• 装备技术 Equipment Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.018

连铸结晶器粘结性漏钢预报系统研究与设计

周小凤[1], 肖俊生[2],王志春[2]
(1. 包头职业技术学院 电气工程系, 内蒙古 包头 014035; 2. 内蒙古科技大学 信息工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘　要:介绍了粘结性漏钢的形成过程,对比分析了正常工况和粘结漏钢形成过程中结晶器壁的温度变化特征。通过 BP 神经网络建立了漏钢预报温度识别模型,用某钢厂 200 组典型历史温度数据对其进行训练;采用虚拟仪器平台搭建了漏钢预报实验系统并进行了模拟实验。结果表明,该方法预报实时、准确,具有一定的应用价值。

关键词:连铸;粘结性漏钢;漏钢预测;BP 神经网络
中图分类号:TF777.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)05-0496-04

Research and Design of Sticker Breakout Prediction System in Continuous Casting Process

ZHOU Xiaofeng[1], XIAO Junsheng[2], WANG Zhichun[2]
(1. Department of Electrical Engineering, Baotou Vocational Technical College, Baotou 014035, China; 2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The forming process of sticking breakout was introduced, and the temperature variation characteristics of mold wall in normal working condition and bonding process were compared and analyzed. BP neural network was used to establish the temperature identification model for molten steel leakage prediction. 200 groups of typical historical temperature data of a steel plant were used for training. The simulation experiment was carried out by using the virtual instrument platform to build the molten steel leakage prediction experiment system. The results show that the method is practical, accurate and certain application value.

Key words: continues casting; sticking breakout; molten steel leakage prediction; BP neural network

连铸漏钢是粘结或裂纹等铸坯表面质量缺陷发展到一定程度产生的恶性质量事故[1]。据统计一次典型漏钢造成的经济损失可达 20 多万美元[2]。实际生产中,在众多的漏钢事故中粘结性漏钢发生频率最高,一般占各类漏钢事故的 70%左右[3]。尤其是随着现代化高效连铸技术的发展,不仅要求高质量连铸坯,而且要求高拉速,高拉速连铸引发出更复杂的结晶器传热、摩擦和润滑等问题,导致粘结性漏钢事故大大增加[1]。而且随着连铸机中其它先进装置的引进,设备操作的稳定性不断提升,其它类型的漏钢事故所占比率将大大降低,而粘结性漏钢发生的概率在漏钢事故中所占的比例将会变得越来越高[2]。因此,避免粘结漏钢已成为了连铸工作者迫切需要解决的重要难题,解决粘结漏钢对保证连铸生产顺行和生产高质量铸坯有十分重要的意义[4]。目前,避免粘结漏钢发生的手段一是改善浇铸工艺,从源头上主动预防粘结的发生;二是开发有效的坯壳和结晶器铜板粘结的检测和判定方法,尽早地识别粘结行为,并采取有效控制措施避免漏钢[3]。本文即针对粘结性漏钢进行预报系统设计,利用多支热电偶监测结晶器壁温度变化情况,通过 BP 神经网络识别模型对漏钢时温度特征进行识别并预报,最后,通过虚拟仪器平台搭建了漏钢预报实验系统。

1　粘结漏钢形成过程

据现场实践表明,粘结漏钢的形成原因十分复杂,与钢液的成分、浇铸温度、保护渣性能、拉坯的拉速以及结晶器的振动规律之间有着紧密的联系。在浇铸过程中,钢液通过中间包底部的侵入式水口注入结晶器,经过结晶器冷却水与钢液间的热交换形成表面凝固的板坯,并以铸造速度拉出结晶器[5]。由于结晶器内部钢液液位波动,结晶器内壁铜板与凝固坯壳之间会出现无液态渣,严重时会产生粘结,这会使得坯壳与结晶器内壁的摩擦阻力增加,发生粘结处容易被拉断,然后会向左右和下部分不断扩大,形成“V”型断裂,当坯壳到达结晶器出口时,极其容

收稿日期:2019-01-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61463041)
作者简介:周小凤(1982-),女,内蒙古赤峰人,硕士,副教授.研究方向:智能仪器、连铸控制新技术.
电话:13948825805,E-mail:xjsok@126.com

易产生漏钢[6]。这种现象被称为粘结性漏钢。

从粘结性漏钢的形成过程可以看出，发生粘结时由于钢液和结晶器壁的直接接触会导致结晶器壁温度的明显突变。因此，可以通过测量结晶器壁的温度变化趋势来推断发生粘结性漏钢的情况。热电偶测量法就是在结晶器壁选择合适的位置安装一定数量的热电偶传感器，使用这些传感器实时测量结晶器内壁铜板温度的变化情况，然后通过神经网络或机器学习等算法模式识别，进而对漏钢做出预报。

2　粘结漏钢温度变化特征

在采用热电偶测量法的粘结漏钢预报系统中，其工作原理是对结晶器铜板中布置的热电偶所采集的温度数据进行模式识别，当识别出有漏钢征兆时发出警告[7,8]。正常生产时，坯壳随着结晶器振动自上而下逐渐生长变厚，上排热电偶温度高于下排热电偶，而且两排热电偶温度数据变化比较平稳，波动范围较小，如图 1 所示。

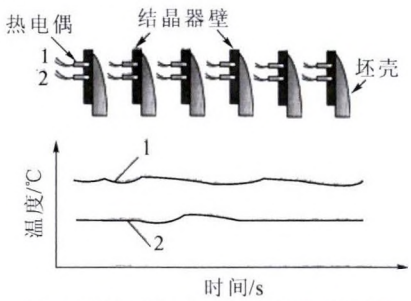

图 1　浇铸正常时的温度变化曲线图

Fig.1　Temperature curve of normal casting

当钢坯和结晶器壁发生粘结时，由于钢液直接与结晶器壁接触导致其温度显著上升；随着撕裂处逐渐下移，结晶器壁温度自上而下有一个温度先升高再缓慢降低的过程，即典型的漏钢温度模式。如用热电偶监测，表现为热电偶温度先上升再下降，纵向排列的热电偶监测到的温度变化趋势基本一致，只是在时间和空间上分别呈现为温度的“时滞”和“倒置”现象，粘结裂口在纵向上的传播速度一般小于铸机拉速[9]。整个过程热电偶温度数据波动较大，漏钢时热电偶温度变化如图 2 所示。

因此，如果能对连铸过程中结晶器壁热电偶温度变化模式进行准确识别，就能对漏钢事件提前做出预报。

3　漏钢预测模型建立

为了准确的进行漏钢模式识别，本文通过 BP 神经网络来建立预测模型。采用 3 层 BP 神经网络，

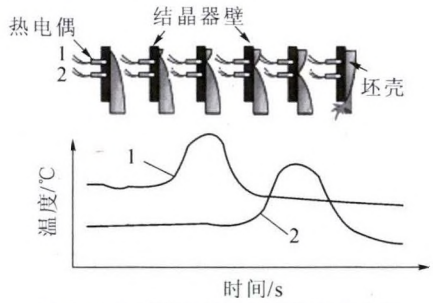

图 2　发生粘结时的温度变化曲线图

Fig.2　Temperature curve when bonding occurs

含 1 个输入层、1 个隐含层和 1 个输出层，其中输入层为 20 个神经元，隐含层为 25 个神经元，由于只需判断漏钢或不漏钢 2 种状态，故输出层采用 1 个神经元。网络结构如图 3 所示。

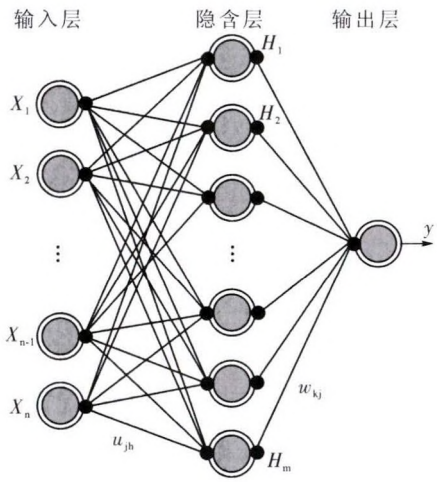

图 3　BP 神经网络结构图

Fig.3　Structural of BP Neural Network

其中，隐含层输出计算公式为[2]：

$$H_j=f\left[\sum_{i=1}^{n} x_i u_{jh}+w_{j0}\right] \tag{1}$$

式中，x_i 是神经网络的输入，u_{jh} 和 w_{kj} 分别是输入层和隐含层、隐含层与输出层之间的连接权值；f 为 S 型激活函数[2]：

$$f(x)=\frac{1}{1+e^{-x}} \tag{2}$$

输出层输出采用线性加权求和：

$$y=\sum_{j}^{m} H_j w_{kj}+w_{j0} \tag{3}$$

其算法流程如图 4 所示。

模型离线训练过程如下：从某钢厂采集的历史数据选取 200 组典型的温度序列作为训练样本，其中正常样本 150 组，漏钢样本 50 组。BP 算法的目标误差为 10^{-6}，学习速率为 0.1，最大训练次数为 200。

训练过程如图 5 所示。

由图可以看出：采用 BP 模型经过 180 多次训

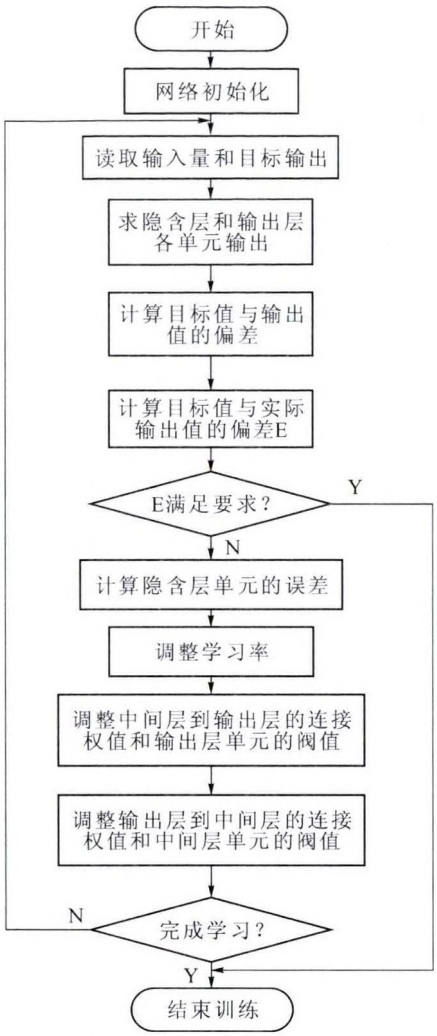

图 4 BP 网络学习规则流程图
Fig.4 BP network learning rule flow chart

练达到了训练精度。经训练后的神经网络即可用于对实际温度进行模式识别，进而预测漏钢的发生情况。

4 漏钢预报实验系统

漏钢预报系统基于 NI 公司的虚拟仪器平台来实现。虚拟仪器是由计算机、模块式硬件和软件组成的测试系统，可以方便灵活地完成对被测信号的采集、分析、判断、显示及数据存储等。

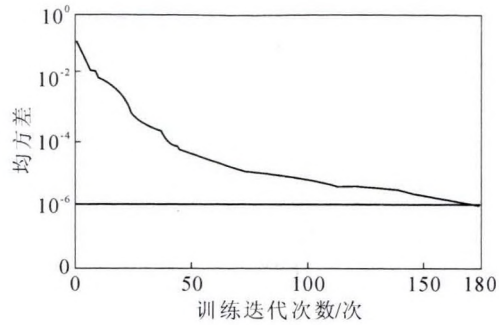

图 5 BP 网络模型训练过程
Fig.5 BP network model training process

4.1 系统硬件结构

漏钢预报实验系统结构如图 6 所示。系统采用虚拟仪器平台，K 型热电偶的输出信号经 SCC-TC01 热电偶温度调理模块调理并进行冷端补偿后，经 SCC-68 接线盒送入数据采集卡 PCI-6221，多路温度数据经 PCI-6221 转换为数字量后送入计算机进行处理。一块 PCI-6221 板卡可完成 16 路温度数据采集，系统中采用 2 块 PCI-6221 来采集数据。

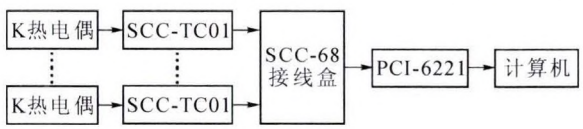

图 6 漏钢预报虚拟仪器系统结构图
Fig.6 Virtual instrument system architecture of breakout prediction system

4.2 系统软件实现

由于整个系统采集的数据种类多数据量大，为了提高数据采集处理速度，软件架构采用生产者 / 消费者设计模式。该模式包括一个或多个并行 while 循环，每个循环以不同的速率执行任务；在本系统中，生产者循环负责完成所有数据的采集任务，并将采集到的温度数据送入队列，该过程耗时极少。消费者循环从队列中读取数据，并完成数据的滤波、数据抽样、模式识别等处理，同时，可将处理后的数据按需求进行保存[10]，程序框图如图 7 所示。

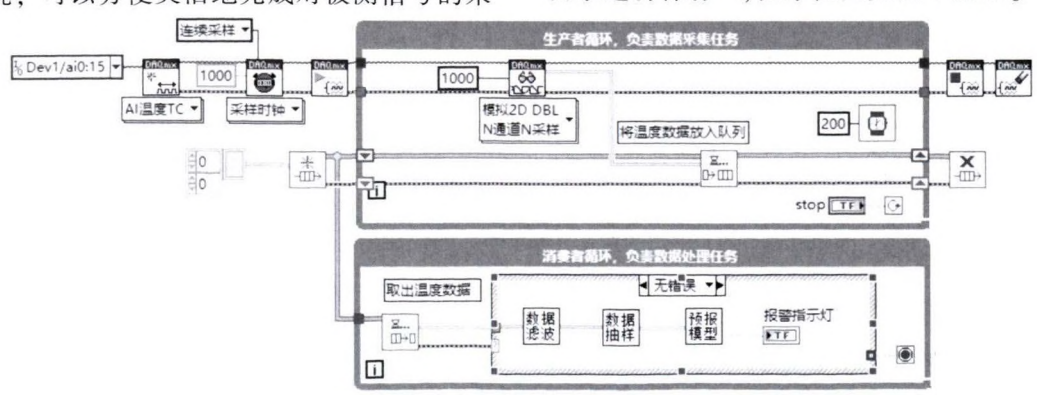

图 7 漏钢预报系统 LabVIEW 软件程序框图
Fig.7 LabVIEW program block diagram of molten steel leakage prediction system

4.3 可视化界面实现

为了直观、简洁的将漏钢报警情况反映出来，以便操作员及时采取相应措施，设计了如图 8 所示报警显示界面。

系统将实时采集到的温度数据输入训练好的神经网络进行测试，神经网络的输出值如果大于设置的阈值，则进行报警，此时报警指示灯亮红色并且不停地闪烁，同时发出报警声音；如果输出值小于所设置的阈值，那么表示目前结晶器未发生粘结情况，处于正常状态。为了便于观察，显示界面还增加了各个热电偶的温度实时曲线，实时曲线数据来源为经过降噪后的数据，操作人员可以直观地观测出各个热电偶的温度曲线。

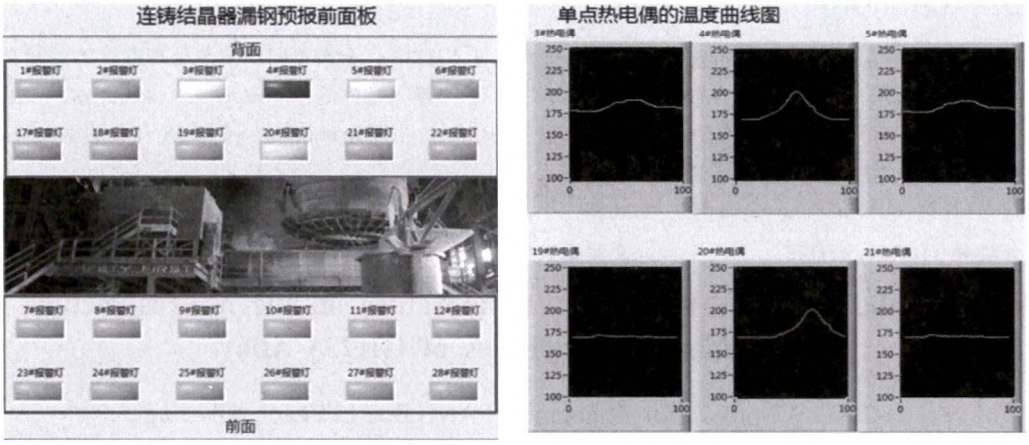

图 8 漏钢预报系统可视化界面

Fig.8 Visualization interface of molten steel leakage prediction system

5 结论

本文介绍了一种粘结性漏钢预报系统设计方案。首先分析了粘结性漏钢形成机理，在此基础上通过测量结晶器壁温度数据，并通过 BP 神经网络对温度数据进行辨识，最后得到预警结果。通过虚拟仪器平台实现了漏钢预报实验系统。最后，采用某钢厂现场采集数据进行训练和预测，实验测试结果表明该方案预报精确度高。

参考文献：

[1] 何飞，贺东风，周俐，等. 连铸结晶器漏钢预报模型研究进展[J]. 铸造技术，2015，36(6):1528-1535.

[2] 肖俊生，任祎龙，李文涛. 基于粒子群算法优化 BP 神经网络漏钢预报的研究[J]. 计算机测量与控制，2015，23(4):1302-1304.

[3] 何飞，张玲颖，谢西安，等. 连铸结晶器内凝固坯壳粘结行为研究现状[J]. 钢铁研究学报，2017，29(8):603-609.

[4] 何飞，吴鹏飞，徐其言，等. 连铸粘结漏钢的结晶器温度变化及其传播行为[J]. 钢铁研究学报，2016，28(2):27-32.

[5] 李文涛，李杨. 基于虚拟仪器的结晶器漏钢预报系统研究[J]. 工矿自动化，2010，36(6):81-85.

[6] 王春梅，孙丽凤，张本国，等. 基于遗传算法优化 BP 神经网络漏钢预报的研究[J]. 铸造技术，2014，35(4):736-739.

[7] 徐海伦，马春成，李清忠，等. 结晶器漏钢过程解析及预报原理[J]. 钢铁钒钛，2012，33(5):35-40.

[8] 史聚. 板坯连铸漏钢预报系统的研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版)，2008(1):66-68.

[9] 刘永贞，王旭东，贾启忠，等. 结晶器内粘结漏钢及其传播行为的研究[J]. 炼钢，2009，25(3):45-48，52.

[10] 肖俊生，周小凤，左鸿飞. 基于 LabVIEW 和 PXI 的某装甲车仪表系统设计[J]. 制造业自动化，2013，35(17):150-153.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628