

· 人工智能技术应用 ·

# 板坯连铸二冷段的动态配水模型研究与应用

薛建国, 王长松, 张玉宝

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘要:**根据建立的在线温度推算模型和冷却段表面温度预测模型,设计了一种板坯连铸二冷段动态配水模型,实现铸坯表面温度自适应控制。该模型通过利用在线调整神经网络配水模型权重,使板坯表面温度与目标温度的差值最小化。现场数据分析证明了模型的适用性,仿真结果表明,模型对表面温度控制的效果优于在线温度推算模型。

**关键词:**连铸;二次冷却;表面温度;动态配水

**中图分类号:**TF777.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7059(2009)03-0011-05

## Research and application of dynamic water distribution model for secondary cooling section in slab continuous casting

XUE Jian-guo, WANG Chang-song, ZHANG Yu-bao

(Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on on-line temperature calculation model and surface temperature prediction model for cooling section, an dynamic water distribution model was designed to realize the adaptive control for cast surface temperature. In this method, weight of neural network water distribution model was adjusted to minimize deviation between cast surface temperature and object temperature. Field data analysis proves suitability of the model. Simulation results show that surface temperature control effect of the model is better than control effect of temperature calculation model.

**Key words:** continuous casting; secondary cooling; surface temperature; dynamic water distribution

### 0 引言

在连铸生产中,二冷配水控制是影响铸坯质量的重要因素。目前主要的二冷配水在线控制方法大体可以分为两种。(1)基于拉速的二冷水控制:根据离线计算的不同稳态拉速时各段水量近似拟合成的一次或二次曲线,控制器按照检测的拉速信号,对流量阀开度进行 PD 调节。这是目前国内运用最为普遍的方法。但是由于拉速突然变化时,铸坯表面温度波动较大,近来有研究将“坯龄”或虚拟拉速作为参数输入<sup>[1-3]</sup>。(2)基于传热方程的二冷水动态控制:计算机根据铸坯传热模型每隔一段时间计算一次铸坯表面温度,并且与目标温度比较,决定各段水量。国内引进较

多的有德国西门子 VAD 的 DYNACS 系统和意大利达涅利的 ELIM 系统等。随着智能控制方法的发展,国内外一些研究者正在探讨将诸如自适应控制、模糊专家系统和神经网络等方法应用于连铸生产<sup>[4-5]</sup>。

某钢厂连铸生产线二冷控制系统为引进的国外先进技术,在进行提高拉速、增加二冷配水段等技术改造时,无法继续使用原控制模型。因此,需要自主开发新的二冷动态配水模型,用于改造后的生产。北京科技大学机电系于 2007 年开发板坯连铸二冷段动态配水模型。仿真和实验结果表明模型对表面温度控制的效果优于在线温度推算模型。

收稿日期:2008-12-15;修改稿收到日期:2009-03-18

作者简介:薛建国(1978-),男,山东巨野人,博士研究生,研究方向为人工智能与数据挖掘技术在冶金过程控制中的应用。

## 1 连铸过程传热数学模型

### 1.1 凝固传热数学模型

铸坯凝固过程具有时变性和非线性特性,过程本身和执行机构有较大的滞后,工艺参数存在扰动且测量传感器常受噪声影响,这些都决定了连铸过程的复杂性。在建立数学模型时首先要规定基本的假设。如设钢液初始温度和冷却水温恒定;凝固潜热、导热系数和比热容等的简化处理;忽略拉坯方向和铸坯与辊子之间传热等。如果以板坯厚度方向为  $x$  方向,宽度方向为  $y$  方向,可以建立板坯凝固传热的二维控制方程为<sup>[6]</sup>:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为密度;  $c$  为比热容;  $T$  为铸坯温度;  $t$  为时间;  $k$  为导热系数;  $L$  为潜热。

对于上述偏微分方程无法求出解析解,一般采用差分法编程,联立各工段边界条件求出数值解。由于计算时间较长,多用于铸坯凝固的离线模拟和工艺参数优化等方面。在实际应用时,还需要实验手段对模型的正确性进行验证。

### 1.2 在线温度推算模型

在线控制时,为满足实时计算的要求,要将凝固传热模型进一步简化。通常将铸流分成垂直拉坯方向的许多切片,切片在结晶器中“生成”,并随着铸流移动,冷淋区结束时从内存中删除。切片内的温度分布,按照简化模型反复进行更新运算。

一般将铸流按性状分成固相区、糊状区和液相区,分别计算每一切片的温度分布<sup>[7]</sup>。本文将固相区接近表面处单独计算,以减少表面处温度的近似误差,如图 1 所示。各区内温度分布与厚度方向坐标的函数关系定义如下:

$$T(x) = \begin{cases} a_0 + a_1 \frac{x}{d_1} + a_2 \frac{x^2}{d_1^2} & D_1 \text{ 区} \\ b_0 + b_1 \frac{x - d_1}{d_2} + b_2 \frac{(x - d_1)^2}{d_2^2} & D_2 \text{ 区} \\ c_0 + c_1 \frac{x - d_1 - d_2}{d_3} + c_2 \frac{(x - d_1 - d_2)^2}{d_3^2} & D_3 \text{ 区} \\ T_1 + l_1 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x - d_1 - d_2 - d_3}{d_4} \right)^n \right] & D_4 \text{ 区} \end{cases} \quad (2)$$

上述式中,  $T_1$  为钢的液相线温度;  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2, l_1$  为待定系数;  $d_1, d_2, d_3, d_4$  分别为近表面固相区、内部固相区、糊状区、液相区的厚度。

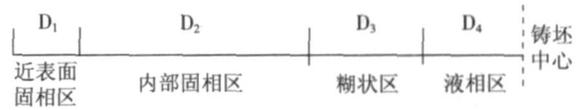


图 1 切片内温度分布示意图

Fig. 1 Temperature profile of a slice

将式 (1) 的一维形式在各区内积分,考虑各区域边界条件及凝固潜热,可得到只含时间导数的常微分方程组。当板坯凝固过程中只存在固相区、糊状区或只存在固相区时,方程组退化。结合传热过程边界条件,方程组总有确定的唯一解。用追赶法求解方程组,再利用隐式欧拉法求解得到下一时刻的待定系数,如此循环,可求出铸坯从结晶器弯月面到铸坯完全凝固整个过程的温度分布和坯壳厚度。

目前先进的板坯配水控制方法就是在温度推算基础上,将各个冷却段的计算温度和目标表面温度相比较,根据温差计算调整后的冷却水量,并进行控制。与水量-拉速曲线配水相比,属于有反馈的动态配水;但随着铸坯的前进,水量调整后的冷却对象已经变化,所以对连铸中开始和结束阶段以及连铸中拉速急剧变化的情况不能准确控制,铸坯表面温度与目标温度有较大的差距。

### 1.3 冷却段表面温度预测模型

上述方法虽然能够在线计算铸坯温度的分布,但由于在铸流长度内大量的切片模型被反复存取计算,因此,只能用于根据实际的喷水水量推算温度,无法达到由目标温度逆向求解水量或用作预测模型进行水量控制的目的。本研究在凝固传热模型基础上,推导出按照不同段的平均温度与水量关系的模型。

将坐标系置于喷水段上,可以建立二冷区第  $i$  段的能量平衡方程式:

$$m_i c \frac{dT_i(t)}{dt} = LHv(t) c [T_{i-1}(t) - T_i(t)] - 2Ll_i h_i(t) [T_i(t) - T_w] \quad (3)$$

式中,  $m_i$  为第  $i$  段铸坯质量;  $T_{i-1}(t), T_i(t)$  分别为第  $i-1, i$  段表面温度;  $L, H$  分别为铸坯宽度和厚度;  $v(t)$  为拉速;  $l_i$  为第  $i$  段长度;  $h_i(t)$  为第  $i$  段综合换热系数;  $T_w$  为冷却水温度。

把  $m_i, c, T_w$  作为常数,将式 (3) 两边对时间求导后,可得到近似的差分方程形式:

$$T_i(k) = A^{-1} [BT_i(k-1) + CT_i(k-2) + DT_{i-1}(k) + ET_{i-1}(k-1) + F] \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned}
 A &= \bar{t}^{-2} + \bar{t}_i^{-1} v(k) \bar{t}^{-1} + \bar{t}_i^{-1} v(k) \bar{t}^{-1} + \\
 & 2(Hc)^{-1} h_i(k) \bar{t}^{-1} + 2(Hc)^{-1} \cdot \\
 & h_i(k) \bar{t}^{-1} \\
 B &= 2 \bar{t}^{-2} + \bar{t}_i^{-1} v(k) \bar{t}^{-1} + 2(Hc)^{-1} \cdot \\
 & h_i(k) \bar{t}^{-1} \\
 C &= -\bar{t} \\
 D &= \bar{t}_i^{-1} v(k) \bar{t}^{-1} + \bar{t}_i^{-1} v(k) \bar{t}^{-1} \\
 E &= -\bar{t}_i^{-1} v(k) \bar{t}^{-1} \\
 F &= 2(Hc)^{-1} T_w h_i(k) \bar{t}^{-1}
 \end{aligned}$$

上述式中,  $v(k)$ 为  $k$ 时刻速度变化量;  $h_i(k)$ 为第  $i$ 段  $k$ 时刻水量变化计算的换热系数变化量;  $t$ 为时间变化量。

式(4)为按时间层计算表面温度的方程。结合综合传热系数与水量关系,可以得到由目标表面温度计算水量的隐式表达式。在线应用时可以利用神经网络对其进行模拟,其表达式可写为:

$$\begin{aligned}
 Q_i(k) = & NN [ T_{g(i-1)}(k+1), T_{g_i}(k+1), \\
 & T_i(k), T_{i-1}(k-1), T_i(k-1), \\
 & q_i(k-1), q_{i-1}(k-1) ] \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中,  $Q_i(k)$ 为第  $i$ 段  $k$ 时刻设定水量;  $T_{g(i-1)}(k+1)$ ,  $T_{g_i}(k+1)$ 分别为第  $i-1$ ,第  $i$ 段目标表面温度。

## 2 二冷配水控制系统设计

### 2.1 控制系统的组成

二冷动态控制系统的组成如图 2 所示。其中温度推算模型根据现场实际的浇铸条件,按照 1.2 节方法计算内存中各切片截面的温度分布。动态配水模型根据段中铸坯的状态参数和目标温度计算水量设定的目标值。

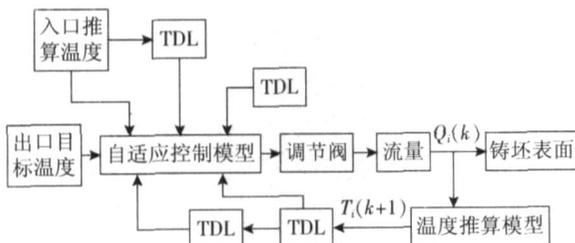


图 2 二冷配水控制系统原理

Fig. 2 Schematic of secondary cooling control system

TDL—时滞环节

### 2.2 自适应控制模型

自适应控制模型由分段预测表面温度模型和神经网络输水量模型组成(见图 3)。表面温度的预测按照式(4)直接计算,水量计算的隐式方程

由 RBF神经网络模型辨识。

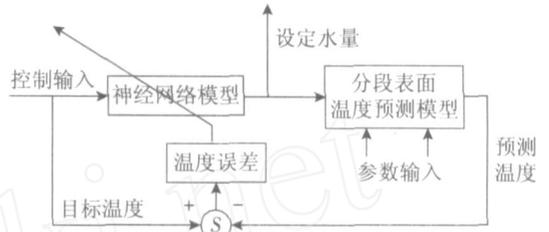


图 3 自适应控制模型结构

Fig. 3 Overall control structure using self-adaptive

S—计算误差

神经网络模型通过在线调整权重使预测表面温度逼近目标表面温度。网络的初始权值由凝固传热模型计算的静态拉速 - 水量结果训练得到,即按表面的预测温度等于目标温度时的情形输出水量。当在计算间隔时间内网络无法达到收敛时,重新设定为初始权值,此时就相当于静态拉速 - 水量配水控制。

### 2.3 目标温度设定

在符合合金约束条件的范围内,温度不是唯一的,但利用凝固传热数学离线优化计算后,确定拉速下目标温度和相应的设定水量固定。所以在拉速稳定时,不同控制方法的控制结果相同。

每个二冷段采用同一个流量阀控制,水量无法按段内切片表面推算温度分别调节,所以只能选取一个控制温度。实际计算时取各段入口、出口和中点的平均值作为控制温度。

## 3 动态配水模型的分析与评价

本文所研究的某钢厂弧形板坯连铸机半径为 8 m,冶金长度 24.9 m,二冷区分为 7 段。原控制系统引进国外软件,二冷采用温度推算反馈配水模型;新模型采用自适应神经网络控制。两种模型控制的目标温度基于相同的传热模型计算结果,所以在拉速相同且稳定时,输出结果相同。

### 3.1 模型的仿真结果

由于现场设备条件和工序流程的限制,许多参数的变化难以控制,因此很难得到同等条件下不同控制方法的对比效果。而采用仿真方式可以使对结果的讨论更为直观。正常生产中受设备条件限制,配水和拉速都有一定的变动范围限制,仿真过程中设定同样的取值范围。以浇铸钢种为 Q235B,截面尺寸为 1.4 m × 0.2 m 的板坯为研究对象,选取二冷区第 5 段进行仿真,不考虑入口温度受之前冷却控制波动的影响,同时设定冷却水

温度、钢成分及各相下的物性参数的输入不随温度和时间变化。表 1 为上段和本段的目标表面温度,其中拉速过低时,由于水量有最小值限定,无法达到优化值。图 4 为输入拉速在设定范围内的变化取值。在线温度推算模型利用编程实现,控制系统利用 Simulink 建模。仿真后,得到的传热系数与段平均温度结果如图 5 和图 6 所示。

图 5 为采用推算温度反馈控制时的结果。当拉速变化时,模型根据当前铸坯温度与目标温度差值计算下一时刻铸坯水量(传热系数),调整量

表 1 不同拉速时计算的目标表面温度

Table 1 Target surface temperature according to speed

冷却段	拉速 / (m/s)				
	0.010	0.012	0.015	0.020	0.030
4段	957.71	977.01	989.31	989.29	989.26
5段	959.82	973.41	973.37	973.33	973.29

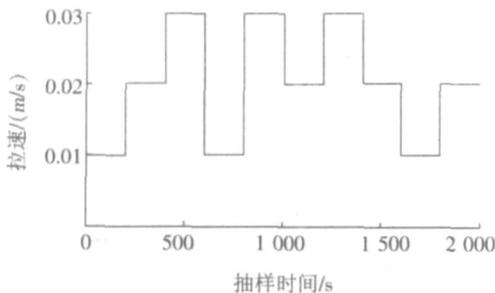


图 4 拉速输入设定

Fig. 4 Control signal of casting speed

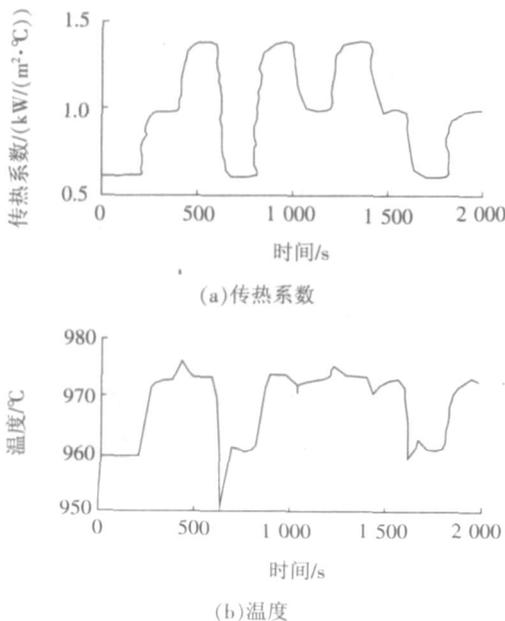


图 5 温度推算反馈控制仿真结果

Fig. 5 Responses of calculated temperature control

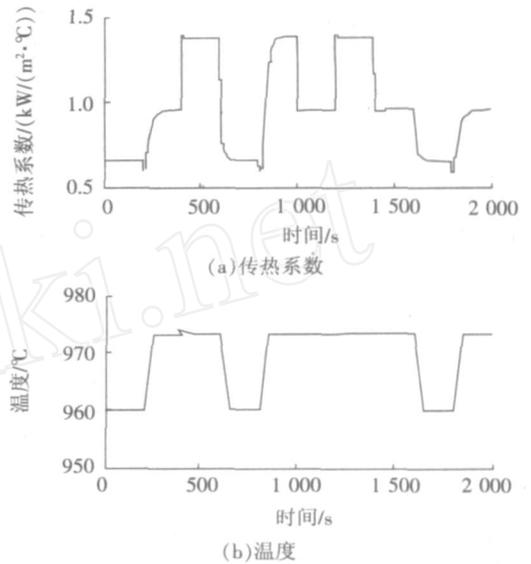


图 6 自适应模型控制仿真结果

Fig. 6 Responses of self-adaptive control

存在滞后,使得铸坯温度出现波动。尤其在目标温度下降时,这种波动更为明显。

图 6 为采用自适应神经网络控制时的结果。当拉速变化时,模型输入包括上一时刻段平均温度、入口温度和实际水量以及当前的段目标温度及入口温度,并通过参考预测模型输出调整神经网络权重后的计算水量(传热系数),补偿了这种滞后,波动很不明显。即使在目标温度变化时,也只有温度平均引起的滞后,调整时间大为缩短。

### 3.2 模型实验结果

在距结晶器液面 8 m 处加装红外测温仪,对第 5 段铸坯宽度中心表面温度进行实时测量,由于铸坯表面存在冷却水膜、蒸汽和氧化铁皮等影响,其测量值波动较大。从在线数据库中连续抽取 1 000 条实际生产样本,样本中记录着每块板坯(长度约 2.5 m)从炼钢到切割全过程的数据,对于多次测量的参数,取其特征值(均值、极值等)简要记录。各板坯经过第 5 段时拉速、水量和表面温度如图 7 所示,其它参数略。

图中测量温度为每块板坯经过测温仪时数次测量的平均值,波动依然较为明显。但其静态统计结果与计算温度比较时,平均误差近似为 0,标准偏差不超过  $\pm 5$ 。虽然在拉速或水量异常变动时,能够看到与目标温度的明显偏差,但其范围一般不超过 4 块板坯。说明模型能较好地将表面温度控制在目标温度附近,能够满足连铸生产中的需要。

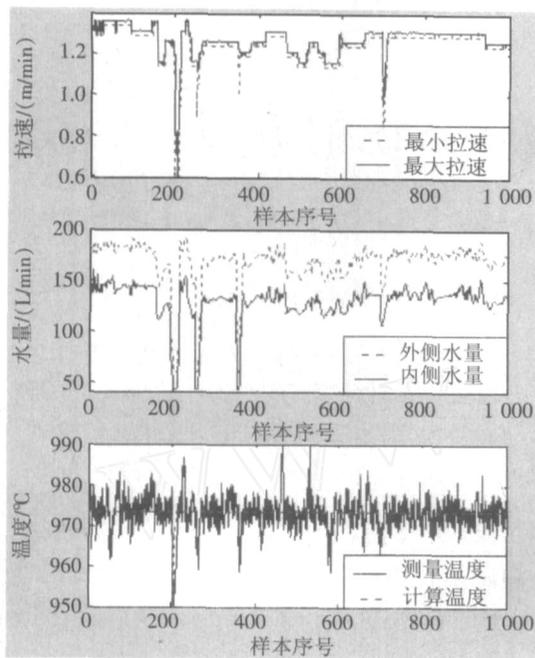


图 7 现场参数及表面温度

Fig. 7 Comparison of surface temperature and industrial data

#### 4 结束语

在凝固传热数学模型基础上,建立了可以用于在线计算的铸坯温度推算模型和分段表面温度预测模型。在二冷配水的动态控制时,利用分段推导的表面温度预测模型的反复计算在线调整神经网络的权重进而调整冷却水量,在原理上更优于直接按照模型推算温度与目标温度误差的控制方式;并且用仿真的方法对比了两种控制在波动范围和调整时间上的差别。

#### 参考文献:

- [1] 刘颖,曹天明,郝安民.板坯连铸二次冷却控制模型[J].北京科技大学学报,2006,28(3):290-292  
 LU Ying, CAO Tian-min, XIAO An-min Control model for secondary cooling in continuous slab casting[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,

2006, 28(3): 290-292

- [2] 韩朋,张兴中.连铸坯二次冷却的非稳态控制[J].钢铁研究学报,2002,14(4):73-76  
 HAN Peng, ZHANG Xing-zhong Non-steady control of secondary cooling used for continuous casting slab[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(4): 73-76
- [3] 刘坤,冯亮花,赵连刚,等.板坯连铸机二冷段的动态控制模型[J].钢铁研究学报,2005,17(2):75-79.  
 LU Kun, FENGLiang-hua, ZHAO Lian-gang, et al Dynamic control model for secondary cooling zone of slab caster[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2005, 17(2): 75-79.
- [4] 陈志凌,张国贤,韩传基.连铸二次冷却智能优化控制的研究[J].钢铁,2006,41(9):40-43.  
 CHEN Zhi-ling, ZHANG Guo-xian, HAN Chuan-ji Research on intelligent control of secondary cooling of continuous casting[J]. Iron & Steel, 2006, 41(9): 40-43.
- [5] 郭戈,王伟,柴天佑.基于神经网络的铸坯凝固过程自适应控制[J].甘肃工业大学学报,2002,28(3):62-65.  
 GUO Ge, WANG Wei, CHAI Tian-you Adaptive control of slab solidification with neural networks[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2002, 28(3): 62-65.
- [6] 郝小红,温治,安月明.连铸坯粗轧热过程二维传热数学模型[J].冶金自动化,2006,30(5):20-24.  
 HAO Xiao-hong, WEN Zhi, AN Yue-ming Two-dimensional heat transfer mathematical model during thermal process for rough rolling of continuous casting slab[J]. Metallurgical Industry Automation, 2006, 30(5): 20-24.
- [7] 祭程,陈志平,宋景欣,等.高拉速板坯连铸机动态二冷控制模型研究[J].冶金自动化,2007,31(3):52-56.  
 JI Cheng, CHEN Zhi-ping, SONG Jing-xin, et al Research on dynamic secondary cooling control model for slab continuous casting machine with high casting speed[J]. Metallurgical Industry Automation, 2007, 31(3): 52-56.

[编辑:夏宁]

### 首钢水厂铁矿搭建技术信息管理平台

首钢水厂铁矿自主承担的技术信息管理平台中新老主厂磨选工序技术平台搭建工作已全部完成,并具备了使用条件。首钢水厂铁矿选矿系统技术信息管理系统是2008年的重点工程,是落实市场化、自动化、信息化和加强管理工作的主线,也是依靠信息化手段搭建技术管理平台、提升精细化管理水平的一项重要举措。该矿在首矿相关处室的协助下,组织有关人员深入研究,将SAP、MES系统数据、在线技术参数、岗位操作调整、试验考察、质量检验等数据在系统内集成,利用工序信息、数据和控制系统,链接延伸上下工序信息,并通过三级平台网页实时显示在人机交互画面上,使各级管理人员和岗位操作人员能全面地了解掌握现场各项工艺技术指标。实现了“一键查询”功能,为快捷、全面掌握经营生产中的各项指标,为系统分析和根据指标变化及时调整操作创造了有利条件。

(首钢矿业公司 党委宣传部 齐瑞普,袁旭光)