

高炉炉喉煤气流形态三维模型重建

安剑奇^{1,3}, 刘洋^{2,3}, 吴敏^{1,3}, 曹卫华^{1,3†}

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学软件学院, 湖南长沙 410075;
3. 先进控制与智能自动化湖南省工程实验室, 湖南长沙 410083)

摘要: 高炉炉喉煤气流分布是表征高炉生产状况的重要因素且无法直接检测; 本文提出一种基于炉顶摄像检测的高炉炉喉煤气流形态三维模型重建方法. 首先建立检测系统的硬件结构, 其次对煤气流形态图像预处理后, 采用边缘检测算法提取图像特征, 并提出基于方向链码的边缘跟踪算法, 计算煤气流形态的图像坐标; 最后结合摄像机内部参数并利用坐标系三维变化关系以及坐标映射关系, 计算煤气流形态在三维空间的坐标, 从而重建煤气流形态的三维模型. 通过仿真对比高炉布料后煤气流形态发展的4个阶段的三维模型变化, 估计气流形态的变化, 从而估计高炉内部的煤气流分布状况, 对指导高炉布料操作以及高炉稳顺运行奠定了基础.

关键词: 高炉; 煤气流形态; 边缘检测; 三维模型重建

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Reconstruction of 3D model of gas flow distribution in blast furnace throat

AN Jian-qi^{1,3}, LIU Yang^{2,3}, WU Min^{1,3}, CAO Wei-hua^{1,3†}

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
2. School of Software, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;
3. Hunan Engineering Laboratory for Advanced Control and Intelligent Automation, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: Because of the importance of the gas flow distribution in testing the production status and the undetectable nature of it, we propose a 3D model reconstruction method based on the top camera for simulating the gas flow distribution in the blast furnace throat. First, we build the hardware architecture of the detection system. Next, the edge detection algorithm is applied to extract the feature points after preprocessing the generated image. The shape of gas flow is drawn by the edge detection algorithm based on the director chain code. Then, combining the camera internal parameters, we obtained the coordinates for the gas flow in 3D model by using the relations of coordinate 3D transform and coordinate mapping. The 3D model for the gas flow distribution is built eventually. The change of the gas flow distribution after the blast furnace burdening can be inferred in simulation by comparing the variations of 3D models in four development stages of the gas flow distribution, resulting in the internal gas flow distribution of the blast furnace. This distribution will be used as the basis for guiding the operation of furnace burdening as well as making the blast furnace to run steadily.

Key words: blast furnace; gas flow distribution; edge detection; 3D model reconstruction

1 引言(Introduction)

钢铁产业是我国国民经济的基础产业, 涉及面广、产业关联度高、消费拉动大, 是决定一个国家工业水平与综合国力的重要因素之一, 对可持续发展战略有着不可忽视的影响^[1]. 高炉作为钢铁生产流程中的关键设备, 从根本意义上说, 高炉生产最重要的就是准确的检测和合理的控制煤气流的分布和发展. 但是高炉是一个巨型的密闭逆流反应容器, 内部环境非常恶劣, 高温、高压、粉尘等环境使得高炉内部的煤气流

分布无法直接检测或者代价极高, 是导致高炉布料操作难以准确控制的重要问题之一^[2-3].

高炉炉喉煤气流分布是影响高炉生产状况的重要因素之一, 对于保持高炉稳定运行和指导高炉优化操作起着十分重要的作用. 目前国内外对高炉煤气流分布的研究方法主要有两类: 第1类是通过检测料面的温度来反映, 该方法主要通过十字测温热电偶及炉顶红外摄像机等装置实现^[4-5]; 第2类是通过理论计算的方法, 包括基于软熔带模型的方法, 该方法根据矿石

的软熔特性、软熔带形状及高炉解剖研究等情况,判断煤气流中 CO_2 分布^[6-8];基于厄根方程的方法,该方法是由一维的形式扩充到二维和三维,通过有限差分法和有限元计算求解方程^[9-10];基于布料模型的方法,该方法主要通过建立布料模型获取料层的矿焦比曲线,利用得到的矿焦比曲线的形态间接反映煤气流的分布形态^[11-12]。

上述第1类研究方法能够建立料面温度场,从而估计高炉内部的煤气流分布。但该方法只能间接反映料面煤气流分布,无法得到立体气流的变化,进而无法了解煤气流的速度场和流场,难以估计气流的强度,从而无法协助判断炉况,指导高炉稳顺运行。而第2类研究方法中的理论计算,其初始条件和边界条件难以检测,且计算复杂,同时存在很多假设条件,很难应用于实际工程中。

2 高炉炉喉煤气流形态三维模型重建方案 (Reconstructing scheme of 3D model of gas flow distribution in blast furnace throat)

目前,煤气流形态分布通常采用十字测温法来估计,或者只是利用炉顶摄像机采集煤气流形态进行观察,通过建立料面温度场模型得到温度来估计^[13],这样做不能准确反映高炉煤气流形态的发展状况。针对上述问题,笔者在某钢铁公司2200 mm³高炉中,综合高炉炉顶摄像机和过程控制系统提供的状态信息,设计并开发高炉炉喉煤气流形态检测系统,提出系统的硬件结构设计和解决方案,为高炉布料操作提供准确的指导。

在高炉生产过程控制系统中,通过炉顶摄像机拍摄高炉炉喉处的煤气流形态,将采集图像输入检测系统进行处理和计算,并利用工业以太网从高炉过程控制系统OPC服务器中读取检测信息,实现高炉炉喉煤气流形态检测,同时使系统满足低成本的要求。系统硬件结构如图1所示。

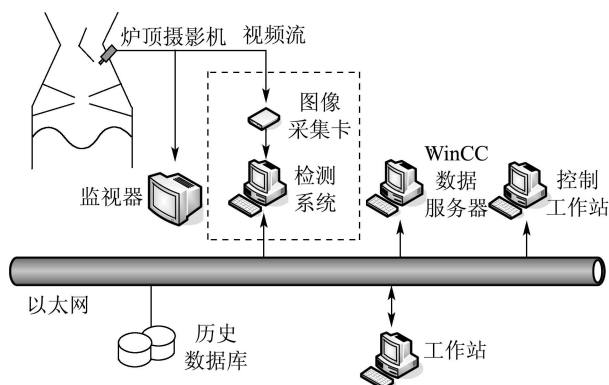


图1 检测系统硬件结构图

Fig. 1 Hardware architecture of detection system

此系统中,炉顶摄像机产生的视频流数据通过分频器,一路信号输出到监视器上,另一路信号输出到

计算机检测系统。同时系统通过主控室的WinCC OPC服务器获取由十字测温得到的数据。利用十字测温的数据,得到料面的温度分布以确定高炉料面高温圆形区域中心的位置。

针对设计的高炉炉喉煤气流形态检测系统,提出一种基于炉顶摄像检测的高炉炉喉煤气流形态三维模型重建方法。首先对采集图像进行预处理,然后提出基于图像边缘检测算法的高炉炉喉煤气流形态图像特征点提取方法,并通过基于方向链码的边缘跟踪算法,得到图像特征点的图像坐标。利用摄像机标定的方法确定的摄像机内部参数,以及煤气流形态图像特征点的图像坐标计算得到煤气流形态图像特征点的世界坐标。通过分析坐标系之间的三维变化关系,计算得到煤气流形态图像特征点在原物体坐标系下的坐标,最后利用坐标映射关系,计算得到煤气流形态在原物体坐标系下的坐标(即煤气流形态的三维空间坐标),从而建立煤气流形态的三维模型。

3 高炉炉喉煤气流形态图像边缘特征提取 (Image edge feature extraction of the gas flow distribution in blast furnace throat)

为了得到煤气流形态图像边缘特征点的坐标信息,需要对图像进行边缘特征提取。首先对图像进行预处理,包括灰度化、滤波、二值化;图像预处理后,进行特征边缘提取,从而得到表征煤气流形态的图像边缘特征点信息。

1) 预处理。

考虑高炉炉喉煤气流形态的特点,本文采用加权平均法^[14]进行图像灰度化,并采用中值滤波^[15]的方法,滤除图像噪声。尽管煤气流形态图像由于噪声影响,导致特征信息不明显,但是图像中一个小范围内的前景和背景之间的灰度差异明显,因此本文采用基于分区的平均灰度自适应二值化方法^[16]处理图像。

2) 特征边缘提取。

由于煤气流形态图像受到高炉布料影响,在炉喉处存在大量粉尘,同时由于实际料面到炉顶摄像机之间,热空气发生混合,引起统一区域热值叠加,导致图像含有大量噪声,特征信息不明显。

为了很好地提取煤气流形态图像的边缘特征点,本文提出一种融合Canny算子^[17]及链码跟踪的边缘检测算法。首先采用基于Canny算子的边缘检测方法对二值化后的煤气流形态图像进行边缘特征点提取,然后采用基于方向链码的边缘跟踪算法,找到边缘特征点相应的图像坐标。此方法计算量较小,速度较快,很好地提高了边缘点扫描的效率,具体步骤如下:

Step 1 先用高斯滤波器平滑图像以消除图像噪声;再用一阶有限差分计算梯度的幅值和方向,并采用“非极值抑制”方法,以细化平滑后的梯度幅值矩

阵,寻找可能的边缘点;最后用双阈值算法进行边缘提取。

Step 2 初始扫描图像,寻找第1个边缘特征点为起始点,记为StartPoint,同时记录其行列坐标值在一个二维数组中.此时方向链码为0.

Step 3 从起始点向其周围的相邻点开始扫描,若搜索方向上的点不是边缘点,则转向Step 4.若是边缘点,则判断此点是不是StartPoint:如果是,可以理解边界是封闭的,已经扫描一周,则跟踪结束;若不是,则将此点记为当前点CurrentPoint,并根据方向链码值计算此点的行列坐标值,将结果记录在二维数组中.将方向链码值减2,即当前搜索方向逆时针旋转90°,作为新的搜索方向.重复Step 3.

Step 4 若搜索方向上的点不是边缘点,则方向链码值加1,即当前的搜索方向顺时针旋转45°,作为新的搜索方向继续搜索相邻点,如果直到回到前一个边缘点的方向都找不到边缘点,则跟踪结束.

通过上述方法,得到煤气流形态边缘特征点的图像坐标,从而为计算煤气流形态的空间三维坐标奠定了基础.

4 煤气流形态空间三维模型(Spatial 3D model calculation of the gas flow distribution)

为了确定高炉炉喉煤气流形态的空间位置分布,首先需要对摄像机进行标定,确定其内部参数.通过边缘特征提取得到煤气流形态边缘特征点的图像二维信息,结合摄像机内部参数,建立特征点在世界坐标系的三维模型.然后根据世界坐标系与原物体坐标系之间的三维变化关系,计算煤气流形态图像特征点在原物体坐标系下的三维模型.最后结合世界坐标系与原物体坐标系之间的坐标映射关系,计算煤气流形态在原物体坐标系下的三维模型.

4.1 高炉炉顶摄像机内部参数标定算法(Calibration algorithm of the intrinsic parameters of the top camera in blast furnace)

摄像机的成像模型描述了物点 P 在摄像机坐标系下的坐标 (X_C, Y_C, Z_C) 与其在计算机图像坐标系下的对应的图像坐标 (x, y) 之间的关系.忽略非线性因素时,可以通过线性几何模型^[18]来描述,如图2,即

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

以摄像机坐标系作为世界坐标系,旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 可省略,进而简化了模型.但是对标定时的外部条件有一定的要求,即测量世界坐标系下的坐标.为了方便实物坐标的测量,将标定板和摄像头平面平

行,于是参数模型简化为

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: (u, v) 是图像坐标系中以像素为单位的坐标, (X_C, Y_C, Z_C) 是实物在摄像机坐标系下的坐标.

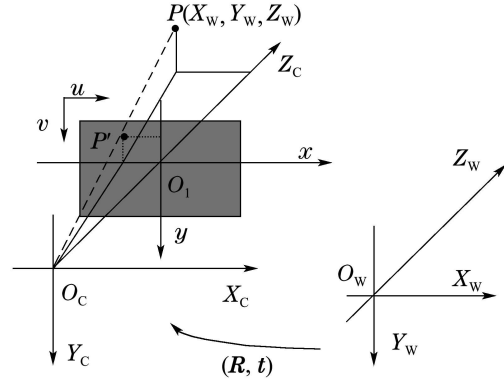


图2 线性摄像机成像模型图

Fig. 2 Imaging model of the linear camera

将矩阵展开,可以写成两个二元方程:

$$Z_C u = a_x X_C + u_0 Z_C, \quad (3)$$

$$Z_C v = a_y Y_C + v_0 Z_C, \quad (4)$$

其中 a_x, a_y, u_0, v_0 为摄像机的内部参数,即待求参数.

本文通过检测黑白棋盘格标定板,确定摄像机的内部参数.标定板中角点的世界坐标可由物理测量得出,而图像上的角点图像坐标采用Moravec^[19]角点检测算子对棋盘格图像进行检测.通过建立世界坐标系和对应点的图像坐标之间的关系,即可计算得到摄像机的内部参数.

本文针对棋盘格的角点数目多的特点,采用最小二乘法使用多个点的数据减小随机误差的影响,提高标定精度.通过此方法得到摄像机内部参数,为煤气流形态的坐标计算奠定了基础.

4.2 煤气流形态二维图像在世界坐标系下的三维模型(3D model of the gas flow distribution image in the world coordinate system)

高炉是一个密闭装置,用于检测煤气流形态的炉顶摄像机安装在高炉边缘,并存在一定角度.高炉炉喉煤气流检测图像成像参数模型,如图3.

为了得到煤气流形态的空间三维坐标,重建煤气流形态的三维模型,在图3中建立摄像机坐标系,由原点 O_C 和 X_C, Y_C, Z_C 坐标轴组成;建立世界坐标系,由原点 O_W 和 X_W, Y_W, Z_W 坐标轴组成;建立以毫米为单位的图像坐标系,由原点 O_1 和 x, y 坐标轴组成;建立以像素为单位的图像坐标系,由原点 O_0 和 u, v 坐标轴组成;建立原物体坐标系,由原点 O 和 X, Y, Z 坐标

轴组成. 其中: θ 表示检测煤气流形态的炉顶摄像机的安装角度; h 表示炉顶摄像机与高炉料面高温圆形区域中心点的距离; s 表示炉顶摄像机与高炉料面高温圆形区域中心点的横向距离.

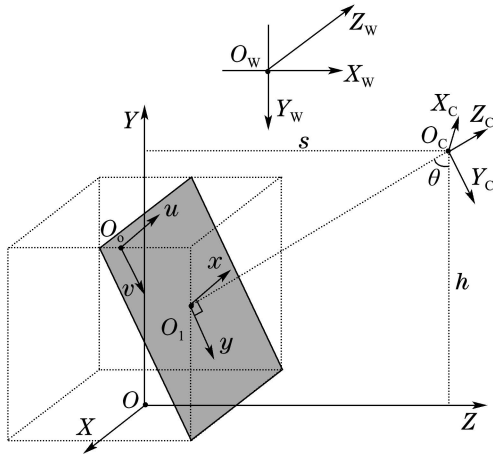


图 3 煤气流形态检测图像成像模型图

Fig. 3 Imaging model of gas flow detection

考虑世界坐标系与原物体坐标系的三维转换关系, 便于煤气流形态在原物体坐标系的坐标计算, 以图像坐标系作为世界坐标系. 通过分析图像坐标系中像素坐标与物理坐标的对应关系, 进而得到煤气流形态图像边缘特征点在世界坐标系的坐标.

在图像坐标系中, 摄像机光轴相交于图像平面的点定义为 O_1 , 该原点一般处于图像中心位置, 在 u, v 坐标系中, 令 O_1 的坐标为 (u_0, v_0) , 而每一个像素在 x 轴与 y 轴方向的物理尺寸分别表示为 dx, dy , 则图像中任意一个像素在两个坐标系下的坐标存在如下关系:

$$u = x/dx + u_0 = ax + u_0, \quad (5)$$

$$v = y/dy + v_0 = by + v_0, \quad (6)$$

其中: $a = 1/dx, b = 1/dy$. 由于参数 a, b 属于摄像机内部参数, 因此在之前摄像机标定的时候, 通过靶纸中检测角点的像素坐标与物理坐标, 以及内部参数 u_0 和 v_0 的值, 能够计算得到 a 和 b 的值.

通过特征边缘提取得到煤气流形态图像边缘特征点的像素坐标, 以及式(5)和式(6), 计算得到煤气流形态图像边缘特征点的物理坐标, 于是得到煤气流形态图像边缘特征点在世界坐标系下的坐标 (X_w, Y_w, Z_w) , 从而为计算煤气流形态图像在原物体坐标系下的三维模型奠定了基础.

4.3 煤气流形态二维图像在原物体坐标系下的三维模型(3D model of the gas flow distribution image in the original coordinate system)

在由原点 O 和 X, Y, Z 坐标轴组成的原物体坐标系中, 炉顶摄像机与高炉料面高温圆形区域中心点的横向距离(即 s), 在高炉实际生产过程中是无法直接确

定的. 本文利用十字测温温度分布来确定料面高温圆形区域中心的位置. 在温度分布中, 气温值最高的点对应高炉料面高温圆形区域的中心气流, 气温值最高点的横向坐标是可以通过高炉内十字测温仪的安装位置确定. 通过确定十字测温仪上气温最高点对应的热电偶的横向坐标以确定 s 的值.

上节确定了煤气流形态图像边缘特征点在世界坐标系下的坐标 (X_w, Y_w, Z_w) , 通过分析原物体坐标系与世界坐标系之间的平移变化以及旋转变换关系, 得到煤气流形态图像在原物体坐标系下的坐标, 具体计算方法如下:

1) 平移变化.

如图4, 若空间平移量为 (t_x, t_y, t_z) , 则平移变换为

$$\begin{cases} x' = x + t_x, \\ y' = y + t_y, \\ z' = z + t_z. \end{cases} \quad (7)$$

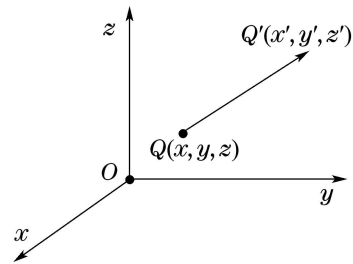


图 4 $O-xyz$ 坐标系

Fig. 4 $O-xyz$ coordinate system

为以后使用方便, 本文用其次坐标与矩阵形式将上式表示为

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

因此在图3中, 原物体坐标系的原点 O 向世界坐标系的原点 O_w , 即点 O_1 进行平移. 煤气流检测图像成像参数模型图正视图如图5.

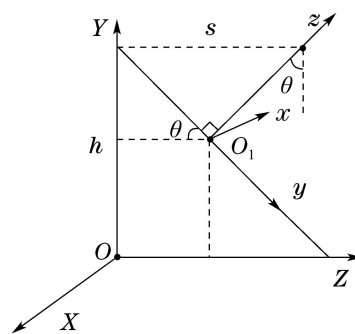


图 5 煤气流形态检测图像成像模型图正视图

Fig. 5 Front view of the imaging model of gas flow detection
在由点 O 和 X, Y, Z 轴组成的原物体坐标系中,

O_1 的坐标为 $(0, h - s \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta, s \cdot \cos^2 \theta)$, 点 O 的坐标为 $(0, 0, 0)$, 因此式(8)可表示为

$$[x' \ y' \ z' \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \times \mathbf{M}, \quad (9)$$

$$\text{其中 } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & h - s \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta & s \cdot \cos^2 \theta & 1 \end{bmatrix}.$$

2) 旋转变换。

如图6, 若坐标系绕 X 轴旋转 γ , 则旋转变换为

$$\begin{cases} x'' = x', \\ y'' = z' \sin \gamma + y' \cos \gamma, \\ z'' = z' \cos \gamma - y' \sin \gamma. \end{cases} \quad (10)$$

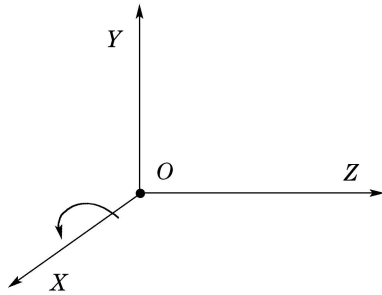


图6 O - XYZ 坐标系

Fig. 6 O - XYZ coordinate system

在图5中, 由点 O 和 X, Y, Z 轴组成的原物体坐标系绕 X 轴旋转 $\gamma = 2\pi/3 - \theta$. 于是式(10)可表示为

$$\begin{cases} x'' = x', \\ y'' = -z' \cos \theta - y' \sin \theta, \\ z'' = z' \sin \theta + y' \cos \theta. \end{cases} \quad (11)$$

用其次坐标与矩阵形式将上式表示为

$$[x'' \ y'' \ z'' \ 1] = [x' \ y' \ z' \ 1] \times \mathbf{N}, \quad (12)$$

$$\text{其中 } \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & -\cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

原物体坐标系绕 X 轴旋转 γ , 得到的坐标系与由点 O_1 和 x, y 轴组成的图像坐标系中的 X 轴和 Z 轴均存在反向, 因此还存在如下关系:

$$\begin{cases} x''' = -x'', \\ y''' = y'', \\ z''' = -z''. \end{cases} \quad (13)$$

用其次坐标与矩阵形式将上式表示为

$$[x''' \ y''' \ z''' \ 1] = [x'' \ y'' \ z'' \ 1] \times \mathbf{U}, \quad (14)$$

$$\text{其中 } \mathbf{U} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

3) 三维变化。

由以上分析可得, 由原物体坐标系向图像坐标系进行三维变化关系为

$$[x''' \ y''' \ z''' \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \times \mathbf{W}, \quad (15)$$

其中 $\mathbf{W} = \mathbf{M} \times \mathbf{N} \times \mathbf{U}$.

于是煤气流形态图像在原物体坐标系下的坐标计算公式可表示为

$$[x \ y \ z \ 1] = [x''' \ y''' \ z''' \ 1] \times \mathbf{W}^{-1}, \quad (16)$$

其中 (x''', y''', z''') 为煤气流形态图像在世界坐标系下的坐标. 根据建立的煤气流形态图像在原物体坐标系下的三维模型, 为煤气流形态在原物体坐标系的三维模型计算奠定了基础.

4.4 煤气流形态的坐标映射关系(Coordinate mapping relationship of the gas flow)

为了重建煤气流形态三维模型需要取得煤气流形态在原物体坐标系下的坐标, 而上述求得 (x, y, z) 为煤气流形态图像在原物体坐标系下的坐标, 因此通过分析煤气流形态的坐标映射关系, 能够得到煤气流形态在原物体坐标系下的坐标, 进而能够重建煤气流形态的三维模型.

如图7, 点 A', B', C' 和 D' 是煤气流形态图像经过特征提取的边缘点, 其坐标为图像坐标在物体坐标系下的坐标. 点 $A(X, 0, Z)$ 为煤气流圈在原物体坐标下的坐标, 且点 A' 为 A 映射在图像上的点. 因此存在如下关系:

$$\begin{cases} \overrightarrow{AA'} \cdot \overrightarrow{A'C'} = 0, \\ \overrightarrow{AA'} \cdot \overrightarrow{A'D'} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

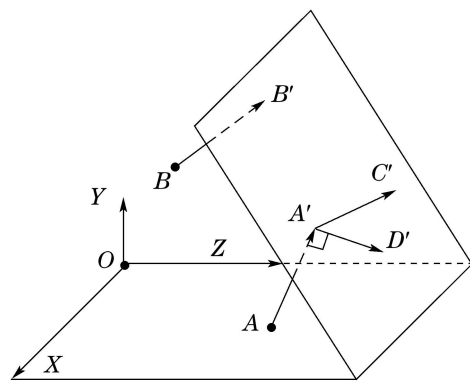


图7 煤气流形态坐标映射关系图

Fig. 7 Coordinate mapping relationship of the gas flow distribution

通过上式能计算得到点 A 的坐标, 于是煤气流圈所有点都能通过上述方法计算得到, 然后对煤气流圈各点的坐标进行曲线拟合, 得到圆. 点 $B(X, h, Z)$ 为煤气流侧面上最高的坐标, 映射到图像上的点为点 B' , 同样存在如下关系:

$$\begin{cases} \overrightarrow{BB'} \cdot \overrightarrow{A'C'} = 0, \\ \overrightarrow{BB'} \cdot \overrightarrow{A'D'} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

于是点B的坐标通过上式可计算得到, 煤气流侧面通过曲线拟合得到. 因此煤气流形态三维模型通过侧边直线沿煤气流圈的中心轴旋转得到.

5 实验结果及分析 (Experimental results and analysis)

本文通过对摄像机进行标定, 得到其内部参数为 $a_x = 762.82, a_y = 785.46, u_0 = 411.94, v_0 = 241.2$. 将经过标定的摄像机拍摄物体进行尺寸计算以验证参数精度. 实验结果显示物体尺寸的绝对误差不超过 2 mm, 相对误差不超过 1.2%, 达到较高精度.

某次采集的高炉炉喉煤气流形态检测图像如图 8 所示, 经灰度化以及中值滤波进行去噪后的煤气流形态图像如图 9.

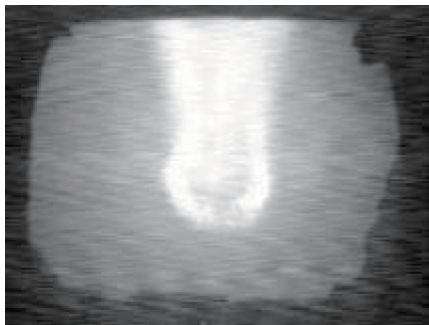


图 8 高炉炉喉煤气流形态检测图像

Fig. 8 Image of the gas flow in the throat of blast furnace

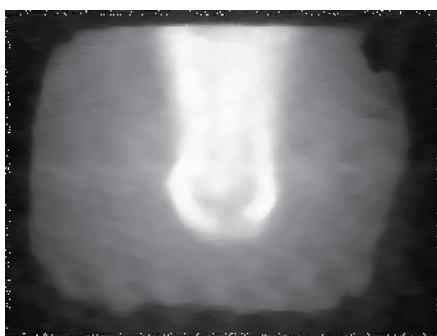


图 9 中值滤波后的煤气流形态图像

Fig. 9 Image of the gas flow (filtered by the median filter)

在图 9 中, 图像边框中黑色区域是因为摄像机防尘罩边缘积灰, 影响图像二值化, 为了避免其造成的影响, 本文在进行基于分区的平均灰度自适应二值化方法之前, 首先对中值滤波后的图像, 取行从 15 像素到 200 像素, 取列从 70 像素到 250 像素, 得到图像的有效区域 (即煤气流形态), 其像素大小为 181×186 , 原中值滤波后的煤气流形态图像的像素大小为 320×240 .

因此基于分区的平均灰度自适应二值化后的煤气流形态图像如图 10 所示. 利用 Canny 边缘检测算子对

二值化后的煤气流形态图像进行边缘特征点提取, 如图 11 所示.

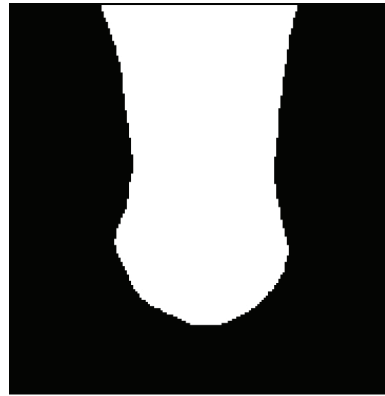


图 10 煤气流形态二值图像

Fig. 10 Binary image of the gas flow

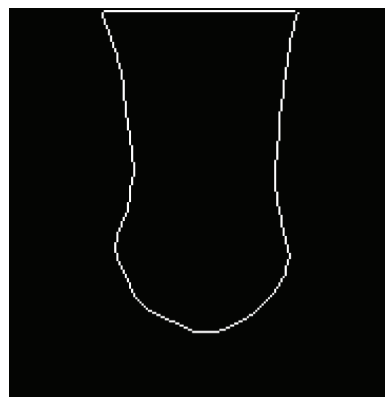


图 11 煤气流形态图像边缘特征提取

Fig. 11 Feature extraction for the gas flow distribution

通过基于方向链码的边缘跟踪算法, 得到煤气流形态图像边缘特征点的图像坐标, 由于此时找到的边缘特征点的图像坐标是在 181×186 像素大小的图像中, 因此需要换算到 320×240 像素大小的图像中.

上述得到的是煤气流形态边缘特征点的图像坐标, 通过确定相关参数, 结合坐标系的三维变化关系以及坐标映射关系, 能够计算得到煤气流形态的三维空间坐标. 该次检测煤气流形态的炉顶摄像机的安装角度 $\theta = 18^\circ$; 炉顶摄像机与高炉料面的距离 $h = 1500 \text{ mm}$ (通过料尺数据计算得到); 炉顶摄像机与高炉料面高温圆形区域中心点的横向距离 $s = 4500 \text{ mm}$ (通过十字测温温度分布计算得到). 基于以上研究, 最后建立煤气流形态三维模型, 如图 12.

根据仿真图可以得到煤气流形态的发展分布, 实验计算可得, 煤气流顶面半径为 513.7 mm ; 煤气流底面半径为 301.7 mm . 通过上述两组半径数据, 可以得到煤气流通风管道的位置分布, 指导高炉布料操作, 使得炉料能够更有效的利用.

图 13 展示了煤气流形态在 4 个阶段的三维模型, 图 13(a)–(d) 分别为布料后煤气流发展的初期、前期、中

期、后期的状态. 这4个状态下的煤气流形态表面积分别为

$$0.29 \times 10^6 \text{ mm}^2, 0.94 \times 10^6 \text{ mm}^2, \\ 1.98 \times 10^6 \text{ mm}^2, 5.0 \times 10^6 \text{ mm}^2.$$

由煤气流形态表面积大小,可以得到煤气流形成的通风管道形态,通过煤气流形态的表面积大小的变化,估计气流形态的变化,从而估计煤气流的速度场和流场,以及煤气流分布的强弱和发展状况,为估计高炉内部的煤气流分布奠定了基础.

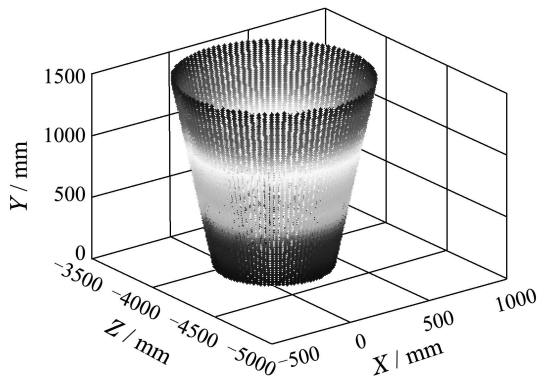
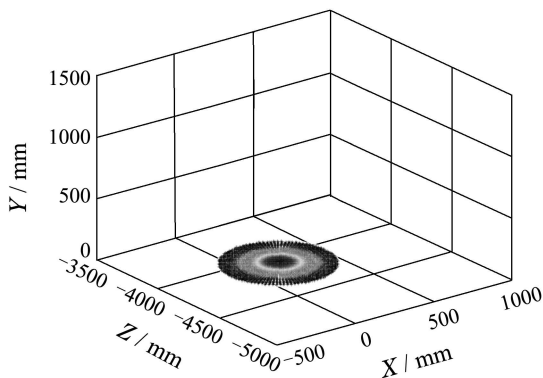
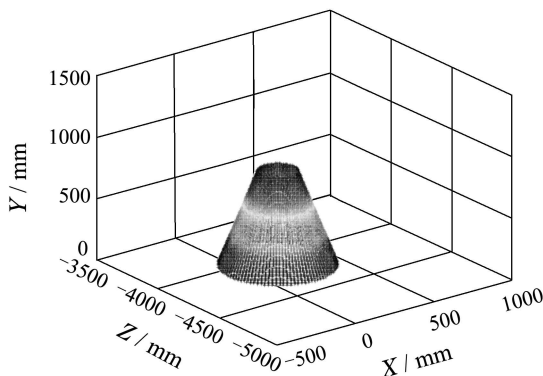


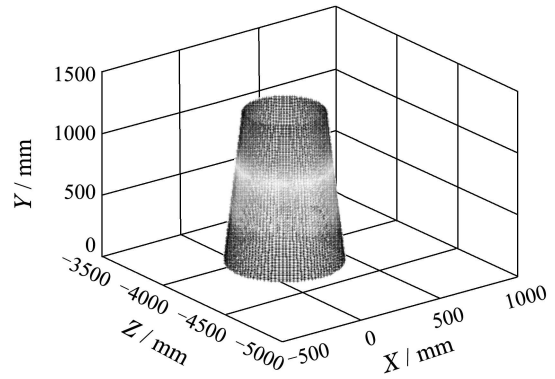
图 12 煤气流形态三维模型($y=0:1500 \text{ mm}$)
Fig. 12 3D model of the gas flow distribution ($y=0:1500 \text{ mm}$)



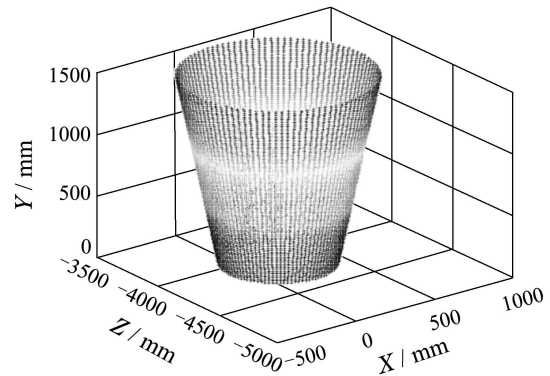
(a) 初期



(b) 前期



(c) 中期



(d) 后期

图 13 煤气流形态4个阶段的三维模型

Fig. 13 3D model of the gas flow distribution at four stages

6 结论(Conclusions)

本文针对高炉内部煤气流分布难以直接检测的“黑箱”问题,提出一种基于炉顶摄像检测的高炉炉喉煤气流形态三维模型重建方法,设计并开发高炉炉喉煤气流形态检测系统.通过已标定的摄像机检测煤气流形态,并对检测图像进行预处理.通过Canny边缘检测算法提取二值图像的边缘特征点,并采用基于方向链码的边缘跟踪算法,得到煤气流形态的图像坐标.最后根据坐标系三维变化关系以及坐标映射关系,结合煤气流形态的图像坐标以及摄像机的内部参数,计算得到高炉炉喉煤气流形态在三维空间的坐标,从而建立煤气流形态的三维模型.

与其他建模方法间接反映煤气流的分布和发展相比,该方法建立的煤气流形态三维模型,能够反映高炉炉喉空间的煤气流分布,为高炉布料操作和炉况诊断等提供实时的指导,保证高炉顺优化运行.

参考文献(References):

[1] 王维兴. 中国高炉炼铁技术发展 [J]. 钢铁, 2005, 40(10): 8-12.
(WANG Weixing. Technological progress of BF ironmaking in China [J]. *Iron and Steel*, 2005, 40(10): 8-12.)
[2] DONG X F, YU A B, YAGI J I, et al. Modelling of multiphase flow

- in a blast furnace: recent developments and future work [J]. *ISIJ International*, 2007, 47(11): 1553 – 1570.
- [3] 刘德馨, 李晓理, 丁大伟, 等. 基于雷达观测数据的高炉料面多模型控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(10): 1277–1283.
(LIU Dexin, LI Xiaoli, DING Dawei, et al. Multi-model control of blast furnace burden surface based on observed data of radars [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1277 – 1283.)
- [4] PETTERSSON F, SAXEN H, DEB K. Genetic algorithm-based multicriteria optimization of ironmaking in the blast furnace [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2009, 24(3): 343 – 349.
- [5] 吴敏, 王昌军, 安剑奇, 等. 基于料面温度场的高炉煤气流分布识别方法 [J]. 信息与控制, 2011, 40(1): 78 – 82.
(WU Min, WANG Changjun, AN Jianqi, et al. A recognition method for gas flow distribution based on temperature field of burden surface in blast furnace [J]. *Information and Control*, 2011, 40(1): 78 – 82.)
- [6] 徐万仁. 数学模型在宝钢高炉操作中的应用 [J]. 炼铁, 2005, 24(S1): 80 – 87.
(XU Wanren. Application of mathematic model in blast furnace operation of Baosteel [J]. *Iron Making*, 2005, 24(S1): 80 – 87.)
- [7] FAN Z Y, NASTSUI S, UEDA S, et al. Transient behavior of burden descending and influence of cohesive zone shape on solid flow and stress distribution in blast furnace by discrete element method [J]. *ISIJ International*, 2010, 50(7): 946 – 953.
- [8] DONG X F, PINSON D, ZHANG S J, et al. Gas-powder flow in blast furnace with different shapes of cohesive zone [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, 30(11): 1293 – 1309.
- [9] 储满生, 郭宪臻, 沈峰满, 等. 高炉数学模型的进展 [J]. 中国冶金, 2007, 17(4): 10 – 14.
(CHU Mansheng, GUO Xianzhen, SHEN Fengman, et al. Development of blast furnace mathematical model [J]. *China Metallurgy*, 2007, 17(4): 10 – 14.)
- [10] 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.
- [11] JIMENEZ J, MOCHON J, FORMOSO A. Burden distribution analysis by digital image processing in a scale model of a blast furnace shaft [J]. *ISIJ International*, 2004, 40(2): 114 – 120.
- [12] PETTERSSON F, HINNELA J, SAXEN H. Evolutionary neural network Modeling of blast furnace burden distribution [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2003, 18(3): 385 – 399.
- [13] HUNAG Y, YAN Y, RILEY G. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two colour method [J]. *Measurement*, 2000, 28(3): 175 – 183.
- [14] GRUNDLAND M, DODGSON N A. Decolorize: fast, contrast enhancing, color to grayscale conversion [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(11): 2891 – 2896.
- [15] NG P E, MA K K. A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(6): 1506 – 1516.
- [16] SAUVOLA J, PIETIKAINEN M. Adaptive document image binarization [J]. *Pattern Recognition*, 2000, 33(2): 225 – 236.
- [17] KIRANYAZ S, FERREIRA M, GABBOUJ M. Automatic object extraction over multiscale edge field for multimedia retrieval [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(12): 3759 – 3772.
- [18] 方勇纯, 刘玺, 李宝全, 等. 一种全局指数收敛的摄像机内参数观测器 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(9): 1082 – 1090.
(FANG Yongchun, LIU Xi, LI Baoquan, et al. A global exponential observer for camera calibration [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(9): 1082 – 1090.)
- [19] SCHMID C, MOHR R, BAUCKHAGE C. Evaluation of interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 37(2): 151 – 172.

作者简介:

安剑奇 (1981–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为工业过程控制、智能控制和信息融合, E-mail: anjianqi@csu.edu.cn;

刘洋 (1989–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为工业过程控制、智能控制和图像处理, E-mail: liuyang@wuhua.csu.edu.cn;

吴敏 (1963–), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进控制理论与应用、过程控制和智能系统, E-mail: min@csu.edu.cn;

曹卫华 (1972–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为过程控制、多智能体系统和机器人技术, E-mail: caowh@csu.edu.cn.