

斗轮堆取料机取料过程中的自动防塌垛技术



蔡有高, 王旭修, 魏正峰, 李崇刚, 时培领, 刘艳佩

(华能(福建)海港有限公司, 福建福州 350602)

摘要: 针对斗轮堆取料机在作业过程中由于操作不当、疲劳作业、位置判断偏差等问题, 造成取料作业时堆垛出现垮料滑坡坍塌导致取料斗轮被部分或全部掩埋, 发生严重过载甚至设备倾覆的安全事故。采用三维激光扫描料堆表面, 通过对点云数据采集进行实时处理和在线三维重建后, 再对料堆实时取料作业面的形状进行分析和识别, 计算当前取料作业面与上层作业面之间的位置关系状态, 自动判别是否存在塌垛风险, 能否继续进行全自动取料作业。结果表明, 提出的防自动塌垛技术能够很好地预防取料过程中的料堆垮料坍塌等问题。

关键词: 斗轮堆取料机; 料堆防坍塌; 点云数据处理; 三维重建

中图分类号: U 653.92

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0235-05

Automatic anti-collapse technology in reclaiming process of bucket wheel stacker reclaimer

CAI You-gao, WANG Xu-xiu, WEI Zheng-feng, LI Chong-gang, SHI Pei-ling, LIU Yan-pei

(Huaneng(Fujian) Seaport Co., Ltd., Fuzhou 350602, China)

Abstract: The improper operation, fatigue operation and position judgment deviation during the operation of bucket wheel stacker reclaimer often cause stack collapse during the reclaiming operation. The collapse will occur in the safety accident such as serious overload and even equipment overturning when the bucket wheel is partially or completely buried. We adopt 3D laser scanner to scan the surface of the stack, carry out the real-time point cloud data processing and online three-dimensional reconstruction, analyze and recognize the shape of the real-time working surface of the stack. By calculating the position relationship between the current reclaiming surface and the upper working surface, the technology can automatically judge whether there is a risk of collapse and whether the full-automatic reclaiming operation can be continued. The results show that the proposed anti-collapse technology can well prevent the stack collapse in the reclaiming process.

Keywords: bucket wheel stacker reclaimer; stack collapse prevention; point cloud data processing; three-dimensional reconstruction

散货港口、火力发电厂和钢铁厂等大型企业作为大宗散状物料的重要中转和终端用户, 通常采用专用的堆场区域储存煤炭、矿石等散状物料(简称散料)。堆料作业时散料通过皮带机输送至堆取料机, 通过堆取料机将散料卸载并堆存在堆场中。待需要时通过旋转斗轮将散料从料场料堆中取出, 通过皮带机输送至下一生产环节。

长期以来国内散货料场主要是依靠斗轮堆取

料机进行装卸存储, 其操作方式主要以人工操作为主, 长时间高强度作业容易因疲劳操作、夜间低照度作业等因素而造成安全生产事故^[1]。其中因取料作业面料堆滑坡坍塌导致部分掩埋或全部掩埋斗轮机构所造成的严重过载和设备倾覆事故, 是较为典型的生产安全事故, 在人工操作的堆取料机上常常发生。

近几年国内外散货港口堆取料机智能化技术

收稿日期: 2021-12-07

作者简介: 蔡有高(1982—), 男, 工程师, 从事火电厂燃料输送系统及港口重型起重设备自动控制技术研究。

研究正随着智慧港口建设理念飞速发展^[2]，但针对取料作业过程中的塌垛预测问题通常采用一维测距传感器进行离散的点状距离检测实现防垮塌的基本防护，无法对料堆的形状进行综合立体的检测与分析，通常控制逻辑较为简单，防护阈值设置粗略，易产生误报导致正常作业受到影响和限制。

本文以实际工程为依托，在基于三维激光扫描感知技术的散货料场堆取料机自动控制系统研发与应用过程中，针对取料作业过程物料垮塌的形成原因和机理进行分析，提出一种基于三维激光扫描机器视觉的料堆作业断面形状感知方法，在此基础上构建料堆滑坡垮塌预测和保护算法，实现了取料作业过程自动防塌垛保护，并进行相关的工程应用与验证。

1 基本理论与实现

散料在堆放时能够保持自然稳定状态的最大角度(单边对地面的角度)，称为自然安息角。在卸载堆料过程中，散料将会按照安息角自动进行滑落堆积，不断增高。不同种类的散料安息角各不相同。而在取料过程中，如高度过高、相邻层作业断面过近导致取料作业断面料堆的安息角大于自然安息角时，堆垛将极易发生滑坡塌垛，导致斗轮被部分或全部掩埋引发严重过载、闷斗等作业安全问题，严重时将导致设备倾覆；同时高落差、大幅度滑坡也会对料堆周边的流动机械、车辆和人员造成安全风险。

本文采用机器视觉的检测方法对作业断面进行三维实时建模与更新，并在实时三维模型基础上分析作业面的形态结合相应的防塌垛策略实现自动防塌垛保护。其主要原理为：通过斗轮堆取料机上安装的三维激光扫描仪采集料堆表面点云数据，并与堆取料机定位系统数据进行匹配，经过数据滤波和填充、坐标变换等预处理，获取料堆表面规整的三维坐标网格数据并完成三维重建，在作业过程中根据实时扫描数据更新三维模型，提取当前料堆作业面的几何形状特征，分析当前

作业面是否存在塌垛风险，最终实现防塌垛保护控制，算法流程如图 1 所示。

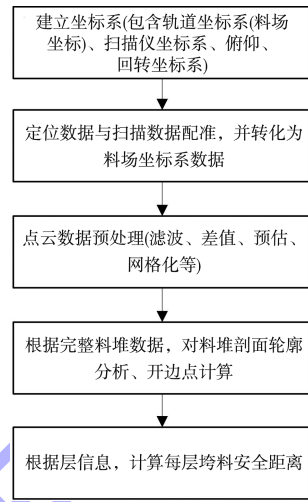
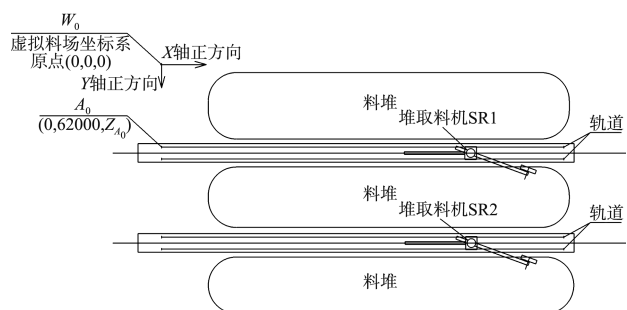


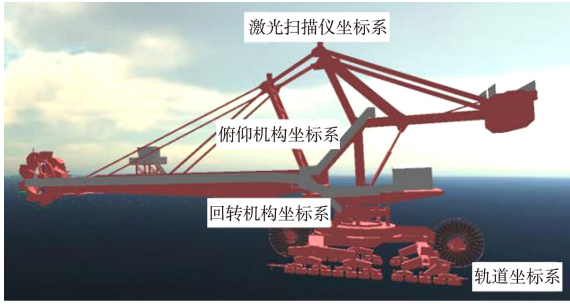
图 1 算法流程

2 料场坐标系建立

坐标系建立的目的是为了求解各个坐标系之间的变换关系，使设备在运动过程中各激光扫描仪获取的点云数据能还原到同一静止坐标系下即料场坐标系，子坐标系包括激光扫描仪坐标系、俯仰机构坐标系、回转机构坐标系和轨道坐标(料场坐标系)^[3]。料场坐标系的建立先使用全球定位系统(GPS)测绘装置在参照点 A_0 处采集标准 WGS84 坐标系下的大地坐标，包括经度、纬度以及大地高度等，将 A_0 点平移一定距离后选取合适的虚拟料场坐标原点 W_0 ，获取 A_0 点在虚拟料场坐标下的坐标值，构架虚拟料场坐标系。故需要将大地坐标转化为同椭球系下的空间直角坐标后，再利用空间直角坐标系变换，转换为料场局部坐标系，坐标系位置建立如图 2 所示。



a) 全料场坐标系结构



b) 堆取料机坐标系结构

图 2 坐标系位置建立

通过式(1)~(3), 可以求出 GPS 标准 WGS84 经纬度坐标系到空间直角坐标系 X 、 Y 、 Z 的变换:

$$X = (N+H) \cos B \cos L \quad (1)$$

$$Y = (N+H) \cos B \sin L \quad (2)$$

$$Z = [N(1-e^2) + H] \cos B \sin L \quad (3)$$

式中: L 为 WGS84 大地坐标系中的经度(东经为正, 西经为负); B 为大地坐标系中的纬度(北纬为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\sin y_{\text{mean_BLh}} & -\cos y_{\text{mean_BLh}} \sin x_{\text{mean_BLh}} & \cos y_{\text{mean_BLh}} \cos x_{\text{mean_BLh}} & x_{\text{mean_xyz}} \\ \cos y_{\text{mean_BLh}} & -\sin y_{\text{mean_BLh}} \sin x_{\text{mean_BLh}} & \sin y_{\text{mean_BLh}} \cos x_{\text{mean_BLh}} & y_{\text{mean_xyz}} \\ 0 & \cos x_{\text{mean_BLh}} & \sin x_{\text{mean_BLh}} & z_{\text{mean_xyz}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{M} 为变换矩阵; $x_{\text{mean_BLh}}$ 、 $y_{\text{mean_BLh}}$ 为堆取料机的俯仰水平, 为回转归零状态下臂架全球导航卫星系统(GNSS)天线在同一位置多次测量的经度、纬度平均值。

调整堆取料机的俯仰水平, 回转归零, 从轨道起点处开始, 控制大机走行, 并每隔一定距离记录下臂架 GNSS 天线的空间直角坐标值, 求走行方向向量为: $\mathbf{X} = \text{norm}(\mathbf{X}_{\text{end}} - \mathbf{X}_{\text{start}})$, 其中 $\mathbf{X} = (X_x, X_y, X_z)$, 求向量 \mathbf{X} 绕 Z 轴旋转的角度 $\beta = \arctan(X_y/X_x)$, 已知绕 Z 轴旋转的角度其变换矩阵为:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

最后通过式(8)将空间直角坐标系的 x 、 y 、 z 值转化为料场坐标系下的 X 、 Y 、 Z 值。

正, 南纬为负); H 为大地坐标系中的大地高; N 为卯酉圈的半径, 计算公式为:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} \quad (4)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (5)$$

式中: e 为参考椭球的第一偏心率; a 为参考地球椭球的长半轴; b 为短半轴。

关于料场局部坐标系的建立, 规定料场坐标系沿设备走行方向为 X 轴、与轨道平面垂直方向为 Z 轴, 垂直于 X 轴为 Y 轴, 规定当前设备轨道端点坐标在料场坐标系下的值为 $(0, 620, 0)$, 并获取当前点在全球坐标系下的值, 转换为 WGS84 坐标系下的值, 多次获取该值后取平均为 $(x_{\text{mean_xyz}}, y_{\text{mean_xyz}}, z_{\text{mean_xyz}})$, 将采集数据通过式(6)转为东北天坐标系^[4]:

$$[X \ Y \ Z \ 1] = [x \ y \ z \ 1] (\mathbf{M}^T)^{-1} \mathbf{M}_1 + [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 0] \quad (8)$$

式中: x_0 、 y_0 、 z_0 为当前设备轨道端点坐标。

3 点云数据预处理

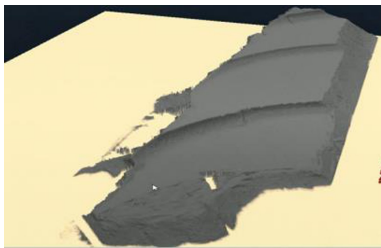
通过三维激光扫描仪对料堆表面点云数据采集过程中, 容易因雨、雪、雾、粉尘以及机械设备本体遮挡产生干扰数据和无效数据, 在本系统中采用弦高法和多重回波技术相结合的方法对扫描数据进行处理^[5-6], 由于受激光扫描仪的安装位置以及扫描范围的影响, 扫描的料堆数据会存在小范围的漏洞区域, 同时也会存在料堆背面因激光扫描仪视线遮挡产生的大面积盲区, 为了能够实现料堆的完整三维重建, 系统针对小范围扫描盲区漏洞采用加权平均算法进行点云数据填充^[7], 针对大范围料堆背面遮挡盲区, 安息角预估算法对料堆背面数据进行填充, 点云预处理前后的对比如图 3 所示。



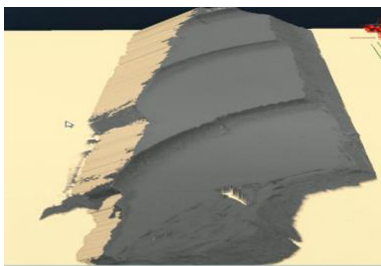
a) 噪声滤除前



b) 降噪处理后



c) 点云盲区预估前



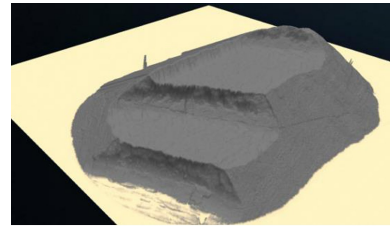
d) 点云盲区预估后

图 3 点云预处理前后对比

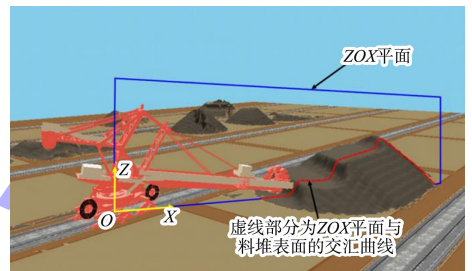
4 料堆取料面形态特征提取

取料过程中需要实时对当前作业料堆的取料面的轮廓进行提取，所以应根据料堆三维模型进行分析，堆取料机作业过程中的某一个作业料堆通过激光扫描进行三维重构后的实时地形见图 4。以堆取料机回转轴为 Z 轴，以堆取料机臂架中心线在水平面上的投影为 X 轴，其中 Z 轴正方向垂直朝上，X 轴正方向为指向斗轮的方向，设料场地平面处 $Z=0$ 。此时建立了一个垂直于地面的 ZOX 平面，那么任意时刻该平面将会与作业对象料堆三维表面形成交汇曲线，见图 4b) 中虚线部

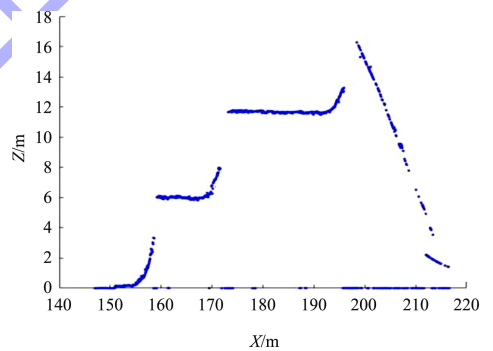
分，通过将图中的虚线部分提取出来后得到图 4c) 中的轮廓曲线，此轮廓曲线将用来进行料堆垮塌风险评估计算。



a) 三维重建后的料堆取料作业面模型



b) 平面 ZOX 与料堆三维模型之间的交汇关系



c) 料堆取料作业面轮廓提取

图 4 料堆取料面形态特征提取过程

5 料堆垮塌风险判断

在取料作业过程中，必须实时分析作业面是否存在塌垛风险，从而避免闷斗等生产事故的发生。本文在前述三维激光扫描仪实时建模的基础上，进一步提出一种基于三维模型在线测量的塌垛预测算法。将图 4c) 中提取出的料堆表面离散点数据进行平滑处理，得到当前作业位置下的料堆表面结构曲线如图 5 所示。设当前料层的斗轮取料切入点(即斗轮旋转轴正下方)在沿臂架方向的坐标为 X_1 ，且层高为 H_1 ； D_w 为斗轮直径，依托工程的斗轮直径为 9.8 m；而上一层的斗轮取料切入点坐标为 X_2 ，层高为 H_2 ，要求最大取料层高小于

0.7 倍斗轮直径。则令取料面与相邻的支撑面之间水平距离 $L=X_2-X_1$ 。

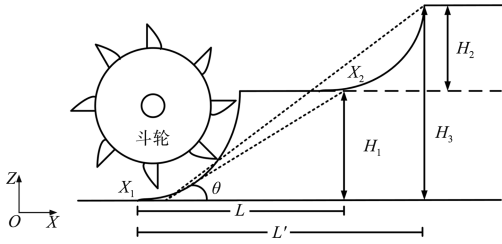


图 5 预测塌料计算

假设当前取料方向为走行正方向，则若要没有垮料风险，应有 θ 小于当前料种的自然安息角 α ，当上一层物料层高小于 0.7 倍斗轮直径时，根据多次测试及操作人员经验可以认定上层为稳定结构，可以忽略上层高度 H_2 及其向下的作用，即可推导出：

$$\frac{H_1}{X_2-X_1} = \tan\theta < \tan\alpha \quad (9)$$

则有：

$$L > \frac{H_1}{\tan\alpha} \quad (10)$$

$$D_3 = \frac{H_1}{\tan\alpha} \quad (11)$$

式中： D_3 为面与相邻的支撑面之间允许的最小水平距离。

当上一层物料层高大于等于 0.7 倍斗轮直径时，考虑上层高度 H_2 及其向下的作用，即 $H_3=H_1+H_2$ ，可推导出：

$$\frac{H_3}{X_2-X_1} = \tan\theta < \tan\alpha \quad (12)$$

则有：

$$L' > \frac{H_3}{\tan\alpha} \quad (13)$$

$$D_3 = \frac{H_3}{\tan\alpha} \quad (14)$$

根据物料的安息角 α 和当前取料层高 H (当上一层物料层高 H_2 小于 0.7 倍斗轮直径时, $H=H_1$, 当上一层物料层高大于等于 0.7 倍斗轮直径时 $H=H_3$) 设置 3 个距离阈值，分别表示不同的安全距离等级，其中 $d_1 > \frac{H+0.2D_w}{\tan\alpha}$ 、 $\frac{H}{\tan\alpha} < d_2 \leq \frac{H+0.2D_w}{\tan\alpha}$ 和

$$d_3 \leq \frac{H}{\tan\alpha}$$

且 $d_1 > d_2 > d_3$ ， d_1 为绝对安全距离，

d_2 为最佳取料作业距离， d_3 为垮料高风险区域范围距离，其含义如下：当 $L > d_1$ 时，当前取料面处于安全位置，不存在上层塌垛风险；当 $d_2 < L \leq d_1$ 且 L 接近 d_2 时，当前取料面位置已在最佳取料位置附近；当 $d_3 < L \leq d_2$ 时，表明当前取料面位置已接近塌方危险区域，控制系统将给出提示，可以由操作人员选择是否换层取料；当 $L \leq d_3$ 时，表明当前取料面位置已处于塌方区域，控制系统迅速给出提示，并自动换层。

6 现场测试

以华能集团福州罗源湾料场无人化控制系统为依托，针对堆取料机的作业特点，基于三维激光扫描技术构建一套作业断面几何形状特征实时提取的方法，通过对作业断面几何特征的实时分析，结合导致料堆塌垛的触发条件，实现一套防塌垛分级预测策略，现场对物料的防塌垛距离进行多次测试。根据现场安全生产规程无论采用人工模式或者自动模式取料，为避免预留过长的安全距离影响料场堆取料机作业，每层取料高度均不得大于 0.7 倍斗轮直径，因此主要围绕 H_2 小于 6.86 m (0.7 倍斗轮直径) 的工况进行测试，针对料场主要的煤炭品种分别做测试后，获取测试结果数据见表 1。

表 1 物料防塌垛距离测试结果

物料名称	H_1/m	d_1/m	d_2/m	d_3/m	$\alpha/(^\circ)$
屯兰焦煤	6.8	>12.0	9.1~11.7	<9.0	37
	5.8	>10.5	7.8~10.3	<7.7	37
唐口气煤	5.0	>10.1	7.2~9.9	<7.1	35
	6.2	>11.7	9.0~11.6	<8.8	35
神华烟煤	4.5	>8.5	5.8~8.3	<5.7	38
	3.5	>7.2	4.6~7.0	<4.5	38

7 结语

1) 通过应用三维激光扫描机器视觉感知技术，构建一套防塌垛分级预测决策机制，有效解决了斗轮堆取料机取料过程中料堆塌垛问题。