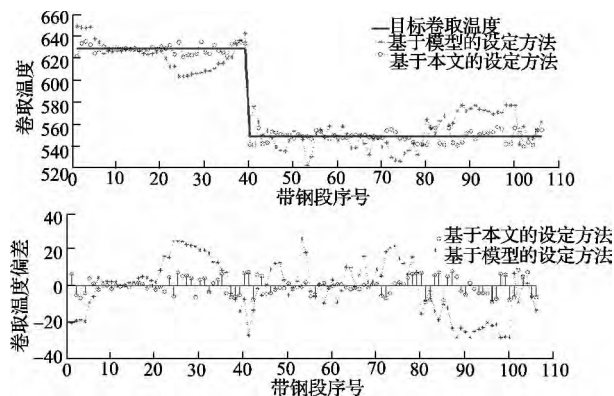


图 8 卷取温度控制效果比较

Fig. 8 The comparisons of strip coiling temperature with different control methods

表 2 对比结果

Table 2 Comparisons results

	基于模型算法	本文方法
平均偏差	11.02 °C	3.51 °C
最大偏差	28.8 °C	9.1 °C
小于 10 °C 命中率	50.9%	100%
小于 5 °C 命中率	28.3%	60.4%

由表 2 可以看出, 当采用文献 [2] 提出的基于模型水量设定算法时, 由于受限于水量设定模型精度, 卷取温度平均控制偏差为 11.02 °C, 最大卷取温度偏差为 28.8 °C, 偏差被控制在 10 °C 范围的仅有 54 段, 命中率为 50.9%; 偏差被控制在 5 °C 范围的仅有 30 段, 命中率为 28.3%。在产品规格发生变化时, 基于模型的方法尚未来得及更新模型, 在硬度等级由 134 变更为 513 时, 第二条带钢初始几段的卷取温度偏差较大, 且头尾控制效果较差; 采用本文提出的方法之后, 卷取温度平均控制偏差为 3.51 °C, 最大卷取温度偏差为 9.1 °C, 所有点的卷取温度偏差都被控制在 10 °C 范围以内, 命中率提高到 100%; 偏差被控制在 5 °C 范围的有 64 段, 命中率提高到 60.4%。而且在发生产品变更之后, 也能及时调整设定的水量, 提高最终带钢卷取温度控制精度。

5 结 论

针对热轧冷却过程中具有频繁变化工况、缺乏实测带钢温度、难以用精确数学模型描述的综合复杂特性, 本文引入优化控制思想, 并考虑到设定水量的动态调整需要, 提出了离线优化-在线推理双层结构的动态优化设定控制结构。采用改进的菌群优化算法(BFO)对层流冷却过程冷却水量进行离线优化设定, 同时引入案例推理(CBR)机制, 在带钢规格的变化工况条件下, 能够及时调整冷却水量的设定值, 最终使带钢卷取温度进入目标范围内。实验结果证明本文提出的方法对提高带钢卷取温度的控制精度具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] XING G, DING J, CHAI T, et al. Hybrid intelligent parameter estimation based on grey case-based reasoning for laminar cooling process [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, 25(2): 418-429.
- [2] DONG Z K, WANG X, WANG X B, et al. Application of weighted multiple models adaptive controller in the plate cooling process [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1144-1150.
- [3] HAN B, ZHANG Z H, LIU X H, et al. Element tracking strategies for hot strip laminar cooling control [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005, 12(3): 18-21.
- [4] ZHENG Y, LI S, WANG X. Distributed model predictive control for plant-wide hot-rolled strip laminar cooling process [J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(9): 1427-1437.
- [5] ZHENG Y, LI N, LI SH Y. Hot-rolled strip laminar cooling process plant-wide temperature monitoring and control [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(1): 23-30.
- [6] 片锦香, 柴天佑, 李界家. 变结构 PI 迭代学习及在层流冷却过程中的应用 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(11): 26-30.
PIAN J X, CHAI T Y, LI J J. Iterative learning method based on variable-structure PI and its application in laminar cooling process [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(11): 26-30.
- [7] ZHENG Y, LI S, WANG X. An approach to model building for accelerated cooling process using instance-based learning [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(7): 5364-5371.
- [8] 片锦香, 柴天佑, 李界家. 案例推理及迭代学习在层流冷却控制中的应用 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(12): 2032-2037.
PIAN J X, CHAI T Y, LI J J. Application of case-based reasoning and iterative learning to laminar cooling process control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(12): 2032-2037.
- [9] GONG D Y, XU J ZH, PENG L G, et al. Self-Learning and Its Application to Laminar Cooling Model of Hot Rolled Strip [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14(4): 11-14.
- [10] XIE H B, JIANG Z Y, LIU X H, et al. Application of fuzzy control of laminar cooling for hot rolled strip [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187-188: 715-719.
- [11] 付培众, 董洁, 杨伟, 等. 基于遗传算法的层流冷却系统优化控制策略 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(8): 918-922.
FU P ZH, DONG J, YANG W, et al. Optimal cooling strategy of the laminar cooling control system for hot strip mill based on genetic algorithm [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 918-922.
- [12] 杨越, 阮雅端, 陈启美. 基于优化遗传算法的负载均衡策略研究 [J]. *电子测量技术*, 2014, 37(6): 26-33.
YANG Y, LUAN Y D, CHEN Q M. Load balancing strategy based on improved genetic algorithm [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(6): 26-33.
- [13] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22: 52-67.
- [14] 王琨, 骆敏舟, 曹毅, 等. 基于多变量预测补偿的机械臂精度提升方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(11): 1213-1221.
WANG K, LUO M D, CAO Y, et al. Promoting method for manipulator accuracy based on multi-variable prediction and compensation [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(11): 1213-1221.
- [15] 吴超, 单奇. 航迹预测技术在制导雷达数据处理中的应用 [J]. *国外电子测量技术*, 2013, 32(4): 35-38.
WU CH, SHAN Q. Application of track prediction in data processing of guidance radar [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2013, 32(4): 35-38.
- [16] 片锦香, 柴天佑, 李界家. 规则与数据驱动的层流冷却过程带钢卷取温度模型 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(11): 1861-1869.
PIAN J X, CHAI T Y, LI J J. Rule and data driven strip coiling temperature model in laminar cooling process [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(11): 1861-1869.

- [17] LI P, LIU G, ZHANG Y. Coiling temperature control of hot steel strip using combined feedforward, feedback and adaptive algorithms [C]. In Proceeding of the 2005 IEEE conference on control applications. Toronto, Canada. 2005, 8: 992-996.

作者简介



片锦香, 沈阳建筑大学信息与控制工程学院副教授。2010 年获得东北大学控制理论与控制工程专业博士学位。主要研究方向为复杂工业过程的建模、控制及优化。

E-mail: pianjx@163.com.

Pian Jinxiang is currently associate professor at School of Information and Control engineering, Shenyang Jianzhu University. She received her Ph. D degree in control theory and control engineering from Northeastern University in 2010. Her research interest covers complex industrial process modeling, control and optimization.



朱云龙(通讯作者), 中国科学院网络化控制系统重点实验室主任, 中科院沈阳沈阳自动所教授。于 2005 年在中科院获得博士学位。主要研究方向为企业信息化管理, 建模技术, 人工智能和机器学习等。

E-mail: ylzhu@sia.cn.

Zhu Yunlong (Corresponding author) is currently the director of CAS Key Laboratory of Networked Control System, professor of Shenyang Institute of Automation of the Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. in 2005 from the Chinese Academy

of Sciences, China. His research interests in various aspects of Enterprise Information Management but he has ongoing interests in modeling technology, Artificial Intelligence, Machine Learning, and related areas. Corresponding author of this paper.



刘金鑫, 中国科学院沈阳自动化所副研究员, 于 2008 年在东北大学获得控制理论与控制工程专业的工学博士学位。主要研究方向为过程建模、智能控制与优化方法研究。

E-mail: liujinxin@sia.cn

Liu Jinxin is currently associate professor at Shenyang Institute of Automation of the Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D degree in control theory and control engineering from Northeastern University in 2008. His research interest covers process modeling, intelligent control and optimization.



柴天佑, 中国工程院院士, 东北大学教授, IEEE Fellow, IFAC Fellow, 欧亚科学院院士。1985 年获得东北大学博士学位, 主要研究方向为自适应控制、智能解耦控制、流程工业综合自动化。

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

Chai Tianyou Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow, and academician of the International Eurasian Academy of Sciences. He received his Ph. D degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, and integrated automation of industrial process.