



# 连铸过程中几个关键环节的设计与实现<sup>1)</sup>

郭戈<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup> 柴天佑<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(甘肃工业大学电气工程与信息工程学院 兰州 730050)

<sup>2</sup>(大连理工大学信息与控制研究中心 大连 116023)

<sup>3</sup>(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

(E-mail: geguo@yeah.net)

**摘要** 根据连铸生产实际需要,对该过程中的结晶器液位控制、漏钢预报以及铸坯冷却控制等关键问题设计了一套智能化综合控制与监测系统.在连铸生产中使用表明,该系统快速而准确,实时性能良好,便于实施,具有很高的实用价值.

**关键词** 结晶器液位,漏钢预报,热电偶系统,铸坯冷却,智能控制

**中图分类号** TG249, TP273

## DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR KEY LINKS IN CONTINUOUS CASTING PROCESS

GUO Ge<sup>1</sup> WANG Wei<sup>2</sup> CHAI Tian-You<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(College of Electrics and Information Engineering, Gansu University of Technology, Lanzhou 730050)

<sup>2</sup>(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

<sup>3</sup>(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110006)

(E-mail: geguo@yeah.net)

**Abstract** According to the requirement of continuous casting process, a synthetic intelligent control and monitoring system is presented to solve three key problems: mould level control, steel leakage prediction and slab cooling control in the process. Being accurate, rapid, effective and practicable, it is very useful and worthy to be popularized.

**Key words** Mould level, steel leakage prediction, thermocouple system, slab cooling, intelligent control

## 1 引言

连铸生产中结晶器液位的波动可能使结晶器保护渣和杂滓卷入钢水,严重影响铸坯质

1) 国家计委“九五”科技攻关项目(85-524-02-05)和甘肃工业大学博士基金(139903)资助

收稿日期 2000-08-16 收修改稿日期 2001-04-29

量,甚至导致溢钢或漏钢事故,这不但危害人身和设备安全,而且会造成巨大的经济损失,而铸坯冷却控制又直接决定着最终铸坯的品质,可见,结晶器液位控制、漏钢预报和铸坯冷却控制是连铸过程中的几个关键问题<sup>[1,2]</sup>.但由于连铸生产在高温恶劣环境中进行,这使得连铸过程的控制相当复杂,主要体现在:过程中存在外部扰动和未建模动态或具有时变特性和非线性特性,过程本身和执行机构具有较大的滞后,用于过程测量的传感器也经常受到高频测量噪声的影响等.上述原因使得现有的液位控制方法和以拉速-流量曲线为基础的 PID (Proportional Integral Differential)冷却控制方法难以获得良好的液位控制和冷却控制效果;同时,现有的横向测温预报方法通常也因为测不到纵裂引起的升温现象而无法准确预报漏钢事故.

本文的研究对象是国内某大型钢铁企业的连铸连轧“九五”攻关课题.该钢厂的弧形方坯连铸机工艺要求结晶器液位偏差应小于 10mm,而且波动不能太剧烈;铸坯表面温度必须严格控制在脆性温度区间口袋区以外,即铸坯在矫直点处的温度应在 900℃以上,以防止铸坯出现表面横向裂纹;必须控制铸坯的降温速率,以防止铸坯表面温度进入低延性区段而导致裂纹的扩展;铸坯沿铸流方向上的温度回升应控制在一定范围之内,以防止铸坯在表面温度升高导致的凝固前沿张力作用下产生裂口.本文对该钢铁厂的方坯连铸机设计了一种智能化结晶器液位控制和铸坯冷却控制策略,同时对漏钢预报热电偶系统进行了改进并以此为基础设计了一种漏钢预报策略.这套方法克服了传统方法的不足,在该厂实际运行取得了良好的效果.

## 2 结晶器液位控制器设计

由于受到高温钢水的腐蚀、磨损以及自身的结构特点,因此滑动水口具有非线性特性,实际液位控制中常用抖动补偿法对此进行补偿<sup>[3]</sup>,但剧烈的抖动会加速滑动水口的磨损,缩短其使用寿命.所以本文根据滑动水口的结构特点和其本身的特性,为其设计了如下非线性控制器

$$C_4 = K_n g(x_v) \quad (1)$$

其中增益  $K_n$  用来补偿滑动水口流量系统中的增益项,即选择

$$K_n = \frac{A_m}{c_c c_v \sqrt{2gh}} \quad (2)$$

上式右端为流量系统增益的倒数.  $g(x_v)$  则用来补偿滑动水口的非线性结构特性,即  $g(x_v)$  取为滑动水口有效流通面积与其移动位移之间的关系函数  $f(x_v)$  的逆函数,  $f(x_v)$  根据几何学和物理学知识得到,且有

$$f(x_v) = \pi r^2 - 2r^2 \arcsin\left(\frac{q - x_v}{2r}\right) - (q - x_v) \sqrt{r^2 - \frac{(q - x_v)^2}{4}} \quad (3)$$

由于中间包重量采用称重法测量很容易,而且它与结晶器液位之间的关系也比较明确,所以本文对中间包钢水重量设计了前馈控制器  $C_3$ . 为了便于工程应用,在实施时我们参考文献[3]中的前馈控制设计思路.另外,由于液压伺服机构和滑动水口所构成的流量开环系统是一个高阶系统,所以设计控制器时首先对该系统进行了降阶<sup>[4]</sup>.然后在此基础上采用内模控制策略设计自整定 PID 控制器  $C_2$  为



$$G_c(s) = \frac{F(s)\tilde{G}_{inv}(s)}{1 - F(s)\tilde{G}_{inv}(s)\tilde{G}(s)} \tag{4}$$

上式中各项的含义及其设计过程详见文献[5]. 因为结晶器液位通常在外部扰动作用下处于波动之中, 所以滑动水口的调节动作常常出现跳跃. 为了避免这种现象, 在控制器的微分项中用滑动水口位移的输出量取代位移调节偏差, 使控制器  $C_2$  的微分项中不包括执行机构设置值, 所以它的阶跃变化不会使控制输出产生微分冲击, 从而使水口的调节比较平稳.

外回路结晶器液位模糊预测控制器  $C_1$  以模糊控制器为主, 以液位预测作为它的修正或补充, 主要用来克服由拉坯速度和未建模动态等引起的噪声和测量噪声的扰动, 提高系统的稳态性能和鲁棒性. 根据该钢厂连铸工艺要求, 以分段直线组成的凸函数作为隶属函数, 根据结晶器液位控制系统的专家规则, 求出每个控制周期的最佳模糊控制器输出  $uk$ . 同时, 我们根据一个预先建立的液位输出预测模型, 采用梯度法对隶属函数进行修正, 从而完成对不太理想的模糊控制规则的调整. 另外, 本文在设计鲁棒预测控制策略时将包含有色噪声项的系统 CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integral Moving Average) 模型进行等效化处理, 在此等效模型的基础上求得最优 GPC (Generalized Predictive Control) 控制律, 作为此模糊控制器的补充, 克服了拉速等形成的有色噪声扰动. 同时, 为了克服测量噪声扰动, 本文在 GPC 准则函数中引入动态滤波方法. 最后, 将这种预测控制方法所提供的控制信号与前面的模糊控制信号综合起来, 形成如下结晶器液位控制器  $C_1$

$$u(k) = \begin{cases} 0, & |y(k) - y_0| < e_1 \\ \hat{u}, & y(k) - y_0 < 0, e_1 \leq |y(k) - y_0| < e_2 \\ \alpha \cdot uk + (1 - \alpha)\hat{u}, & y(k) - y_0 > 0, e_1 \leq |y(k) - y_0| < e_2 \end{cases} \tag{5}$$

其中  $\hat{u}, uk$  分别为由预测控制方法和模糊控制方法所得到的控制量.

本文设计的结晶器液位控制系统如图 1 所示, 其中  $C_4$  是为了克服滑动水口非线性流量特性的影响而设计的一个非线性补偿环节;  $C_3$  是为消除中间包重量(或中间包钢水液位)对结晶器液位的影响而设计的前馈控制器;  $C_2$  为液压伺服机构和滑动水口位移控制器, 它采用模型降阶和内摸控制方法设计;  $C_1$  是采用模糊预测控制策略设计的结晶器液位控制器, 它主要用来克服由拉坯速度和未建模动态等引起的噪声以及测量噪声的影响.

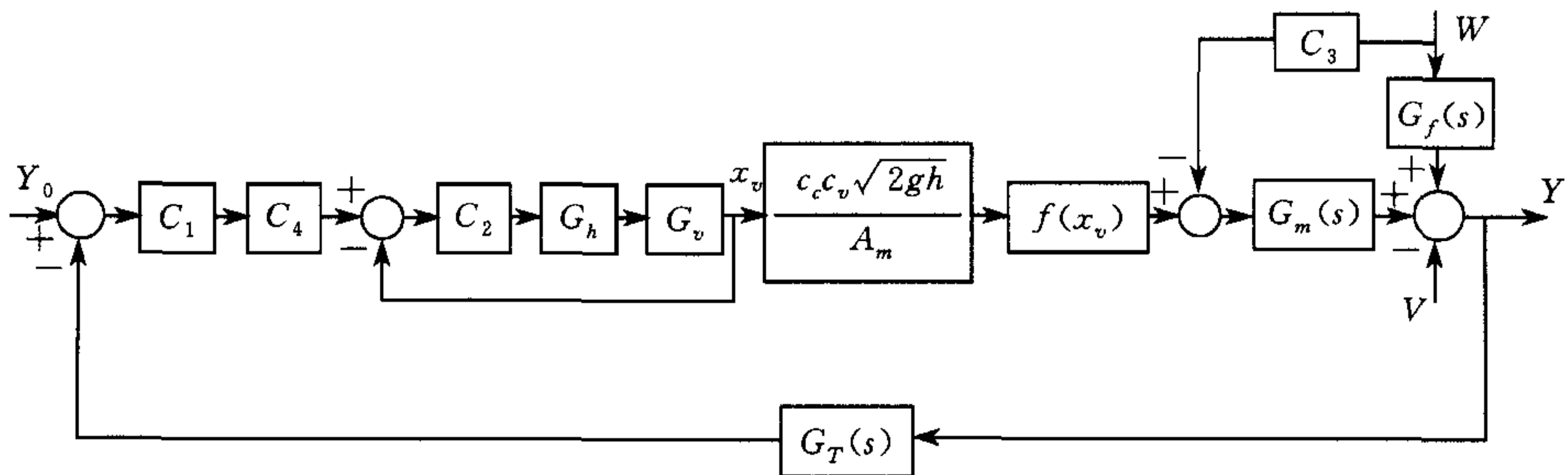


图 1 结晶器液位控制系统原理图

### 3 漏钢预报系统的设计

铸坯上发生的裂口实际上近似呈四边形向四周扩散, 而不是象通常所认为的那样以三



角形扩散,所以本文将热电偶埋设方法在保持热电偶总数不变的情况下由两排改为三排,而且经计算得到横向测温间距和纵向测温间距的最佳值.虽然两种热电偶埋设方法的热电偶总数相同,但改进后系统的热电偶排数和列数都比原系统有所增加,所以能检测到原系统无法检测到的铸坯纵裂、亮点和缩孔等缺陷.另外,由于在结晶器铜板中央(横向)位置的热电偶相对增多,这对于准确检测由铸坯鼓肚引起的断裂漏钢特别有用.在进行漏钢预报时,按第一排热电偶将系统分成不同的子系统,并将各子系统分为几个热电偶组,根据各组中所有热电偶温度模式的模糊加权组合做出决策,这保证了预报的准确性.

不同的结晶器铜板热状态对应着不同的温度变化模式,所以,拉漏预报的本质就是识别出可能引起漏钢的温度模式.为此,设  $p_1, p_2, \dots, p_{n_p}$  为漏钢预报系统中一个子系统的所有热电偶的温度模式,  $m_1, m_2, \dots, m_{n_p}$  为根据工艺状况预先确定的温度参考模式集合,首先建立如下模式族

$$x_k = \begin{cases} m_k, & k = 1, 2, \dots, n_p \\ p_k, & k = n_p + 1, \dots, n_p + n_t \end{cases} \quad (6)$$

这一模式族中各模式之间的关系可用如下矩阵  $R = [r_{ij}]_{l \times l}$  来描述

$$r_{ij} = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} [x_i(k) \cong x_j(k)] \quad (7)$$

这里模糊算子“ $\cong$ ”的含意如下

$$x \cong y = \frac{1}{2} [(x\varphi y) \wedge (y\varphi x) + (\bar{x}\varphi\bar{y}) \wedge (\bar{y}\varphi\bar{x})]$$

其中  $x\varphi y = \min(1, 1 - x + y)$ , “ $\wedge$ ”表示取小运算.这样就将温度模式识别的问题转化为根据模糊运算关系寻找一个模式-类别矩阵  $C = [c_{ij}]_{l \times n_p}$ , 它可以将上述关系矩阵进行如下分解

$$r_{ij} = \bigvee_{k=1}^{n_p} (c_{ik} \wedge c_{jk}) \quad (8)$$

本文采用专门设计的神经网络来解决这一分解问题,该神经网络的中间层和输出层激活函数分别采用

$$h_k = \bigvee_{l=1}^n (c_{lk} \wedge i_l) = c_{jk} \quad (9)$$

$$o_i = \bigvee_{k=1}^m (c_{ik} \wedge h_k) = \bigvee_{k=1}^m (c_{ik} \wedge c_{jk}) \quad (10)$$

这里  $m = n_p, n = l$ . 必须指出,训练数据  $(i_1, i_2, \dots, i_n) = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]$  (第  $j$  个元素为 1) 代表模式族  $x$  中的第  $j$  个模式. 如果用  $x_j$  和关系矩阵  $R$  中与之相应的行的数据  $o_i = r_{ji} (= r_{ij}, i = 1, 2, \dots, l)$  对模糊神经网络进行训练,就可得到  $c_{ij}$ .

在识别出各个子系统中所有热电偶温度的模式类之后,就可根据每个子系统中全部热电偶的温度情况进行决策.模糊决策系统是以可能引起拉漏事故的温度模式为基础根据预先定义的预报函数<sup>[5]</sup>进行漏钢预报的.当模糊决策系统的输出超过阈值  $y_r$  时,系统就发出警报,同时指出引起拉漏的可能原因和发生漏钢的位置.其中后者根据温度值最大的热电偶所在位置来确定,前者则取决于子系统中全部热电偶的温度模式.

## 4 铸坯冷却控制

本文设计的二次冷却控制系统结构如图 2 所示.目前常见的铸坯冷却模型大多是单纯

根据传热现象建立的铸坯凝固过程传热偏微分方程模型,这种方法由于没有考虑液芯中由电磁搅拌和自然对流引起的钢水对流散热,因而很不准确.本文综合传热、钢水流动和凝固三种现象建立了铸坯凝固过程模型,其中铸坯凝固传热偏微分方程如下

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial c_i} (s_i T) = S + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial c_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial c_i} \right) \quad (11)$$

其中  $C$  为比热,  $\rho$  为密度,  $\lambda$  为导热系数,  $T$  为温度, 对应于  $i=1, 2, 3$ ,  $s_i$  分别表示  $x, y, z$  方向上的速度  $u, v$  和  $w$ ,  $c_i$  分别表示  $x, y, z$  坐标上由  $S$  为凝固潜热引起的热流. 由于篇幅所限, 求解该方程的边界条件<sup>[6]</sup>不再赘述.

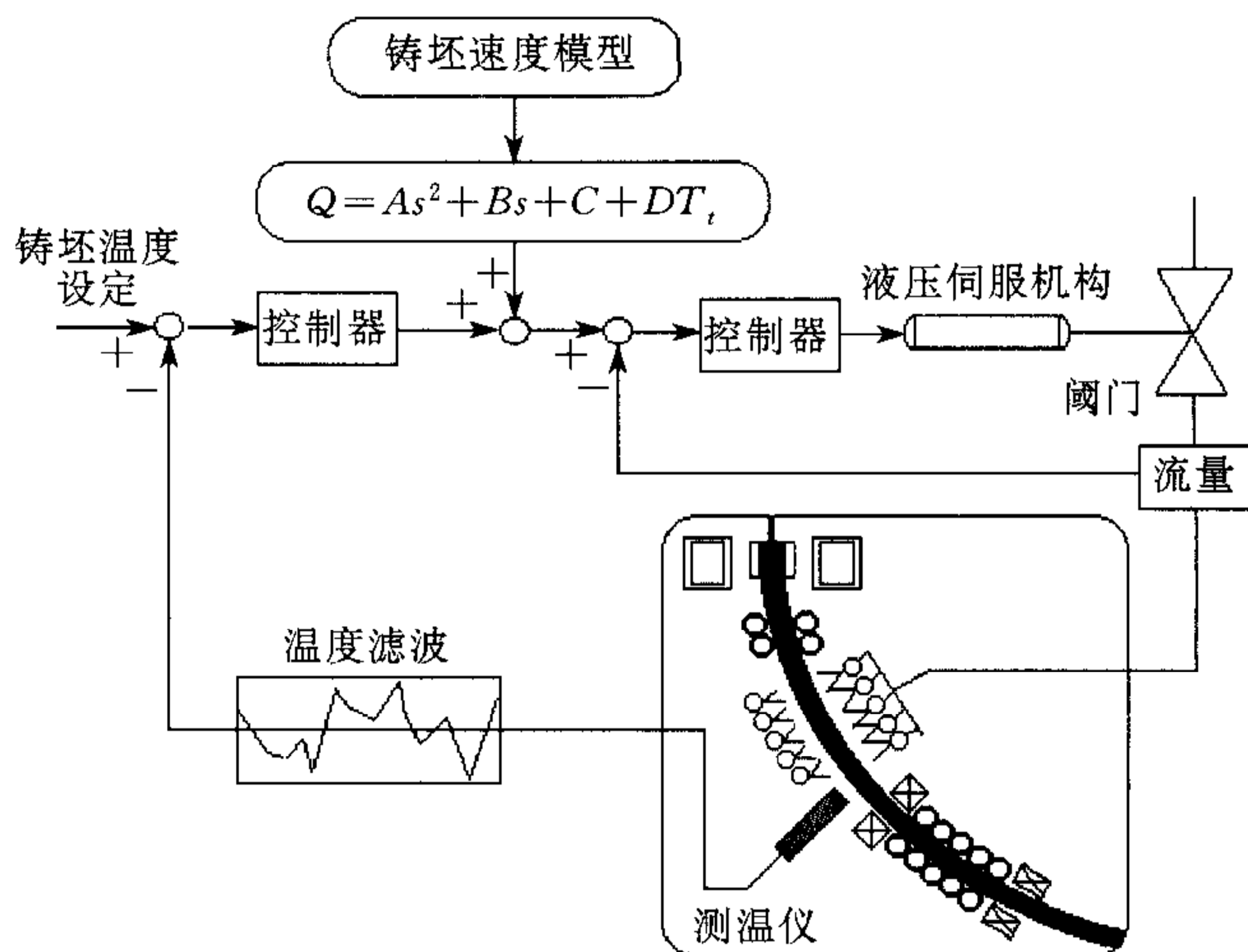


图 2 连铸二次冷却控制系统

中间包钢水温度与大包钢水平均温度、传导散失的热量、辐射散热、传导热损等有关. 本文所建立的中间包钢水温度模型是在忽略辐射散热后得到的. 另外, 为了冷却控制的需要, 本文还采用傅里叶级数描述铸坯横截面外形<sup>[7]</sup>, 并由保角映射方法<sup>[8]</sup>得到铸坯凝固层的厚度模型. 由于篇幅有限, 这两个模型的具体形式及其求解过程此处略去.

本文根据结晶器冷却水管进出口水温度差的最大允许值来设定一冷区冷却水量, 二次冷却水流量设定模型采用二次曲线配水模型. 铸坯表面温度反馈信号本来应由光学测温仪器测得, 但由于在冷水作用下铸坯表面覆盖有水雾和氧化铁皮, 因而光学测温仪无法测得铸坯表面的真实温度. 为此, 本文根据所建立的铸坯温度预测模型通过外回路控制器给出二次冷却水量的调节量, 该调节量和根据拉速等得到的水量设定模型输出值一起构成二冷水量控制的设定值.

通过对铸坯凝固过程模型的分析<sup>[6]</sup>发现, 在给定区段内铸坯表面温度可近似地用如下形式的集中参数模型描述

$$y(k) = A(z^{-1})y(k) + z^{-d}f[u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + e(k) \quad (12)$$

其中  $y(k)$  为某测量点处铸坯表面温度值,  $u(k)$  为该测量段冷却水量,  $f(\cdot)$  为结构未知的光滑非线性函数,  $e(k)$  是均值为零、方差为  $\lambda^2$  的白色噪声扰动. 该模型是铸坯冷却控制系统在其平衡点的一个邻域内的近似准确描述, 用它求解控制律时计算太复杂. 为此本文采用工程中常用的 Taylor 展开近似模型方法, 采用一个用静态梯度法训练的神经网络辨识该近似



模型,设计了一种基于神经网络的铸坯冷却自适应控制器.铸坯表面温度控制量可用神经网络输入输出的线性方程来描述

$$u(k) = \frac{y^*(k+d) - f_0[u(k-1), \dots, u(k-m+1)] - A(z^{-1})y(k)}{f_1[u(k-1), \dots, u(k-m+1)]} \quad (13)$$

其中  $f_1(\cdot), f_2(\cdot)$  分别为  $f(\cdot)$  泰勒展开的前两项,由神经网络学习得到.

## 5 工程实施结果

该钢厂 4 流弧形方坯连铸机中 1 流的直弧形半径为 3 000mm,正常拉速为 1~3m/min,结晶器横截面为 150cm×150cm,结晶器高度  $L=80$ cm,结晶器振动频率  $f=1.25\sim 6.7$ Hz,振幅为  $\pm 3$ mm,拉矫机最大拉力  $F=200$ kN,冷却水温度  $T_w=25^\circ\text{C}$ ,环境温度  $T_a=25^\circ\text{C}$ ,浇铸温度  $T_0=1\,520^\circ\text{C}$ ,液相温度  $T_l=1\,490^\circ\text{C}$ ,固相温度  $T_s=1\,450^\circ\text{C}$ ,波尔兹曼常数取为  $\sigma=5.67\times 10^{-12}\text{J}/(\text{cm}^2\cdot\text{K}^4\cdot\text{s})$ ,辐射系数取  $\epsilon=0.8$ ,钢密度取  $\rho=7.4, \rho_{ls}=7.2, \rho_l=7.0$ .在实际投入使用之前,我们对该系统进行了大量的仿真实验研究,结果表明采用本系统后,结晶器液位系统的鲁棒性大大改善,且稳态时液位基本没有出现波动和较大的液位偏差,所设计的漏钢预报系统也准确地预报了绝大多数漏钢事故,误报率(包括漏报)大约为 3~5%;铸坯冷却控制效果也比传统的 PID 控制策略有很大改善.由于篇幅所限,这里略去仿真实验研究的详细结果,下面只给出工程实施中的结果.

图 3 是该方法在实施中的结晶器液位控制性能,可以看出结晶器液位最大偏差约为 5mm,而且波动幅度很小.这是由于本文将拉速等形成的扰动作为有色噪声引入结晶器液位系统的模型之中,从而消除了主要由它们引起的结晶器液位剧烈波动.当然,这也与本文对滑动水口流量非线性特性和中间包重量扰动分别采取非线性补偿和前馈补偿措施有很大的关系.另外,在调试中针对更换钢包和拉速变化两种情况分别做了研究,结果发现液位在拉速刚增大后会下降,随后便很快回到稳定值.只是由于滑动水口和液位系统的惯性,使得液位回到给定值的过程需要一段时间,但没有出现较大的偏差.最大液位偏差也不超过 10mm.类似地,在更换钢包时,结晶器液位起初有所下降,但很快就稳定在给定值附近大约 5mm 范围之内.值得指出的是,这两种情况下结晶器液位回到稳定值后常常会反超稳定值几毫米,且之后再次回到稳定值所需时间较长,大约为 10~20 秒.这是由于内回路 PID 控制器的积分累积作用导致的.为此,在内回路 PID 控制器中引入了条件积分策略,当绝对误差较大时停止积分作用,从而避免了由此产生的较大超调量.

本文的漏钢预报方法在现场实施中也准确地预报了绝大多数漏钢事故,以一次铸坯粘结晶拉漏事故为例,测得的温度数据显示热电偶 6,17,18 的读数由正常值逐渐升高,而其它热电偶读数未见异常.模式识别结果表明这几处的温度呈上升直线模式,这时模糊决策系统指

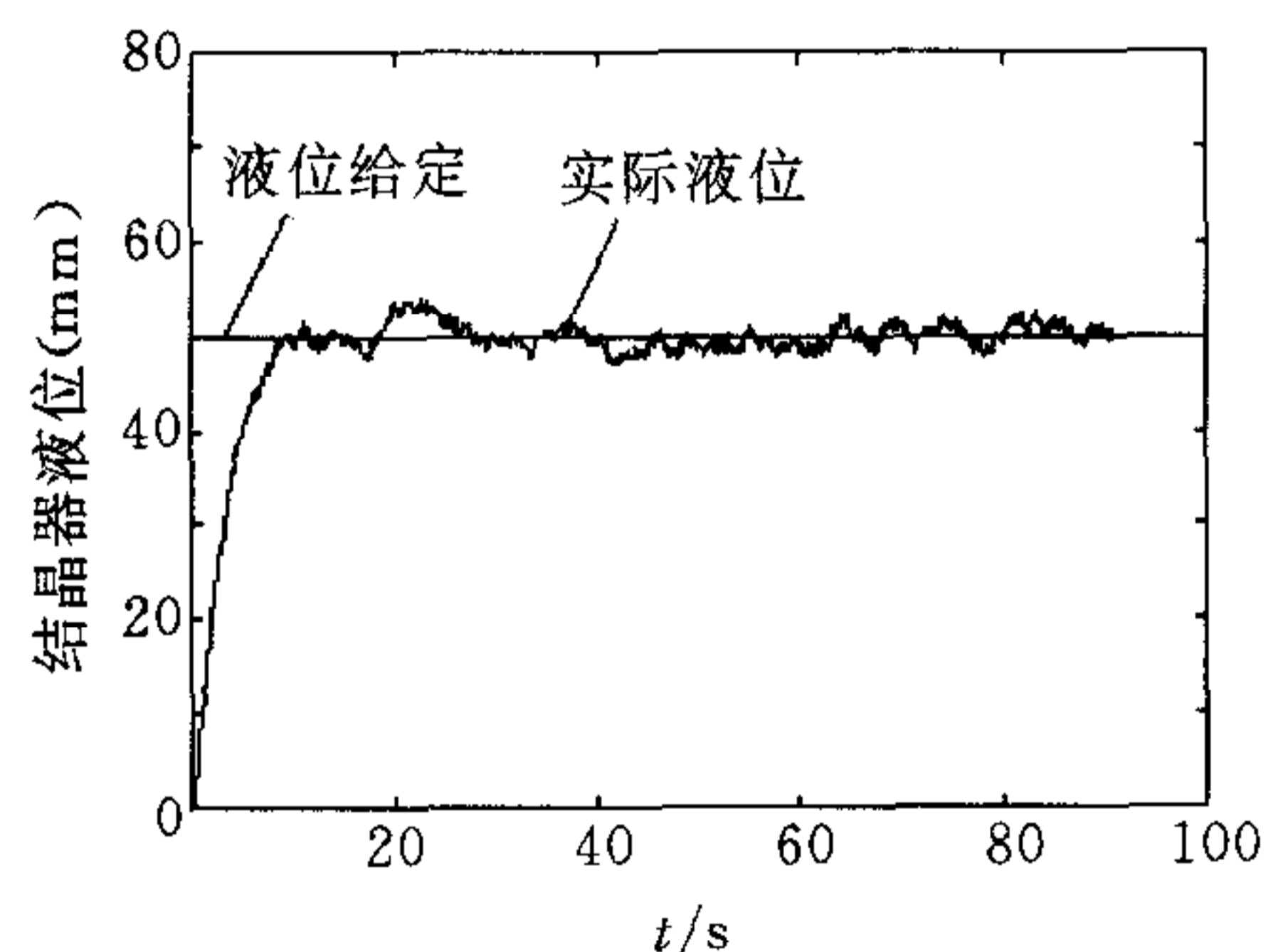


图 3 现场实施时的液位控制效果



出这三个热电偶所在区域可能发生铸坯与结晶器铜板粘结,但系统并未报警.大约经过 10 秒钟后,系统发出了漏钢警报,此时热电偶 6,17,18,30 处的温度模式呈现典型的峰状模式,而且其峰值按照热电偶从上到下的顺序出现.这说明粘结并没有在结晶器振动和润滑剂作用下得到消除,而是在拉坯机作用下逐渐生长扩散到了最底层热电偶处.此时,原有的漏钢预报系统数据显示浇注过程未见异常,因此没有报警,而本文的模糊决策系统不但预报即将发生漏钢事故,还指出可能发生在热电偶 6,17,18,30 所围成的区域内.另外,它提示引发拉漏事故的可能原因是该区域内出现了粘结或横向裂缝,事实上这正是一次粘结拉漏事故.对于即将达到使用寿命的结晶器而言,由于保护渣的凝结和钢水的腐蚀作用,使铸坯更容易发生粘结或裂缝,尤其是角部.因此,我们采取了“一个系统多重精度”的策略,即对漏钢预报系统中对应于结晶器角部的各子系统的灵敏度进行修正,使预报函数的输出阈值略小于其它部分的值.结果表明,该系统经过修正之后可以比现有系统提前数秒钟发出漏钢警报,从而有效地减少了上述原因引起漏钢的危险.原来该厂两个月左右就发生一次漏钢,而采用本漏钢预报系统之后半年间没有发生一次漏钢事故,而且预报系统半年中没有发生误报,也没有漏报过一次漏钢事故,不过出现这种情况的可能性还是存在的.

在浇铸温度为  $1510^{\circ}\text{C}$ 、拉速为  $1.5\text{m}/\text{min}$  的条件下进行二次冷却控制时,铸坯表面的温度

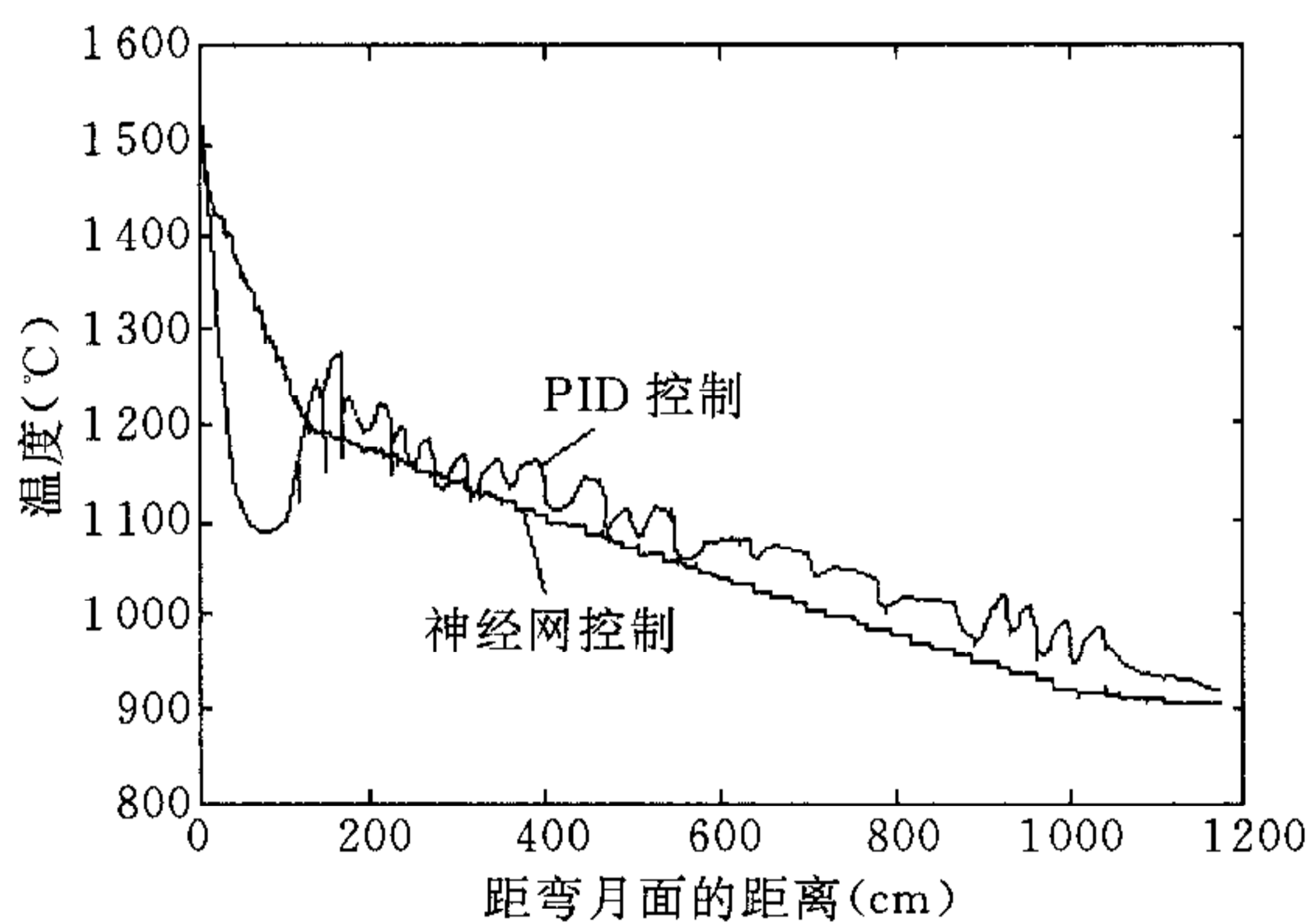


图 4 现场实施时的铸坯表面温度控制效果

表 1 铸坯表面温度测量值与计算值

检测点	计算值	测量值	误差(%)
结晶器底端	1204.7	1180	2.1
二冷一段出口	1084.6	1046	3.6
二冷二段出口	979.6	955	2.5
校直点	908.2	902	1.8

度曲线如图 4 所示.由图可见,采用现有的 PID 控制方法时,在结晶器底端铸坯温度常常会出现较大幅度的回升,且表面温度存在剧烈的波动.采用本文的方法时,铸坯表面温度在拉坯方向上平稳降低,没有较大的温度降低或回升.原因是除了本文设计的二次冷却控制策略更加有效之外;还因为现有的连铸机结晶器冷却水量一经设定后就不再调整,而本文在设定一次水量的基础上不断根据结晶器进出口冷却水温度差反馈信息对结晶器冷却水量进行调整,从而克服了结晶器下部铸坯温度大幅回升问题.现场中分别采用热电偶和接触式光电测温仪器,测量结晶器底端和二次冷却区两个冷却段出口处以及校直点的铸坯表面温度值,表 1 列出了测量结果和本文模型的计算结果.可以看出,计算的铸坯表面温度与实测数据相吻合,说明采用它作为铸坯温度设定模型是很可靠的.必须指出的是,实施中发现拉速对校直点附近铸坯温度的影响较大,而对于冷却区前段铸坯温度的影响则不很明显.与此相反,二冷前段冷却水量对于该段铸坯温度的影响较大,而对于矫直点附近铸坯温度的影响则不很明显.根据这一事实,我们采用增大冷却前段的冷却水量的办法来降低偏高的铸坯温度或消除幅度较大的温度回升,并通过适当加快拉速来避免铸坯表面温度在矫直点之前进入脆性区.

的铸坯表面温度与实测数据相吻合,说明采用它作为铸坯温度设定模型是很可靠的.必须指出的是,实施中发现拉速对校直点附近铸坯温度的影响较大,而对于冷却区前段铸坯温度的影响则不很明显.与此相反,二冷前段冷却水量对于该段铸坯温度的影响较大,而对于矫直点附近铸坯温度的影响则不很明显.根据这一事实,我们采用增大冷却前段的冷却水量的办法来降低偏高的铸坯温度或消除幅度较大的温度回升,并通过适当加快拉速来避免铸坯表面温度在矫直点之前进入脆性区.



## 6 结论

本文通过对中间包重量的前馈控制和对滑动水口流量非线性特性的补偿措施,以及将拉速等形成的有色噪声扰动引入结晶器液位模糊预测控制器设计之中,大大改善了结晶器液位系统的鲁棒性和稳态性能. 所提出的漏钢预报方法能够准确预报方坯连铸机的漏钢事故,提示操作人员引起拉漏的可能原因和出现拉漏的大体位置,并且对于不同情况可以有不同的灵敏度,从而增强了该漏钢预报方法的适应能力和可靠性. 该方法对于预报和防止因粘结等原因造成的漏钢事故很有效,也可用于板坯连铸机的漏钢预报,而且稍做修改后就可用于连铸生产的故障诊断. 另外,本文采用拉速和中间包钢水温度共同设定二次冷却水量,通过采用计算值取代测量值进行冷却水量设定,避免了中间包钢水连续测温这一难题. 所建立的铸坯凝固过程的温度模型为铸坯冷却控制提供了准确的温度设定,使铸坯温度自适应控制器能有效克服铸坯表面温度不均现象. 总之,该综合控制系统简便有效,不但可以用于正常浇铸,也能用于开浇和停浇等拉速变化较大的情况,对于完善我国的连铸生产技术具有十分重要的意义.

## 参 考 文 献

- 1 Hesketh T, Clememts D J, Williams R. Adaptive mould level control for continuous steel slab casting. *Automatica*, 1993, **29**(4):851~864
- 2 Cockerell R A. Design study for continuous caster tundish weight control and ladle steel flow estimate. In: Kwon W H, Won S, Proceedings ASI'97, Oxford: Pergamon Press Ltd, 1997. 308~313
- 3 Keyser R D. Improved mould-level control in a continuous steel casting line. *Control Engineering Practice*, 1997, **5**(2):231~237
- 4 郭戈,王伟,柴天佑. 连铸过程建模与控制. 控制与决策, 1997, **12**(增刊):1~6
- 5 郭戈. 连铸过程建模与控制方法的研究[博士学位论文]. 沈阳:东北大学, 1998
- 6 郭戈,柴天佑. 铸坯凝固过程计算机模拟. 中国有色金属学报, 1999, **9**(2):339~344
- 7 Haers F, Thornton S G. Application of mould thermal monitoring on the two strand slab caster at Sidmar. *Ironmaking and Steelmaking*, 1994, **21**(5):390~398
- 8 Kondo O. New dynamic spray control system for secondary cooling zone of continuous casting machine. In: Proceedings 1993 Steelmaking Conference. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1993. 309~314

**郭 戈** 1994 年于东北大学自动控制系本科毕业, 1998 年于东北大学自动化研究中心获博士学位, 现为甘肃工业大学副教授. 主要研究方向为复杂工业过程的建模与控制、智能化理论与智能系统等.

**王 伟** 1988 年在东北大学获工学博士学位, 1990 年至 1992 年在挪威工学院从事博士后研究, 现为大连理工大学教授、博士生导师、信息与控制研究中心主任、国家自然科学基金委员会学科评审组成员. 主要研究方向为自适应控制理论与应用、预测控制等.

**柴天佑** 1982 年和 1985 年在东北大学分别获工学硕士和博士学位, 现为东北大学博士生导师、国务院学科评议组成员. 主要研究方向为智能控制、自适应控制、复杂工业过程的建模、控制与优化等.