

基于炉口辐射和改进神经网络的转炉终点预测模型

温宏愿 赵琦 陈延如 周木春 张猛 许凌飞

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 针对国内外转炉炼钢终点控制的现状,建立了一种用于终点预测的神经网络模型。以炉口辐射信息获取系统为实验平台,运用光纤谱分复用和颜色空间模型转换技术,分析发现了光谱与图像信息特征量在吹炼过程中呈现出中前期类似、末期相反的规律。从得到的特征规律曲线中选用一些关键特征量,在改进的修正系数算法基础上,进行了模型的训练和预测分析。实验结果表明:响应时间在 2 s 以内,满足快速判定的时间要求;改进算法的模型预测精度高于常规算法,该系统可以正常工作在转炉炼钢的恶劣环境下,达到了预期效果。

关键词 信号处理; 预测; 神经网络; 辐射信息; 转炉; 终点

中图分类号 TN911.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082811.2131

Basic-Oxygen-Furnace Endpoint Forecasting Model Based on Radiation and Modified Neural Network

Wen Hongyuan Zhao Qi Chen Yanru Zhou Muchun Zhang Meng Xu Lingfei

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Considering the present situation of the basic oxygen furnace (BOF) steelmaking endpoint control, a neural network model was established to judge the steelmaking endpoint. Based on the furnace mouth radiation information acquisition platform, the spectrum and image characteristics were analyzed using the fiber spectrum division multiplexing technology and the color space conversion method. The results indicate that they are similar at early-middle stage but inverse at the steelmaking late stage. Some appropriate variables were selected from the law curve as the neural network model parameters and the model was trained and forecasted on the basis of an improved back propagation (BP) neural network correction coefficient algorithm. The experimental results show the response time is less than 2 s which meets the requirements of online endpoint judgment, and the prediction accuracy of the proposed algorithm is better than that of the conventional algorithm. The system works stably and the anticipated effect is achieved.

Key words signal processing; forecasting; neural networks; radiation information; basic oxygen furnace; endpoint

1 引 言

终点控制是转炉吹炼末期的重要操作,对炼钢终点的精确控制直接关系到最终钢铁的质量。目前我国中小型转炉的产量占全国钢产量的大多数,而这些占多数的转炉钢厂普遍采用的是经验炼钢

法^[1],以物料平衡和热平衡为基础的静态控制,却不能在线实时修正,难以保证较高的命中率,工艺中经常要回炉吹炼,造成了资源浪费,效率低下。当今国内外新型的转炉终点控制方法主要分为以下几种方式:国外出现了一种用红外激光穿透炉气时发生的

收稿日期: 2008-01-02; 收到修改稿日期: 2008-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(50176020)、国家 863 计划(2007AA04Z181)、国防预研重点基金和江苏省高技术(工业部分)发展项目(BG2005006)资助课题。

作者简介: 温宏愿(1982—),男,博士研究生,主要从事光电信息探测与图像处理等方面的研究。

E-mail: wenhongyuan@yahoo.com.cn

导师简介: 陈延如(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事光电信息探测与处理等方面的研究。

E-mail: yrchen2002@yahoo.com.cn

变化情况来判断终点的光电探测法^[2],但这种方法仅适用于低碳检测且要在近距离下工作,造成设备寿命低,在实际中应用有限;美国 Bethlehem 公司研制了一种光学探头^[3],通过测定转炉炉口排出炉气的光强度,来在线测量吹炼终点的钢水碳含量,目前只适用于供氧稳定的 200 t 以上大型转炉含碳量低于 0.05% 范围内的钢水终点碳含量的控制,而且装置中有繁琐的冷却装置;国内一些有条件的大型转炉厂采用副枪和炉气分析装置^[4],提高了终点的冶炼自动化水平和终点命中率,但是副枪和质谱仪成本高、投资大;上述方法都无法在中小型转炉普及使用。文献^[5~7]中的模型均根据炼钢过程的统计数据建立的,保证了一定的精度,但是这几种方法是以原料及吹氧量和副枪测得的一些数据作为输入数据,一是很难在现场直接准确获取数据,二是副枪的使用造成了成本的提高。

针对上述国内外现状及存在的问题,为了研制出适于大多数转炉的准确、低成本、易操作的终点控制方法,研究从光学信息入手,构建了适合炼钢现场恶劣环境的炉口辐射多频道信息获取系统,在南京钢铁集团转炉炼钢厂采集了转炉炉口火焰的光谱图像信

息,分析并找到潜在的规律,从中选出合适的参数,建立了反向传输(Back propagation, BP)神经网络数学模型并用于终点预测,达到了较好的预测结果。

2 辐射信息获取系统的构建

2.1 转炉冶炼的基本判断及系统设计方法

转炉终点控制的基本要求是在吹炼结束时,钢水的化学成分和温度同时达到出钢的要求。终点含碳量主要依据所炼钢种来控制,但应该考虑到脱硫剂和铁合金含碳量的影响。转炉冶炼的基本判断方法主要有以下几个方面^[1]:根据火焰特征判断;观察钢样判断;热电偶测量钢水温度;钢水成分的判断;炼钢工观测火焰并结合喷出的火花情况综合判断。上述方法是基本的测定原理,工程中常要进行倒炉测试或者补吹等操作,而且炉次的吹炼条件等的不同,影响了判断的准确性。

根据转炉冶炼的基本原理、光辐射理论和普朗克公式,本文构建了多频道信息获取系统,主要分为光纤光学系统和火焰视频捕获系统两大系统,原理装置框图如图 1 所示。

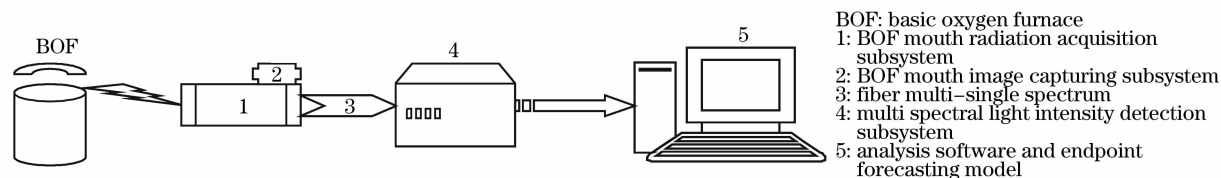


图 1 系统原理框图

Fig. 1 Diagram of system principle

炉口辐射获取分系统:针对转炉炼钢现场的恶劣环境,采用光纤束与望远光学系统相结合的方法,既能达到人工近距目视的效果,又能远避高温和污染对探测系统的损害,考虑到双不胶合物镜有口径不受限制、可以利用空气间隔校正剩余误差和相对口径可增大等优点,参考光学手册进行参数计算得表 1,可以满足远距离条件的采集工作。光纤谱分复用分系统:选用粗光纤芯径的阶梯折射率光纤,运用光纤“波分复用”的相关理论和技术,设计光纤谱分系统实现“光纤谱分复用”,即通过若干根光纤遵循传像的要求组合成一根“粗”光纤,一端截面与光学系统出瞳面相匹配,另一端分成若干小股“细”光纤束,端面与设计好的不同波长的干涉滤光片紧贴传输到多光谱复合探测分系统,按预设谱线把炉口

光辐射分成若干波段,实现谱分。多光谱符合探测分系统:主要负责将光学系统传输的光强信号变成数字信号发送到计算机,来进行下一步处理,主要组成部分为光电探测器、滤波电路、放大器、A/D 转换电路、单片机、时钟电路、数据存储电路、通讯电路等,具体采集电路主要通过软件与硬件相结合来完成,并要满足快速响应、实时处理大信息量和能在高温、烟尘等恶劣环境下工作等要求。炉口图像获取分系统:为了更全面的采集辐射信息,模拟并提取经验炼钢中人工依据火焰整体颜色变化的判断,系统基于 Windows Driver Model (WDM) 视频采集模式,该模式工作快,消耗 CPU 资源少,避开了流媒体冗杂的原始数据,该系统通过空间颜色模型转换,提取特征色度信息,与光谱光强结合进行综合分析判断。

表 1 选用的双不胶合物镜的参数(mm)

Table 1 Separated doublet parameters (mm)

Optical properties	Structural parameters		
	r	d	n
$f' = 1499.0$	968.3	...	1.5638
$D/f' = 1:10$	-508.2	15	Bak6
$2\omega = 1.2$	-508.2	0.2	1.6128
$L' = 1481.9$	-3404	19	F2

2.2 色度和光谱信息的综合分析

火焰图像经彩色 CCD 系统采集后按 RGB 格式存储,该颜色模型是一个正立方体形式,其与人眼的直观颜色概念没有直接的联系。为了能参考工人判定炼钢终点的经验——吹炼末期火焰呈现出发黄变软的情况,并且更好地得到图像中包含的颜色信息,系统利用 Smith 提出的颜色空间映射算法^[8]把采集到的 RGB 图像数据格式转换到 HSV(色度 hue、饱和度 saturation、明度 value)六棱锥颜色模型下。HSV 颜色系统使用对用户更直观的颜色描述方法^[9],该模型(见图 2)的色度分量 H 用角度表示,从 0°(红色)增大到各种颜色,最直接地反映了采集图像中的颜色信息。

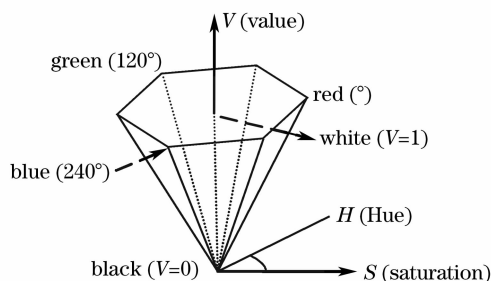


图 2 HSV 六棱锥

Fig. 2 HSV pyramid

现在需要进一步从 HSV 信息中选择有用的信息用于后续处理,由于单帧图像的直方图不能反映整个视频的规律,所以转而考虑所有图像直方图组成的三维图像中寻找合适的信息。图 3 展示了系统在线实时得到的一个完整炉次下的转换后的 HSV 颜色模型下的色度信息, X 轴为色度级别, Y 轴为单帧图像号(时间轴), Z 轴为对应的灰度值。由于寻找的信息要用于终点的判断,所以要找到一条到达终点时变化明显的曲线,即在 XOY 面俯视图中沿着平行与 Y 轴方向找到一条到达终点颜色变化剧烈的直线。发现在 H 约为 17 的时候,随着吹炼过程的进行,色度发生了明显的变化,从深蓝到浅蓝到黄色不断变化着,在终点到来前红色明显增多,说明整个过程中该色度下包含着较多的潜在信息,临近

终点时与之前相比量值出现了明显的变化,易于对终点的到来做出判定,因而提取它作为图像的特征信息量。

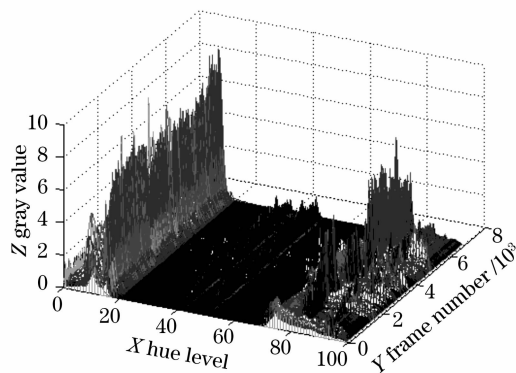


图 3 色度量三维图

Fig. 3 Hue stereogram

结合该色度量值,系统提取分析了 492~535 nm 波长段谱线测试点的光谱光强,并在色度曲线上标记出了碳量、温度均满足要求的终点时刻(记为 E 点),由于光强与图像特征值相差较大,经整体基准调整和噪声处理后的典型变化曲线如图 4 所示。可以发现炼钢这种多元多相的高温物理化学反应过程中,光强值随吹炼过程逐步变大,在吹炼的中期由于反应的剧烈干扰增多有波动的现象,接近吹炼终时光强曲线缓慢下降;与此同时图像特征值在吹炼的初期缓慢上升,中期存在着剧烈的振荡,而到达末期接近终点时却显著提高,在接近吹炼终点时,图像曲线有一个极大值(称为 C 点)的出现。该规律是系统采集转炉炉口火焰辐射信息、并利用相关技术得到的炼钢吹炼过程的变化特征,实时反应了炼钢过程中的光谱图像特征量的变化。但是由于不同炉次加入的原材料及吹炼条件等因素的差异,造成了各炉次的终点时刻存在了较大的波动,由实验发现其具体时间差为 100 s 以内不定。为了准确地判定

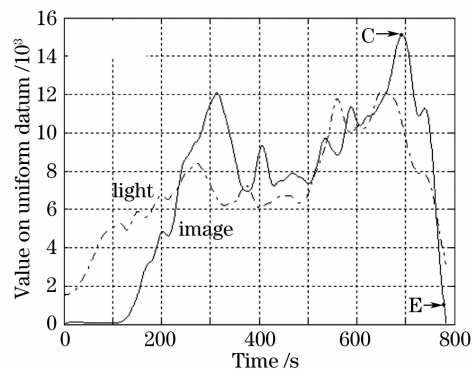


图 4 图像与光强特征值变化规律

Fig. 4 Change laws of the image and light intensity

炼钢终点,系统提出了一种神经网络算法,选用上述规律中的一些特征值作为神经网络的输入输出变量,建立了终点预测模型,通过训练力求达到较理想的结果,进而用于终点的预测,下面主要介绍该模型的算法及运行情况。

3 终点神经网络预测模型

3.1 反向传播(BP)神经网络的原理

神经网络在模式识别、实验数据处理、智能控制等领域有着广泛的应用^[10~13]。BP网络是一种多层前馈型神经网络,包括输入层、隐含层和输出层,通常有一个或多个隐层。每层神经元之间无连接,上下层之间全连接。网络的权值调整采用的是反向传播学习算法,即BP学习算法,分为工作信号的正向传播和误差信号的反向传播,即当一对学习样本提供给网络后,神经元的响应值通过隐含层向输出层传播,若输出层不能得到期望的输出,产生误差信号;按照误差信号的表现函数的负梯度方向,由输出端开始逐层向前传播,在误差信号反向传播的过程中,网络的权值和阈值由误差反馈进行调节,从而使目标输出接近期望输出。

3.2 算法的不足和改进

标准BP神经网络有其自身的不足和缺点,主要为:可能陷入局部最小点;学习步长固定造成训练时间长;网络往往存在较大的冗余性等。为得到较理想的训练精度和较短的训练时间,系统选用了共轭梯度法^[14]。新的搜索方向是与负梯度方向和上一次搜索方向共轭的方向。

若梯度方向为 g_0 ,则初始搜索方向为 p_0 为其负方向,沿此方向作一维搜索:

$$x_{i+1} = x_i + \alpha_i p_i. \quad (1)$$

让共轭方向作为新的搜索方向,即在当前负梯度方向上附加上一次搜索方向:

$$p_k = -g_k + \beta_k p_{k-1}. \quad (2)$$

修正系数 β_k 的选取本系统选用的算法步骤如下:

1) 仿真次数设为 k ,随机产生 n 维权向量 w_k ,尺度因子 λ_b 取0。影响参数 σ 及调整参数 λ 为 5.0×10^{-5} 和 5.0×10^{-7} 。

2) 令 k 逐次增加,计算

$$\sigma_k = \sigma / |p_k|, \quad (3)$$

$$s_k = \frac{G'(w_k + \sigma_k p_k) - G'(w_k)}{\sigma_k}, \delta_k = p'_k s_k. \quad (4)$$

3) 调整尺度

$$\delta_k = \delta_k + (\lambda_k - \lambda_b) \cdot |p_k|^2, \quad (5)$$

若其不大于零,则

$$\lambda_k = 2(\lambda - 2\delta_k / |p_k|^2) p_k, \quad (6)$$

$$\delta_k = -\delta_k + \lambda_k |p_k|^2, \quad \lambda_k = \lambda_b. \quad (7)$$

4) 计算评价参数

$$D_k = \frac{2\delta_k [G(w_k) - G(w_k + \alpha_k p_k)]}{\mu_k^2}, \quad (8)$$

式中 $\mu_k = p_k g_k$ 为步长, $\alpha_k = \mu_k / \delta_k$ 。若评价参数不小于零,则 $w_{k+1} = w_k + \alpha_k p_k$ 。若 $\text{mod}(k, n) = 0$,按原梯度方向重新计算, $\text{mod}(k, n)$ 表示 k 除以 n 后的余数,否则

$$\beta_{k+1} = (|g_{k+1}|^2 - g'_{k+1} g_k) / \mu_k. \quad (9)$$

若评价参数大于阈值 θ_1 ,减小尺度因子,以减少误差;若评价参数小于阈值 θ_2 ,则相应增加尺度因子。从而重新进行计算,得到最终的学习结果。

3.3 网络模型的设计

吹炼的最终目的即为准确判定出碳量、温度在要求范围内的终点时刻,因而网络模型选用单输出量为炼钢终点时间 T ,并需要选取合适的量值作为网络模型的输入样本。考虑到吹炼前期炉内反应剧烈,而中后期趋于平稳,选用这个阶段特征量干扰较小的量作为样本数据。因为输入各分量具有不同的量纲,且相互间数值相差较大,为了避免特征值大的波动垄断神经网络的学习过程,对输入输出量进行正规归一化处理: $x'_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$,其中 x_i 为原始值, x'_i 为归一化后的值, x_{\min} 和 x_{\max} 分别为样本的最小值和最大值。处理后的值在0到1的范围内。由于具有Sigmoid非线性函数的三层神经网络可以以任意精度逼近任何有理函数^[15],而隐含层的神经元数通过不断试探确定为8时较理想。考虑到为了较快得到预测结果,该转炉终点预测神经网络模型结构共三层,输入节点数为7,输出节点数为1,隐含层节点数为8,隐含层传递函数选用Tansig函数: $f_1(x_j) = 2 / [1 + \exp(-\lambda \cdot x_j)] - 1$,输出层传递函数选用Purelin线性函数: $f_2(x_l) = \lambda' \cdot x_l$ 。

3.4 模型的训练和结果分析

综合考虑实时性要求,系统预达训练精度设定为0.001,并选用误差收敛条件相对简单的批处理模式达到较短的训练时间。在炼钢厂实地采集了55炉次数据代入上述模型进行训练,训练一次记为一Epoch。实验结果表明当网络模型运行到116 Epochs时,训练精度即可达到要求。系统又依次采集另外26炉作为模型预测验证,模型预测值与实际值的结果如图5所示。

表2显示了该模型与加入动量项的常规算法训

练的网络模型比较情况。可以看出,本文选用方法效果明显,预测误差在 5 s 以下的情况较常规算

法高了大约 19.3%,经多次验证,响应时间低于 2 s,完全满足快速判断的时间要求。

表 2 不同算法下的网络模型比较

Table 2 Comparison between the different algorithm network model

Method	Training (55 groups)		Time /s	Prediction error (26 groups)	
	Training error			<5 s	<10 s
	<5 s	<10 s			
Proposed algorithm	76.4%	87.3%	1.422	80.8%	88.4%
Conventional algorithm	61.8%	74.5%	3.481	61.5%	73.1%

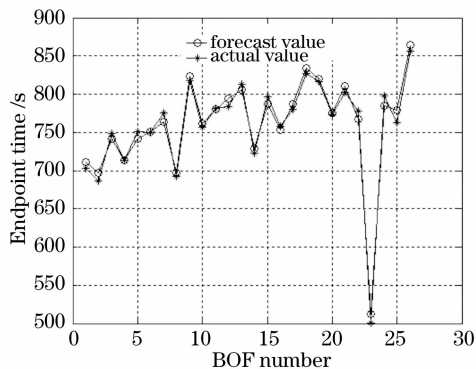


图 5 预测值与实际终点分布图

Fig. 5 Distribution of the forecast value and the actual endpoint value

4 结 论

针对国内外转炉炼钢终点控制的现状及存在的问题,提出了分析炉口辐射信息的方法,利用光纤谱分复用和颜色空间模型转换技术,着重研究了转炉吹炼过程中光谱光强及图像信息的特征变化,发现了吹炼过程中的潜在规律。在此规律基础之上,运用改进的神经网络算法,设计了系统用网络模型,在南京钢铁集团炼钢厂进行实验。实验结果表明:该模型较常规算法有明显的提升,训练误差和预测误差在 5 s 以内的精度均达到 76%以上,系统响应时间低于 2 s,满足转炉终点在线预测的要求。要达到更好的预测精度,需进一步研究和丰富数据量来完善。

致谢 感谢南京钢铁集团转炉炼钢厂在实验期间给予的帮助。

参 考 文 献

- Feng Jie, Zhang Hongwen. *BOF Steelmaking* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. 332~338
- 冯捷,张红文. 转炉炼钢生产[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006. 332~338
- Daniel M. Mass spectrometry for oxygen steel-making control [J]. *Steel Times*, 1997, **225**(11): 439~440
- Sharan A. Light sensors for BOF carbon control in low carbon heats [C]. *Steelmaking Conference Proceedings*, 1998, **81**: 337~345
- Wang Yong, Yang Ningchuan, Wang Chengkuan. Present situation and development of converter steelmaking in China[J]. *Special Steel*, 2005, **26**(4): 1~5
- 王勇,杨宁川,王承宽. 我国转炉炼钢的现状和发展[J]. *特殊钢*, 2005, **26**(4): 1~5
- Feng Mingxia, Li Qiang, Zou Zongshu. An outlier identification and judgment method for an improved neural-network BOF forecasting model [J]. *Steel Research International*, 2008, **79**(5): 323~331
- Xie Shuming, Tao Jun, Chai Tianyou. BOF steelmaking endpoint control based on network[J]. *Control Theory and Applications*, 2003, **20**(6): 903~907
- 谢书明,陶钧,柴天佑. 基于神经网络的转炉炼钢终点控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, **20**(6): 903~907
- Cemalettin K, Harnun T, Recep A et al.. Bofy-fuzzy logic control for the basic oxygen furnace (BOF) [J]. *Robotics and Autonomous System*, 2004, **49**(3~4): 193~205
- Smith A R. Color gamut transform pairs [J]. *Computer Graphics*, 1978, **12**(3): 12~19
- Chen Chulung, Wu Weijun. Color pattern recognition with the multi-channel non-zero-order joint transform correlator based on the HSV color space[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**(1~6): 51~59
- Zhao Jianhua, Fang Jun, Shu Xueming. An identification method of fire smoke based on neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1086~1089
- 赵建华,方俊,疏学明. 基于神经网络的火灾烟雾识别方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1086~1089
- Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1435~1439
- 唐燕,陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1435~1439
- Du Xiliang, Dai Jingmin. Data processing method for the division-of-amplitude photopolarimeter based on an artificial neural network[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 89~93
- 杜西亮,戴景民. 基于神经网络的分振幅光偏振仪的数据处理[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 89~93
- Qi Feng, Liu Wenqing, Zhou Bin et al.. Improving DOAS system measurement precision with artificial neural network method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1345~1349
- 齐锋,刘文清,周斌等. 利用人工神经网络方法提高差分光学吸收光谱系统测量精度研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1345~1349
- Chen Kaizhou. *Optimized Arithmetic* [M]. Xi'an: Northwest Institute of Telecommunication Engineering Press, 1985. 83~87
- 陈开周. 最优化计算方法[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985. 83~87
- Castro J L, Mantas C J, Benitez J M. Neural networks with a continuous squashing function in the output are universal approximators[J]. *Neural Networks*, 2000, **13**(6): 561~563