

基于遗传算法的层流冷却系统优化控制策略

付培众^{1,2}, 董 洁², 杨 伟², 胡广大², 尹怡欣²

(1. 安阳钢铁股份有限公司, 河南 安阳 455004; 2. 北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 为进一步提高层流冷却系统的控制精度, 不仅要满足对卷取温度的要求, 还要满足控制冷却对冷却速率的要求. 本文以热连轧层流冷却系统的粗调区为研究对象. 综合考虑层流冷却控制系统的两个控制目标: 目标卷取温度与目标冷却速率, 直接将粗调区集管的开闭模式作为染色体的编码, 应用遗传算法搜索粗调区集管开闭的最佳模式. 最后对整个冷却控制系统进行了仿真, 结果表明采用该控制策略明显优于简单的前端密集冷却模式.

关键词: 层流冷却; 卷取温度; 冷却速率; 遗传算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Optimal cooling strategy of the laminar cooling control system for hot strip mill based on genetic algorithm

FU Pei-zhong^{1,2}, DONG Jie², YANG Wei², HU Guang-da², YIN Yi-xin²

(1. AnYang Iron & Steel Inc, Anyang Henan 455004, China;

2. School of Information and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the control accuracy of a laminar cooling system for the hot strip mill, it is necessary to consider the requirement on the cooling rate, in addition to the desired coiling temperature. This paper investigates the laminar cooling system for the main zone of a hot strip mill. Both the desired cooling temperature and the cooling rate are simultaneously considered during the cooling process. The opening and closing modes of the headers in the main zone are taken directly as the representation of the chromosome, and a genetic algorithm(GA) is introduced to determine the optimal cooling strategy in the main zone of the whole control system. Simulation results are given to testify the validity, which indicate that the optimal cooling strategy determined by GA is prominently better than the simple-grouping cooling strategy in the front end.

Key words: laminar cooling; coiling temperature; cooling rate; genetic algorithm

1 引言(Introduction)

卷取温度控制是整个热轧生产成品的最后一个环节^[1], 它不仅是影响热轧带钢性能的关键因素, 而且还影响带钢是否能顺利地卷取. 卷取温度是衡量板带加工性能、力学性能与物理性能的重要参数. 由于在冷却过程中会析出马氏体, 对于特殊的带钢, 除控制卷取温度外, 冷却速率也应控制在一定的范围内. 如果带钢表面与中心温度偏差太大, 其晶体的结构会受到影响. 因而不同的钢种根据其组织性能需要采用不同的冷却模式和卷取温度.

目前, 大多数的层流冷却系统没有考虑冷却速率的要求^[2,3]. 实际生产中大都采用了前端密集喷水, 通过模型计算与目标值的误差来调节集管的开闭, 而未考虑中间过程冷却的工艺要求, 结果必将对一些钢种钢板的组织结构以及力学性能产生影响. 由

于集管流量与带钢温度之间是复杂的非线性关系, 传统的优化算法在求解冷却过程的优化策略方面会面临许多困难.

本文旨在探索应用遗传算法来解决该优化问题. 在构造指标函数时, 不仅考虑了最终的目标卷取温度, 同时也考虑了反映工艺要求的冷却区的目标冷却速率. 层流冷却系统分为粗调区和精调区, 本文的目标是解决粗调区集管的最优开闭问题, 对精调区的优化控制策略将另作研究. 通过仿真来观察和验证采用遗传算法解决这个优化问题的效果.

2 遗传算法搜索集管开闭的最佳模式(Genetic algorithm searching for optimal on/off mode)

图1为国内某钢厂1780 mm热连轧机层流冷却系统的主要设备布置情况. 整个层流冷却系统由粗调

区和精调区组成, 每个冷却区均由布置在辊道上下两侧的喷水集管构成, 其中粗调区有上下36对集管, 精调区有上下6对集管. 粗调区集管的流量均为设定值, 不可调, 只能调节集管的开闭; 精调区的集管则是流量可调的. 此外为了避免前一冷却段的水流沿着带钢表面进入下一冷却段而造成水冷误差, 每两个冷却段之间还布置有侧喷集管, 及时将带钢表面的积水冲出表面. 在精轧机出口位置设置精轧出口测温仪, 卷取机入口处设置卷取入口测温仪.

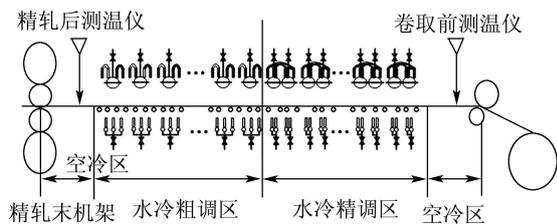


图 1 层流冷却系统布局图

Fig. 1 Layout of laminar cooling system

对应钢种的冷却速率可由CCT(continuous cooling temperature)曲线得到, 是集管开闭模式的主要依据之一. 针对不同的钢种实施相应的冷却策略^[4]:

1) 前端密集喷水: 前端集管依次打开, 快速水冷, 远端集管关闭, 以空冷结束冷却过程. 例如: 11111111100000000001010(1代表集管开, 0代表集管闭, 下同);

2) 前端分布喷水: 前端集管的开闭依次转换, 逐步冷却. 例如: 1010101010101010100000;

3) 远端密集喷水: 前端集管全部关闭, 缓慢空冷, 远端集管全部打开, 以水冷结束冷却过程. 例如: 000000000001111111111111;

4) 远端分布喷水: 前端集管全部关闭, 缓慢空冷, 远端集管的开闭依次转换, 以逐步水冷结束冷却过程. 例如: 00000000000101010101010;

5) 随机分布喷水: 没有固定的喷水模式, 集管的开闭是随机的;

上文中冷却策略1)~5)以1, 0表示集管开闭的形式给笔者以启发, 这与遗传算法中染色体编码具有形式上的相似性. 本文直接以粗调区集管的开闭模式作为遗传算法中染色体的编码, 而经过寻优计算之后的染色体编码即为最优的集管开闭模式, 也即最优的冷却策略. 这种直接以实际集管的开闭模式作为染色体编码的设计, 既省略了遗传算法中编码设计的部分, 又使得问题的解更直接和直观. 而且对于粗调区来讲, 集管的开闭模式多达 2^{36} 种, 要想从如此庞大的开闭模式中找到满足前述层流冷却系

统两个控制目标的最佳模式, 是非常困难的. 遗传算法并行处理的能力以及不易陷入局部最优的随机搜索能力非常适于解决这个问题.

2.1 遗传算法(Genetic algorithm)

遗传算法(GA)是应用最为广泛的进化计算的形式^[5]. GA是由Holland J.H.于20世纪70年代提出的一种优化方法, 其最优解的搜索过程模拟达尔文的进化论和“适者生存”的思想以及孟德尔的遗传变异理论. 通过选择一定数量的个体进行杂交以及基因突变, 把优秀的基因传给后代, 丢弃不良基因, 经过数代遗传, 最终得到最优秀的一个或几个后代(问题的最优解).

2.2 适应度函数的设计(Fitness function design)

带钢各时刻温度 T 由如下所述的温度模型计算得到. 只考虑厚度方向的一维非稳态导热方程为^[6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q}, \quad (1)$$

式中: ρ 为钢板的密度, c 为钢的比热, λ 为钢的导热系数, \dot{q} 为冷却过程中由奥氏体向铁素体相变时产生的热量, x 为厚度方向坐标. 将钢板考虑为上下对称的, 以上半部分钢板为研究对象. 其边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, t \geq 0, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=H/2} = h(T - T_w), t \geq 0. \quad (3)$$

其初始条件为:

$$T(x, 0) = T_0. \quad (4)$$

T_w 为水温, H 为钢板的厚度, h 为与水对流的换热系数, 与多个因素, 如钢板的速度、钢板的表面温度、集管的流量等有关.

本文层流冷却系统的控制量是以集管开闭表现的集管流量的变化, 与对流换热系数存在非线性的关系, 这一非线性关系目前尚无明确的解析表达式, 但是许多学者和专家都提出了不同的模型^[7]. 本文在进行仿真计算时使用了某钢厂提供的数据.

在钢板的上半部分厚度方向划分 n 个节点, 则由式(1)所推得的有限差分模型如下所示:

$$\begin{pmatrix} T_0^{p+1} \\ T_1^{p+1} \\ \vdots \\ T_{n-1}^{p+1} \\ T_n^{p+1} \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} T_0^p \\ T_1^p \\ \vdots \\ T_{n-1}^p \\ T_n^p \end{pmatrix} + 2c_2 \begin{pmatrix} -Q + Q_x \\ Q_x \\ \vdots \\ Q_x \end{pmatrix}. \quad (5)$$

式中:

$$G = \begin{pmatrix} 1 - 2c_1c_2 & 2c_1c_2 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ c_1c_2 & 1 - 2c_1c_2 & c_1c_2 & 0 & \cdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & c_1c_2 & 1 - 2c_1c_2 & c_1c_2 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 2c_1c_2 & 1 - 2c_1c_2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$c_1 = \frac{2\lambda Wn}{H}, \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{dt}{\rho c V_i}, \quad (8)$$

$$Q = Ah(T - T_w) + \varepsilon A\sigma(T^4 - T_\infty^4), \quad (9)$$

$$Q_x = \frac{\Delta z * L}{c}. \quad (10)$$

W 为钢板宽度, V_i 为各节点的体积, A 为钢板长度方向上单位长度的面积, ε 为黑度, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}^4)$ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量, T_∞ 为环境温度, Δz 为铁素体的变化量, L 为潜热释放量, Q_x 为相变放热. 应用该模型将图1所示的输出辊道按水冷和空冷分区计算各个时刻的温度值. 式(9)等号右边第1项为牛顿冷却公式适应于水冷阶段, 第2项为斯特藩-玻耳兹曼定律, 适应于空冷阶段. 由于相邻两组集管的水柱在带钢表面相互交叠影响, 与只开一个集管时相比, 对流换热系数会有所变化. 本文在进行仿真计算时采用了某钢厂提供的对流换热系数, 该钢厂在考虑相邻集管同时开启对对流换热系数产生的影响时, 由经过现场调试得到的影响因子进行了修正, 关于这个影响因子的确定还可参考文献[7].

鉴于卷取温度以及冷却速率对产品性能影响的重要性, 层流冷却控制系统考虑两个控制目标: 一个是目标卷取温度, 一个是目标冷却速率.

为此将系统的最优化指标函数定义为^[8]

$$J(\vec{n}) = \frac{1}{2}(T(\tau) - T_d(\tau))^T S(T(\tau) - T_d(\tau)) + \frac{1}{2} \int_0^\tau \{(T(t) - T_d(t))^T Q(T(t) - T_d(t)) + \sum_{i=1}^m R_i p_i^2\} dt. \quad (11)$$

式中: \vec{n} 为各集管开闭模式构成的矢量, $T(t)$ 为式(5)中各温度节点构成的矢量, p_i 是集管的流量, 其表达式为

$$p_i = p_{\max} \times n_i. \quad (12)$$

p_{\max} 为集管全开的流量, n_i 为第*i*个集管的开闭状态其值为1或0, S 和 Q 是 $n \times n$ 的半正定权值矩阵, R_i 是个标量的权值, τ 为冷却过程的时间, 式(11)中等号右边第1项是相对于终冷目标温度 $T_d(\tau)$ 误差的惩罚项, 积分式中的第1项是相对于中间过程目标冷却温度 $T_d(t)$ 误差的惩罚项, 第2项是对无效的冷却水的惩罚项. 目标冷却温度-时间轨迹可由CCT曲线获取. 取式(11)倒数

$$f(\vec{n}) = \frac{1}{J(\vec{n})} \quad (13)$$

作为适应度函数.

2.3 遗传算法的操作(Operations of GA)

本文以轮盘赌作为选择操作的实现方式. 采用单点交叉方式, 交叉概率 p_c 设为0.6. 变异操作采用基本变异算子, 为了防止遗传算法的早熟, 设变异概率 p_m 为0.004.

3 仿真(Simulations)

仿真程序用C++编写, 在VC6.0环境下调用MATLAB引擎显示仿真结果.

权值矩阵 S , Q 以及 R_i 构成的矢量 \vec{R} 的选取对计算结果有比较大的影响, 需要适当选取这些参数. 经验表明权值越大对目标的跟踪越好^[8]. 本文通过仿真来选取合适的权值矩阵. 仿真表明为了达到目标卷取温度, 权值矩阵 S 需要取较大的数值. 由于表面节点温度的变化主要受与水对流换热的影响, 权值 $Q(1, 1)$ 在表面节点温度的调控方面意义不大. 为了使钢板尽可能多的节点温度更好的跟踪目标冷却速率, 表面节点温度的权值 $Q(1, 1)$ 应当取较小值.

在带钢上半部分厚度方向上分了3个节点, 分别为心部节点, 位于心部与表面之间的内点, 以及表面节点. 本文仿真参数如下:

$$S = 10^6 \times \text{diag}\{1, 1, 1\}, \quad (14)$$

$$Q = 10^3 \times \text{diag}\{10^{-4}, 1, 1\}, \quad (15)$$

$$R = \{0.1, 0.1, 0.1\}, \quad (16)$$

$$p_c = 0.6, \quad (17)$$

$$p_m = 0.004, \quad (18)$$

$$N_p = 180, \quad (19)$$

$$N_g = 300. \quad (20)$$

上式中: N_p 为初始种群个数, N_g 为种群世代数.

在上述仿真参数下多次运行仿真程序, 选取其中最佳个体适应度最大的一组仿真结果如图2~图6所示.

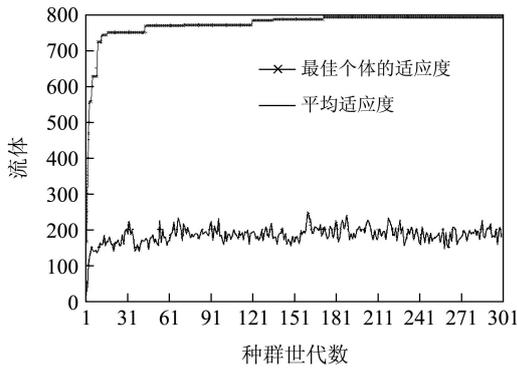


图 2 适应度曲线
Fig. 2 Fitness curves

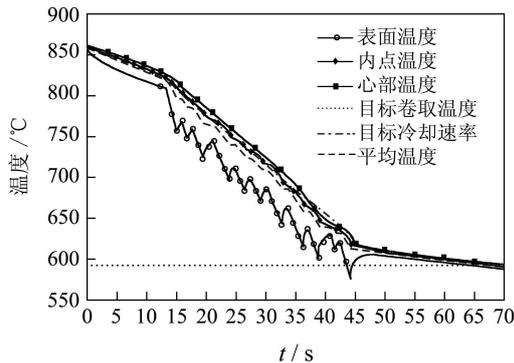


图 3 遗传算法优化的温度曲线
Fig. 3 Temperature profiles optimized by genetic algorithm

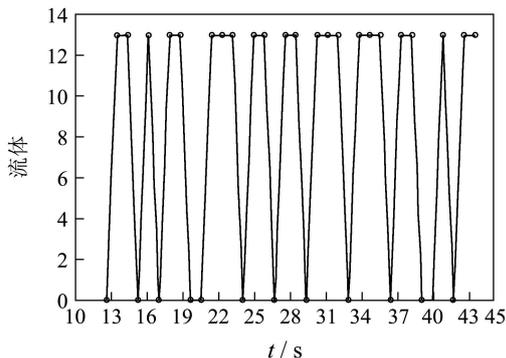


图 4 遗传算法优化的粗调区集管开闭模式
Fig. 4 Optimal on/off mode determined by genetic algorithm

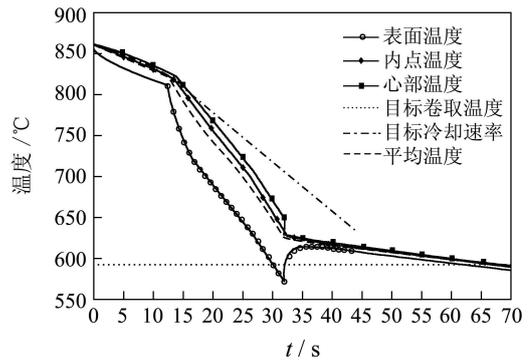


图 5 现场采用的前端密集冷却温度曲线
Fig. 5 Temperature profiles by near group cooling

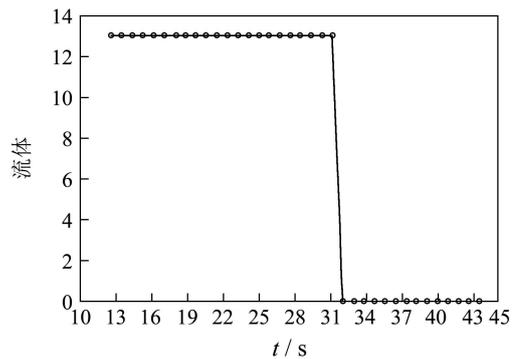


图 6 前端密集冷却的粗调区集管开闭模式
Fig. 6 Near group cooling on/off mode

图2为最佳个体适应度以及平均适应度曲线. 图3为应用遗传算法优化控制策略的温度曲线, 其中圆圈标记了各集管所在的位置. 从图3中可以看出无论是心部、内点还是平均温度都很好的跟踪了目标冷却速率温度曲线.

图4为遗传算法优化的集管开闭模式. 图5、图6为简单的前端密集喷水模式时对应的温度曲线以及集管开闭模式图. 从图5可以看出采用前端密集喷水模式时钢板各节点温度的变化曲线与目标冷却速率曲线相差较大. 图3所示的采用遗传算法优化控制策略的冷却速率跟踪明显要优于简单的前端密集冷却模式.

因为集管为全开或全闭必定会对卷取温度造成至少1/2个集管流量的误差, 实际生产中须辅以流量可调的精调区来补偿粗调的误差. 本文只研究粗调区集管的开闭策略, 对精调区的优化控制策略将在后续的研究中加以介绍.

4 结论(Conclusions)

本文将热连轧层流冷却系统粗调区集管的开闭模式直接作为遗传算法中染色体的编码, 在计算适应度函数时只需按开闭模式将流量的最大设定值或者零流量代入温度计算模型即可. 由仿真

结果可以看出采用遗传算法优化控制策略的各节点温度曲线在跟踪目标冷却速率方面明显优于简单的前端密集冷却模式,表明本文所提出的这种应用遗传算法来解决粗调区的优化问题具有很好的效果。

参考文献(References):

- [1] MUKHOPADHYAY A, SIKDAR S. Implementation of an on-line run-out table model in a hot strip mill[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2005, 169(2): 164 – 172.
- [2] 谢海波, 张中平, 刘相华, 等. 层流冷却的前馈控制[J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18(3): 60 – 62.
(XIE Haibo, ZHANG Zhongping, LIU Xianghua, et al. Feedforward control in laminar cooling system for hot strip mill[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18(3): 60 – 62.)
- [3] 彭良贵, 余广夫, 李国强, 等. 热轧带钢层流冷却控制系统[J]. *钢铁研究学报*, 2005, 40(11): 46 – 49.
(PENG Lianggui, YU Guangfu, LI Guoqiang, et al. Feedforward control in laminar cooling system for hot strip mill[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005, 40(11): 46 – 49.)
- [4] SIKDAR S, MUKHOPADHYAY A. Numerical determination of heat transfer coefficient for boiling phenomenon at runout table of hot strip mill[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2004, 31(6): 495 – 502.
- [5] WANG K F, THOMAS L, MARRIO S, et al. A genetic algorithm for online-scheduling of a multiproduct polymerbatch plant[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, 24(2/7): 393 – 400.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [7] GUO R M. Heat transfer of accelerating steel strip using laminar flow cooling[C] // *The 10th PTD Conference Proceedings*. [S.l.]: [s.n.], 1992: 435 – 445.
- [8] BISWAS S, CHEN S J, SATYANARAYANA A. Optimal temperature tracking for accelerated cooling processes in hot rolling of steel[J]. *Dynamics and Control*, 1997, 7(4): 327 – 340.

作者简介:

付培众 (1969—), 男, 电气高级工程师, 博士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: fupz2005@163.com;

董洁 (1972—), 女, 副教授, 硕士生导师, 目前研究领域为人工智能与人工生命、复杂系统控制和仿人智能控制、智能优化控制理论在过程控制中的应用等, E-mail: pdongjie@126.com;

杨伟 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工业过程控制、智能控制, E-mail: jillycooper@126.com;

胡广大 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事嵌入式系统及运动控制、延时系统及网络控制、应用非线性控制及数值方法等方面的研究, E-mail: ghu@hit.edu.cn;

尹怡欣 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为复杂系统的建模与控制、网络控制、流程工业自动化、人工生命以及智能控制与智能管理, E-mail: yyx.ustb@126.com.