

基于雷达观测数据的高炉料面多模型控制

刘德馨, 李晓理, 丁大伟, 陈先中

(北京科技大学自动化学院; 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 炉料在高炉内部的布局直接影响着高炉的运行, 好的布料策略能极大地提高生产力, 并带来巨大的经济效益. 本文利用模糊 c 均值聚类算法对大量雷达扫描得到的料面数据进行分类, 建立多模型料面模型集; 设定期望料面, 并根据料面模型集中的多种料面, 设计多种布料控制策略, 求出相应的布料矩阵. 每一个布料周期, 采用模糊识别的方法把获得的实时料面数据与模型集相匹配, 进而采取相应的布料矩阵进行布料, 直至达到期望料面. 由于雷达扫描数据的存在, 形成了反馈机制, 使得高炉布料能够实现闭环控制. 本控制策略在某钢铁厂 2500m^3 高炉上得到实施, 取得很好的控制效果, 达到节能降耗的要求.

关键词: 雷达; 多模型; 布料; 闭环控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Multi-model control of blast furnace burden surface based on observed data of radars

LIU De-xin, LI Xiao-li, DING Da-wei, CHEN Xian-zhong

(School of Automation and Electrical Engineering; Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process (Ministry of Education), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The operation of blast furnace is directly affected by the charging distribution. Productivity can be boosted considerably if good charging distribution strategy is adopted. At the same time, great economic benefits will be brought about. In our method, a large amount of burden surface data from radars are classified by using fuzzy c -means clustering, and the multiple models set of burden surface is built. When the expected burden surface is given, multiple control strategies are designed based on multiple burden surfaces of the model set, and multiple charge distribution are obtained. In every charging distribution period, the real time burden surface data will be matched with the model set by fuzzy recognition, and the corresponding charge distribution matrices will be selected for charge distribution until the expected burden surface is produced. Feedback mechanism is formed from the observed data of radars, and closed-loop control is realized. The proposed control strategy is applied to a 2500m^3 blast furnace in an Iron and Steel Plant; the control effect has been improved greatly, and the energy conservation and consumption reduction are realized.

Key words: radars; multiple models; charging distribution; closed loop control

1 引言(Introduction)

钢铁是现代最重要的原材料之一, 我国钢产量已经连续9年居世界之首, 是世界上最大的钢铁生产国和消费国. 但在能耗方面, 每生产一吨钢所用的矿石、煤炭、电力等资源远远高于发达国家. 因此, 提高技术和设备水平, 是我国钢铁工业近期首要解决的问题^[1].

高炉布料控制是高炉操作的一个重要部分, 也是影响高炉炼铁质量的重要因素之一^[2]. 布料是指高炉炼铁过程中, 对高炉炉喉处的炉料(主要是矿石和焦炭)的分布与控制. 考虑炉顶装料装置的功能和炉料特性, 在装炉时, 控制不同形状、粒度的炉料装入炉内后的堆尖位置、厚度. 既要实现煤气流合理分

布, 使其热能、化学能得到最大限度利用, 又要保证炉料的顺利下降, 维持高炉冶炼过程的稳定进行.

自1972年第一个无钟布料装置在德国汉博恩厂投产以来, 国内外专家学者对于合理的布料分布越来越重视, 这方面的研究结果也越来越多. Zhang S J等人^[3-4]建立了高炉数值模型, 主要对煤气流和料面坍塌进行分析, 并为进一步的布料控制做准备; Ho C K等人^[5]研究了炉料的密度和大小对布料的影响; Gupta S等人^[6]详细阐述了焦炭在高炉生产中起到的重要作用; 陈令坤等人^[7]采用摄像设备摄取料流轨迹和料面图像建立了高炉布料控制模型.

但目前关于布料控制的主流方法仍为开环控制, 这是因为高炉内部高温、高压、高粉尘的恶劣环境,

使实时料面的获取成为难题,同时也给精确布料控制策略的实施带来了难度.近些年来,一些学者开始利用雷达观测料面形状指导布料控制^[8-9],并逐步引起冶金和控制专家的关注.

本文基于多雷达观测料面数据,对已知的多组料面进行分类,建立料面模型集.进一步给出每类模型的布料控制器.采用控制工程界的热点研究方法——多模型控制的思想^[10-11],进行布料控制.把获得的实时数据与模型集相匹配,得到对应的控制策略,形成闭环布料控制系统.研究方法通过仿真和某钢厂的现场实验进行验证,说明了其有效性.

2 多模型料面模型集(Model set of multiple burden surface models)

2.1 基于多雷达观测数据的料面模型(Burden surface models based on observed data of multiple radars)

炼铁高炉是一个高温高压及高粉尘的密闭反应器,造价在几十亿元之巨,其内部环境非常复杂.传统料面监视是用机械探尺采集数据,只有2~3个点,不能完全反应高炉料面的实际情况,无法做到精准控制.本文采用已在国内某大型钢铁厂投入使用的多雷达设备监控料面,获得料面数据.

多雷达的安装分布俯视图如图1所示,阴影部分代表无法布置雷达的区域(吊装孔、中心溜槽区、喷水孔等设备的安装区域).在高炉斜面的水平投影位置,等间隔的方法,垂直安装4台雷达(#1- #4),另外2台(#5、#6)在内环靠近炉中心位置倾斜安装,实现料面的全覆盖^[8].

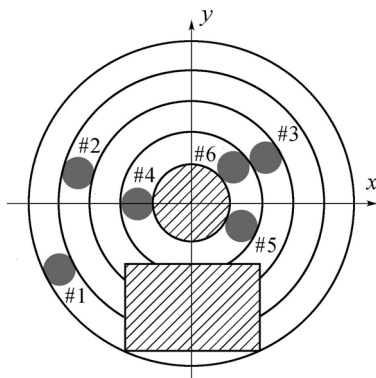


图1 雷达安装分布图

Fig. 1 The installed position of radars

通过分析高炉炉体的结构和雷达的探测原理,建立料面的数学模型.测得的原始数据 L 为雷达到料面实际测量点之间的距离.以一个雷达为例,建立空间直角坐标系 $Oxyz$ 则测量空间如图2所示.图2为一个半径为 $R_0 = 4\text{ m}$ 的高炉, S 为平面 A 到零料面的距离参数,一般规定 $S = 3\text{ m}$. (X, Y, Z) 为雷达的安装坐标, X, Y 表示安装点在零料面上的投影位置,

Z 表示安装点和平面 A 在垂直方向上的距离,向心倾角 φ 表示雷达与垂直方向上的夹角.

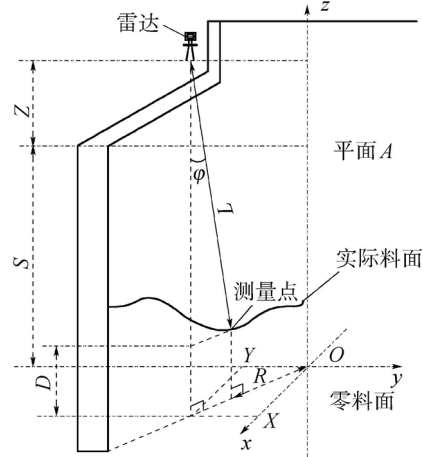


图2 雷达测量空间模型

Fig. 2 Measuring space model of radar

6个雷达的安装坐标和向心倾角如表1所示.

表1 雷达的安装坐标和向心倾角

Table 1 Installation coordinate and obliquity of radars

雷达	X	Y	Z	向心倾角 φ
#1	-3.49	-1.27	-3.12	0.00
#2	-3.01	1.09	3.48	0.00
#3	2.24	1.29	4.18	0.00
#4	-2.00	0.00	4.50	0.00
#5	1.63	-0.94	4.70	4.50
#6	1.58	1.11	4.00	11.00

定义 R 为实际测量点和中心点间的径向距离:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} - L \sin \varphi. \quad (1)$$

D 为实际测量点和零料面的料面相对高度:

$$D = Z + S - L \cos \varphi. \quad (2)$$

由表1的雷达安装数据、式(1)和式(2)可得6个点: $(R_i, D_i)(i = 1, 2, \dots, 6)$.假设料面关于中心点 O 是中心对称的,通过高炉轴向旋转变换,把这6个点,归到一个平面上,再在区间 $[0, R_0]$ 上对6个点做3次样条插值,可得近似料面曲线 C 如图3所示,图中“*”为6个点 (R_i, D_i) 的坐标.

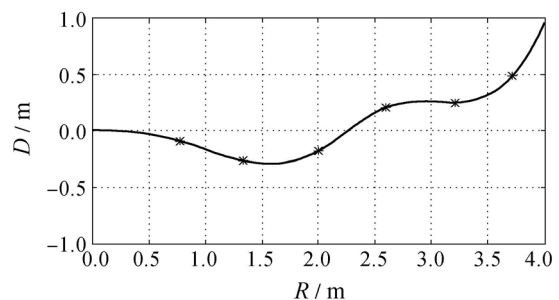


图3 料面近似曲线

Fig. 3 Burden surface approximate curve

堆尖位置、倾斜角度和中心点的高度是料面的几个重要特征, 在布料控制中起到决定性的作用. 因此, 可将料面曲线化简为折线后再分析. 方法如下:

等间隔取料面曲线 C 上的多个点:

$$\{(r_0, d_0^C), (r_1, d_1^C), \dots, (r_n, d_n^C)\}, \quad (3)$$

其中 $n = R_0/0.01$.

固定中心点 (r_0, d_0^C) 和炉壁点 (r_n, d_n^C) , 然后在两点间选定一个 $(r_{t^*}, d_{t^*}^C)$, 用这 3 点连成的折线代替曲线. 可看出 $(r_{t^*}, d_{t^*}^C)$ 有 $n - 1$ 种选择.

设生成的折线为 $P(t) (t = 1, 2, \dots, n - 1)$. 类似式(3), 取其上的多点数据:

$$\{(r_0, d_0^{P(t)}), (r_1, d_1^{P(t)}), \dots, (r_n, d_n^{P(t)})\}, \quad t = 1, 2, \dots, n - 1, \quad (4)$$

求出使得折线 $P(t)$ 曲线 C 的偏离方差最小的 t^* 值:

$$t^* = \arg \min_{1 \leq t \leq n-1} \left\{ \sum_{j=1}^{n-1} (d_j^C - d_j^{P(t)})^2 \right\}. \quad (5)$$

因为料面是关于中心点对称的, 在 $[-R_0, R_0]$ 上, 把完整的料面曲线简化为折线.

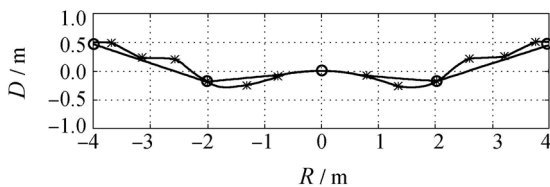


图 4 料面折线图

Fig. 4 Burden surface polygonal line

综上所述, 用 3 个点 (r_0, d_0^C) , $(r_{t^*}, d_{t^*}^C)$ 和 (r_n, d_n^C) 就可表现出料面的特征, 而对于一个固定的高炉, 任何一组雷达数据经过数据处理 $r_0 = 0, r_n = R_0$, 所以可把料面折线用 4 个数据表示:

$$H = \{d_0^C, r_{t^*}, d_{t^*}^C, d_n^C\}. \quad (6)$$

2.2 多模型料面模型集的建立 (Establishment of model set of multiple burden surface models)

在高炉生产过程中, 因煤气流的运动、炉料与炉壁的摩擦和塌料, 使得料面在下移过程中不断变化, 虽然其形状并不单一, 但大体上可分为常见的几类.

模糊 c 均值聚类 (fuzzy c -means, FCM) 的思想是将经典划分的定义模糊化, 用隶属度函数来确定属于某个聚类程度的一种方法. 本文通过 FCM 算法把大量由雷达得到料面数据分成 c 个类, 建立 c 个模态^[12].

首先, 根据式(1)–(6)把已知的 n 组 6 维原始数据 L 转化为 4 维折线数据 H 作为 FCM 算法的输入:

$$H = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{24} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{n4} \end{bmatrix}.$$

然后, 确立模糊分类数 c ; 设定阈值 ε ; 初始化隶属度矩阵 $U = [u_{ij}]_{c \times n}$, u_{ij} 表示第 j 样本属于第 i 个聚类中心的属性度, 且满足式(7)的约束条件; 令 $t = 0$.

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1, \quad u_{ij} \in (0, 1). \quad (7)$$

构成如下分类步骤:

1) 根据如下公式计算聚类中心:

$$V = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix},$$

且 $t = t + 1$.

$$\mathbf{v}_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m \mathbf{h}_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m}, \quad i = 1, 2, \dots, c, \quad (8)$$

其中: $\mathbf{v}_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ v_{i3} \ v_{i4}]$; m 称作平滑参数, 通常取值在 $[1.5, 2.5]$ 之间.

2) 计算目标函数:

$$J(U, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_c) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2, \quad (9)$$

其中 $d_{ij} = \sqrt{\sum_{q=1}^4 (h_{jq} - v_{iq})^2}$ 为第 j 个料面模型与第 i 个聚类中心 \mathbf{v}_i 的欧几里得距离.

如果目标函数 J 相对与 $t - 1$ 次时刻的变化量大于阈值 ε , 则根据如下公式计算新的隶属度矩阵, 返回步骤1):

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad i = 1, 2, \dots, c, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

如果变化量小于阈值 ε , 算法停止并输出隶属度矩阵 U 和聚类中心 V . 由最终的隶属度矩阵 $U = [u_{ij}]_{c \times n}$ 计算:

$$i = \arg \max_{1 \leq i \leq c} u_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

这样, 就把料面数据 H_1, H_2, \dots, H_n 分到第 i 类 ($i = 1, 2, \dots, c$), 建立 c 个模态.

3 布料控制 (Charging distribution control)

由于料面的多样性, 单一的布料控制方法往往不理想. 根据多模型控制的思想, 针对不同的工况下, 得到的 c 个料面模态, 设计多种控制策略, 进而采用多模型控制“分而治之”的思想. 通过切换机制, 建立整个控制系统.

布料模型可以描述成布料矩阵 W 和初始料面 H 的函数:

$$Q = f(W, H). \quad (12)$$

根据式(12), 已知布料矩阵 W 和初始料面 H 后, 便可估计出布料后的料面 Q . 由于此公式推导过程十分复杂, 限于篇幅, 详细步骤参考文献[13].

3.1 基于固定料面的布料矩阵设计(Design of charging distribution matrix based on fixed burden surface)

溜槽的倾角是形成合理料面的关键因素之一, 不同的溜槽倾角构成了不同的角位, 决定着物料的下落点. 对应不同的角位, 当每次下料的质量为定值时, 下料圈数对应着下料的质量. 因此, 决定料面曲线的关键因素是不同角位的选择和对应角位的布料圈数, 二者构成了布料矩阵: $W = [\alpha \ N]^T$.

本文采用多环布料的方法, 把溜槽的倾角固定11个档位, 只在这几个角度布料, 即把整个料面分成11个同心圆, 且中心的小圆和另外10个圆环的面积相等.

已知高炉炉喉的半径为 R_0 , 则等分成的11部分每部分的面积为

$$S = \frac{\pi R_0^2}{11}. \quad (13)$$

每个圆的半径为

$$r'_k = \sqrt{\frac{Sk}{\pi}}, \quad k = 1, 2, \dots, 11. \quad (14)$$

取小圆的中心点和每个环的中心线为炉料落点 r'' , 如图5所示.

$$r''_1 = 0, \quad r''_k = \frac{r'_k + r'_{k-1}}{2}, \quad k = 2, 3, \dots, 11. \quad (15)$$

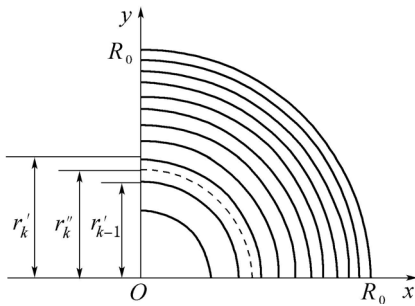


图5 料面同心圆

Fig. 5 Burden surface concentric circles

已知炉料落点位置 r'' 与溜槽倾角 α 之间存如下关系:

$$r''^2 = l_0^2 \sin^2 \alpha + 2l_0 L_x \sin \alpha + \left(1 + \frac{4\pi^2 \omega^2 l_0^2}{C_1^2}\right) L_x, \quad (16)$$

其中: 溜槽长度 l_0 和转速 ω 为定值, L_x 和 C_1 是 α 的函数, 因此, r'' 与 α 一一对应^[13]. 已知 r'' 求对应的 α , 如果用反函数来计算不容易实现, 本文通过计算机迭代来求解. 使 α 从 0° 以分为步长增长到 90° , 求出最贴

近 $[r''_1 \ r''_2 \ \dots \ r''_{11}]$ 的11个对应角度:

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{11}]. \quad (17)$$

式(17)即为所求得11个角位的溜槽倾角值. 下面求解这11个角度对应的布料圈数.

类似式(3), 在区间 $[0, R_0]$, 取折线化后的初始料面 H 和期望料面 G (由专家经验得到的固定值)上的 n 个点, $n = R_0/0.01$:

$$\{(r_0, d_0^H), (r_1, d_1^H), \dots, (r_n, d_n^H)\}, \quad (18)$$

$$\{(r_0, d_0^G), (r_1, d_1^G), \dots, (r_n, d_n^G)\}. \quad (19)$$

根据二者高度的差得出炉料体积:

$$V = \sum_{i=0}^n 2\pi r_i (d_i^G - d_i^H) \times 0.01, \quad (20)$$

则布料所需要的炉料总质量 $M = \rho V$, 其中 ρ 为炉料的平均密度, 由炉料的种类决定. 给定每次单圈投入布料的炉料质量为定值 m , 由此可得到布料圈数的总和:

$$N = \left[\frac{M}{m} + 0.5\right]. \quad (21)$$

其中符号 $[*]$ 表示取小于等于 $*$ 的最大整数.

采用由外向内逐步求解的方法计算每个角度对应的布料圈数, 设 N_k 为第 k 环的布料圈数, 初始值为1; k 的初始值为11.

1) 由 N_k 和式(17)得到的 α , 组成单环布料矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \dots & \alpha_k & \dots & \alpha_{11} \\ 0 & \dots & N_k & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

把 W 和初始料面 H 代入式(12)可求布料后的料面 Q .

2) 比较此时料面 Q 和期望料面 G 在第 k 环炉料落点 r''_k 处的料面高度 d^Q 与 d^G 的大小.

若 $d^Q \leq d^G$, 则 $N_k = N_k + 1$, 并返回步骤1).

否则, $N_k = N_k - 1$, 得到第 k 环的布料圈数.

3) 令 $k = k - 1$, 计算内一圈的布料圈数. 把前面得到的最终料面 Q 作为新的初始料面 H , 并返回步骤2). 直到计算出所有的 $N_k (k = 1, 2, \dots, 11)$.

若结果 $\sum_{k=0}^{11} N_k = N$, 计算结束.

若不满足, 这说明在所求的 N_k 中, 存在某角位不足期望料面高度, 但多一圈又会超出界限的情况, 出现 $\sum_{k=0}^{11} N_k < N$. 此时, 把其中某一环的布料圈数加1, 计算在此布料圈数下

$$[N_1 \ \dots \ N_k + 1 \ \dots \ N_{11}]$$

得到 k 个料面 $Q_k (k = 1, 2, \dots, 11)$. 如式(3)等间隔取 Q_k 上 n 个点($n = R_0/0.01$):

$$\{(r_0, d_0^{Q_k}), (r_1, d_1^{Q_k}), \dots, (r_n, d_n^{Q_k})\}. \quad (22)$$

由式(19)和式(22), 计算使期望料面 G 和料面 Q_k 的偏离方差最小的 k 值, 最终确定第 k 环的布料圈数

加1.

$$k = \arg \min_{1 \leq k \leq 11} \sqrt{\sum_{j=0}^n (d_j^G - d_j^{Qk})^2}. \quad (23)$$

综上所述, 先由式(13)–(17)得到布料倾角, 再通过(20)–(23)计算布料圈数, 得到多环布料矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_{11} \\ N_1 & N_2 & \cdots & N_{11} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

3.2 料面类别的确立(Determination of burden surface category)

当有新的一组实时料面数据时, 要把它与模型集相匹配, 确立料面的类别. 这里引入模糊集当中贴近度的概念进行求解.

贴近度是两个模糊向量 \mathbf{A} , \mathbf{B} (向量 \mathbf{A} , \mathbf{B} 的元素都属于 $[0, 1]$ 区间) 接近程度的度量, 记做 $\delta(\mathbf{A}, \mathbf{B})$, 且满足 $\delta(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \in [0, 1]$. 当两个模糊集越接近时, 贴近度越大, 反之越小.

为了求得新测得料面数据 H 和第 2.1 节获得的 c 类模型中的哪一类最接近, 即要求得与 H 最接近的 $v_i (i = 1, 2, \dots, c)$, 先把数据做归一化处理, 通常采用平移标准差变换和平移极差变换的方法^[14].

把聚类中心 V 和 4 维料面数据 H , 构成如下矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} V \\ H \end{bmatrix} = [x_{pq}]_{(c+1) \times 4}. \quad (25)$$

对其进行归一化变换:

1) 平移标准差变换:

$$x'_{pq} = \frac{x_{pq} - \bar{x}_q}{s_q}, \quad (26)$$

$$p = 1, 2, \dots, c + 1, \quad q = 1, 2, \dots, 4,$$

其中: $\bar{x}_q = \frac{1}{c + 1} \sum_{p=1}^{c+1} x_{pq}$ 为每列的均值;

$$s_q = \sqrt{\frac{1}{c + 1} \sum_{p=1}^{c+1} (x_{pq} - \bar{x}_q)^2}$$

为每列的标准差.

2) 平移极差变换:

$$x''_{pq} = \frac{x'_{pq} - \min_{1 \leq p \leq c+1} \{x'_{pq}\}}{\max_{1 \leq p \leq c+1} \{x'_{pq}\} - \min_{1 \leq p \leq c+1} \{x'_{pq}\}}, \quad (27)$$

$$q = 1, 2, \dots, 4.$$

经过变换后, 显然有 $x''_{pq} \in [0, 1]$. 把得到的 $X'' = [x''_{pq}]_{(c+1) \times 4}$ 拆开, 则有

$$X'' = \begin{bmatrix} V'' \\ H'' \end{bmatrix}, \quad (28)$$

V'' 的 c 个 4 维的行向量 $v''_1, v''_2, \dots, v''_c$ 和 H 上的元素都属于 $[0, 1]$ 区间.

采用最大最小贴近度算法比较归一化后的料面向量数据 H'' 与 $v''_1, v''_2, \dots, v''_c$ 中哪类最接近.

$$\delta(H'', v''_i) = \frac{\sum_{q=1}^4 \min[H''_q, v''_{iq}]}{\sum_{q=1}^4 \max[H''_q, v''_{iq}]}, \quad i = 1, 2, \dots, c. \quad (29)$$

若有

$$i^* = \arg \max_{1 \leq i \leq c} \delta(H'', v''_i), \quad (30)$$

则 H'' 和 v''_{i^*} 的贴近度最大, 即新的折线化后的料面数据 H 属于模型库中的第 i^* 类.

3.3 基于多模型思想的布料控制系统(Charging distribution control system based on multi-model idea)

高炉冶炼是把铁矿石还原成生铁连续生产过程. 铁矿石、焦炭和熔剂等固体原料按规定配料比由炉顶装料装置分批送入高炉, 在炉内形成交替分层结构, 并使炉喉料面保持一定的高度. 铁矿石逐步被还原、熔化成铁水和渣, 聚集在炉缸中, 定期从铁口、渣口放出^[15].

本文基于多模型控制思想, 设计下料过程, 需做如下准备工作^[16]:

1) 首先, 根据大量料面数据设计多模型料面模型集. 根据第 2.2 节的 FCM 算法, 把大量料面数据分成常见的几类, 构成多模型料面模型库. 设分成 c 类, 则每一类料面 $i (i = 1, 2, \dots, c)$, 对应模型库中的第 i 个元素模型.

2) 给定设定值料面 G , 由第 3.1 节的算法求出元素模型 i 对应的布料矩阵 $W_i (i \in 1, 2, \dots, c)$, 构成元素模型控制器.

3) 如第 3.3 节确定贴近度函数 $\delta(\cdot, \cdot)$ 、阈值 ε_1 和 ε_2 , 构成指标函数. 在每个布料周期中, 利用此函数选择模型库中与当前测量料面最接近的料面, 并将对应的布料矩阵切换为当前的布料策略.

根据以上准备工作 1)–3), 有如下在线控制策略:

1) 由雷达扫描料面, 对获得的料面数据进行分析, 得到料面特征数据, 并与模型集相匹配, 如第 3.2 节求出料面所属的类别. 设定阈值 ε_1 , 若料面类别 $i^* (i^* \in 1, 2, \dots, c)$ 满足 $\delta(H'', v''_{i^*}) \geq \varepsilon_1$, 则按照布料矩阵 W_{i^*} 进行布料; 若 $\delta(H'', v''_{i^*}) < \varepsilon_1$, 则把此料面作为新的一种类型, 添加进模型库, 使得模型库的元素模型数量变为 $c + 1$. 如第 3.1 节求出此类模型对应的布料矩阵 W_{c+1} 进行布料, 并添加进控制器库.

2) 下一个布料周期开始时, 等间隔取布料后的料面 Q 上的 n 个点 ($n = R_0/0.01$):

$$\{(r_0, d_0^Q), (r_1, d_1^Q), \dots, (r_n, d_n^Q)\}. \quad (31)$$

点击“布料”按钮实现布料, 布料后的料面曲线在料面显示窗口中用黑线表示. 点击右下部的“计算误差”按钮得到布料结果和期望料面的偏离方差 $E = 0.0182$, 小于设定阈值 $\varepsilon_2 = 0.05$, 达到要求暂停布料, 等待料面下移和下一个布料周期.

本文的方法应用在某个钢厂安装6台雷达的2500 m³高炉上, 其中1台的安装现场如图8所示. 雷达的在线自动监控, 使得高炉内部料面的形状能够实时获得. 由于可探测到炉料的下降过程, 料面分布的不合理性, 诸如塌料等不利状况, 能够及时发现. 操作人员能适时采取有效措施进行处理, 为高炉布料操作优化的实现提供了有效果的途径. 项目实施后, 2500 m³高炉经济指标得到了大幅度提升. 其中煤气利用率由实施前的48.07%提高了1.504%达到了项目目标要求(提高0.5%), 煤气利用率的提高, 为高炉降低燃料比创造了良好条件, 燃料比平均下降了16.808 kg/t.

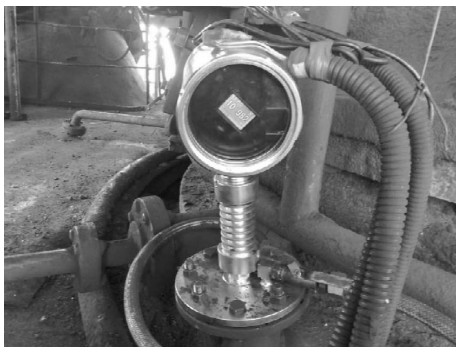


图8 模高炉雷达安装现场图

Fig. 8 Installation of blast furnace radar field

5 结论(Conclusion)

本文在多雷达检测数据的基础上, 通过FCM算法把已知料面数据分类, 建立多模型料面模型集, 并给出每类模型的布料矩阵. 在此基础上, 结合模糊识别函数设计出完整的闭环布料控制系统. 此方法克服了传统的高炉布料开环控制方法的不足, 提高了布料的精度和效率. 文中方法在某钢厂2500 m³高炉布料系统中得以实施, 生产数据验证了方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] 杨天钧, 左海滨. 中国高炉炼铁技术科学发展的途径 [J]. 钢铁, 2008, 43(1): 1-6.
(YANG Tianjun, ZUO Haibin. Compound behaviors in pheromone robotics [J]. *Iron & Steel*, 2008, 43(1): 1-6.)
- [2] 张寿荣. 21世纪前期钢铁工业的发展趋势及我国面临的挑战 [C] //中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 107-117.
(ZHANG Shourong. The tendency of world steel industry in the first 2 decades of 21st century and the challenges facing Chinese steel industry [C] // *Proceedings of Chinese Society for Metals Annual Meeting*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 107-117.)
- [3] ZHANG S J, YU A B, ZULLI P, et al. Numerical simulation of solids flow in a blast furnace [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2002, 26(2): 141-154.
- [4] RADHAKRISHNAN V R, RAM K M. Mathematical model for predictive control of the bell-less top charging system of a blast furnace [J]. *Journal of Process Control*, 2001, 11(5): 565-586.
- [5] HO C K, WU S M, ZHU H P, et al. Experimental and numerical investigations of gouge formation related to blast furnace burden distribution [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(11): 986-994.
- [6] GUPTA S, FRENCH D, SAKUROVS R, et al. Minerals and iron-making reactions in blast furnaces [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34(2): 155-197.
- [7] 陈令坤, 于仲洁, 周曼丽. 高炉布料数学模型的开发及应用 [J]. 钢铁, 2008, 41(11): 13-16.
(CHEN Lingkun, YU Zhongjie, ZHOU Manli. Development and application of blast furnace burden distribution model [J]. *Iron & Steel*, 2006, 41(11): 13-16.)
- [8] LIU D X, LI X L, ZHOU X, et al. Application of fuzzy pattern recognition in burden surface identification [C] // *International Conference on Intelligent Control and Information Processing*. Dalian: IEEE, 2010: 292-296.
- [9] 陈先中, 丁爱华, 吴响. 高炉雷达料面成像系统的设计与实现 [J]. 冶金自动化, 2009, 33(2): 52-56.
(CHEN Xianzhong, DING Aihua, WU Jun. Design and implementation of radar burden imaging system in the blast furnace [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2009, 33(2): 52-56.)
- [10] 王伟, 李晓理. 多模型自适应控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(WANG Wei, LI Xiaoli. *Multiple Model Adaptive Control* [M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [11] DONG Z K, WANG X, WANG X B, et al. Application of weighted multiple models adaptive controller in the plate cooling process [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 35(8): 1144-1150.
- [12] HATHAWAY R J, YING K H. Density-weighted fuzzy c-means clustering [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(1): 243-252.
- [13] 刘云彩. 高炉布料规律 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
(LIU Yuncai. *The Law of Blast Furnace* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.)
- [14] MAJL P, PAL S K. Rough set based generalized fuzzy c-means algorithm and quantitative indices [J]. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2007, 37(6): 1529-1540.
- [15] NOGAMI H, CHU M, YAGI J I. Multi-dimensional transient mathematical simulator of blast furnace process based on multi-fluid and kinetic theories [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, 29(11/12): 2438-2448.
- [16] 李晓理, 石龙辉, 丁大伟. 水箱液位系统多模型控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 370-374.
(LI Xiaoli, SHI Longhui, DING Dawei. Multi-model control for water level system [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 370-374.)

作者简介:

刘德馨 (1987-), 女, 博士研究生, 从事神经网络和智能控制等研究, E-mail: bjldxin@126.com;

李晓理 (1971-), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制和智能控制等研究, E-mail: lixiaoli@hotmail.com, 本文通信作者;

丁大伟 (1980-), 男, 副教授, 从事鲁棒控制与切换控制等研究, E-mail: ddaweiauto@163.com;

陈先中 (1966-), 男, 教授, 博士生导师, 从事工业雷达及成像系统和先进传感器等研究, E-mail: cxz@ustb.edu.cn.