

板坯连铸二冷控制系统升级改造的研究

裴红星^{1,2}, 王长松¹, 张玉宝¹, 曹军民¹, 金学伟¹

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 阐述了对引进的奥钢联板坯连铸过程控制系统升级改造的必要性和可行性, 并建立了连铸板坯凝固传热的二冷动态控制模型, 分析了拉速和过热度等参数对铸坯生产过程的影响, 在二冷水控制模型中引入中包温度与目标温度的偏差值作为流量修正的前馈控制, 提高了二冷水流量对拉速变化的适应能力, 有利于铸坯表面温度的均匀稳定和提高铸坯的质量。在此基础上, 完成 Windows 操作系统下的二冷控制系统, 并与离线状态下 Alpha 小型机运行结果进行对比, 两者吻合良好。表明新模型在 Windows 操作系统下替代小型机进行二冷控制是可行的。

关键词: 连铸; 有限体积法; 凝固传热; 二冷动态控制; 升级改造

中图分类号: TF777.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1043(2009)03-0074-04

Study on upgrading of second cooling control system in slab continuous cast

PEI Hong-xing^{1,2}, WANG Chang-song¹, ZHANG Yu-bao¹, CAO Jun-min¹, JIN Xue-wei¹

(1. Mechanic Engineering School, University of Science and
Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Physic Engineering School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The present paper elaborates the necessity and feasibility of upgrading the process control and automation system in the slab continuous caster introduced from Voestalpine AG and analyzes the effect of such a few parameters as the drawing speed and the overheat extent on the process of the slab production by the established secondary cooling dynamic control model in the continuous casting slab solidification heat-transfer process. The deviation value of the tundish temperature and the target temperature are introduced in the secondary cooling water control model as the feedforward control of the flow revision and as the result the adaptability of the secondary cooling water flow to the change of the drawing speed is improved, thus contributing a great deal to the equality and consistency of the surface temperature of the slab as well as to the improvement in the quality of the slab. On the basis of the above mentioned effort development of the secondary cooling control system under the Windows operating system was accomplished and comparison was made between the running results of the current system and that of small sized Alpha machine running under the off-line condition and they are in good agreement with each other. It shows that the new model can replace the secondary cooling control function of the small sized machine under the Windows operating system.

Key words: continuous casting; finite volume method; solidification heat-transfer; dynamic control of secondary cooling; upgrading

从 20 世纪 90 年代后期起, 国内十几家钢厂 陆续引进了奥钢联的板坯连铸生产线, 其板坯连

作者简介: 裴红星(1975 -), 男, 北京科技大学机械工程学院, 讲师, 博士生, 从事机电、计算机应用与自动化的研究。

铸机自动控制系统在功能分配上为分级式层次结构:L1级是基础自动化级,L2级是过程控制级。在美国DEC公司Alpha Station Open VMS操作系统环境下运行。主要负责处理包括成分控制、质量判定、二冷配水、优化切割和生产参数采集等。其中板坯连铸控制模型中二冷配水模型是该控制系统的数学模型中最重要的核心部分。

由于硬件生产厂家产权的变更,备件购买及质量难以得到保证,且掌握Open VMS操作系统的技术人员短缺造成的系统维护越来越困难,严重影响了铸坯质量,从生产能力及开发新钢种,提高企业的竞争能力来讲,控制系统的升级改造都迫在眉睫^[1]。

PC Server的飞速发展,计算、存储、通讯能力都得到了很大的提高,使PC Server取代该控制系统的Alpha小型机,在Windows操作系统下实现对控制系统升级改造成功的可能性大为提高。本文结合某钢厂的实际情况,研究了控制系统中最重要的二冷控制模型,并与控制实际生产的Alpha机在相同参数情况下离线运行的结果进行对比验证。

1 二冷控制采用算法的基本思想

二冷控制采用有限体积法,其基本思想是:将计算区域划分为一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积,将待解的微分方程对每个控制体积积分,得出一组只含有时间导数的常微分方程,然后进行时间积分,可以采用任意求解常微分方程系统的标准数值解法,最常用的是线性多步法和龙格-库塔法。在时间层 t_n 与 t_{n+1} 的公共界面 $t = t_n$ ($n = 1, 2, \dots, n-1$),空间的剖分可以是两重的,即 t_n 与 t_{n+1} 的网点在该时间层上可以不一致,这样处理给有限体积网络的构造带来了极大的灵活性^[2]。

把描述二冷动态控制模型的偏微分方程转化为只包含时间导数的常微分方程组进行求解。将铸坯沿拉速方向分割成(0~N)个断面。假定0断面在结晶器弯月面处。各个断面都以 $v = v(t)$ 的拉速沿 z 轴运动,依次经过结晶器和二冷段各区域,同时新的断面在结晶器弯月面附近以一定的频率(与拉速 v 有关)产生,出二冷区后结束。两相邻断面之间的距离用 Δh 来表示,本文令 $\Delta h = 10 \text{ cm}$ 。通过实际的拉速跟踪计算各切片单元所在位置,在相邻的两个断面之间的单元内假设

温度 T 只是空间位置的函数,不随时间 t 而变化。首先,在一个单元内对传热偏微分方程按各个不同的相区进行空间位置积分,得到的是温度 T 关于时间导数的常微分方程组,按追赶法求解此常微分方程组,得到温度关于时间的导数;第二步,由温度关于时间的导数就可求得铸坯的表面温度,根据此温度与目标表面温度的差值,确定冷却水的喷淋量。依次循环,求解出整个铸坯连铸过程的铸坯表面温度,进而确定冷却水量^[3]。

2 连铸二冷动态模型的建立

钢的成分除Fe外,还有C、Si、Mn、P、S等其他元素,钢水的凝固过程为多元系相变,凝固过程中存在固相区、糊状区和液相区,板坯凝固传热的微分方程为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

式(1)中, ρ 为钢的各相密度, kg/m^3 ; C 为钢的各相热容, $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$; λ 为各相导热系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

设固相区、糊状区、液相区的厚度分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ,各个相区内的温度分布是厚度方向的函数,以厚度方向为 x 轴,其关系如下^[4]。

$$\text{固相区: } T(x) = a_0 + a_1 \frac{x}{d_1} + a_2 \frac{x^2}{d_1^2} \quad (2)$$

$$\text{糊状区: } T(x) = b_0 + b_1 \frac{x - d_1}{d_2} + b_2 \frac{(x - d_1)^2}{d_2^2} \quad (3)$$

$$\text{液相区: } T(x) = T_l + l_i \{1 - [1 - (x - d_1 - d_2)/d_3]\} \quad (4)$$

式(1~4)中, T_l 为钢的液相线温度,K; a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 l_i 为待定系数。

将一维传热数学模型的基本方程式(1)两边在同一相区内任意两厚度 x_1 、 x_2 之间进行积分,有^[5]:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial T}{\partial t} dx = \frac{\lambda}{\rho C} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \quad (5)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial T}{\partial t} dx = \frac{d}{dt} \left[\int_{x_1}^{x_2} T dx \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{x_1}^{x_2} T dx \right] \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\int_{x_1}^{x_2} T dx \right] - \left[T \frac{dx}{dt} \right]_{x_1}^{x_2} \quad (6)$$

$$\frac{\lambda}{\rho C} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx = \frac{\lambda}{\rho C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1}^{x_2} \quad (7)$$

$$\text{即: } \frac{dx}{dt} \int_{x_1}^{x_2} T dx - \left[T \frac{dx}{dt} \right]_{x_1}^{x_2} = \frac{\lambda}{\rho C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1}^{x_2} \quad (8)$$

令 $E(*) = \frac{\lambda_*}{\rho C_*}$, $F(*) = \frac{1}{\lambda_*} \frac{\partial q_*}{\partial t}$, 考虑边界条件及凝固潜热, 得到只含有时间导数的常微分方程组:

$$\begin{bmatrix} A_0 & A_1 & 0 \\ 0 & B_1 & B_2 \\ C_0 & C_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dq_0}{dt} \\ \frac{dq_1}{dt} \\ \frac{dq_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12q_0}{d_1^2} E(s) - d_1 F(s) \\ \frac{12b_1}{d_2^2} E(f) + d_2 F(f) \\ -\frac{7l_1}{d_3^2} E(l) - \frac{d_3}{6} F(l) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中, $A_0 = 4 + \frac{d_1}{\lambda_k} \frac{\partial q_k}{\partial T} \Big|_{T=q_0}$, $A_1 = \frac{q_k}{\lambda_k} - \frac{1}{d_1} (3a_1 + 4a_2)$, $B_1 = -\frac{b_1}{d_1} - \frac{q_k}{d_1} \frac{d_1}{\lambda_k} - \frac{6}{d_2} (T_1 - T_s)$, $B_2 = -2\frac{b_1}{d_2} - 4\frac{b_1}{d_2}$, $C_0 = \frac{1}{6} \frac{d_3}{\lambda_k} \left[2\frac{\lambda_k}{d_1} + \frac{\partial q_k}{\partial T} \Big|_{T=q_0} \right]$, $C_1 = -2\frac{l_1}{d_3} + \frac{1}{6} \frac{d_3}{\lambda_k} \left[\frac{\lambda_k}{d_2} b_1 + q_k \right]$, $C_2 = -l_1 \left[\frac{2}{d_3} + \frac{1}{d_2} - \frac{1}{6} \frac{d_3}{\lambda_k} \frac{\lambda_k}{d_2^2} b_1 \right]$.

由式(9)对时间积分, 可以求得各个相区的温度分布。

3 二冷水控制模型

在铸坯断面尺寸不变的情况下, 二冷水量与拉速近似成一次或二次曲线关系, 若按照一次关系处理, 当拉坯速度增大时, 二冷水量迅速增大, 容易造成铸坯表面温度过分降低, 甚至进入脆性区; 拉坯速度减小时二冷水量随之下降, 容易造成铸坯表面温度回升。

铸坯凝固传热数学模型的计算表明: 在拉速不变的前提下, 钢水浇铸温度出现较大波动时, 只要各冷却回路水量随过热度进行相应调整, 就可以保证由模型计算出的铸坯表面温度稳定在目标温度附近。浇铸温度是可以测量的, 因此浇铸温度可作为影响铸坯生产过程的一个扰动来处理。实际控制中, 以标准浇铸温度情况下的前置控制为基础, 通过铸坯凝固传热数学模型获得过热度关于不同钢种和断面尺寸的铸坯对各冷却水回路的修正系数。以中包温度作为前馈信号, 实现对各回路给定水量的修正, 二冷水量与过热度、拉速的关系可表示为:

$$Q_i = (A_i v^2 + B_i v + C_i) (1 + \alpha \Delta T) \quad (10)$$

式(10)中, Q_i 为第 i 冷却段的配水量; v 为拉速, m/min ; A_i 、 B_i 、 C_i 为第 i 冷却段对应拉速 v 的配水参数; ΔT 为中包温度与目标温度的偏差

值, $^{\circ}C$; α 为过热度流量修正系数, $1/^{\circ}C$ 。

4 动态模型的验证

采用以上模型为核心编制的软件, 以 $1500 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的 Q235B 钢坯为例计算铸坯温度, 并与控制实际生产的 Alpha 机在相同参数情况下离线运行的结果进行对比验证。连铸机的参数如下。

该铸机为立弯型板坯连铸机, 平板型结晶器, 铸机基本弧形半径 8 m , 矫直方式为连续矫直。二冷区共分为 8 个冷却段, 其中第 8 冷却段的水量不进行控制, 处于常开状态, 其余 7 段的长度分别为: 0.50 、 1.08 、 1.70 、 1.90 、 3.81 、 3.84 和 4.66 m 。其中 1 段的宽面和窄面冷却水量、4~7 段内外弧冷却水量按一定的比例分配。2、3 段内外弧冷却水量相同。钢的物性参数^[6]: 固态、糊状、液态的比热容分别为 665.31 、 700.00 、 $743.50 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 密度为 7200 kg/m^3 ; 固态、糊状、液态的导热系数分别为 31.33 、 41.27 、 $99.00 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; 液相温度为 $1522^{\circ}C$, 固相温度为 $1495^{\circ}C$, 浇铸温度为 $1553^{\circ}C$ 。浇铸速度 1.0 m/min , 浇铸速度波动不超过正常拉速的 20% 。运行结果对比如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 两种运算能够较好的吻合, 以上运算是基于离线状态的, 此时实际水量和设定水量相等, 即: 在不考虑实际水量波动的情况下, 对于不同的钢种、不同的板厚、拉速波动时, 自行开发的模型在 PC 机运行结果和 Alpha 机的离线运行效果吻合度良好。

5 结 论

(1) 采用有限体积法建立了板坯连铸凝固传热二冷动态控制的数学模型, 并与控制实际生产的 Alpha 小型机在相同参数情况下离线运行的结果进行对比验证, 结果表明, 铸坯表面温度的计算符合生产实际, 参数的选取和处理方法基本合理, 新模型在 Windows 操作系统下替代小型机进行二冷控制是可行的。

(2) 二冷水控制模型中引入中包温度与目标温度的偏差值作为流量修正的前馈控制, 有利于提高二冷水流量对拉速变化的适应能力及铸坯表面温度的均匀稳定, 以提高铸坯的质量。

(3) 由于运算结果的吻合度是在离线状态下得到的, 并没有考虑实际水量波动的情况, 所以新模型是否能很好的完成对实际生产的控制, 还需要在实际生产中进一步验证。

表 1 研发模型与 Alpha 机运行结果对比

拉速/ (m·min ⁻¹)	1 段坯壳厚度/ mm		7 段冷却水量/ (L·m ⁻² ·min ⁻¹)		7 段表面温度/ ℃		拉速/ (m·min ⁻¹)	1 段坯壳厚度/ mm		7 段冷却水量/ (L·m ⁻² ·min ⁻¹)		7 段表面温度/ ℃	
	Alpha	PC	Alpha	PC	Alpha	PC		Alpha	PC	Alpha	PC	Alpha	PC
1.000	17.1	17.2	73.7	73.7	925.5	925.5	1.183	16.3	16.3	74.0	74.0	925.1	925.1
1.017	17.1	17.1	73.7	73.8	925.4	925.4	1.167	16.3	16.7	74.1	74.1	925.0	925.0
1.033	17.1	17.0	73.7	73.8	925.5	925.6	1.150	16.4	16.4	74.2	74.2	925.1	925.1
1.050	17.0	16.9	73.8	73.9	925.1	925.1	1.133	16.5	16.3	74.3	74.3	924.7	924.8
1.067	16.9	16.9	73.8	73.8	925.2	925.2	1.117	16.7	16.7	74.4	74.4	924.8	924.8
1.083	16.9	16.7	73.8	73.8	925.3	925.3	1.100	16.7	16.7	74.5	74.5	924.9	924.9
1.100	16.8	16.8	73.8	73.9	925.4	925.4	1.083	16.8	16.7	74.6	74.6	925.1	925.1
1.117	16.7	16.7	73.8	73.8	925.4	925.5	1.067	16.8	16.8	74.7	74.7	924.7	924.7
1.133	16.6	16.6	73.8	73.8	925.5	925.5	1.050	16.9	16.9	74.9	74.9	924.7	924.7
1.150	16.4	16.4	73.8	73.8	925.1	925.1	1.033	17.0	17.0	75.0	75.0	924.7	924.7
1.167	16.3	16.3	73.9	73.9	925.2	925.2	1.017	17.1	17.1	75.1	75.1	924.3	924.3
1.183	16.2	16.2	73.9	73.9	925.3	925.5	1.000	17.1	17.1	75.2	75.2	924.4	924.4
1.200	16.0	16.0	74.0	74.1	925.5	925.5							

[参考文献]

[1] 张建立,王长松,樊 厉,等.奥钢联板坯连铸过程控制系统升级改造的研究[J].冶金能源,2006,(5):55-58.

[2] 吴子牛.计算流体力学基本原理[M].北京:科学出版社,2001:128-173.

[3] C W Lan,C C Liu and C M Hsu. An adaptive finite volume method for incompressible heat flow problems in solidification[J]. Journal of Computational Physics, 2002,178: 464-497.

[4] 陈建尧,范宝明.二次冷却动态控制的研究与分析[J].宝钢技术,2000,(4):37-39.

[5] Z Radovic M Lalovic. Numerical simulation of steel ingot solidification process [J]. Journal of Materials Processing Technology. 2005,160: 156-159.

[6] 奥钢联.安阳钢铁公司第一炼轧厂板坯连铸生产技术手册[M].1998

(修回日期:2008-09-20)

(上接第 33 页)

自于氧枪的周围设备和环境,比如氧压不均,转炉炉口气流压力差,金属飞溅等。从图中还可以看出:常规 PID 控制超调(振荡)量较大,若随机干扰加大,则系统将变得不稳定。而模糊自适应 PID 控制超调量较小,能有效和迅速地消除干扰,具有较强的鲁棒性。常规 PID 控制的扰动响应稳态精度不高,存在较大的静差。而模糊自适应 PID 控制则能对负载的变化做出及时反应,且稳态精度较高。

5 结 论

本文针对氧枪系统的时变、耦合等非线性特点,提出了一种基于自适应模糊 PID 控制策略的氧枪定位控制方案,将 PID 控制算法的输出误差作为模糊控制器的输入,通过建立合理的枪位模糊控制规则,应用模糊推理自学习方法来自动调整 PID 参数。仿真结果以及在梅山钢铁公司炼钢厂 1 号转炉上的应用实践表明,此方法具有超

调量小,调节时间短,鲁棒性好、抗干扰能力强、稳态精度高等优点,是适用于氧枪定位控制的有效策略。

[参考文献]

[1] 张乐金,薛 峰,崔代宝.炼钢厂转炉系统自动化控制[J].冶金动力,2003,(6):69-71.

[2] 李敏远,都延丽,姜海鹏.智能自整定 PID 在药剂温度控制系统中的应用[J],控制理论与应用,2003,(5):806-807.

[3] 周黎英,赵国树.模糊 PID 控制算法在恒速升温系统中的应用[J].仪器仪表学报,2008,(2):406-409.

[4] 田淑杭,姜丽娟.一种参数自整定模糊 PID 控制器的研究[J].电气传动自动化,2003,(6):28-30.

[5] 陈 龙,马伯渊,张雪峰.智能 PID 控制在电石炉电极调节系统中的应用[J].系统仿真学报,2007,(7):1-4.

[6] 李国勇.一种新型的模糊 PID 控制器[J].系统仿真学报,2003,(10):1492-1493.

[7] Hiroshi Yamen, Bell J T. Development of expert system and Mn online sensor for bop process [C]// Steelmaking Conference Porceedings,1991,(74):453-458.

[8] Yang Chunhua,Li Jian . A starter testing system based on fuzzy-PID control [J]. Cont- Theory & Applications,2003,(10):1-6.

(修回日期:2008-11-20)