



# 堆取料机取料过程中防坍塌预警及 路径规划研究\*

王宝华<sup>1</sup>, 王博强<sup>1</sup>, 赵纯权<sup>2</sup>, 万书亭<sup>2</sup>

(1. 国能常州发电有限责任公司, 江苏 常州 213000;

2. 华北电力大学, 河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 在运煤轮船船舱进行取料作业时, 由于路径规划可能引发煤堆坍塌的危险, 提出一种基于分层点云边缘信息提取的防止煤堆坍塌的模拟堆取料机取料路径规划方法。首先利用搭载二维激光扫描试验装置采集原始三维点云数据, 通过坐标转换, 采用直通滤波算法去噪滤波, 随机采样法简化算法精简点云数据, 基于切片法计算煤堆体积和质量, 实现对来煤精准盘点; 然后提取每层煤料堆表面的边缘信息, 将不同层次的煤料堆边缘信息组合起来, 构建出整个煤料堆表面的边缘模型, 实时计算待取料煤堆边缘安息角, 实现煤堆坍塌预警信息; 最后基于直线插补方法进行取料路径规划, 给出防止煤堆坍塌的模拟堆取料机执行机构作业路径。

**关键词:** 堆取料机; 煤堆坍塌; 激光扫描仪; 边缘信息提取; 直线插补方法

中图分类号: U653.92

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0056-09

## Coal pile collapse warning and material retrieval path planning of stacker-reclaimer

WANG Baohua<sup>1</sup>, WANG Boqiang<sup>1</sup>, ZHAO Chunquan<sup>2</sup>, WAN Shuting<sup>2</sup>

(1. Guoneng Changzhou Power Generation Co., Ltd., Changzhou 213000, China;

2. Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance & Failure Prevention,  
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Based on the risk of coal pile collapse caused by path planning during stacking and reclaiming operations in the cabin of coal transport ships, this paper proposes a simulated clearing machine reclaiming path planning method based on edge information extraction from layered point clouds to prevent coal pile collapse. Firstly, the original 3D point cloud data is collected using a two-dimensional laser scanning experimental device. The point cloud data is simplified through coordinate conversion, denoising filtering using direct filtering algorithm, and random sampling simplification algorithm. Based on the slicing method, the calculated coal pile volume and mass are obtained, and the incoming coal is accurately counted. Then, the edge information of each layer of coal pile surface is extracted. The edge information of different layers of coal pile is combined to build the edge model of the entire coal pile surface, and the edge rest angle of the coal pile to be taken is calculated in real-time computing to realize the early warning information of coal pile collapse. Finally, based on the linear interpolation method, the material retrieval path planning is carried out, and a simulated cleaning machine execution mechanism operation path to prevent coal pile collapse is provided.

**Keywords:** stacker-reclaimer; coal pile collapse; optical scanner; edge information extraction; linear interpolation method

收稿日期: 2023-07-26

\*基金项目: 国家自然科学基金项目 (52275109); 河北省自然科学基金项目 (E2022502007)

作者简介: 王宝华 (1969—), 男, 高级工程师, 从事火电厂生产运营和火电厂基建技术研究。

智慧码头是建设智慧电厂的重要组成部分,目前船舱内的工程机械均使用柴油发动机,柴油机废气的排放加剧半封闭船舱环境恶化已不适于人工作业,降低人工成本、最大限度地改善工作环境、稳定生产率、提高信息化程度等成为散货港口面临的问题<sup>[1]</sup>。采用激光扫描仪进行实时盘点船舱内煤堆信息是实现堆取料机自动化控制的基础。目前煤堆测量方法主要分为人工测量、无人机测量以及激光雷达测量等<sup>[2-3]</sup>。传统的人工盘煤已无法满足当前生产生活日益增长的需求,虽然无人机测量在解决工作强度大和工作环境恶劣等方面取得了进展,但是操作难度较高,并且由于煤场内部存在高浓度的粉尘等问题,难以实现对煤场内部存煤情况的准确盘点<sup>[4-5]</sup>。激光雷达盘煤系统虽然存在设备昂贵繁杂、操作复杂等问题,但具有较强的精确度及实时性,比较适用于运煤船舱来煤的盘点<sup>[6-8]</sup>。为了防止煤堆坍塌事故,相关文献也提供了解决方案,郑昌林等<sup>[9]</sup>分析散堆坍塌的原因,提出防坍塌的解决方案,但未实现实时防坍塌预警以及定量计算安息角;蔡有高等<sup>[10]</sup>虽就安息角提出料堆防坍塌安全距离计算,但实时性不高,且未考虑各个方向上边缘坍塌情况,未进行取料路径规划;王旭修等<sup>[11]</sup>提出基于视觉图像处理的作业路径规划算法,但未提及煤堆防坍塌技术,且对原始点云数据进行系列处理可能造成点云坐标信息失真,导致无法正确指导堆取料机作业。由于很多发电厂的来煤运输方式采用轮船海运,通过卸船机进行接卸,船舱作业的安全问题不容小觑,特别是堆取料机在取料作业时可能会发生煤堆坍塌事故,以致于威胁人员和船舱作业机械设备安全,造成较大的经济损失。所以船舱内的煤堆防坍塌技术的研究颇为重要。

本文以国能常州发电有限公司输煤码头现有堆取料机为基础,搭建模拟运煤轮船船舱堆取料作业试验台。经过对来煤进行盘煤之后,利用点云边缘信息提取技术、激光扫描技术、多重定位技术等方法,建立数字化船舱煤堆信息,对计算的体积和质量进行综合评估,通过对分层点云提

取边缘信息后指导堆取料机的取料路径规划,实时扫描定量计算安息角进行防煤堆坍塌预警。在保证安全不发生煤堆坍塌事故的前提下实现堆取料机智能化模式的转变。

## 1 基于激光扫描的煤堆三维点云处理

### 1.1 原始点云获取及坐标转换

原始点云数据获取主要依靠河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室智慧化煤炭输送和存储中心搭建的模拟船舱煤堆的堆取料平台系统,采集系统硬件为 SICK 激光扫描仪,见图 1。激光扫描仪的基本工作原理(图 2)基于脉冲飞行时间(TOF)原理。

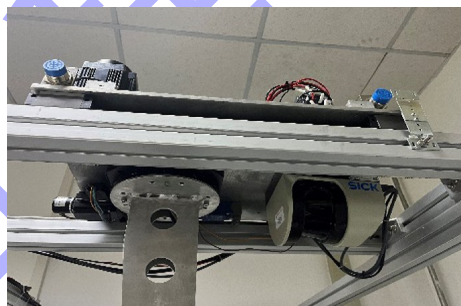


图 1 激光扫描仪实物

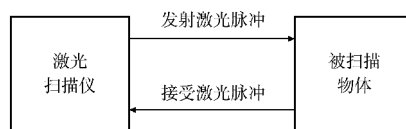


图 2 激光扫描仪测距原理

利用试验平台移动扫描获得极坐标系下的点云数据,通过式(1)将激光扫描仪采集的极坐标系下三维点云数据转换到直角坐标系下。

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha \\ y = r \sin \alpha \\ z = vt \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $r$  为激光扫描仪中心点到目标点的距离,  $\alpha$  为扫描角度,  $v$  为前进速度,  $t$  为行进时间。

通过控制电机匀速前进和激光扫描仪的扫描频率,获得不同密度的三维点云。在该系统下采集的模拟船舱煤堆见图 3。试验选择粒径为 2~5 mm 的国内烟煤煤粉模拟船舱煤堆,在光泽度、粒径均匀程度上较好地模拟了真实煤堆。

图 4 是利用 python 对初始点云数据进行坐标转换后使用 CloudCompare 软件的三维显示, 可见初始点云存在很多无关数据点。



图 3 模拟船舱煤堆实例

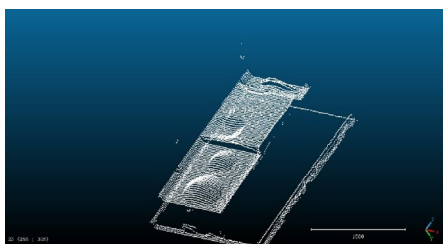


图 4 初始点云三维显示

## 1.2 点云的去噪滤波和精简

由图 4 可以看出该原始点云坐标转换后的三维模型包含了地面信息点, 由于已知模拟船舱煤堆地面与激光扫描仪的距离为一定数值, 所以选择直通滤波器过滤地面点云。

通过删除不在阈值内的点云, 完成直通滤波点云的过程, 地面点云滤波公式为:

$$\begin{cases} \text{groundpoints} & (d \geq h) \\ \text{nongroundpoints} & (d < h) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $h$  为距离阈值, groundpoints 为地面点云, nongroundpoints 为非地面点云,  $d$  为点云坐标转换后的竖直方向坐标。

当筛选掉多余的地面信息点后, 船舱煤堆的三维数据形态已经大致完成, 但由于两侧挡板数据点也被扫描在内, 需通过滤波滤除可得到图 5 所示的三维模型图像。

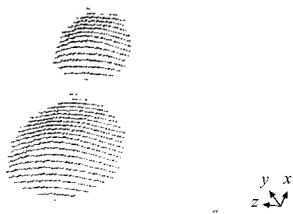


图 5 去除多余信息点的三维点云图

为了提高点云数据处理的效率, 在不破坏点云的几何结构与细节特征的前提下, 对庞大的点云数据进行一定程度的精简。试验平台基于西门子 SMART 200 PLC 进行三轴直线插补运动的路径规划中可配置的路径最多为 128 条, 对应分层点云中的点云个数, 对点云进行简化, 在保证点云边缘信息准确不失真的前提下, 可有效减少点云数量便于提高堆取料效率。

采用随机采样算法对初始点云进行简化<sup>[12]</sup>, 剩余数据按每 2 个点取 1 个点的间隔, 将  $x$  与  $y$  坐标进行插值拟合, 再与  $z$  坐标匹配构建  $X-Y-Z$  矩阵, 绘制出精简数据后的煤堆点云图见图 6。

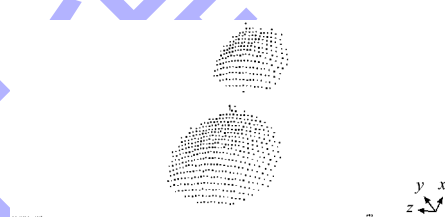


图 6 精简数据后的煤堆点云图

## 1.3 点云的分层切片

“逆向建模法”体积解算准确可靠, 但构建点云三角网格算法比较复杂, 且仍需拓扑检查和孔洞填充等处理, 计算过程耗费资源和时间<sup>[13]</sup>。通过对比切片法可有效降低空间复杂度、提高计算效率、真实反映煤堆形貌, 且对下一步指导取料作业起到至关重要的作用。煤堆点云信息对堆取料机的路径规划具有指导性的作用。首先应对煤堆模型进行高度方向上分层切片, 分层厚度与堆取料的掘进深度相关, 计算堆取料的掘进深度如式(3)所示:

$$h = Pk/sgD \quad (3)$$

式中:  $h$  为每次掘进深度, m;  $P$  为堆取料机额定输出功率, kW;  $k$  为煤的松弛系数;  $s$  为煤的抗压强度, Pa;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $D$  为堆取料机滚筒直径, m。

基于上述分层厚度, 可以得到对于扫描数据的分层数  $n_p$  为:

$$n_p = \left\lceil \frac{y_{\max} - y_{\min}}{h} \right\rceil \quad (4)$$

式中:  $y_{\max}$  和  $y_{\min}$  为点云在  $Y$  方向上的最大值和最小值;  $h$  为点云分层切片的厚度;  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整。 $n_p+1$  为点云分层切片数量。

每层切片的位置为:

$$y_l = \begin{cases} y_{\min} & (l=0) \\ y_{\min} + lh & (1 \leq l \leq n_p) \\ y_{\max} & (l=n_p) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $l (l \in N)$  为切片序号;  $y_l$  为切片平面的位置。

第  $i$  层切片的轮廓点分布方式为:

$$\begin{cases} P_i = \{P_i^0, P_i^1, \dots, P_i^j\} & (j \geq 0) \\ P_i^j = \{P_0, P_1, \dots, P_a, \dots, P_m = P_0\} & (6) \\ P_a = \{x_a, y_a, z_a\} \in R^3 \end{cases}$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  层中所有轮廓的集合;  $P_i^j$  为第  $i$  层切片上第  $j$  个轮廓中点的集合, 共有  $m$  个点;  $P_a$  为轮廓中的 1 个顶点,  $\{x_a, y_a, z_a\}$  为该顶点坐标。

## 2 基于激光扫描三维点云的煤堆体积计算

煤堆体积计算是船舱内煤量盘点中最重要的步骤, 通常船舱内来煤盘点计算的第 1 步是测定煤的堆密度, 然后结合激光扫描的结果测定煤场中煤堆的体积。两者乘积即为实际存煤量<sup>[14]</sup>。煤堆密度的主要因素有煤堆水分、中值粒径、粒度分布参数、热值等<sup>[15-16]</sup>。目前, 激光扫描仪只能测量煤堆的体积, 国能常州发电有限公司全年耗煤量约为 350 万 t, 目前主要来煤煤种为国内烟煤、褐煤及印尼煤, 通过试验方法测验其煤堆密度并记录在册以便于后续使用。

### 2.1 体积计算算法——切片法

与点云有关的物理模型体积算法有很多种<sup>[17-18]</sup>, 其中切片法是将点云沿坐标轴的 1 个方向分割切片, 累加各个切片的体积来计算目标体积, 但切片厚度影响计算速度和精度, 所以需要合理分析切片的厚度。

本文采用切片法计算料堆体积, 首先根据分层切片法进行切片, 然后进行如下处理, 以获得煤堆体积。由式(6)可知第  $i$  层切片的截面面积

$S_i$  为:

$$S_i = \sum_{l=0}^j S_l^j \quad (7)$$

式中:  $S_l^j$  为轮廓  $P_l^j$  围成的面积,  $S_i$  为第  $i$  层的截面积。  $S_l^j$  的计算公式为:

$$S_l^j = \frac{1}{2} \sum_{a=0}^m (x_a y_{a+1} - x_{a+1} y_a) = \frac{1}{2} \sum_{a=0}^m \begin{vmatrix} x_a & y_a \\ x_{a+1} & y_{a+1} \end{vmatrix} \quad (8)$$

式中:  $|\cdot|$  为行列式运算。

最终的煤堆点云的体积  $V$  为:

$$V = \sum_{i=0}^{n-1} V_i = \sum_{i=0}^{n-1} S_i h \quad (9)$$

式中:  $V_i$  是第  $i$  切块的体积。

### 2.2 试验测试

为了证实堆密度的计算和体积计算最后得出煤堆质量的准确性, 采用 5 L 的量杯量取 300 L 即 0.3 m<sup>3</sup> 的散装模拟煤堆, 根据表 1 的测量结果得出煤堆的计算体积均值为 0.298 9 m<sup>3</sup>, 经过多次试验可以得到其测量体积与真值较接近

表 1 煤堆测量结果

测量次数	测量结果	相对误差/%
1	0.301 6	0.53
2	0.298 8	0.40
3	0.299 6	0.13
4	0.297 7	0.77
5	0.298 5	0.50
6	0.298 9	0.37
7	0.297 4	0.87
8	0.298 2	0.60

通过对模拟煤堆国内烟煤煤粉相关参数查询和测量得出模拟煤堆水分参数为 6%~8%、中值粒径参数  $D_{50}$  为 3 mm、粒度分布的参数  $n$  为 0.7, 根据 Rosin-Rammler 分布函数获得上述参数与堆密度之间的关系, 以评估堆密度取值范围为 1.2~1.5 t/m<sup>3</sup>。热值为 27.17~37.20 MJ/kg, 采用最小二乘法建立热值对堆密度回归直线确定线性关系计算, 得到较为精准的堆密度为 1.31 t/m<sup>3</sup>。煤堆的总质量通过测量体积和计算堆密度进行乘积计算, 得出模拟煤堆的计算质量为 0.391 6 t。通过使用台秤对所有模拟煤堆进行称量, 得出煤堆的

总质量为 0.411 0 t。可知煤堆计算质量和真实质量误差较小,保证了测量结果的准确性。

### 2.3 体积、质量评估机制

体积结合堆密度计算得出质量,不仅起到了对来煤实际总量进行盘点,便于指导后续计划生产的作用,还为后续船舱取料防煤堆坍塌自动化控制提供了依据,可以有效地确定将要进行堆取料作业的煤堆。对于采集经过一系列处理的点云数据、煤堆体积以及质量采取以下评估机制。

$$\begin{cases} \text{Stackingtarget} = (V+M)_{\max} \\ \text{Take-uptarget} = (V+M)_{\min} \\ Y_1 = Y_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $V$  为煤堆体积,  $M$  为煤堆质量,  $Y_1$  为目标最高  $Y$  值坐标。通过煤堆体积和质量的综合评估,致力于寻找目标煤堆的最高点来指导船舱作业取料的自动化控制以及堆取料路径规划的起点。

## 3 船舱堆取料机取料路径规划及防坍塌评估

以往的船舱堆取料机都是采用人工操作或者半自动操作,劳动强度较大且不宜协同操作、易发生碰撞事故等<sup>[19]</sup>。如果未对船舱堆取料机的路径进行合理规划,极易造成煤堆垛的坍塌,不仅浪费煤场的空间,也极易造成一些工程机械被掩埋,人员生命安全受到威胁的情况,带来较大的经济损失和安全隐患。

### 3.1 待取料作业煤堆边缘信息提取

根据上文中的体积与质量评估机制,得到待取料煤堆点云图见图 7,本文主要分析取料作业,因此得到体积和质量较大的目标煤堆。

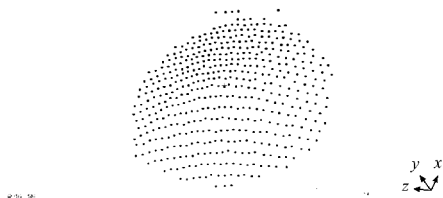


图 7 取料作业目标煤堆

对于原始点云在高度方向( $y$  方向)上进行分层切片。首先获取待取料作业煤堆点云文件中  $y$  方向

上的最大值和最小值,按照船舱堆取料机的掘进深度确定分层切片厚度,获得各切片厚度内的点云文件,并将所有分层切片边缘信息组合起来构建出整个煤料堆表面的边缘模型;然后通过计算每个点的法线方向,构建一个 KDTree,用于快速查找每个点周围的最近邻点。遍历所有点,用 KDTree 查找每个点的最近邻点的索引和距离,计算每个最近邻点与该点的法向量之间的差距,并选择最大值作为法向量差异的度量。如果最大差异超过阈值,则表示该点可能属于边缘,且该点与其最近邻点应是一条边缘。于是将该点与每个最近邻点的索引作为一对添加到边缘点的索引集合中。并通过在两点之间插入一条曲线来断开边缘,然后继续检查下一个点。基于上述法线估计算法可以得到图 8 的部分示例。图 9 可以直观观察到分层切片边缘提取相对于待取煤作业的相对位置和精度。

基于由 PLC 控制的船舱堆取料机和 PLC 的工作原理,需要具有三维坐标的点云文件,如图 10 提取到第 9、10 层边缘信息点云文件。

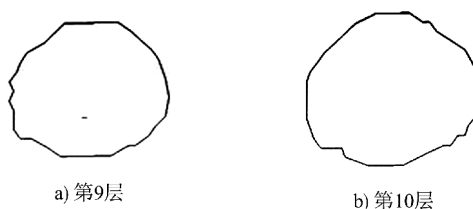


图 8 边缘信息

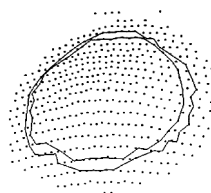


图 9 第 9 层和第 10 层相对目标煤堆位置

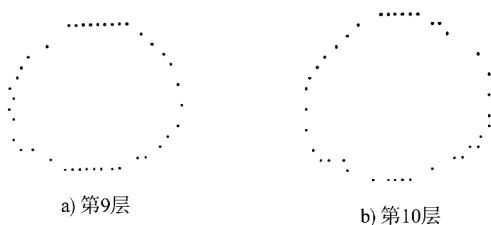


图 10 边缘信息点云

### 3.2 防止煤堆坍塌的评估指标

影响煤堆稳定性有诸多因素,外部的因素起到诱导作用,最重要的因素是在堆取料的作业过程中使煤堆形成陡坡,这与安息角密切相关,因此安息角对煤堆斜坡的稳定性起到了控制作用<sup>[20]</sup>。安息角是指堆积物体的最大坡度,即在不破坏堆积物体结构的情况下能够形成的最大坡度。如图 11 所示  $\alpha$  为散堆的安息角。船舱煤场实物见图 12。

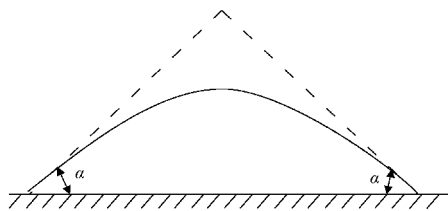


图 11 安息角示意



图 12 船舱煤场实物

在煤堆的堆取料过程中,如果堆积角度大于安息角,将引起煤堆结构的失稳,导致坍塌。安息角的影响因素主要有散体粒级、颗粒外形等<sup>[21-22]</sup>,见表 2。

表 2 部分松散物料的安息角

物料名称	安息角/(°)	
	运动	静止
无烟煤(干、小)	27~30	27~45
烟煤	30	35~45
褐煤	35	35~50
泥煤	40	45
泥煤(湿)	40	45
焦炭	35	50
木炭	-	-
无烟粉煤	-	37~45

由表 2 可知,安息角包括运动安息角和静止安息角,对应堆料和取料时煤堆安息角。因此在船舱堆取料机作业过程中考虑安息角因素可以有效降低煤堆坍塌的风险。

本文对煤堆安息角的评估计算方法(以第 9、10 层煤堆边缘信息为例)为:首先将第 10 层边缘信息点云投影到分层切片底层,计算所有投影后点云的中心点;然后用第 10 层点云中的点依次遍历第 9 层点云中的点,计算两点之间的距离并取距离最小的两个点,求第 9 层两个点的中位点;最后利用第 10 层中心点、第 10 层边缘点、第 9 层点云中的点与第 10 层边缘点距离最小两个点的中位点求得煤堆各方向的安息角  $\alpha$ ,单个安息角计算见图 13。

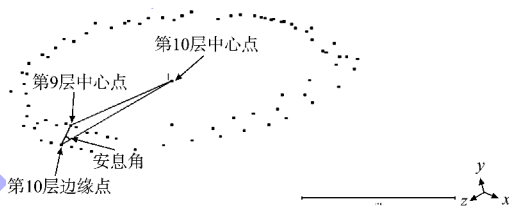


图 13 安息角计算

通过查询和测量试验用煤堆的最大安息角,设定安息角阈值  $\alpha_{TTZ}$ 。对于经过上述处理得到的各个方向的安息角采取以下评估指标:

$$\begin{cases} \alpha_{\max} < \alpha_{TTZ} & (\text{安全}) \\ \alpha_{\max} \geq \alpha_{TTZ} & (\text{坍塌危险}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\alpha_{\max}$  为各个方向求得安息角的最大值,  $\alpha_{TTZ}$  为安息角的阈值。

由于本文模拟煤堆为粒径为 2~5 mm 的国内烟煤煤粉,取料作业时评估的静止安息角为 35°~45°,取安息角安全阈值为 30°,对上述煤堆安息角的评估计算方法进行验证(以第 9、10 层煤堆边缘信息为例),可以得到第 9 层各方向较大安息角见表 3。

表 3 第 9 层煤堆各方向安息角部分计算结果

方向序号	安息角/(°)	
	计算结果	安全阈值
5	15.7	30
10	20.3	30
15	19.5	30
17	19.7	30
20	19.6	30
23	21.8	30
30	22.4	30
38	16.9	30
40	21.5	30

由表 3 可见第 9 层煤堆各方向最大安息角为  $22.4^\circ$ ，在安全阈值内，可以继续进行下一层取料作业。

### 3.3 船舱堆取料机作业过程中执行机构分析

立足于智慧化煤炭输送和存储中心搭建的模拟船舱堆取料机和激光扫描仪试验台，采用西门子 SMART 200 PLC 控制带有 SICK 激光扫描仪的模拟船舱堆取料机大臂移动，对下方煤堆扫描进行数据采集。通讯方式采用 MODBUS TCP 协议，通过网线方式连接。激光扫描仪的  $X$  和  $Y$  轴均采用步进电机驱动的电动分度盘，带动大臂回转和小臂俯仰。

通过对模拟船舱堆取料机大臂、小臂等相关长度测量，模拟船舱堆取料机试验台及其简化模型见图 14、15。



图 14 试验台实物

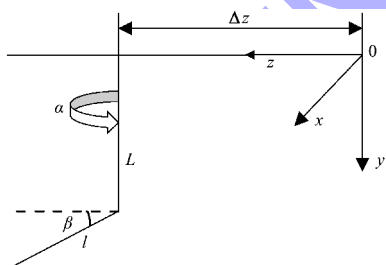


图 15 试验台机构运动

由图 15 可知，通过激光扫描仪扫描后经过坐标转换等处理后，得到关于三维直角坐标系下的点云数据，以及拟合的煤堆模型，综合评估煤堆体积、质量得出已知点云取料目标煤堆  $Y$  轴最高点坐标  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ，通过公式(12)得到相关的数据：

$$\begin{cases} X_1 = l \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha \\ Y_1 = L + l \cdot \sin\beta \\ Z_1 = \Delta z + l \cdot \cos\beta \end{cases} \quad (12)$$

式中： $L$  为大臂长度， $l$  为小臂长度， $\alpha$  为大臂转过的回转角， $\beta$  为小臂旋转的俯仰角， $\Delta z$  为行进距离。

由于点  $A$  坐标已知，反推出输入 PLC 控制器的  $\alpha$ 、 $\beta$  以及  $\Delta z$ ：

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin \left\{ \frac{X_1}{l \cdot \cos \left[ \arcsin \left( \frac{Y_1 - L}{l} \right) \right]} \right\} \\ \beta = \arcsin \left( \frac{Y_1 - L}{l} \right) \\ \Delta z = Z_{\text{目标}} - l \cdot \cos \left[ \arcsin \left( \frac{Y_1 - L}{l} \right) \right] \end{cases} \quad (13)$$

由于  $X$ 、 $Y$  方向的电动分度盘步距角均为电机每转 1 圈分度盘转过  $4^\circ$ ，得到输入 PLC 程序的坐标为  $(\alpha, \beta, \Delta z)$ ，通过公式转化把各分层点云数据以表格的形式写入 PLC 路径规划中。

通过相关操作得出接近煤堆真实形态的整个煤料堆表面的边缘模型，根据三维模型点云数据以及不同堆积密度计算出煤散堆的体积和质量，进行自动控制船舱堆取料机定位、定点对煤堆的取料作业。

### 3.4 防止煤堆坍塌的执行机构路径分析

路径规划是移动机械臂较为关键的技术，文献[23]中提到一种计算包络的方法进行路径规划，由于点云文件已经生成了接近于包络的分层外缘轮廓线，如果对外边缘轮廓线进行曲线拟合，再进行直线插补过于繁琐，且使用的试验台搭载的西门子 SMART 200 PLC 支持三轴的直线插补功能，因此直接使用直线插补方法进行路径规划。

对煤堆总质量和体积计算后确定待取料煤堆，船舱堆取料机通过大臂已经到达待取料煤堆的顶点处，按照第 1 层分层切片点云的坐标通过表格的形式传送输入到 PLC 中进行直线插补运动，从第 1 层的起始点以之字形进行煤堆取料作业，待完成后，若扫描后未发现有煤堆坍塌风险，遂按照上述流程进行下一层取料，直到达到取料要求后停止。以第 9 层煤堆取料作业为例，其路径规划见图 16。

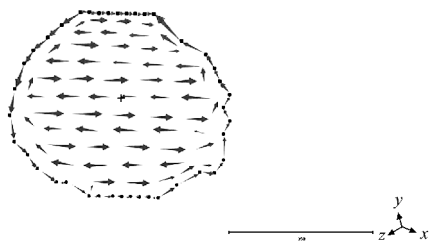


图16 第9层路径规划

为确保每层煤堆都被完全取走,船舱堆取料机在进行之字形取料的 $X$ 方向上,以此层点云中 $X$ 的最大值和最小值为左右限制;运动速度以船舱堆取料机单位时间内取煤量为准,速度应该略小于计算值;且进给量应该略小于铲斗长度,防止铲斗力矩不够发生停机过载现象;在进行直线插补运动时3个轴的运动速度相等且有最大值,由于限位开关感应器具有一定的感应宽度,若超过特定速度感应开关会失效,因此应该保证运动速度小于最大值,合理的速度有利于提高取料效率。

模拟船舱堆取料机路径规划的自动化控制的流程见图17。

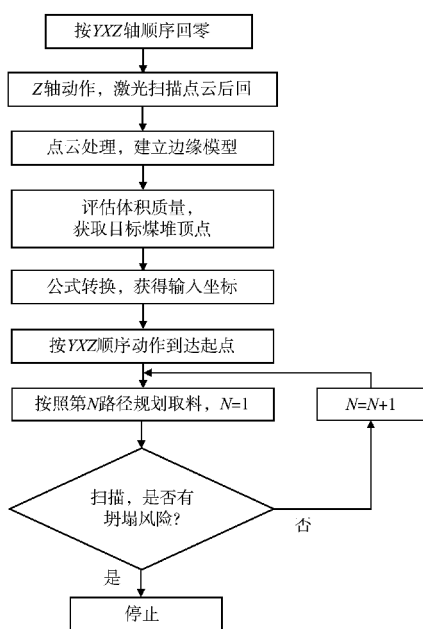


图17 船舱堆取料机自动作业流程

船舱堆取料机建立的坐标系应该和激光扫描仪所建立的坐标系保持一致, $X$ 轴为大臂回转方向, $Y$ 轴为小臂俯仰方向, $Z$ 轴为试验台行进方向。为防止发生碰撞,第1次 $Z$ 轴动作进行扫描操作时,

首先将小臂( $Y$ 轴)抬起回零,再回转( $X$ 轴)回零,最后进行行走( $Z$ 轴)回零。获取目标点后进行堆取料作业3个轴的动作顺序与第1次扫描相反。

根据上述安息角评估指标以及路径规划方法,可以在取料作业时对煤堆坍塌进行有效预警,船舱堆取料机对煤堆的每一分层进行取料作业完成后都对煤堆重新进行扫描和分层切片,并按照上述的安息角计算方法判断煤堆各方向是否具有坍塌的风险,如果有,船舱堆取料机停止作业并报警,等待下一步人工干预处理或者根据需要自动将船舱堆取料机运动至具有坍塌风险处,进行整形以防止煤堆坍塌。

#### 4 结论

- 1) 使用激光扫描仪采集煤堆三维点云数据,通过对原始点云去噪、滤波和精简,基于切片法精确计算煤堆体积和质量,为取料作业提供有效依据。
- 2) 通过原始分层点云信息实时计算每层待取料煤堆边缘安息角,并通过与最大安息角比对判断是否存在坍塌风险,实现堆取料机取料作业中煤堆坍塌预警。
- 3) 基于试验平台模拟执行机构分析计算,对原始点云数据处理获取原始分层点云信息,采用直线插补方法规划取料路径,准确、高效地满足现场取料作业要求。

#### 参考文献:

- [1] 赵德安,余海波,李洋洋.堆取料机无人化系统在散货港口的应用[J].水运工程,2021(10):310-315.
- [2] 杨青青.基于激光扫描仪的盘煤系统设计与开发[D].北京:北京林业大学,2018.
- [3] 王艳春.储煤场智能盘煤设备的应用[J].煤矿机械,2018,39(9):155-156.
- [4] 程健,祖丰收,王东伟,等.露天储煤场无人机自动盘煤系统研究[J].煤炭科学技术,2016,44(5):160-165.
- [5] 黄校春,姜国平,贾晓国,等.基于无人机的露天煤场盘煤系统研究与应用[J].电站系统工程,2020,36(5):64-66.
- [6] 黎少辉,顾军,钱建生,等.封闭储煤场高空轨道盘煤机器人系统设计[J].煤炭科学技术,2019,47(9):208-213.

- [7] 李明杰. 基于运动恢复结构的露天储煤场三维场景重建的研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [8] 崔峥. 基于深度学习点云分割的散料堆体积测量方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [9] 郑昌林, 刘尚冬, 段观林, 等. 货垛分类分级管理与防坍塌措施的研究与应用[J]. 江苏安全生产, 2022(12): 35-36.
- [10] 蔡有高, 王旭修, 魏正峰, 等. 斗轮堆取料机取料过程中的自动防塌垛技术[J]. 水运工程, 2022(7): 235-239, 258.
- [11] 王旭修, 蔡有高, 时培领, 等. 激光探测与测量视觉技术在堆取料机全自动控制中的应用[J]. 水运工程, 2020(6): 87-91, 105.
- [12] KUANG H W, WANG B, AN J P, et al. Voxel-FPN: Multi-scale voxel feature aggregation for 3D object detection from LIDAR point clouds[J]. Sensors, 2020, 20(3): 704.
- [13] 刘金锦, 李浩军. 基于点云切片改进法的不规则物体体积测量[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 133-145.
- [14] 李晶, 许晓峰, 金志国, 等. 数学模型在测定煤场堆积密度中的应用[J]. 新疆电力技术, 2010(4): 74-75.
- [15] 李阿卫, 张景香. 煤炭堆密度小容器测定不确定度评定[J]. 煤炭技术, 2021, 40(6): 214-216.
- [16] 王晓磊. 煤料堆密度的影响因素分析[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(5): 58-60, 65.
- [17] 张春森, 张奇源, 南轲. 多视几何无人机影像堆体体积量算[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(1): 124-129.
- [18] KRIVOKUCA M, CHOU P A, KOROTEEV M. A volumetric approach to point cloud compression, part II: Geometry Compression[J]. IEEE transactions on image processing, 2020, 29(1): 2217-2229.
- [19] 虞学明. 新型斗轮堆取料机自动化控制系统研究[J]. 中国水运(上半月), 2021(9): 88-90.
- [20] 卜祥航, 傅荣华, 李仅德, 等. 散粒体斜坡失稳破坏内部因素试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 116-120.
- [21] 常帅, 李楠, 丛龙生, 等. 矿岩散体粒级对自然安息角影响的试验研究[J]. 金属矿山, 2020(9): 54-59.
- [22] 杜欣, 曾亚武, 高睿, 等. 用离散元方法研究颗粒外形对摩擦机理的影响[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(2): 252-257.
- [23] 李宏超, 黄亚楼, 夏毅, 等. 带拖车的移动机器人包络路径分析与描述[J]. 机器人, 2001, 23(4): 334-337.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 32 页)

#### 4 结语

1) 密排桩基结构的波浪力分布与直墙式建筑波浪力分布大致相同, 可采用现有直墙式建筑波浪力计算理论公式计算, 其中日本 OCDI 公式的结果较为接近试验值。

2) 密排桩基结构的波浪力沿堤身轴线分布呈现中间堤身大、两端堤头小的趋势, 且随着波浪入射角增大, 趋势越明显。

3) 斜向浪影响密排桩基的波浪力大小, 高水位时 Goda 斜向浪影响公式与试验值较接近, 低水位时偏差较大。工程实践中有条件的情况下可采用物理模型试验进一步论证。

#### 参考文献:

- [1] SHANKAR N J, KHADER M H A. Performance characteristics of closely spaced Pile Breakwaters [C]//BARTON A C T. Proceedings of Fifth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering. Washington: the National Committee on

Coastal, 1981: 31-33.

- [2] HAYASHI T, KANO T. Hydraulic research on the closely spaced pile breakwater [J]. Coastal engineering proceedings, 1966, 1(10): 873-884.
- [3] 俞聿修, 史向宏. 不规则波作用于群桩的水动力系数[J]. 海洋学报(中文版), 1996, 18(2): 138-147.
- [4] 李玉成, 王凤龙, 王洪荣. 作用于并列双桩桩列上的波流力[J]. 海洋学报(中文版), 1992, 14(2): 106-121.
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [6] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan[R]. Tokyo: OCDI, 2002.
- [7] 合田良实. 港工建筑物的防浪设计[M]. 刘大中, 孙巨才, 译. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [8] 李玉成, 孙昭晨, 董国海, 等. 斜向不规则波对直墙作用的实验研究[J]. 海洋工程, 2002, 20(1): 57-63.

(本文编辑 王璁)