

文章编号 1004-924X(2014)09-2407-09

## 高炉料面检测中的多源数据融合

苗亮亮<sup>1,2\*</sup>, 陈先中<sup>1</sup>, 侯庆文<sup>1</sup>, 白真龙<sup>1</sup>, 王正鹏<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学自动化和电子工程学院 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083;  
2. 北京佰能电气技术有限公司, 北京 100096)

**摘要:**针对高炉料面检测中多传感器数据难以直接应用的问题,提出了同时融合高度和温度数据,结合布料机理对非检测点进行估计来实现料面检测的方法。首先,对高炉异类传感器得到的多源数据进行时间和空间配准;然后,根据高炉高度与温度的机理关系,提出环域配准融合思想,用高炉料面温度求出对应的高度;最后,结合料面的物理性质,将理论料形与多源数据进行贝叶斯融合得到高炉料面图像。以某钢铁企业 2 500 m<sup>3</sup> 高炉现有检测设备为基础进行了现场实验,实验结果表明,与料形估算法相比,本文检测方法的测量精度提高了 5.4%,料面分辨率提高了 0.43。该方法使得高炉料面形状检测更加精准,为高炉节能减排操作提供了必要的指导。

**关键词:**料面检测;多源数据融合;环域配准;贝叶斯融合

**中图分类号:**TP391.4;TF03 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142209.2407

## Multi-source data fusion in detection of blast furnace burden surface

MIAO Liang-liang<sup>1,2\*</sup>, CHEN Xian-zhong<sup>1</sup>, HOU Qing-wen<sup>1</sup>, BAI Zhen-long<sup>1</sup>, WANG Zheng-peng<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Advanced Control for Iron and Steel Process of the Ministry of Education, School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*  
2. *Beijing Bestpower Electrical Technology Ltd., Beijing 100096, China*)  
\* *Corresponding author, E-mail: zqllmiao@163.com*

**Abstract:** In consideration of the difficulty of directly using the multi-sensor detecting data in detection of the burden surface of a blast furnace (BF), a novel approach is put forward. The method fuses height data and temperature data and makes use of material mechanism to estimate the non-detecting points to obtain the burden surface. First, multi-sourced data obtained by dissimilar sensors are dealt with in both the time dimension and the spatial dimension. Then, a specific means of loop domain registration is proposed to derive the height of burden surface from the temperature of burden surface. Finally, by combing with the physical properties of surface shape and using Bayes fusion for the theoretical shape and multi-sourced data, the image of burden surface shape of BF is acquired. The experiments indicate that the measurement accuracy has improved by 5.4%, and the resolution of BF has improved by 0.43 as compared with that the traditional burden surface shape estimating method. The method provides necessary guidance for energy saving operation of blast furnaces.

**Key words:** burden surface detection; multi-sourced data fusion; loop domain registration; Bayes fusion

收稿日期:2013-07-26;修订日期:2013-09-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61333002)

## 1 引言

钢铁工业是国民经济的基础工业,中国炼铁系统能耗占整个钢铁行业总能耗的 69.41%。提高炼铁高炉料面形状的检测精度,可以更好地反映炼铁高炉炉况,实现节能减排。

高炉作为高温、高压、高粉尘的密闭容器,其料线形状检测手段受到限制,无法直接获得料面的具体形状。因此,冶金学者采用多个传感器对料面上的某些采样点进行检测,对于非采样点,用重构的方式获得数据。料面形状的整体测量精度依赖于检测点的类型、数量、位置及重构方法。

传统方法是采用多个异类传感器进行检测得到多源数据,针对每种数据采用不同的重构方法得到料面形状。料面形状检测的装置主要有高度传感器<sup>[1-2]</sup>和温度传感器<sup>[3]</sup>。

基于高度传感器检测,往往采用多个雷达或者多个机械探尺检测料面上的不同点,然后基于机理模型法<sup>[4-5]</sup>或直接拟合法<sup>[1-2]</sup>对非采样点进行重构。机理模型法应用布料或者运动方程进行料面建模,其运动模型、接触力模型等都采用了一些假设来进行纯理论的近似计算,因此料面形状的重构不够准确。直接拟合法<sup>[4-5]</sup>单纯从数据拟合的角度对料线进行建模,这样易使重构的料线形状与高炉布料实际情况不符。此外,两者受高炉环境限制,高度检测点少,由于多在径向上检测相对炉心距离不同的点,并认为圆周上料面形状为均匀分布,对料面形状进行圆周均匀插值,故无法反映料面的偏心状况。

基于温度传感器的检测,往往采用多个十字测温热电偶,对于非采样点,用插值的方式获得料面温度分布图<sup>[6]</sup>。高炉内温度检测点较多,一般在径向上检测相对炉心距离相同的点,能够反映料面温度的偏心情况。由于高炉料面温度与高度呈显著耦合关系,用温度分布图的偏心性可判断料面高度偏心性。

从上述文献可以看出,高炉料面检测中多传感器数据难以直接应用。多传感器数据融合可以使传感器信息互补,优化配置,提高整体系统的检测精度<sup>[7-9]</sup>。本文在检测条件不变的情况下,同时融合高度和温度数据,结合布料机理对非检测点进行估计,提高了料面整体检测精度。

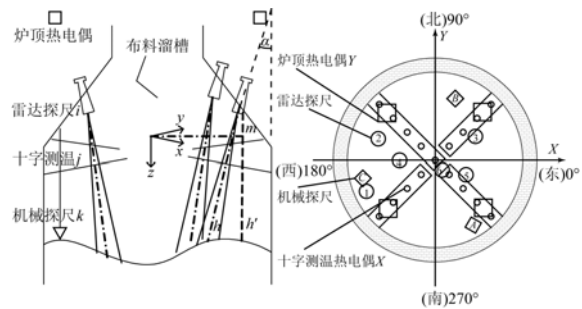
最后,以某钢铁企业 2 500 m<sup>3</sup> 高炉现有检测设备为基础进行现场实验,验证了本文方法的检测精度。

## 2 时空配准

### 2.1 空间配准

#### 2.1.1 建立空间坐标系

以高炉剖面轴线与工艺上零料线交点为原点,传感器的布置如图 1 所示。零料线所在零料面水平方向为  $xoy$  平面, $z$  轴方向垂直  $xoy$  面向下,如图 2(a)所示。在  $xoy$  平面上,各检测传感器投影如图 2(b)所示。设安装孔对应 0°,对应坐标轴为  $x$  轴,方向为东;将  $x$  轴逆时针旋转 90°设为  $y$  轴,方向为北。根据建立的坐标系,机械探尺传感器测得的数据即为相对于零料面的数据。仅需对雷达探尺传感器及十字测温传感器进行空间配准。



(a) Section drawing (b) Plane projection drawing  
(a) Section drawing (b) Plane projection drawing

图 1 各传感器布置图

Fig. 1 Drawing of sensor layout

#### 2.1.2 雷达探尺数据空间配准

由于高炉炉顶并非平面,且各个雷达投影到平面上距离炉心位置不等,故各个雷达安装垂直位置距离零料面不同。需将雷达回波检测到的高度数据转化为相对零料面到实际料面的高度数据。令雷达坐标为  $(x_i, y_i, m_i, \alpha_i)$ ,其中  $i$  为雷达标号, $(x_i, y_i)$  为雷达安装位置投影到  $xoy$  平面上的坐标,雷达与零料线垂直距离为  $m_i$ , $\alpha_i$  为安装倾角。

将雷达高度数据融合为相对零料面的高度数据:

$$h'_i = h_i \cos \alpha_i - m_i, \quad (1)$$

式中: $h_i$  为雷达探尺检测得到高度数据; $h'_i$  为空

间融合后的雷达探尺高度数据。

2.1.3 十字测温数据空间配准

十字测温热电偶测得的数据为十字测温所在平面的温度,而为了反应实际料面处的温度,需将十字测温测得的数据转换为实际料面处的温度数据。由于高炉料面温度与高度有较强的线性关系<sup>[10]</sup>,在炉内空间存在温度衰减,这里借助轴向方向的炉顶热电偶温度传感器,应用相关性系数法,分析轴向方向温度的衰减情况。

令十字测温热电偶坐标为  $(x_j, y_j, \omega_j, h_j)$ , 十字测温热电偶投影到  $xOy$  平面上的坐标为  $(x_j, y_j)$ , 十字测温热电偶测得的温度数据为  $\omega_j$ , 十字测温热电偶与料面的距离为  $h_j$ 。

在十字测温上方有炉顶上升管热电偶  $Y$ , 分别取其中每一上升管温度随机样本观察值  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , 取对应梁上每一十字测温热电偶  $X$  温度随机样本观察值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 计算样本的相关系数  $r$ :

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

式中:  $\bar{x}$  为十字测温热电偶的测得温度平均值;  $\bar{y}$  为炉顶热电偶的测得温度平均值。

在  $\max(|r|)$  处, 说明  $n$  维欧式空间  $R_n$  中, 向量  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  与向量  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$   $t$  几乎平行, 此时十字测温热电偶  $X$  与炉顶热电偶  $Y$  具有最强线性关系。根据线性相关最大处的十字测温热电偶和炉顶热电偶测得温度以及十字测温到炉顶上升管的距离来确定温度衰减和深度的关系, 然后根据十字测温热电偶投影到料面的深度情况, 把十字测温热电偶的温度值映射到料面上。

$$\Delta\omega_j = \frac{(\omega_j - \omega_k) \times d_2}{d_1}, \quad (3)$$

$$s(t) = \left[1 + 2 \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}\right] \left[\frac{t - t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}}\right]^2 y_i + \left[1 + 2 \frac{t - t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}}\right] \left[\frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}\right]^2 y_{i+1} + (t - t_{i+1}) \left[\frac{t - t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}}\right]^2 m_i (t - t_{i+1}) \left[\frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}\right]^2 m_{i+1}. \quad (7)$$

根据文献<sup>[10]</sup>, 可得出递推公式:

$$m_i = a_i m_{i+1} + b_i \quad (i = n, n-1, \dots, 1, 0). \quad (8)$$

其中:  $a_i = \frac{-a_i}{2 + (1 - a_i) a_{i-1}}, b_i = \frac{\beta_i - (1 - a_i) b_{i-1}}{2 + (1 - a_i) a_{i-1}}$

$(i = 1, 2, \dots, n), a_0 = -\frac{a_0}{2}, b_0 = \frac{\beta_0}{2}$ , 运用公式求

$$d_2 = h_j - n, \quad (4)$$

$$\omega'_j = \omega_j + \Delta\omega_j, \quad (5)$$

式中:  $d_1$  为炉顶热电偶到十字测温热电偶的距离;  $d_2$  为十字测温热电偶到料面的距离;  $h_j$  为十字测温热电偶所在位置高炉料面高度;  $n$  为十字测温热电偶与零料面距离;  $\omega_j$  为十字测温热电偶检测得到温度数据;  $\omega'_j$  为空间融合后的十字测温热电偶温度数据。

2.2 时间配准

异类传感器是典型的异步传感器, 需要对其采样时间进行同步处理。采用基于最小二乘法的样条拟合算法<sup>[11]</sup>, 求得某一传感器数据按时间变化的拟合曲线。可以根据其他传感器的采样时刻, 从本算法拟合曲线中取出相应时刻的拟合值进行时间融合对准。

设传感器  $A$  在某一时间段  $[a, b]$  内对目标进行了以  $n+1$  次测量, 将整个时间区间按采样时刻划分为  $a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$ , 给定的时刻点  $t_i$  对应的观测值为  $f(t_i) = y_i (i = 0, 1, \dots, n)$ , 构造一个 3 次样条插值函数  $s(x)$ , 使其满足下列条件:

- ①  $s(t_i) = y_i, i = 0, 1, \dots, n$ ;
- ②  $s(t)$  在每个小区间  $[t_i, t_{i+1}]$  上是一个三次多项式,  $i = 0, 1, \dots, n-1$ ;
- ③  $s(t)$  在  $[a, b]$  上具有二阶连续导数。

基于最小二乘的样条函数拟合是在样条函数空间  $S_k(\square)$  内, 找出对于  $f(t)$  关于范数  $\|\square\|$  的最佳逼近, 即找到  $s^*(t)$ , 使:

$$\|f - s^*\| = \min_{s \in S_k(\Delta)} \|f - s\|. \quad (6)$$

3 次样条插值函数的构造过程如下:

记  $m_i = s'(t_i), (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ , 在每个小区间  $[t_i, t_{i+1}] (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$  上利用 Hermite 插值公式写出 3 次样条插值函数  $s(t)$  的计算公式:

$b_i, a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 令  $m_{n+1} = 0$ , 求出  $m_n, m_{n-1}, \dots, m_0$ , 将所给参数  $t_i, y_i, m_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$  代入  $s(t)$  即得所求的三次样条插值函数。

经过样条插值拟合, 可以求得传感器在任意时刻的值。

### 3 多源数据配准

料面形状检测可获得料面各点的高度,而异类传感器得到的是多源数据,其中热电偶得到的是温度数据,需要将温度数据转换成高度数据。

根据文献[10],高炉温度数据与高度数据在一定程度上成反比关系,因此通过检测温度数据可以反映料面高度的分布情况。但是由于高炉操作时,其炉料形状、粒度等不断发生一些变化,在溜槽旋转作用下,炉料大小颗粒下落的位置也有所不同,因此还需求取每一区域温度与高度的具体关系。采用环域配准法求解。

(1)采用平均分布细化法<sup>[6]</sup>确定料面上每一点的温度。

十字测温悬臂上的每个点的温度值:

$$\omega_x = \omega_j - \frac{\omega_j - \omega_{j+1}}{n} (j \leq x \leq j+1), \quad (9)$$

其中: $j$ 为十字测温某点的测量值, $j+1$ 为 $j$ 测量点后一点, $\omega_x$ 为介于两者之间某点温度值, $n$ 为细化的程度。

算出点 $(x, y)$ 到原点的距离  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,在十字测温悬臂上找出与原点距离为  $r$ ,且与点 $(x, y)$ 距离最近的两个点  $\omega_{xr}$ 和  $\omega_{yr}$ 。

则点 $(x, y)$ 处的温度  $\omega_{xy}$ 为:

$$\omega_{xy} = \frac{x}{x+y} \omega_{xr} + \frac{y}{x+y} \omega_{yr}. \quad (10)$$

(2)环域配准

由于高炉布料采用环形周期布料,所以一般情况下,在  $xoy$  平面中,与原点距离相等的点的温度与高度比例相对比较接近。令  $[\omega_{j/2}, \omega_{j+1/2}]$  为一个环,由于在坐标轴向下,即测得距离与温度成正比,在每个环域内令:

$$h_{xy} = a\omega_{xr} + b, \quad (11)$$

式中: $h_{xy}$ 为实测数据, $\omega_{xy}$ 由式(10)得到, $a, b$ 为待定系数。

环域配准原理如图 2 所示,在每个环域取 2 个实测点即可求出  $a, b$ ,当环域内少于 2 个实测点时,找出与环域  $[\omega_{j/2}, \omega_{j+1/2}]$  距离最近的 2 个点,当环域内多于 2 个实测点时,取其中 2 点分别求出  $a, b$ ,代入第三点,取令第三点误差最小的值为  $a, b$ 。

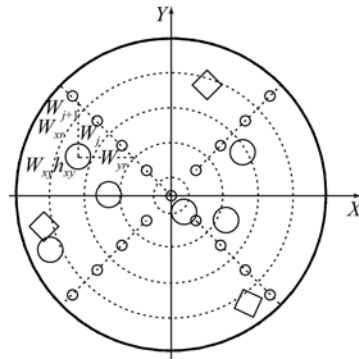


图 2 环域配准原理

Fig. 2 Loop domain registration principle

(3)反向求解料面高度

对于环域内的任一点,令:

$$h'_{xy} = a \frac{1}{\omega_{xr}} + b, \quad (12)$$

式中: $h'_{xy}$ 为融合后料面高度数据。

### 4 多源数据融合

#### 4.1 料线形状模型

根据布料机理,料面形状为环形对称面状体,定义料线模型经对称即可得到料面形状。根据文献[12-13],料线形状模型如图 3 所示:

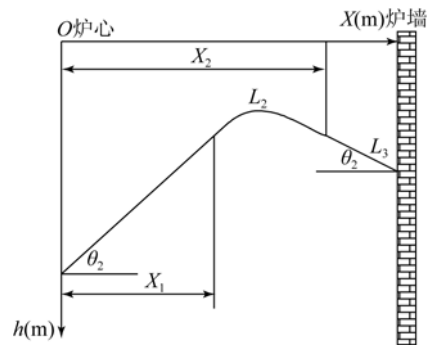


图 3 三段曲线拟合料面形状

Fig. 3 Model of three section curves for burden distribution

$L_1$ 和 $L_3$ 为直线, $L_2$ 为二次曲线, $R$ 为炉喉半径, $\theta_1$ 为内堆角, $\theta_2$ 为外堆角, $X_1, X_2$ 分别表示曲线的交点。三段曲线分别为:

$$L_1: y = a_1 x + a_2, 0 \leq x \leq X_1,$$

$$L_2: y = b_1 x^2 + b_2 x + b_3, X_1 \leq x \leq X_2,$$

$$L_3: y = c_1 x + c_2, X_2 \leq x \leq R \quad (13)$$

$a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ 为待定系数。考虑到

三段曲线在交点  $X_1, X_2$  处高度和斜率相等,则由式(13)可得如下约束方程:

$$\begin{cases} a_1 X_1 + a_2 = b_1 X_1^2 + b_2 X_1 + b_3, \\ b_1 X_2^2 + b_2 X_2 + b_3 = c_1 X_2 + c_2, \\ a_1 = 2b_1 X_1 + b_2, \\ 2b_1 X_2 + b_2 = c_1. \end{cases} \quad (14)$$

$$L_x = \frac{V^2 \sin^2 \alpha_k}{g} \cdot \left\{ \sqrt{\cot^2 \alpha_k + \frac{2g}{V^2 \sin^2 \alpha_k} [l_0 (1 - \cos \alpha_k) + h_k]} - \cot \alpha_k \right\}. \quad (15)$$

$X_1, X_2$  为距高炉中心的距离:

$$\begin{aligned} X_1 &= \sqrt{l_0^2 \sin^2 \alpha_1 + 2l_0 \sin \alpha_1 L_1 + \frac{1+4\pi^2 \omega^2 l_0^2}{V^2} L_1^2}, \\ X_2 &= \sqrt{l_n^2 \sin^2 \alpha_n + 2l_n \sin \alpha_n L_n + \frac{1+4\pi^2 \omega^2 l_n^2}{V^2} L_n^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

从图 3 及式(13)中不难得出:

$$V_1 = V - V_0 = \frac{m}{\rho} = \int_0^{X_1} (a_1 x + a_2) dx + \int_{X_1}^{X_2} (b_1 x^2 + b_2 x + b_3) dx + \int_{X_2}^R (c_1 x + c_2) dx - V_0,$$

即:

$$\frac{1}{2} a_1 X_1^2 + a_2 X_1 + \frac{1}{3} b_1 (X_2^3 - X_1^3) + \frac{1}{2} b_2 (X_2^2 - X_1^2) + b_3 (X_2 - X_1) + \frac{1}{2} c_1 (R^2 - X_2^2) + c_2 (R - X_2) = \frac{m}{\rho} + V_0, \quad (18)$$

式中: $V$  表示装完料后物料总体积,  $V_0$  表示这批料之前的物料总体积(由本次装料前的料面曲线进行体积积分计算得到),  $m$  表示这批料的质量,  $\rho$  表示这批料的密度。

联立公式(14), (16), (17), (18), 即可求出待定系数  $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$  得到料线形状模型。

#### 4.2 理论料形与多源数据 Bayes 融合

高炉料面由炉料颗粒组成, 根据文献[14], 颗粒物质在冲击下的分布可近似的认为是高斯分布, 而高斯分布为正态分布的一种。设对于料面非检测点, 其经多源数据两级配准(时空配准及环域配准)后的数据为  $X_i$ , 理论料线数据为  $X_j$ , 则  $X_i, X_j$  都服从正态分布, 以概率密度函数曲线作为各自的特征函数, 记成  $p_1(x), p_2(x), x_i, x_j$  为  $X_i, X_j$  的一次观测值。

为了反映观测值  $x_i, x_j$  之间的偏差的大小, 引进置信距离测度  $d_{ij}$ ,  $d_{ij}$  的值称为第  $i$  项数据与第  $j$  项数据的置信距离测度,  $d_{ij}$  的值越小, 两种数据的值越详尽, 否则偏差就很大, 因此  $d_{ij}$  也称为第  $i$  项数据与第  $j$  项数据的融合度,  $d_{ij}$  的值可借助正态分布误差函数  $\text{erf}(\theta) = \frac{2}{\pi} \int_0^\theta (e^{-u^2}) du$  [15] 直接求得:

多环布料情况下,  $X_1, X_2$  可理解为溜槽的内、外倾角形成的。

炉料落点处料线深度为  $h_k (k=1, 2, \dots, n)$ , 溜槽长度  $l_0$ , 溜槽倾角  $\alpha_k (k=1, 2, \dots, n)$ , 重力加速度为  $g$ , 溜槽速度  $\omega$  时, 炉料移动距离  $L_x$  为 [12]:

$$\begin{cases} a_1 = \tan \theta_1, \\ c_1 = -\tan \theta_2. \end{cases} \quad (17)$$

考虑体积约束, 由新、旧料面曲线所形成的曲面绕高炉中心线旋转而围成的体积应当与炉料的实际装入量相等, 可知:

$$\begin{cases} d_{ij} = \text{erf} \left\{ \frac{x_j - x_i}{\sqrt{2} \delta_i} \right\}, \\ d_{ji} = \text{erf} \left\{ \frac{x_i - x_j}{\sqrt{2} \delta_j} \right\}. \end{cases} \quad (19)$$

则置信距离测度  $d_{ij}$  构成一个矩阵

$$\mathbf{D}_m = \begin{pmatrix} d_{11} & & d_{1m} \\ d_{21} & & \\ \vdots & d_{2m} & \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{m1} & & d_{mm} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

一般情况下, 根据工艺要求人为确定一个阈值  $\epsilon$ , 当置信距离测度小于  $\epsilon$  时两种数据相互支持, 值为 1 ( $r_{ij}=1$ ), 否则为 0, 则关系矩阵为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq \beta_{ij}, \\ 0, & d_{ij} > \beta_{ij}. \end{cases}$$

$$\mathbf{R}_m = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots \\ r_{21} & r_{22} & \dots \\ & \dots & \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots \end{pmatrix}, \quad (21)$$

其中:  $r_{ij}$  表示第  $i$  项数据与第  $j$  项数据的支持程度,  $r_{ij}$  表示第  $j$  项数据与第  $i$  项数据的支持程度。

设单点料面值的各项数据的最佳融合数是  $l$

( $l < 5$ ), 融合集为  $X = (x_1 \cdots x_l)$ , 各个测量值的条件概率密度为:

$$p(\mu | x_1 \cdots x_l) = \frac{p(\mu; x_1 \cdots x_l)}{p(x_1 \cdots x_l)}, \quad (22)$$

其中:  $\mu$  是测量的均值, 服从正态分布即 Gauss 分布  $N(\mu_0, \delta_0^2)$ , 且  $x_k$  服从  $N(\mu, \delta_k^2)$ , 并令  $\alpha = \frac{1}{p(x_1 \cdots x_l)}$ ,  $\alpha$  是与  $\mu$  无关的常数;  $\mu_0, \delta_0$  是期望的数学期望和均方差;  $\delta_k$  是第  $k$  次测量的均方差; 所以:

$$p(\mu | x_1 \cdots x_l) = \alpha \exp \left[ -1/2 \sum_{k=1}^l \left( \frac{x_k - \mu}{\delta_k} \right)^2 - 1/2 \left( \frac{\mu - \mu_0}{\delta_0} \right)^2 \right],$$

式中指数部分是关于  $\mu$  的二次函数,  $p(\mu | x_1 \cdots x_l)$  仍为正态分布, 假设服从  $N(\mu_N, \delta_N^2)$ , 则:

$$p(\mu | x_1 \cdots x_l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_N} \exp \left[ -1/2 \left( \frac{\mu - \mu_N}{\delta_N} \right)^2 \right]. \quad (23)$$

则有:

$$\mu_N = \left[ \sum_{k=1}^l \frac{x_k}{\delta_k^2} + \frac{\mu_0}{\delta_0^2} \right] / \left[ \sum_{k=1}^l \frac{1}{\delta_k^2} + \frac{1}{\delta_0^2} \right]. \quad (24)$$

所以  $\mu$  的贝叶斯估计为  $\mu = \mu_N$ , 即理论料形与多源数据的最佳融合值为  $\mu_N$ 。

## 4 实验验证

在某钢厂 2 500 m<sup>3</sup> 高炉, 炉喉直径 8.2 m, 炉顶检测装置有雷达探尺、机械探尺、十字测温热电偶以及炉顶上升管热电偶。将多传感器数据融合料面检测方法与传统料形估算法进行对比, 并采用开炉激光人工逐点测量法, 验证本方法测量料线的准确性。实验中料线坐标单位均为 m。

第一步: 空间配准。利用式(1)对雷达探尺数

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ \delta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.49 & -3.01 & 2.24 & -2.00 & 1.63 & 1.18 \\ -1.27 & 1.09 & 1.29 & 0.00 & -0.94 & -1.11 \\ 2.892\ 8 & 3.022\ 6 & 3.040\ 1 & 2.777\ 1 & 2.130\ 7 & 1.667\ 2 \\ 0.123\ 1 & 0.098\ 5 & 0.057\ 0 & 0.036\ 1 & 0.075\ 9 & 0.005\ 4 \end{bmatrix}.$$

十字测温温度数据经时空融合及环域配准后转换

据进行计算。十字测温传感器上的热电偶为环状分布, 经计算, 在从内向外的第 4 环上  $\forall \max(|\bar{r}|) = 0.9 \rightarrow 1$ , 以此环数据为基准, 利用式(5)及炉顶热电偶数据对十字测温数据进行计算。

第二步: 时间配准。高炉雷达获得数据的周期为 29 ms, 机械探尺为 1 s, 十字测温为 500 ms, 因为高炉为缓变系统, 若以雷达为周期会造成系统资源浪费, 因此以十字测温周期为基础, 利用式(7)对雷达探尺及机械探尺进行插值并取 500 ms 时刻值, 得到均为周期 500 ms 的数据。

第三步: 环域配准。根据式(10)求出料面任意处温度值, 根据式(11)求出料面任意处温度与高度关系等式, 根据式(12)得到料面任意处高度配准值。

第四步: 料形计算。采用的布料矩阵为:  $C_{33321}^{24678} O_{33322}^{14678}$ , 5 环布料, 由式(16)得到  $X_1, X_2$  位置: [3.721 2.6722]。由式(17)求得待定系数  $a_1, c_1$ , 式中  $\theta_1$  为<sup>[13]</sup>:

$$\tan \theta_1 = \tan \varphi_0 - K \frac{h}{R}, \quad (25)$$

式中:  $R$  炉喉半径;  $K$  系数; 料线深度为  $h$ ; 测得焦炭, 混合料的自然堆角: 30.2° 和 29.1°。

$\theta_2$  用经验公式计算<sup>[16]</sup>:

$$\text{焦炭: } \theta_2 = 73.12 - 1.97 \alpha_k, \quad (26)$$

$$\text{烧结矿: } \theta_2 = 79.77 - 2.04 \alpha_k, \quad (27)$$

式中,  $\alpha_k$  为  $n$  档溜槽倾角。

联立公式(14)(18)求出其它待定系数  $a_2, b_1, b_2, b_3, c_2$  得到料线形状模型。

第五步: 贝叶斯融合。以 500 ms 周期, 取 60 s 之内的观测值, 求出经两级配准后实测数据的分布以及理论料形数据的分布, 根据式(19)~(24)求出各数据的最佳融合值。

雷达检测值经时空融合后高度数据为:

的高度数据为:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ w_j \\ z_j \\ \delta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.864 & -2.978 & -2.137 & -1.023 & 0.004 & 1.023 & 2.137 & 2.978 & 3.864 \\ 3.864 & 2.978 & 2.137 & 1.023 & 0.004 & -1.023 & -2.137 & -2.978 & -3.864 \\ 280 & 127 & 109 & 315 & 496 & 187 & 75 & 88 & 186 \\ 1.49 & 1.33 & 1.13 & 2.01 & 3.09 & 1.25 & 0.98 & 0.90 & 1.39 \\ 0.042\ 3 & 0.043\ 1 & 0.012\ 6 & 0.098\ 3 & 0.004\ 9 & 0.004\ 1 & 0.016\ 2 & 0.093\ 8 & 0.034\ 9 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ w_j \\ z_j \\ \delta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.864 & -2.978 & -2.137 & -1.023 & 1.023 & 2.137 & 2.978 & 3.864 \\ -3.864 & -2.978 & -2.137 & -1.023 & 1.023 & 2.137 & 2.978 & 3.864 \\ 148 & 71 & 72 & 177 & 100 & 78 & 90 & 237 \\ 1.35 & 0.71 & 0.97 & 1.19 & 1.09 & 1.00 & 0.91 & 1.45 \\ 0.032\ 1 & 0.012\ 6 & 0.028\ 3 & 0.004\ 9 & 0.010\ 2 & 0.036\ 8 & 0.042\ 6 & 0.100\ 2 \end{bmatrix}.$$

机械探尺数据为:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ \delta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.93 & -3.48 & -2.55 \\ 3.47 & -0.93 & -2.55 \\ 2.978 & 3.012 & 2.899 \\ 0.009\ 7 & 0.011\ 7 & 0.012\ 5 \end{bmatrix}.$$

理论料形数据为:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ \delta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 2.667\ 2 & 3.721 & 4.100\ 0 \\ 0.000\ 0 & 2.667\ 2 & 3.721 & 4.100\ 0 \\ 3.098\ 9 & 1.452\ 2 & 1.139\ 0 & 1.339\ 6 \\ 0.002\ 3 & 0.000\ 6 & 0.001\ 2 & 0.000\ 3 \end{bmatrix}.$$

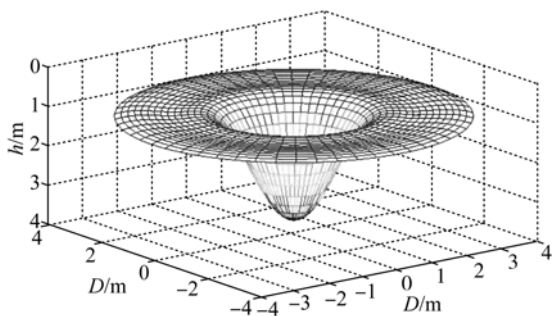


图 4 料形估算高度图

Fig. 4 Burden shape estimated with height data

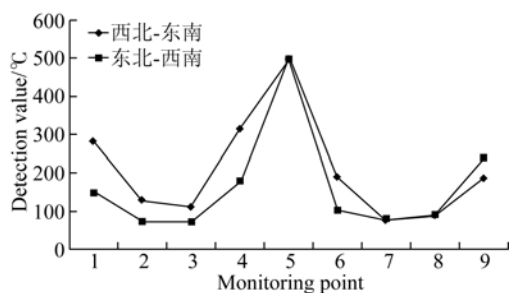


图 5 温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution curves

第六步:算法比较。传统的只用高度数据结合料形估算得到的料面形状如图 4 所示,只用温度数据得到高炉温度分布如图 5 所示,采用三级数据融合的方法进行料面检测,将多源数据进行时空配准、环域配准之后与理论料形进行融合得到高炉料面图像,如图 6 所示。

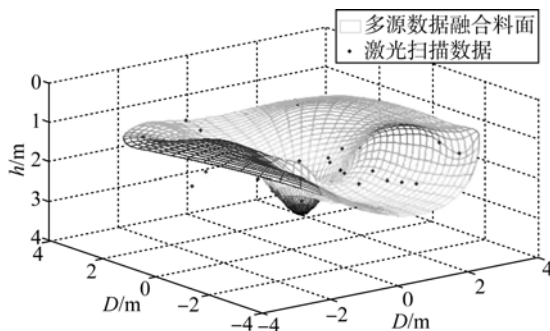


图 6 65 点与激光扫描法所得数据比较结果

Fig. 6 Comparison of the fitting furnace surfaces by multi-source data fusion method and 65 point data scanned by laser

提出的新的多传感器数据融合检测法在成像分辨率、成像速度和精度方面,其与传统料形估计法对比如表 1 所示。其中开炉后通过激光法验证成像误差为:

$$k = \left( \sum_{i=1}^{65} |m_i| - \sum_{j=1}^{65} |m_j| \right) / \sum_{j=1}^{65} |m_j|, \quad (28)$$

其中:  $k$  为取 65 点测量绝对值差与激光测量值比的平均误差(在此假设各种检测设备本身没有误差)。激光为 1 mm 精度逐点扫描,高炉炉喉半径 4.1 米,面积约 53 m<sup>2</sup>,激光沿 0, 0.25π, 0.5π, 0.75π, π, 1.25π, 1.5π, 1.75π 8 个弧度方向均匀扫描 65 点,约 1.5 点/m<sup>2</sup>,其中每个方向扫描 8 个点,并且每个方向上扫描位置相同。中心点扫描一个点。

表 1 多传感器数据融合法、一般料形估算法与激光扫描料面数据的对比

Tab. 1 Contrast of fitting furnaces surface by multi-source data fusion method, burden shape estimated method and furnace surface data scanned by laser

方法对比	料形估算法	多传感器数据融合法
数据模型	3 点机械探尺。料形估算仅需一个基准点,对机械探尺数值取平均值,检测信息减少	3 个机械探尺,17 点十字测温,6 个雷达。增加了测量点类型和密度
成像误差	10.2%	4.8%
成像分辨率	3 点/53 m <sup>2</sup> =0.06 点/m <sup>2</sup>	26 点/53 m <sup>2</sup> =0.49 点/m <sup>2</sup>
成像速度/s	<1 s	2~3 s

与单独高度检测的料形估算法相比:料形估算仅需一个料线高度为基准点,料线高度由料面平台处的机械探尺提供,故取机械探尺的平均值,检测信息减少,重构图像为纯理论计算,不能反映料面的偏心情况,其结果与实际检测有偏差。多传感器数据融合法增加了数据类型(十字测温温度),增加了测量点密度(增加了雷达点,包含各点信息,各点不取平均值),温度数据能够体现在重构结果上,能够反映料面偏心情况,减少了检测误差,检测数据的增加使得成像分辨率大幅提高。

与单独温度检测的温度判断法相比,温度判断法仅提供温度分布图,其趋势与料面形状大致成反比,需要人为判断料面高度的偏心情况。数据融合法采用环域配准融合思想,用高炉料面温度求出对应的高度,给出了温度与高度的定量关系,充分反映了有偏心的料面高度。

由于多传感器数据融合法点数增多,数据量有所提高,从而分辨率相对估算法有所提高。由

于雷达数据都是实时采集,成像速度差别只体现在后期融合处理上,按照某钢铁公司 65 个点的数,融合法数据传输加成像算法的完成时间,采用 MATLAB 2010 运算,约 2~3 s 完成。估算法成像时间反应速度较快,一般小于 1 s。

## 5 结 论

针对检测得到的高炉料面多源数据,提出了环域配准融合思想,充分利用温度数据补充高度数据,对料面图像进行了数据细化和补充。实验显示,结合理论料形模型确定料面形状具有料面信息准确,成本低,有针对性等优点。得到的结果表明,与料形估算法相比,本文方法的测量精度提高了约 5.4%,料面分辨率提高了 0.43。该方法使得高炉料面形状检测更加精准,可为高炉节能减排操作提供必要的指导。

## 参考文献:

- [1] GAO Z K, LIU J, GAO T. Advanced inside-furnace monitoring techniques implemented on the new large blast furnace of shagang [J]. *AISTech Iron Steel Technol. Conf. Proc.*, 2010; 565-571.
- [2] CHEN X Z, LIU F M, HOU Q W, *et al.*. Industrial high-temperature radar and imaging technology in blast furnace burden distribution monitoring process [J]. *ICEMI*, 2009; 599-603.
- [3] MAYSUI Y, KASAI A, ITO K, *et al.*. Stabilizing burden trajectory into blast furnace top under high ore to coke ratio operation [J]. *ISIJ International*, 2003, 27(8); 1159-1166.
- [4] NAG S, KORANNE V M. Development of material trajectory simulation model for blast furnace compact bell-less top [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2009, 36(5); 371-378.
- [5] ZHENG Y F, SATORU I, SHUNGO N, *et al.*. Influence of blast furnace inner volume on solid flow and stress distribution by three dimensional discrete element method [J]. *ISIJ International*, 2010, 50; 1406-1412.
- [6] 安剑奇, 吴敏, 何勇, 等. 基于两级信息融合的高炉料面煤气流分布检测方法[C]. 第 29 届中国控制会议, 北京, 2010; 5660-5665.

AN J Q, WU M, HE Y, *et al.*. Detection method of gas flow distribution of burden surface based on

- two-stage information fusion [N]. *Proceedings of the 29th Chinese control conference*. Beijing, 2010:5660-5665. (in Chinese)
- [7] 裴闯,蒋晓瑜,王加,等.自然彩色化双通道实时图像融合系统[J].*光学精密工程*,2013,21(5):1333-1339.  
PEI CH, JIANG X Y, WANG J, *et al.*. Dual-channel real-time image fusion system with nature color [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(5):1333-1339. (in Chinese)
- [8] 韩辅君,徐静,宋世忠.基于低成本多传感器的自适应组合滤波[J].*光学精密工程*,2011,19(12):3007-3015.  
HAN F J, XU J, SONG SH ZH. Adaptive attitude estimation filtering with low-cost multi-sensors for MAHRS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(12):3007-3015. (in Chinese)
- [9] HE J P, TU Y Y, SHI Y Q. Fusion Model of Multi Monitoring Points on Dam Based on Bayes Theory [J]. *Procedia Engineering*, 2011:2133-2138.
- [10] 成兰伯.高炉炼铁工艺及计算[M].北京:冶金工业出版社,1991.  
CHENG L B. *Blast furnace ironmaking process and calculation* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [11] 梁凯,潘泉,宋国明,等.多传感器时间对准方法的研究[J].*陕西科技大学学报*,2006.  
LIANG K, PAN Q, SONG G M, *et al.*. Research on multi-sensor time alignment method [J]. *Journal of Shanxi University of Science & Technology*, 2006. (in Chinese)
- [12] 祝乔,程汉卿,尹怡欣,等.基于多点雷达和最小二乘法估计高炉料面形状[J].*北京科技大学学报*, 2012(9):1061-1064.  
ZHU Q, CHENG H Q, YIN Y X, *et al.*. Estimating the burden surface profile of a blast furnace based on multi-radar measurement and least squares approximations [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012(9):1061-1064. (in Chinese)
- [13] 刘云彩.高炉布料规律[M].3版.北京:冶金工业出版社,2006.  
LIU Y C. *Regularity of burden distribution in blast furnace*[M]. 3rd Ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [14] 张航,郭蕴博,陈骁,等.颗粒物质在冲击作用下的堆积分布[J].*物理学报*,2007,56(4):2031.  
ZHANG H, GUO Y B, CHEN X, *et al.*. The distribution of a granular pile under impact [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56 (4): 2031. (in Chinese)
- [15] 吴小俊,曹奇英,陈保香,等.基于Bayes估计的多传感器数据融合方法研究[J].*系统工程理论与实践*,2000,7:45.  
WU X J, CAO Q Y, CHEN B X, *et al.*. Study on multisensor data fusion methods based on bayes estimation [J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2000,7:45. (in Chinese)
- [16] 陈令坤,于仲洁,周曼丽,等.高炉布料数学模型的开发及应用[J].*钢铁*,2006,41(11):13.  
CHEN L K, YU ZH J, ZHOU M L, *et al.*. Development and application of blast furnace burden distribution model [J]. *Iron and Steel*, 2006,41(11):13. (in Chinese)

#### 作者简介:



苗亮亮(1981—),女,辽宁鞍山人,博士研究生,2003年于辽宁科技大学获得学士学位,2009年于重庆理工大学获得硕士学位,主要从事传感器网络与传感器融合,高炉料面检测与控制。E-mail:zqlmiao@163.com