

# 基于分层递阶融合算法的高炉料面煤气流分布软测量方法

安剑奇<sup>1</sup> 吴敏<sup>1</sup> 何勇<sup>1</sup> 曹卫华<sup>1</sup>

**摘要** 高炉能否稳顺、高产和低耗运行与煤气流的分布密切相关, 本文针对料面煤气流分布难以直接检测的问题, 提出了一种基于多源信息分层递阶融合的高炉料面煤气流分布软测量方法. 首先, 将多源信息配准为同一时间和空间的尺度; 然后, 采用数据级融合分别建立能够反映煤气径向和轴向分布的高炉料面温度场模型和高炉布料模型; 最后, 利用模糊决策级融合算法计算出高炉料面煤气流分布状态. 现场数据仿真表明本文的检测方法有效, 能够准确地反映高炉料面的煤气流分布状态, 为高炉操作提供必要的指导.

**关键词** 高炉, 煤气流, 料面温度场, 信息融合, 软测量

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2011.00496

## Soft-sensing Method of Gas Flow Distribution of Blast Furnace Burden Surface Based on Multi-level Hierarchical Fusion Algorithm

AN Jian-Qi<sup>1</sup> WU Min<sup>1</sup> HE Yong<sup>1</sup> CAO Wei-Hua<sup>1</sup>

**Abstract** Since the operation of blast furnace (BF) is closely related to the gas flow distribution in terms of stability, high production and low energy consumption, a soft-sensing method of gas flow distribution of BF burden surface based on multi-level hierarchical fusion is accordingly presented in order to solve the difficulty of direct detection for gas flow distribution. First, the multi-source information is registered to the same spatial dimension and temporal dimension. And then, the model of burden distribution and the model of burden surface temperature profile are respectively designed by means of data level fusion, which could reflect the gas distribution in the radial and axial directions. Finally, the gas flow distribution state is obtained by using the fuzzy decision level information fusion algorithm. According to the field simulation to verify the detection method, the method can accurately reflect the gas flow distribution of BF burden surface and offer a necessary guidance for the BF operation.

**Key words** Blast furnace (BF), gas flow, burden surface temperature profile, information fusion, soft-sensing

高炉是钢铁生产中的关键设备, 是典型高温、高压、多粉尘的“黑箱”容器, 许多状态难以直接检测<sup>[1-2]</sup>. 高炉煤气流分布是影响高炉生产的最主要因素之一<sup>[3]</sup>. 从某种意义上讲, 高炉操作就是调整和控制煤气流的分布, 但是炉内煤气流的分布无法直接检测.

目前国内外的学者研究料面煤气流分布的检测方法主要有厄根方程法<sup>[4]</sup>, 软熔带模型法<sup>[5]</sup>, 红外图像检测法<sup>[6]</sup>, 十字测温法<sup>[7]</sup>等. 其中基于厄根方程和软熔带模型的煤气流分布建模方法计算复杂、运算量大, 主要从理论上研究高炉内煤气流的分布状况以及高炉炉料对煤气流分布的影响. 炉顶红外摄

像仪方法存在检测死区和盲区, 仅仅被当作为监视料面温度场和炉喉煤气分布的参考, 没有建立相应的料面煤气流分布模型, 缺少对数据作深入的分析研究及应用. 基于十字测温的方法只能反映两个径向的煤气流分布, 测量点离散, 不能反映任意位置的煤气流状态. 本文针对高炉煤气流分布研究中存在的不足, 利用红外图像、十字测温、炉墙热电偶和布料模型等信息, 采用基于多源信息分层递阶融合算法, 研究了高炉料面煤气流分布软测量方法, 结构如图 1 所示. 该结构分为数据级融合和决策级融合, 数据级融合是决策级融合的基础, 决策级融合是数据级融合的目的.

料面是全炉煤气的出口, 煤气流分布与轴向矿焦比和径向料面温度分布有直接的联系. 本文在数据级融合层利用高炉生产过程数据和图像, 先建立料面温度场模型和布料模型, 得到能够反映料面煤气流分布的两个特征信息——料面图像灰度和料层轴向矿焦比, 这两个特征信息分别从水平方向和垂直方向表征煤气流的分布状态, 为决策级融合提供基础.

收稿日期 2010-05-19 录用日期 2010-12-21  
Manuscript received May 19, 2010; accepted December 21, 2010  
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2007AA04Z177), 国家杰出青年科学基金项目 (60425310) 资助  
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2007AA04Z177) and National Science Fund for Distinguished Youth Scholars of China (60425310)

1. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083  
1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083

在决策级融合层利用模糊融合思想, 将通过数据级融合层得到的每个点矿焦比和相对灰度作为模糊融合器的输入, 求出高炉料面的煤气流分布. 决策级信息融合是整个检测方法的关键. 现场数据仿真表明该方法能够准确地反映高炉料面的煤气流分布状态, 为高炉操作提供必要的指导.

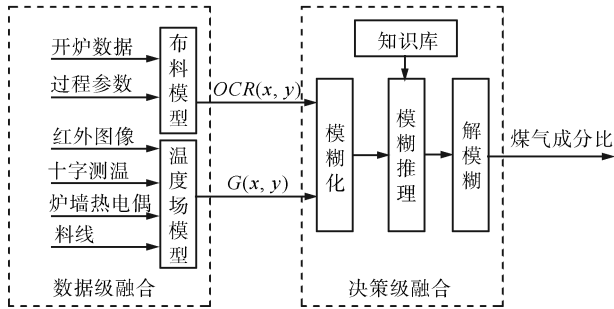


图1 整体结构图

Fig.1 Structure diagram

### 1 多源信息时空配准

多源信息融合的系统必须对所有信息进行必要的空间和时间上的配准<sup>[8-9]</sup>. 高炉中的红外图像、十字测温、炉墙热电偶、料线和料面等信息在空间位置和采样频率上有所不同, 因此, 本文首先对这些信息进行空间和时间配准.

#### 1.1 多源信息空间配准

对多源信息进行空间配准, 主要包括如下步骤:

##### 步骤 1. 建立空间坐标系.

以料面中心距离探尺零位垂直距离 3.6 米时, 高炉料面的几何中心为原点, 高炉料面中心水平方向为  $x-y$  平面, 以十字测温两条梁臂方向为  $x$  和  $y$  轴的方向, 以高炉垂直方向为  $z$  轴, 如图 2 所示.

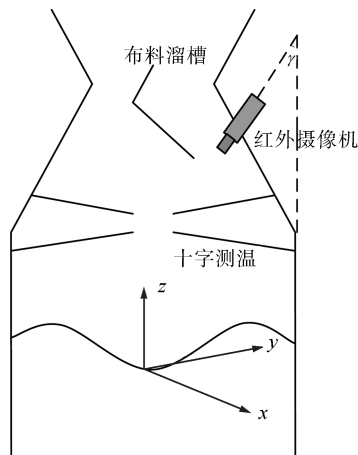


图2 高炉炉喉设备示意图

Fig.2 The schematic diagram at furnace throat

##### 步骤 2. 对十字测温进行空间配准.

十字测温是测量炉喉处温度分布的装置, 如图 2 所示. 令十字测温上任意测温点  $T'_i$  在坐标系中的坐标为  $(x_i, y_i, H)$ , 其中,  $H$  为料线深度. 由于空间中存在温度降, 所以原坐标点的温度值  $T'_i$  应转换为料面上的温度  $T_i$ , 因此, 十字测温空间校准为

$$T_i(x_i, y_i, H) \rightarrow (T'_i - \alpha H)(x_i, y_i, 0) \quad (1)$$

##### 步骤 3. 对炉墙热电偶进行空间配准.

炉墙中自上而下分布了若干热电偶, 本文只取最靠近炉喉位置的一层热电偶采集的温度数据. 按照上述十字测温配准方法得到炉墙热电偶空间校准值  $T_{qi}$ , 表示第  $i$  个炉墙测温点空间校准后的温度值.

##### 步骤 4. 对红外图像进行空间配准.

由于红外摄像机存在拍摄角度  $\gamma$ , 所以拍摄的图像实际上是图 3 所示的  $A'B'CD$  平面的图像. 按照式 (2) 所示, 可以将  $A'B'CD$  平面上点  $M'(x'_{M'}, y'_{M'}, z'_{M'})$  配准到  $M(x_M, y_M, z_M)$ .

$$\begin{cases} x_M = x_N - (x'_N - x'_M) \cos \gamma \\ y_M = y_N - (y'_N - y'_M) \cos \gamma \\ z_M = 0 \end{cases} \quad (2)$$

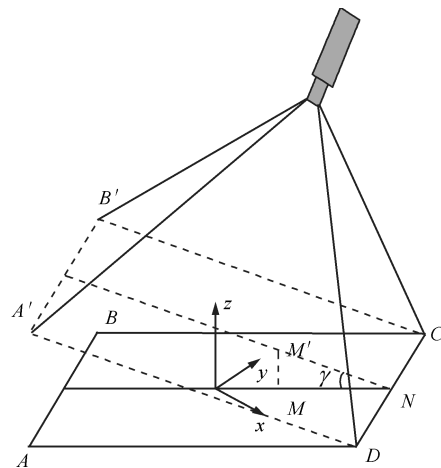


图3 图像的空间配准

Fig.3 Spatial registration of image

#### 1.2 多源信息时间配准

时间配准是指将多传感器检测的数据统一到扫描周期最长的一个传感器数据上. 本文有三方面数据: 十字测温和炉墙热电偶采样周期是  $\tau_1 = 500 \text{ ms}$ ; 红外图像处理后周期是  $\tau_2 = 5 \text{ s}$ ; 布料模型根据开炉数据和布料情况进行计算得到, 不需要进行时间配准. 因此, 需要将前两种数据进行时间配准.

将十字测温连续 10 次的测量值进行融合, 可以消除由于时间偏差而引起的十字测温和红外图像对料面温度测量的不同步. 用  $\mathbf{T}_{j10} = [t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{j10}]^T$  表示第  $j$  个测温点从第  $k-5$  秒到第  $k$  秒之间的 10 次测量值 ( $k \geq 5$ ),  $t_{j10}$  和处理后的红外图像同步. 用  $\mathbf{U}_j = [t_j, \hat{t}_j]^T$  表示融合以后的测量值及其导数构成的列向量. 十字测温第  $j$  个测温点瞬时测量值  $t_{ji}$  表示为

$$t_{ji} = t_j + (i - 10)\tau_1 \hat{t}_j + v_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (3)$$

$v_{ji}$  是第  $j$  个测温点第  $i$  次测量噪声, 式 (3) 可改写为

$$\mathbf{T}_{j10} = \mathbf{W}_{j10}\mathbf{U}_j + \mathbf{V}_{j10} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{V}_{j10} = [v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{j10}]^T$ , 均值为 0. 式 (4) 中,

$$\mathbf{W}_{j10} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 9T & 8T & \dots & 0T \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

根据最小二乘配准方法, 则有目标函数:

$$J = \mathbf{V}_{j10}\mathbf{V}_{j10}^T = [\mathbf{T}_{j10} - \mathbf{W}_{j10}\hat{\mathbf{U}}_j][\mathbf{T}_{j10} - \mathbf{W}_{j10}\hat{\mathbf{U}}_j]^T \quad (6)$$

使  $J$  最小,  $J$  两边对  $\hat{\mathbf{U}}_j$  求偏导数并令其为零, 整理得:

$$\hat{\mathbf{U}}_j = [\hat{t}_j, \hat{t}_j] = (\mathbf{W}_{j10}^T \mathbf{W}_{j10})^{-1} \mathbf{W}_{j10}^T \mathbf{T}_{j10} \quad (7)$$

将式 (3) 和式 (5) 分别代入上式, 得到融合以后的温度测量值:

$$\hat{t}_j = c_1 \sum_{i=1}^{10} t_{ji} + c_2 \sum_{i=1}^{10} i \cdot t_{ji} \quad (8)$$

式中,  $c_1 = -2/n = -1/5$ ,  $c_2 = 6/[n(n+1)] = 3/55$ ,  $n = 10$ .

$\hat{t}_j$  就是十字测温第  $j$  个测温点测得的与红外摄像机拍摄时间匹配的测量值. 同理, 可以将炉墙热电偶的测量值与红外摄像机拍摄时间进行匹配.

## 2 数据级融合的布料模型

布料是高炉上部操作的最重要的内容. 布料操作主要通过改变料批种类、料批重量、布料角位、布料圈数等, 来调节高炉料面径向形状和轴向矿焦比<sup>[10]</sup>. 由于不同的料面形状和矿焦比对应的透气性不一样, 对煤气发展的阻力就不同, 故高炉料面煤气流分布状态也不同<sup>[11]</sup>. 因此, 通过建立高炉布料模型, 计算料面形状和矿焦比, 可以推断出料面的煤气流分布状况.

在建立的坐标系中, 根据高炉实验数据和布料经验, 料面函数基本形式如式 (9) 所示:

$$\begin{cases} z = a_0 + a_1 r + a_2 r^2, & 0 \leq r < X_1 \\ z = b_0 + b_1 r, & X_1 \leq r < X_2 \\ z = c_0 + c_1 r + c_2 r^2, & X_2 \leq r < X_3 \\ z = d_0 + d_1 r, & X_3 \leq r \leq X_w \\ r^2 = x^2 + y^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $x, y, z$  分别为料面曲线坐标,  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, c_0, c_1, c_2, d_0, d_1$  为待定系数,  $X_w$  为高炉中心到高炉炉墙的距离,  $X_1, X_2, X_3$  由经验公式确定<sup>[12]</sup>. 料面分布可简化为曲线组合而成, 根据物料平衡原理和开炉数据, 分段计算曲线组成, 确定方程系数.

根据计算出的  $f(x, y)$ , 可以按照式 (10) 求解出高炉平面中坐标为  $(x, y)$  的点的矿焦比.

$$OCR(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(\Delta L_O)_i}{(\Delta L_C)_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{[f'_O(x, y) - f_C(x, y)]_i}{[f'_C(x, y) - f_O(x, y)]_i}} \quad (10)$$

式中,  $\Delta L_O, \Delta L_C$  分别表示炉内料面分布中矿石层厚度和焦炭层厚度,  $f'_O(x, y), f'_C(x, y)$  分别表示一罐炉料装入炉内后所形成的新的矿、焦料面曲线,  $f_O(x, y), f_C(x, y)$  分别表示旧的矿、焦料面曲线,  $N$  是计算矿焦比时根据高炉生产工艺要求而设定的累加罐次, 从而求出高炉轴向矿焦比  $OCR(x, y)$ .

## 3 数据级融合的料面温度场模型

高炉料面煤气流分布不仅与布料产生的轴向矿焦比有关, 还和高炉料面温度分布有关. 一般认为, 高炉料面温度高的地方, 煤气流 CO 含量较高, CO<sub>2</sub> 含量较低, 还原效果较差. 通过建立料面温度场可以从一个侧面了解料面煤气流分布状态.

炉顶红外摄像机拍摄到的图像经过空间配准后, 得到高炉生产过程料面的温度分布灰度图, 如图 6(a) 和图 7(a) 所示 (见第 500 页), 温度高的地方灰度就高, 反之就低. 但是由于摄像机本身存在检测死区和边缘检测误差, 导致图像中存在料面温度高于约 600 度时为全白, 低于约 200 度就会全黑, 且无法拍摄到料面边缘.

本文首先通过十字测温对图像中全黑和全白区域进行补偿; 然后融合十字测温边缘点和炉墙热电偶补偿红外图像边缘拍摄误差, 得到准确的高炉料面灰度分布, 为建立料面煤气分布模型奠定基础.

### 3.1 基于十字测温的径向温度计算

由于高炉布料采用环形周期布料, 所以在  $x-y$  平面中与原点距离相等点的温度相对比较接近, 所以本文采用如下算法根据十字测温的测量值确定料面中每个点的温度, 以图 4 中点  $(x, y)$  的温度  $T_{x,y}$  说明.

**步骤 1.** 十字测温 4 个方向进行插值, 求坐标轴上的每个点相对应的温度值, 如式 (11) 所示:

$$T_x = t_i - \frac{t_i - t_{i+1}}{n}, \quad i \leq x \leq i+1 \quad (11)$$

其中,  $i$  为十字测温某点,  $i+1$  为  $i$  后的测量点,  $T_x$  表示介于两者之间某点的温度值,  $n$  表示细化的程度.

**步骤 2.** 计算出坐标为  $(x, y)$  的点到原点的距离  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , 然后在  $x$  轴和  $y$  轴上找出距离为  $r$  且与点  $(x, y)$  距离最近的两个点的温度  $T_{xr}$  和  $T_{yr}$ .

**步骤 3.** 将点  $(x, y)$  与两个坐标轴的距离作为权重, 求取  $T_{xy}$ , 如式 (12) 所示:

$$T_{xy} = \frac{x}{x+y} T_{xr} + \frac{y}{x+y} T_{yr} \quad (12)$$

根据以上 3 个步骤计算出基于十字测温的料面每个点的温度值.

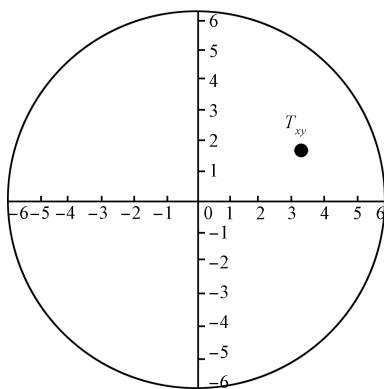


图 4 十字测温装置

Fig. 4 The cross-temperature device

### 3.2 基于十字测温的图像全黑全白校正

根据由十字测温计算出的温度对由红外摄像机拍摄的灰度图像校正, 克服由于红外摄像机的灰度死区造成的全白和全黑区域. 主要校正算法如下:

**步骤 1.** 确定图像中的灰度若干等级.

**步骤 2.** 利用图像分割方法, 提取图像全黑区域、全白区域以及灰度递变区域.

**步骤 3.** 在灰度递变区域, 由于温度和灰度的关

系近似线性, 所以可以按照分段两点法定标:

$$y = ax + b \quad (13)$$

式中,  $x$  为灰度信号,  $y$  为温度值信号, 测得灰度为  $G_a$  和  $G_b$  对应的温度分别为  $T_a$  和  $T_b$ , 代入线性方程计算出参数  $a$  和  $b$ , 从而计算出温度和灰度的关系.

**步骤 4.** 在全白和全黑区域中, 根据十字测温计算的温度值, 按照式 (13) 所示方法计算对应点的灰度值, 调整图像中全白和全黑区域的灰度.

### 3.3 边缘温度的提取与灰度图像拟合

由于红外图像视角问题无法检测到料面边缘, 因此, 需要对料面边缘温度进行提取和灰度图像的拟合. 反映料面边缘温度的检测量主要有十字测温的边缘测温点和炉喉处炉墙热电偶, 本文采用热传导和 BP 网络方法计算料面边缘温度分布. 算法如下:

**步骤 1.** 按照热传导原理, 根据炉墙热电偶测得的温度计算炉内边缘温度. 假设炉墙传热是从内到外的一维传热方式. 则热传导函数为

$$T_{\text{inside}} - a^2(\rho_{\text{water}}, t_{\text{water}}) \frac{\partial^2 T_{\text{outside}}}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (14)$$

式中,  $T_{\text{inside}}$  为炉墙内温度,  $a^2(\rho_{\text{water}}, t_{\text{water}})$  为热传导系数,  $x$  为炉墙径向位移,  $f(x, t)$  为炉墙径向温度分布. 由于该计算存在假设和误差, 不能直接用来表示料面边缘温度, 所以本文融合十字测温边缘测温点加以计算.

**步骤 2.** 利用 BP 神经网络计算料面边缘温度, 输入为十字测温边缘热电偶测温值和根据炉墙计算的边缘温度. 采用 3 层结构网络结构, 输入层含有 8 个神经元; 隐含层神经元是 8 个; 输出层为计算出的边缘温度值; Sigmoid 型函数激活, 梯度法调整权值. 根据现场提供样本进行训练, 确定各个权值.

**步骤 3.** 利用已得到的定标方法, 根据边缘温度计算出边缘灰度值, 并拟合为灰度图像.

将经过十字测温修正的图像和边缘区域灰度图像进行叠加, 得到如图 5 所示的料面图像.

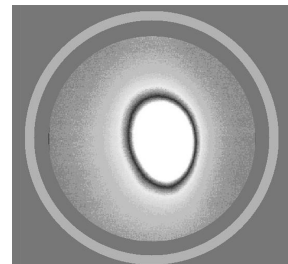


图 5 校正后的料面图像

Fig. 5 Burden image after adjustment

### 4 基于模糊决策级融合料面煤气分布检测

求出的料面每个点的矿焦比值  $OCR(x, y)$  和每个点灰度值  $G(x, y)$  都能够从不同角度反映料面煤气流在每个点的分布, 但是它们也都存在着各自的不足. 利用模糊决策级信息融合技术融合二者, 既考虑了料面煤气流分布与径向温度分布的关系, 又综合了料层分布与透气性对煤气流分布的影响, 因此, 可以有效地建立高炉料面煤气流分布模型.

将料面中点  $(x, y)$  的矿焦比  $OCR$  和灰度值  $G$  作为模糊决策的二维输入, 将该点煤气流成分  $COR(x, y)$  作为输出. 输入  $OCR$  的论域是  $[0, 8]$ , 设计语言变量有 5 个, 隶属度函数为梯形; 输入  $G$  的论域是  $[0, 255]$ , 设计语言变量有 7 个, 隶属度函数为梯形; 输出量  $COR(x, y)$  的论域为  $[0, 1]$ , 设计语言变量为 7 个, 隶属度函数为三角形. 根据专家经验得到如表 1 所示的模糊控制规则表.

输出解模糊采用重心法, 输出煤气流 CO 含量

$COR(x, y)$ . 从而根据矿焦比和红外图像求出料面每个点的煤气 CO 含量, 建立起高炉料面煤气分布模型.

表 1 高炉料面点  $(x, y)$  煤气流 CO 含量模糊推理规则表  
Table 1 Rule table of fuzzy reasoning of CO content on  $(x, y)$  of the burden surface

$OCR \backslash G$	Z	ZS	S	SM	M	MB	B
B	Z	ZS	ZS	S	S	SM	M
MB	ZS	ZS	S	S	SM	SM	M
M	S	S	SM	SM	M	M	MB
SM	S	SM	SM	M	M	MB	MB
S	SM	M	M	MB	MB	B	B

### 5 运行结果分析

根据现场运行数据和拍摄的红外图像, 用红外图像方法和本文方法, 分别求出高炉任意直径方向的煤气 CO 含量的百分比, 如图 6 和图 7 所示.

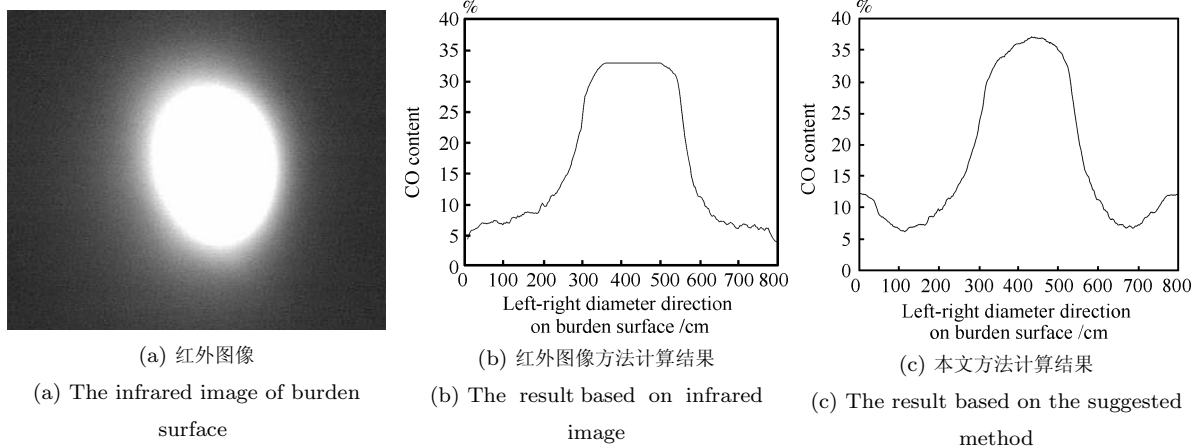


图 6 布料完成后期高炉料面从左至右直径方向煤气 CO 含量曲线

Fig. 6 CO content curves of left-right diameter direction on burden surface of blast furnace in the later period after burden distribution

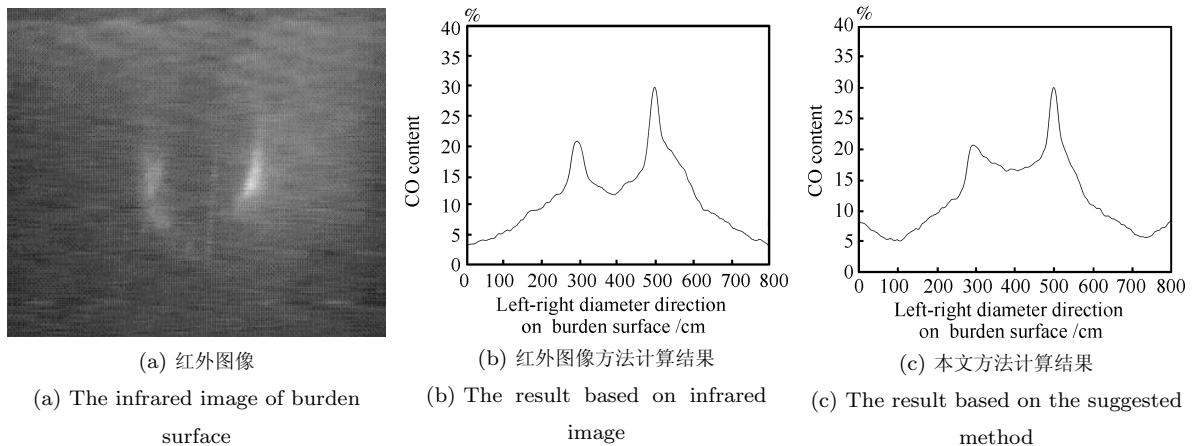


图 7 布料完成前期高炉料面从左至右直径方向煤气 CO 含量曲线

Fig. 7 CO content curves of left-right diameter direction on burden surface of blast furnace in the prior period after burden distribution

图 6(a) 是煤气流发展旺盛时期的料面红外图像, 此时中心和边缘气流均较强. 图 6(b) 是根据红外图像检测的料面煤气流分布曲线, 料面中心很宽区域内 CO 含量都是 33%, 边缘气流的 CO 含量仅仅只有 3.8%, 这是由于红外图像本身存在饱和截止和检测死区问题, 导致计算出的中心和边缘煤气流分布不准确, 而这两个区域是现场操作人员最关心的位置. 图 6(c) 是采用本文方法计算的结果, 结果表明料面中心区域 CO 最高含量为 37.2%, 边缘气流的 CO 含量为 12.1%. 该方法一方面修正了料面中心煤气流检测中由于红外图像检测饱和造成的中心点缺失, 准确地找到料面中心位置和发展趋势; 另一方面修正了由于红外图像检测盲区问题造成的料面边缘煤气流检测错误, 准确地反映了料面边缘气流的强度.

图 7(a) 是布料操作完成不久时的图像, 料面少量料块滑落到中心, 阻挡了中心煤气流的热辐射, 造成红外图像中心偏黑. 图 7(b) 是根据红外图像计算的煤气流分布曲线, 料面中心煤气流 CO 含量只有 11.6%, 且整个中心区域煤气流分布都很小, 而实际上此时中心气流被一定程度地压制, 但是仍然相对比较高, 只是热辐射被料块挡住, 导致图像中心偏黑, 从而导致煤气流检测的不准确. 图 7(c) 是采用本文方法计算的结果, 料面中心 CO 含量为 17.8%, 反映了中心煤气流发展较强, 更为准确地体现了此时中心矿焦比较小, 煤气流流动性很好的特点; 同时修正了边缘煤气流的分布检测, 更为准确地检测出料面煤气流的分布. 表 2 是检测结果数值对比.

表 2 料面煤气流 CO 含量数值对比

Table 2 Comparison of CO contents in gas flow

	中心煤气流 CO 含量		边缘煤气流 CO 含量	
	红外图像法	本文方法	红外图像法	本文方法
图 6	33%	37.2%	3.8%	12.1%
图 7	11.6%	17.8%	3.1%	8.3%

根据本文方法开发的系统应用于某钢铁公司 2200 立方米高炉后, 高炉操作人员可以准确地了解料面煤气流分布, 为进行优化布料提供了有效操作指导. 通过现场统计和测定, 高炉利用系数提高了 0.05 吨/立方米·天, 休风率降低了 0.7%, 同时提高了企业的自动化水平和信息管理水平.

## 6 结论

本文针对高炉料面煤气流分布难以直接检测的问题, 提出了高炉料面煤气流的分层递阶融合算法, 建立了料面煤气流软测量模型. 实验结果表明, 本文

设计的方法能够更为准确地反映高炉料面的煤气流分布状况, 为高炉生产提供必要的指导. 将本文方法应用于某钢铁公司 2200 立方米高炉后, 稳定了炉况, 提高了效率, 降低了成本, 保障了高炉稳顺、高效运行.

## References

- Hinnela J, Saxen H, Pettersson F. Modeling of the blast furnace burden distribution by evolving neural networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003, **42**(11): 2314–2323
- Gao Chuan-Hou, Jian Ling, Chen Ji-Ming, Sun You-Xian. Data-driven modeling and predictive algorithm for complex blast furnace ironmaking process. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 725–730  
(部传厚, 渐令, 陈积明, 孙优贤. 复杂高炉炼铁过程的数据驱动建模及预测算法. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 725–730)
- Dai Y D, Konishi M, Imai J. Temperature distribution control in blast furnace by RNN. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control*. Dalian, China: IEEE, 2008. 475–478
- Nogami H, Chu M, Yagi J. Multi-dimensional transient mathematical simulator of blast furnace process based on multi-fluid and kinetic theories. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, **29**(11–12): 2438–2448
- Dong X F, Pinson D, Zhang S J, Yu A B, Zulli P. Gas-powder flow in blast furnace with different shapes of cohesive zone. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, **30**(11): 1293–1309.
- Wu Ming. The application of infrared camera system of the blast furnace top surface in Panzhihua Iron and Steel Corporation. *Sichuan Metallurgy*, 2010, **32**(3): 71–74  
(吴明. 高炉料面红外摄像系统在攀钢的应用. *四川冶金*, 2010, **32**(3): 71–74)
- Tu Chun-Lin, Bi Xue-Gong, Zhou Yong. Study on neural network for the recognition of blast furnace top temperature distribution. *Henan Metallurgy*, 2004, **12**(1): 10–12  
(涂春林, 毕学工, 周勇. 高炉炉顶温度分布模式识别神经网络的研究. *河南冶金*, 2004, **12**(1): 10–12)
- Han Chong-Zhao, Zhou Bin, Yuan Xiang-Hui, Lian Feng. Error transfer and correction between multi-target measurements in a common clutter environment. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(7): 771–774  
(韩崇昭, 周彬, 元向辉, 连峰. 共同杂波环境下多目标量测数据的误差传递与校正. *自动化学报*, 2007, **33**(7): 771–774)
- Chen Er-Xue, Li Zeng-Yuan, Tian Xin, Li Shi-Ming. Application of scale invariant feature transformation to SAR imagery registration. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(8):

861–868

(陈尔学, 李增元, 田昕, 李世明. 尺度不变特征变换法在 SAR 影像匹配中的应用. 自动化学报, 2008, **34**(8): 861–868)

- 10 Liu Yun-Cai. *Regularity of Burden Distribution in Blast Furnace (Third Edition)*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005. 20–53

(刘云彩. 高炉布料规律 (第三版). 北京: 冶金工业出版社, 2005. 20–53)

- 11 Xu Yong-Hua, Wu Min, Cao Wei-Hua. A blast burden distribution model based on information fusion and its application. *Information and Control*, 2005, **34**(6): 647–651

(许永华, 吴敏, 曹卫华. 基于信息融合的高炉料面分布模型与应用. 信息与控制, 2005, **34**(6): 647–651)

- 12 Wu Min, Xu Yong-Hua, Cao Wei-Hua. Design and application of burden distribution model in dell-less blast furnace. *Journal of System Simulation*, 2007, **19**(21): 5051–5054

(吴敏, 许永华, 曹卫华. 无料钟高炉布料模型设计与应用. 系统仿真学报, 2007, **19**(21): 5051–5054)



**安剑奇** 中南大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为工业过程控制, 智能控制, 信息融合.

E-mail: anjianqi@csu.edu.cn

(**AN Jian-Qi** Ph.D. candidate at the School of Information Science and Engineering, Central South University.

His research interest covers process control, intelligent control, and information fusion.)

control, intelligent control, and information fusion.)



**吴敏** 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为过程控制、鲁棒控制和智能系统. 本文通信作者.

E-mail: min@csu.edu.cn

(**WU Min** Professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers process control,

robust control, and intelligent system. Corresponding author of this paper.)

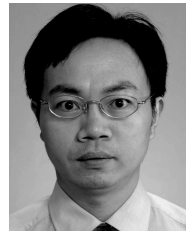


**曹卫华** 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为多智能体系统、机器人技术和生产过程智能控制.

E-mail: caowh@csu.edu.cn

(**CAO Wei-Hua** Professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers multi-agent systems, robot technology, and intelligent control for production process.)

systems, robot technology, and intelligent control for production process.)



**何勇** 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为时滞控制系统, 鲁棒控制和过程控制.

E-mail: heyong08@yahoo.com.cn

(**HE Yong** Professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers time-delay systems, robust control, and process control.)

robust control, and process control.)