

基于模型的中厚板水幕连续冷却的前馈—反馈控制系统¹⁾

王仲初 柴天佑

(东北大学自动化中心 沈阳 110006)

摘要 本文研究了基于模型的中厚板水幕连续冷却系统的前馈—反馈控制算法。该算法可以设定各检测点的温度值,确定水幕的开幕数、水幕的排列方式、水幕的流量、辊道速度,以此来补偿钢板厚度的变化及在水幕入口处的温度波动。

关键词 控制冷却,水幕,中厚板,前馈,反馈

1 水幕冷却控制系统构成、作用及存在的问题

水幕冷却控制系统示意图如图 1 所示。在本系统中,钢板的上下表面都采用水幕冷却,一共有 13 道水幕,前 11 道水幕为主冷区,后两道水幕为精冷区,相邻水幕幕头之间的距离为 2 米。主冷区的作用是根据工艺所要求的终冷温度和冷却速率,将钢板冷却到适当的温度。精冷区的作用是调整模型和现场不确定性所产生的误差,使钢板达到工艺所规定的目标终冷温度。控制系统由基础自动化级和过程级组成,两级系统的功能及水幕在输出辊道的位置在图 1 中标明。

钢板经末架精轧机轧制后,钢板温度大约是 900°C,厚度范围是 10-40 毫米,沿着 55 米长的输出辊道运行后,进入水幕冷却区,经水冷却后,再沿着输出辊道运行 45 米,然后进入热矫直机。钢板在输出辊道上的速度为 0.5—2.1m/s,冷却速度为 5—30 °C/s,钢板的目标终冷温度为 550-630°C,误差为 ±20°C。

在中厚板水幕连续冷却过程中,冷却参数对钢板的冷却速率和温度降的影响很大,从而影响钢板的组织性能。钢板在水冷区中,钢板表面的温度不可测量,且钢板表面与钢板中心存在比较大的温度梯度,只能在水幕的入口和出口处对钢板表面温度进行有限次测量。因此,如何根据轧钢厂的实际工况(钢板厚度、钢板速度、钢板在水幕的入口温度、钢种等)设定水幕的开启个数、排列方式及水幕的流量就成为水幕控制冷却的关键问题。

目前控冷系统存在的主要问题是:

- 1) 随着轧制钢板的厚度增加,温度估计模型的误差增大^[3, 4]。其原因是,用于冷却控制系统的模型是基于:
 - a. 从热传导方程推导的解析解的近似^[5]。 b. 温度估计模型没有考虑钢板厚度方向的温度梯度,使用的是钢板的总体温度,而测量的是钢板的表面温度,随着钢板的厚度的增加,测量误差增大。
- 2) 没有控制钢板的冷却速度的能力一般的控冷系统能够取得工艺规定的终冷温度的目标值,但是,不能控制高质量钢板所要求的冷却速度。Auzinger.D 指出^[6],对于达到相同目标终冷温度的钢板,可以具有不同的冷却速度,因而可导致不同性能的钢材。对于中厚板来说,控制冷却速度更为重要,因为中厚板的冷却速度比

¹⁾ 863重大关键技术攻关项目资助(863-511-830-002) 国家自然科学基金69934020

较小, 运行速度慢. 为了解决上述问题, 本文主要研究在达到目标终冷温度的同时, 满足冷却速度的要求.

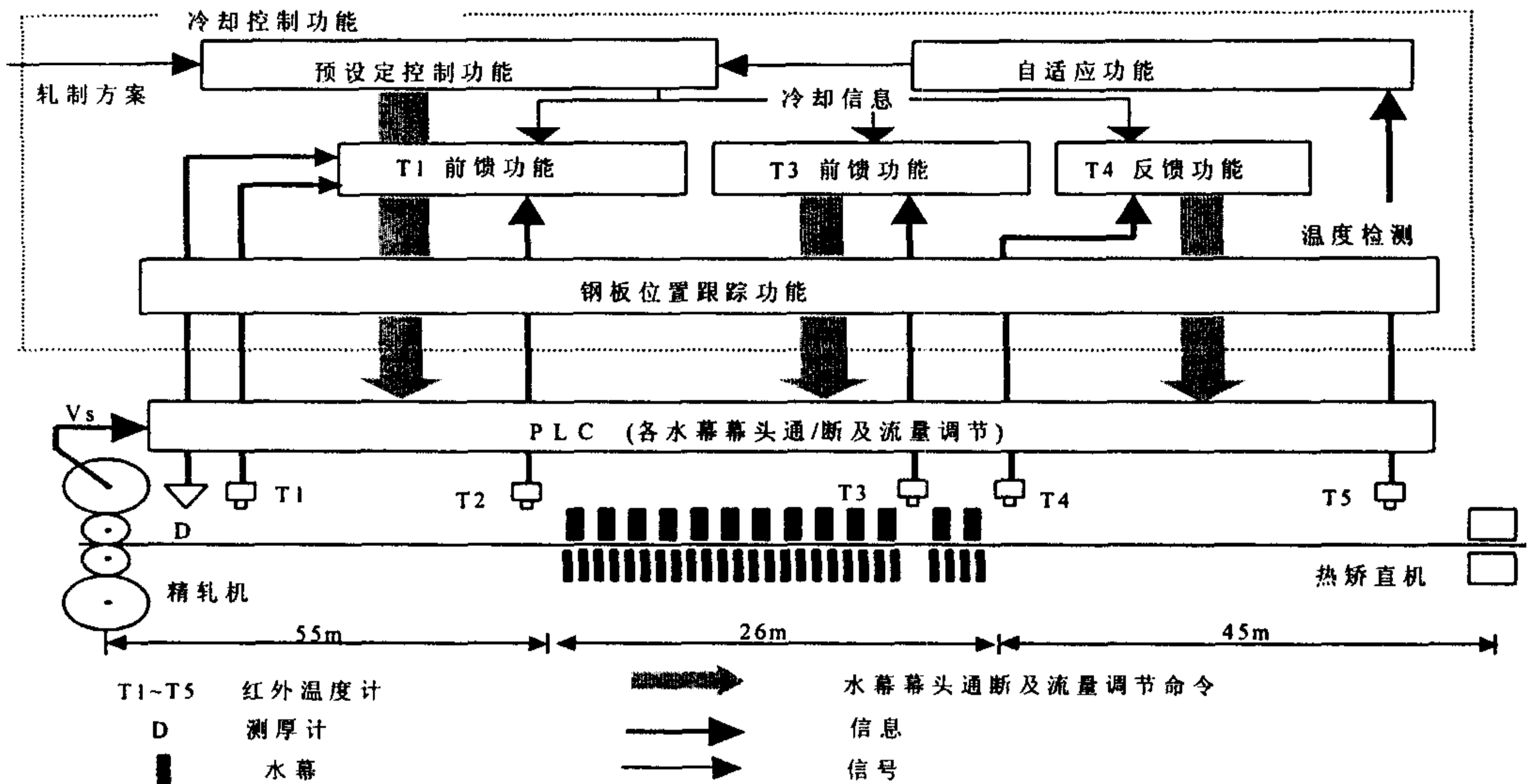


图 1 冷却系统示意图

2 冷却系统数学模型的建立

数学建模的方法主要有: 非线性模型线性化的方法和机理建模的方法. 在水幕冷却系统中, 非线性模型线性化的方法对精轧机出口的边界条件有严格的要求, 当精轧机出口的边界条件波动很大, 该方法会产生比较大的误差. 当钢板从精轧机出口的温度波动在 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 时, 非线性模型线性化的方法难以在这样的工况下应用.

当忽略钢板宽度和运动方向的热传导时, 热传导方程由下列公式表达^[1]:

$$\rho \cdot C_p (\partial T / \partial t) = k (\partial^2 T / \partial y^2) \tag{2.1}$$

钢板上下表面边界条件为:

$$\pm k (\partial T / \partial y) = h (T - T_a) \tag{2.2}$$

$$h = h_a + h_{wt} \frac{T - T_w}{T - T_a} + h_{wb} \frac{T - T_w}{T - T_a} + \sigma \epsilon \frac{T^4 - T_a^4}{T - T_a} \tag{2.3}$$

$$h_a = 0.010093 V^{0.926} \tag{2.4}$$

其中: h =钢板上下表面与周围介质的热交换系数; T =钢板温度($^{\circ}\text{C}$); y =钢板厚度(m); ρ =钢板的比重(kg/m^3); C_p =钢板的比热($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$); k =钢板的导热系数($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$). T_a =环境温度($^{\circ}\text{C}$); T_w =冷却水温度($^{\circ}\text{C}$); σ =斯蒂芬-波尔兹曼常数; ϵ =辐射系数. h_a =钢板与空气对流热交换系数; h_{wt} 、 h_{wb} =钢板上下表面与冷却水的热交换系数.

辐射和空气对流热交换系数只用于空冷区, 热交换系数 h_{wt} 、 h_{wb} 只适用于水冷区.

由于中厚钢板厚度一般为 10-50mm, 如果在模型中不考虑钢板厚度方向的温度梯度, 则随着钢板厚度的增加, 会带来比较大的误差^[3,4]. 为了讨论问题方便, 假设钢板上下表面对称冷却, 这时只考虑钢板一半厚度 H 的温度场. 将钢板非均匀地分为两层, 钢板表层厚度 Δy_1 为 1 毫米, 其余的厚度为里层厚度 Δy_2 ($\Delta y_2 = H - \Delta y_1$). 由方程 (2.1)

可以推导出多道水幕连续冷却的状态方程^[1]:

$$\dot{X} = AX + \sum_{i=1}^m p_i B_i(t) X \quad (2.5)$$

其中: $X=[T_1-T_w, T_2-T_w]=[X_1, X_2]$ 为温度向量, 其它参数定义见参考文献[1].

3 水幕冷却系统前馈—反馈控制算法

以往钢板控制冷却的研究, 大部分都是控制终冷温度(或卷取温度). 对于冷却速率的控制考虑不够. 本文根据参考文献[1, 2]的控制思想, 提出一种前馈—反馈控制算法. 不但使终冷温度达到设计要求, 而且钢板总体温度可以比较好的跟踪冷却曲线.

A. 空冷段温度降的确定

$$T_2 = [(T_1 + 273)^3 + At/d]^{1/3} - 273 \quad (3.1)$$

其中: t = 钢板通过空冷区的时间(秒); d = 钢板厚度; A 为模型系数, 通过自适应算法来确定^[9].

B. 水幕冷却最优前馈算法

由公式(2.5)定义如下性能指标:

$$J(p) = \frac{1}{2} (X(\tau) - X_d(\tau)) S (X(\tau) - X_d(\tau)) + \frac{1}{2} \int_0^{\tau} \{ (X(t) - X_d(t)) Q (X(t) - X_d(t)) + \sum_{i=1}^m R_i p_i^2 \} dt \quad (3.2)$$

在满足上述性能指标的前提下, 这是一个无约束优化问题. 但是, 在实际的控冷系统中, 每一个水幕的流量必须在最大和最小流量之间或者水幕流量为零. 所以, 实际的控冷系统应该满足下列约束条件:

$$1) p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max}; \quad 2) X_d(\tau_i) - X_2(\tau_i) \leq \varepsilon_1 \quad \text{for } i=2,3,\dots,m; \quad 3) |X_1(\tau) - X_d(\tau)| \leq \varepsilon$$

其中: X_d 是希望的冷却曲线(即冷却速率). 约束条件 1 代表每一道水幕的流量必须在最小和最大流量之间, 约束条件 2 代表在每一道水幕出口处, 钢板总体温度与理想的 CCT 曲线之间的误差不能大于某一个规定的数值. 约束条件 3 表示在冷却装置出口处钢板的表面温度与希望的终冷温度之间的误差必须小于或等于工艺上的规定值(国际水平为 $\pm 15^\circ\text{C}$). 性能指标(3.2)与约束条件 1)、2)、3) 相结合, 当已知水幕入口和出口温度及冷却速度和钢板参数时, 可以确定水幕的开幕数、开启水幕的排列方式、各水幕幕头的流量及辊道速度. 详细推导见参考文献[6].

C. 反馈控制

在建模过程中, 误差干扰 N 主要有三种形式:

- (1) 模型设定不准产生的阶跃误差;
- (2) 模型设定不准产生的斜坡误差(上升或下降);
- (3) 其他干扰因素(例如测量干扰)引起的低频振荡误差.

一般来说, 第一种形式的误差是主要的, 后两种误差的影响很小, 且不常发生, 因此, 反馈控制器设计的目的主要是消除阶跃干扰误差的影响. 使用参考文献[7]的反馈控制器, 可以实现最短时间控制, 消除滞后时间.

D. 各检测点的温度设定

具体计算步骤如下:

1. 根据实际检测 T1 点的温度值, 由公式 (3.1) 来预报 T2 点的温度.
2. 终冷目标温度 T5 点是工艺给定的, 由公式 (3.1) 可以计算 T4 点的温度.
3. 将精冷区的两道水幕设定为中等流量, 根据参考文献[6]可以计算出 T3 点的温度.
4. 由 T2 点和 T3 点之间的温度差、给定的冷却速度和钢板厚度及钢种, 根据最优前馈算法, 可以确定水幕的开启个数、排列方式、各水幕幕头的流量和辊道速度及 T3 点的温度.
5. 根据第四步所计算的辊道速度, 重复第二步计算 T4 点的温度.
6. 由 T3 点与 T4 点之间的温度差, 确定精冷区的各水幕流量.
7. 根据 T4 点的实测温度与 T4 点的计算温度之差, 实现反馈控制.

E. 钢板位置跟踪

利用安装在精轧机上、输出辊道上的测速装置及沿着输出辊道安装的热金属检测器, 对钢板在输出辊道上的位置进行测量和跟踪.

4 仿真结果

图 2(a)钢板厚度为 20 毫米, 钢板从精轧机出口温度为 950°C , 目标终冷温度为 600°C , 冷却速度为 $13.5^{\circ}\text{C}/\text{S}$, 图 2(b)钢板厚度为 20 毫米, 钢板从精轧机出口温度为 900°C , 目标终冷温度为 600°C , 冷却速度为 $13.5^{\circ}\text{C}/\text{S}$, 钢板速度为 1 米/秒. 通过仿真可以看出, 由于钢板在精轧机出口的温度不同, 为了达到相同的目标终冷温度和相同的冷却速度, 水幕的开幕数和水幕的排列方式及各水幕幕头的流量必须改变, 来补偿精轧机入口温度的波动.

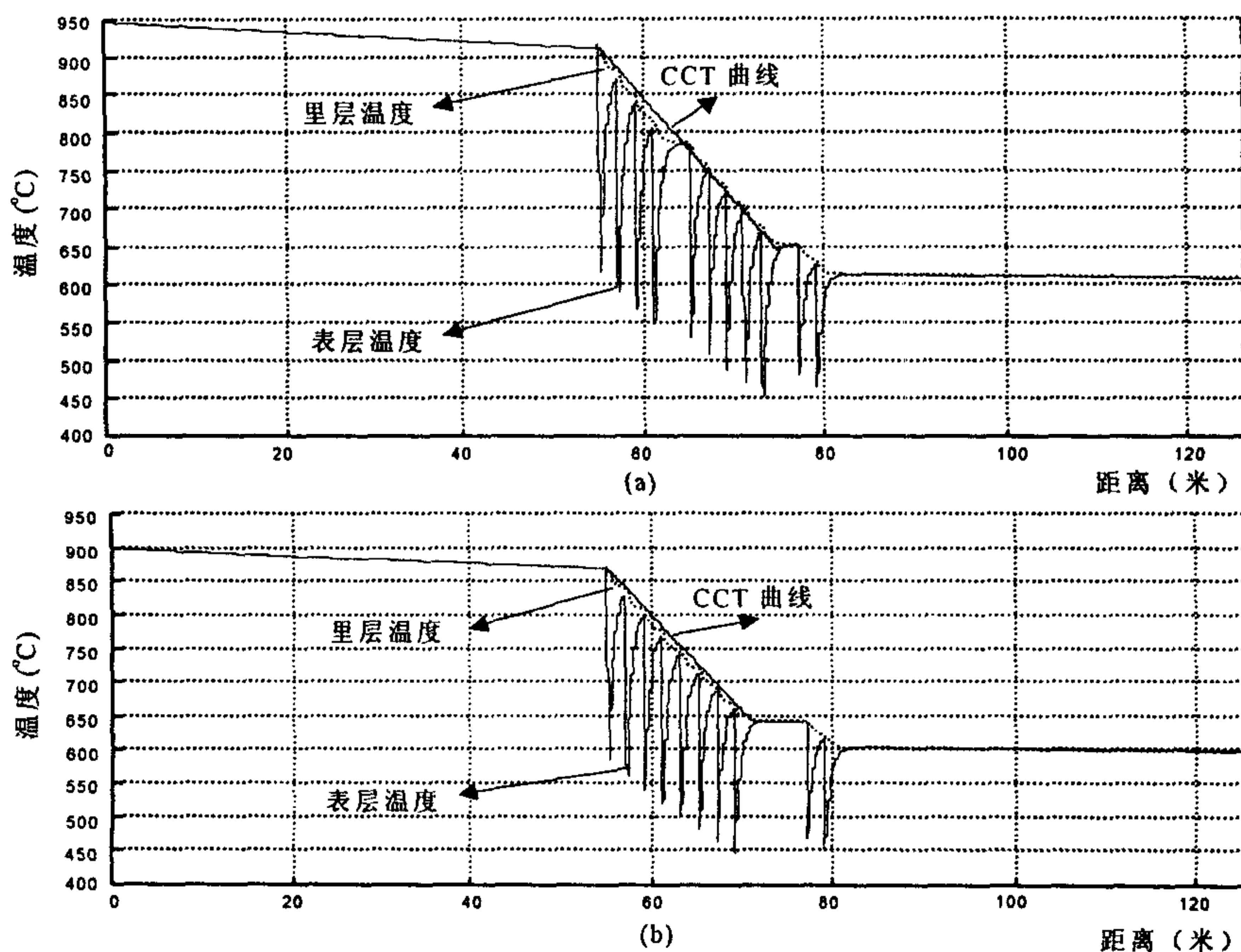


图 2 冷却过程仿真图

5 结论

本文建立了中厚板冷却过程的数学模型,在此基础上,提出了中厚钢板水幕冷却的前馈—反控制算法.该算法可以设定各检测点的温度值,确定水幕的开幕数、水幕的排列方式、水幕的流量、辊道速度,以此来补偿钢板厚度的变化及在水幕入口处的温度波动.仿真结果证明了该算法的有效性.该方法也可以应用于连铸或轧钢的冷却过程.

参 考 文 献

- 1 Chen.S.J et al. Modelling and analysis of controlled cooling for hot moving metal plates. *Monitoring and control for manufacturing processes ASME PED* 1990,44:465-473
- 2 Kazuo.O Development of runout table cooling control technology in hot strip mill. *CAMP-ISIJ* 1994,7:416-419
- 3 吴毅平. 宝钢热轧层流冷却卷取温度控制的改进. *冶金自动化* 1997,21(1):15-17
- 4 Lawrence.W.J .On line modelling and control of strip cooling. *Ironmaking and Steelmaking* 1996,23(1):74-78
- 5 Ditzhuijzen.Van Control of run-out table cooling. *Steel Times International* 1994,(1):21-23
- 6 Wang Z.C , Wang X.B, Chai T Y An optimal feedforward control algorithm of water-curtain cooling for plate ASCC 2000 Accepted
- 7 关守平 一类复杂工业过程的混合实时专家控制系统极其在中厚钢板加速冷却过程中的应用研究 东北大学博士论文 1995年10月
- 8 Auzinger.D Recent development in process optimization for laminar cooling in hot strip mills. *Ironmaking and steelmaking* 1996,23(1):84-87
- 9 冯光宏、蔡庆伍、宋佩莼 中厚板轧后冷却控制模型 *钢铁* 1997,32(7):27-30

王仲初 男, 1955年生. 博士研究生. 主要研究方向为现从事自适应控制、复杂工业过程建模、优化设定等.

柴天佑 男, 1947年生. 教授, 博士生导师, 东北大学自动化研究中心主任. 发表论文被 EI 检索收录 120 篇, 被 SCI 检索收录 18 篇. 研究方向为自适应控制、多变量智能解耦控制、工业过程综合自动化理论、方法、技术及应用.