C 型料场刮板机取料速度控制方法与系统开发

吉孟扬[1a]，郭 宇[1b]，李 曦[2]，谢祖华[3]
（1. 西安交通大学 a. 电子与信息学部；b. 人工智能学院，陕西 西安 710000；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；3. 武钢集团昆明钢铁股份有限公司，云南 昆明 650302）

摘要：在 C 型料场刮板机自动化作业过程中，取料过快经常导致刮板机跳闸故障，取料过慢会导致供料不足、效率低等问题。对此，本文提出一种基于点云模型的 C 型料场刮板机取料速度控制方法，并在某 C 型料场现场试验验证，该控制方法步骤：① 获取料堆点云数据和形状，将其转换为高度灰阶图，并采用一种新型点云过滤算法降低其噪声、提高平滑度；② 基于刮板机链板恒定条件建立物料流量模型，结合能量转换构建刮板机电流－速度模型，将模型结果实时写入刮板机 PLC 中，进而实时控制刮板机取料速度。结果表明：使用该模型，料堆点云模型的内存资源降低 98.64%，点与点之间形成有效的拓扑关系，计算的复杂度降低，料堆点云模型的平滑度显著提高；刮板机作业时料流的流量波动在 8.29% 内，刮板机的设备故障率减少 5.24%，生产效率提高 9.68%。本文提出的取料速度控制方法可用于替代人工调节刮板机的取料速度，减少刮板机的作业故障，提高生产效率，有效提高设备的无人化、智能化水平，并可为各种刮板机取料速度控制与作业稳定性控制提供参考。

关键词：C 型料场；点云模型；速度控制；均匀料流；刮板机速度
中图分类号：TF04；TP399 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0080－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.078

Control method and system development of reclaim speed for C-type stockyard scraper

JI Mengyang[1a], GUO Yu[1b], LI Xi[2], XIE Zuhua[3]
(1. Xi'an Jiaotong University a. Faculty of Electronic and Information Engineering; b. College of Artificial Intelligence, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 3. Kunming Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan Iron and Steel Group, Kunming 650302, Yunnan, China)

Abstract: In the process of automatic operation of the scraper in the C-type stockyard, too fast reclaim often leads to the tripping failure of the scraper, and too slow reclaim will lead to insufficient material supply and low efficiency. A method for controlling the reclaim speed of C-type stockyard scraper based on point cloud model is proposed, and it is verified in the field test of a C-type stockyard, the control method steps: 1) The data and shape of the point cloud of the stockpile are obtained, and the height grey scale picture is converted, and a new point cloud filtering algorithm is used to reduce its noise and improve its smoothness; 2) The material flow model is established based on the constant condition of the scraper chain plate, and the current-speed model of the scraper is constructed in combination with energy conversion, and the model results are written into the scraper PLC in real time, and then the scraper reclaim speed is controlled in real time. The results show that, using this model, the memory resources of the stockpile point cloud model are reduced by 98.64%, an effective topological relationship is formed between points, the complexity of calculation is reduced, and the smoothness of

收稿日期：2024－02－27；**修回日期**：2024－03－15
基金项目：陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM－141)
作者简介：吉孟扬(2003—)，男，从事冶金工业机器视觉、智能控制方面的研究。
通信作者：郭 宇(1985—)，男，副教授，从事目标姿态估计、三维点云处理与分析等方面的研究。

the stockpile point cloud model is significantly improved; the flow fluctuation of the material flow during the operation of the scraper is within 8.29%, the equipment failure rate of the scraper is reduced by 5.24%, and the production efficiency is increased by 9.68%. The reclaim speed control method proposed in this paper can be used to replace the manual adjustment of the reclaim speed of the scraper, reduce the operation failure of the scraper, improve the production efficiency, effectively improve the unmanned and intelligent level of the equipment, and provide references for the control of the reclaim speed and operation stability of various scrapers.

Key words: C-type stockyard; point cloud model; speed control; uniform material flow; scraper speed

据中国钢铁工业协会统计，2023 年我国粗钢产量约为 10.19 亿吨。近年来，由于环保意识的提高，国内钢铁企业的原料场逐渐从露天料场改造成封闭料场[1]。随着人们对封闭料场改造探索的深入，C 型料场的结构以及效率得到优化提升，如云东[2]对上料系统的布置方式进行改进，并研发储配一体化的新型 C 型料场结构，有效解决了原有 C 型料场上料系统容易堵料和生产操作不灵活等问题。为进一步提高 C 型料场设备的自动化水平，国内大型钢厂通常采用三维扫描仪对料堆进行扫描建模，通过三维模型对料场中的物料进行盘库并指导堆、取料设备作业。如段成银[3]使用三维建模搭建了原料场的三维数字化料场系统；顾奕华等[4]阐述了无人化料场的组成，并提出相应解决方案；孟凡光等[5]利用三维模型实现了料场盘库，采用欧式聚类分割、深度学习等算法对料堆进行分割处理。

在现有研究基础上，一些研究人员借助三维扫描仪所扫描出的点云模型，通过相应的点云算法计算料场中刮板机的作业点，用来指导刮板机的自动化运行，以提高刮板机的无人化、智能化水平。在进行自动化作业时，通常采用三维扫描仪对 C 型料场刮板机料格进行扫描建模，然而在卸料的过程中现场会扬起大量的粉尘，对扫描仪的结果产生干扰，导致三维模型中出现大量毛刺，影响后续的计算。因此需对料格点云中的毛刺点进行过滤，以达到去除毛刺点以及平滑料堆模型的目的。传统的点云过滤方法有两种：① 基于点云的位置信息进行过滤[6-7]；② 基于点云的法向量进行过滤[8-9]。两种过滤方式均有缺点：基于点云位置的过滤会使得过滤后的料堆变得尖锐，原有的几何特征将改变；基于点云法向量的过滤则依赖法向量的计算，在料堆存在大量杂乱点的情况下，这种计算法向量的方法本身就存在着较大误差，杂乱的法向量信息不仅无法保证点云的特征信息，而且会导致点云出现严重变形。

为此，本文以现场三维扫描仪扫描到的料堆点云模型数据为基础，对大量点云数据进行降采样，构建出料堆高度的灰阶图，并结合料堆连续可微的特性，对料堆进行过滤以及插值平滑处理；同时根据料堆点云模型以及现场作业流程，构建料流作业流量模型，实现作业流量的计算。进一步地，在保证作业流量的稳定性以及作业负荷在最大安全功率之内时，实时刮板机作业的速度计算。系统在提高现场刮板机作业效率的同时，降低设备的故障率，为料场刮板机设备的自动化作业提供指导，进一步提高设备的无人化、智能化水平。

1　系统原理

在进行自动化作业时，刮板机以固定的速度在料格中来回运动刮取物料，该速度值往往根据人工经验手动设定。当取料速度过大时，刮板机的电流负载过大，容易发生跳电故障；取料速度过小又将影响到作业效率和供料的稳定性，造成料流的不稳定。由于不同物料的密度、湿度、粒度等属性不一致，刮板机固定取料作业速度的运行模式不能适应不同的工况，因此需要建立以物料流量恒定为目标的控制方法来指导刮板机作业。

本文以 C 型料场三维点云数据为基础，以作业过程中料流稳定以及功率不过载为目标，实现对 C 型料场刮板机速度的自动调节。C 型料场刮板机取料速度控制系统原理如图 1 所示。由图 1 可知，作业速度控制系统的主要步骤：① 通过 3D 扫描仪等硬件设备实时采集料堆点云数据；② 对点云数据进行处理用以计算刮板机速度，处理方

法主要包含高度灰阶图算法、平滑过滤算法、料流流量模型算法以及速度控制模型算法；③ 将计算后的结果实时写入刮板机上的 PLC 中以达到实时控制刮板机作业速度的目的。在上述步骤中，第二步是算法实现的关键，其系统工作流程：① 对原始料堆进行降采样，建立有效的数字高程模型，进一步对高度信息进行线性变换，并将其映射到灰阶空间；② 在实现高度灰阶图算法后，图像存在许多毛刺以及干扰点，后续模型根据料堆连续可微的特性，在高度灰阶图上进行卷积运算从而过滤掉干扰点；③ 基于料堆模型构建符合实际生产控制需要的料流模型，计算物料流量大小，进而搭建刮板机速度控制模型，计算刮板机的实时速度。下文将介绍每个算法的原理。

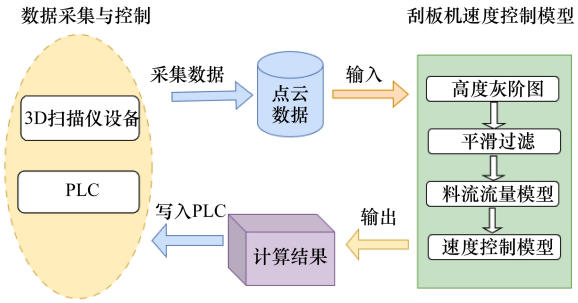


图 1 刮板机取料速度控制系统原理

Fig. 1 Principle of scraper reclaiming speed control system

1.1 高度灰阶图原理

在实时扫描 C 型料场的料堆时，三维扫描仪的扫描频率一般为 40 Hz 或更高，其在很短的时间内会产生大量的点云数据，导致模型程序的内存占用率过大以及计算复杂性过高[10]。传统的体素降采样方法是将点云数据划分为一个个小体素。体素是在空间上以 Δx、Δy、Δz 为边长的长方体。模型采用体素的重心代替体素内包含的点。尽管这种方法可以有效降低原始点云的数据量，但是对大范围上的点仍然难以形成有效的拓扑结构[11-13]。因此，本文在此基础上提出一种新型的点云数字高程拓扑结构算法，将点云数据以线性变换的形式映射到灰阶空间，实现对点云数据的压缩，并为后续算法步骤提供数据支撑。

体素降采样算法原理：假设点云由 n 个三维空间点组成，其坐标分别为(x_1,y_1,z_1)、(x_2,y_2,z_2)、(x_3,y_3,z_3)、…、(x_n,y_n,z_n)。假定用体素来包含空间中的点，并且用体素里面的重心代表出现在正方体中的点，则正方体的重心点(X,Y,Z)的坐标为

$$X=\frac{x_1+x_2+x_3+\cdots+x_n}{n} \tag{1}$$

$$Y=\frac{y_1+y_2+y_3+\cdots+y_n}{n} \tag{2}$$

$$Z=\frac{z_1+z_2+z_3+\cdots+z_n}{n} \tag{3}$$

式(1)～(3)中，采用重心坐标代替体素内所包含的点的坐标，当所选体素的高度 $h\to\infty$ 时，即表明采用在 XOY 平面上的网格来表示料堆模型；而 Z 方向采用重心高度来表示时，通过网格高度来近似代表点云轮廓，以此实现点云的数字高程模型。进一步地，引入线性矩阵 $\boldsymbol{T}$ 进行变换，将高程模型变换到灰阶空间上，形成高度灰阶矩阵 $\boldsymbol{H}_{\text{out}}$：

$$\boldsymbol{H}_{\text{out}}=\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{P} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{H}_{\text{out}}$ 为最终的高度灰阶矩阵；$\boldsymbol{T}$ 为变换矩阵；$\boldsymbol{P}$ 为当体素的高度 $h\to\infty$ 时重心点坐标的高度矩阵。

1.2 过滤平滑算法

C 型料场中往往存在着大量的粉尘，导致扫描结果与实际结果不相符合，因此对三维扫描仪的结果进行平滑过滤后，才能提高后续计算的精度。假定料堆的表面方程为 $z=f(x,y)$，则根据卸料过程中散状物料的流动性特征，$f(x,y)$ 函数在卸料范围内$[x\in(x_i,x_k)$，$y\in(y_i,y_k)]$为连续且可微，且存在任一点 $A(x_0,y_0,z_0)$ 使得下式成立：

$$\lim_{x\to x_0^-}\frac{f(x,y)-f(x_0,y)}{x-x_0}=\lim_{x\to x_0^+}\frac{f(x,y)-f(x_0,y)}{x-x_0} \tag{5}$$

将 $x\in(x_0,x_k)$、$y\in(y_0,y_k)$划分正方形网格，记网格边长为 b，则在 i 行、j 列正方形网格左下角的坐标为

$$\begin{cases}x_i=x_0+ib\\ y_j=y_0+jb\end{cases} \tag{6}$$

则对应任意正方形网格有：$x\in(x_i,x_i+b)$、$y\in(y_i,y_i+b)$，存在 m 个点使其在 XOY 平面的投影落在正方形网格内，其对应的正方形网格的高

度为

$$h_{i,j} = \frac{\sum_i^m z_i}{m} \tag{7}$$

通过上述步骤将料堆模型简化为 N 个正方形网格上的高度，基于料堆的表面方程的连续性以及可微性，近似用差分法来过滤 $h_{i,j}$ 如下所示。

$$\lim_{x\to x_0^-}\frac{f(x,y)-f(x_0,y)}{x-x_0}=\frac{h_{i,j}-h_{i-1,j}}{b} \tag{8}$$

$$\lim_{x\to x_0^+}\frac{f(x,y)-f(x_0,y)}{x-x_0}=\frac{h_{i+1,j}-h_{i,j}}{b} \tag{9}$$

式(5)、(6)以一阶差分来近似的代表函数的一阶导数，其与实际的一阶导数存在误差。设 α 为 $f(x,y)$ 在 x_0 处的高阶无穷小量，则有：

$$\left|\frac{h_{i,j}-h_{i-1,j}}{b}-\frac{h_{i+1,j}-h_{i,j}}{b}\right|<\alpha \tag{10}$$

进一步有：

$$|2h_{i,j}-(h_{i-1,j}+h_{i+1,j})|<b\alpha \tag{11}$$

同理有：

$$|2h_{i,j}-(h_{i,j-1}+h_{i,j+1})|<b\alpha \tag{12}$$

式(10)~(12)对于设定的 α 可过滤掉不符合的网格。使用上式对网格进行过滤后，对于存在孔洞的网格，根据料堆是连续可微的特性，在任意一点采用多项式插值进行拟合。本文用二次多项式插值算法来拟合局部点云，其中二次型为

$$h=ax^2+bx+c \tag{13}$$

对于任意 i 行相邻的三个网格 $\{h_j,h_{j+1},h_{j+2}\}$，有：

$$\begin{cases}h_j=ax_j^2+bxj+c\\ h_{j+1}=ax_{j+1}^2+bx_{j+1}+c\\ h_{j+2}=ax_{j+2}^2+bx_{j+2}+c\end{cases} \tag{14}$$

根据式(14)可解出二次型的参数 a、b、c，因此对于任意出现在 $\{h_j,h_{j+1},h_{j+2}\}$ 内的点，均可以通过式(13)插值补齐点云的孔洞。

1.3　料流流量模型算法

通过三维扫描仪扫描料堆，可获取料堆的形状 $z=f(x,y)$，假设刮板机刮板所在平面满足 $z=g(x,y)=ax+by+c$，因此刮料的体积为

$$V=\iint[f(x,y)-g(x,y)]\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{15}$$

式(15)中，积分范围为刮板机所在平面与料堆交点在 XOY 平面上的投影，考虑到点云的离散性，必然存在连续两点 $(i,j,h_{i,j})$、$(i+1,j,h_{i+1,j})$，使刮板机所在平面与料堆轮廓相交，满足：

$$[h_{i,j}-g(x_i,y_j)]\times[h_{i+1,j}-g(x_i,y_{j+1})]<0 \tag{16}$$

式(16)满足：$x_i\in(x_m,x_m+l)$。其中，x_m 为刮板机位置，m；l 为刮板机刮板的宽度，m。因此整个积分边界值的坐标可通过计算得出。

当刮板机以速度 v 来回取料的时候，在 Δt 内可以得到：

$$\int q\mathrm{d}t=\rho V \tag{17}$$

式中：q 为作业时的流量，t/h；V 为刮板机在前进速度方向的料堆体积，m^3；ρ 为物料堆密度，t/m^3。

在 dt 时间内，其体积变化为

$$V=\iint[f(x_0,y)-g(x_0,y)]v\mathrm{d}y\mathrm{d}t \tag{18}$$

式中：x_0 为刮板机的位置，m。将体积 V 代入式(17)中，可以得到：

$$q=\rho\int[f(x_0,y)-g(x_0,y)]v\mathrm{d}y \tag{19}$$

考虑到 $g(x,y)$ 为刮板机所在平面，进而有：

$$g(x,y)=g(0,y) \tag{20}$$

因此，其链板料流的流量为

$$q=v\rho\int[f(x_0,y)-g(0,y)]\mathrm{d}y \tag{21}$$

其中，$g(x,y)$ 仅与刮板机当前的角度 θ 有关，记：

$$k=\int[f(x_0,y)-g(0,y)]\mathrm{d}y \tag{22}$$

则有：

$$q=\frac{k\rho v}{60} \tag{23}$$

式中：k 为取料作业中刮取的瞬时截面积，m^2；v 为刮板机的行走速度，m/min。

1.4　速度控制算法

刮板机作业时，链板的传递功率为

$$P=mg\sin\theta\omega \tag{24}$$

式中：ω 为链板转动速度，m/s；P 为功率，kW；m 为作业时刮取的重量，t；θ 为刮板机当前角度；g 为重力加速度，9.80 m/s^2。

考虑到链板以恒定的速度匀速转动，因此，

上式可进一步变化为

$$P = qgl\sin\theta = k\rho vgl\sin\theta \tag{25}$$

式中：l 为单位时间内链板转动的距离，m。

式(25)表明，刮板机链板运行的功率与实时速度、料堆形状以及刮板机的下降角度和当前角度有关。通常刮板机的下降角度为恒定值，因为在实际生产作业过程中调整刮板作业角度会导致堆形凹凸不平，造成后续取料作业变得困难。因此，为保证取料功率在刮板机的额定功率内，使得：

$$P = \eta UI \leqslant \eta \overline{P} \tag{26}$$

式中：η 为刮板机功率转换效率,%；U 为刮板机的电压，kV；I 为刮板机的电流，A。$\overline{P}$ 为刮板机的额定功，kW。

因此，为保证刮板机在安全功率范围内以最大的行走速度完成取料，可通过式(26)实时推算出刮板机的最大安全速度，并且将其写入 PLC 中，实现对刮板机取料速度的控制。

2 系统组成与实现

2.1 硬件模块

2.1.1 三维重构模块

在刮板机的龙门架上安装三维扫描仪(如图2所示)，实现刮板机走行过程中自动采集三维点云数据。模型程序实时将原始点云模型进行降采样、过滤、插值补全等计算，还原真实的料场模型。



图2 扫描仪安装位置

Fig. 2 Scanner installation location

2.1.2 PLC 数据传输

PLC 数据传输模块实时获取刮板机的格雷姆线位置、当前俯仰角度、刮板机电流等料场设备的作业数据，并将其写入计算机前置内存块中，以确保数据的实时性，为上层计算提供基础数据支持。另外，通过约定的数据交互协议将作业点的数据写入到 PLC 内存块内，以便实时控制刮板机的速度。

2.2 算法设计

2.2.1 高度灰阶图算法设计

将原始点云数据构建成数字高程模型，在网格平面上形成拓扑结构，在料场坐标系下划分网格，通过网格的高度代表点云模型。进一步地，将网格高度矩阵线性变换到高度灰阶图。算法设计如下：输入为点云数据 *XYZ* 矩阵为 $\boldsymbol{P}$，步长为 L_{step}，输出为点云灰阶矩阵 $\boldsymbol{M}$：

$$\boldsymbol{H}_{\text{ij}} = \boldsymbol{P} \times \left[\frac{1}{L_{\text{step}}}\ \frac{1}{L_{\text{step}}}\ 1\right] \tag{27}$$

$$h_{ij} = mean[\,groupby(\boldsymbol{H}_{ij})\,] \tag{28}$$

$$\boldsymbol{M} = h_{ij} \times \boldsymbol{T} \tag{29}$$

式(27)将点云的 *XYZ* 坐标矩阵乘以网格的步长矩阵，得到 $\boldsymbol{H}_{ij}$ 矩阵，该矩阵表示为第 i 行第 j 列网格内点的高度 h。考虑到每个网格可能包含多个点，式(28)使用 *groupby* 函数对这些点进行分组，并利用 *mean* 函数计算每组点的高度平均值，从而得到每个网格的最终高度。其中 *groupby* 函数的作用对数据进行分组，*mean* 函数的作用是对数据求平均。式(29)将每个网格高度乘以灰阶变换矩阵 $\boldsymbol{T}$，得到灰阶矩阵 $\boldsymbol{M}$。

上述公式将大大简化点云模型的计算。对于点云矩阵 $\boldsymbol{P}$，可以用 $m \times n$ 的二维矩阵来表示，其中矩阵中的元素均表示真实料堆的高度。

2.2.2 过滤平滑算法设计

通过上述算法可将料场点云模型转换成高度灰阶图，其由二维平面图表示三维空间中的点。因此求解 X 轴、Y 轴的偏导数，可以转换为求解高度灰阶图乘以一个卷积核。其算法设计：输入为点云高度灰阶图矩阵，输出为过滤后点云 $\boldsymbol{T}_{\text{out}}$。首先定义初始化左右偏导卷积核矩阵 $\boldsymbol{K}_1$、$\boldsymbol{K}_2$ 以及阈值 $\varepsilon_{\text{threshold}}$，将高度灰阶图以 $\boldsymbol{K}_1$、$\boldsymbol{K}_2$ 做卷积运算，计算出左右两个偏导，将卷积后的图像做差值，并比较设定的 $\varepsilon_{\text{threshold}}$，若左右两个偏导超过一定阈值，即不满足连续可微函数的特性，因此

将过滤掉此点。考虑到过滤后的点会形成孔洞，因此需对过滤后的模型使用式(13)进行插值补全，以保证料堆模型的完整性。

$\boldsymbol{K}_1$、$\boldsymbol{K}_2$ 卷积矩阵为

$$\boldsymbol{K}_1=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ -1 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{30}$$

$$\boldsymbol{K}_2=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{31}$$

2.2.3　料流计算算法设计

基于上述理论推导，并结合上文中所获取到的 $m\times n$ 网格高度矩阵，设计料流计算过程算法，算法输入为点云高度灰阶矩阵 $\boldsymbol{M}$，输出为作业过程中实时流量 q(t/h)。根据刮板机的刮板位置坐标，获取刮板的截距 b。刮板机在左右移动的时候，其截距默认是不变的。通过读取刮板机上的 PLC 数据，获取刮板机的实时位置 x，以及当前刮取物料的密度 ρ 等信息。根据式(32)～(35)计算出刮板机在作业时所刮去的截面积。

$$j=\frac{x}{L_s} \tag{32}$$

$$\boldsymbol{h}_j=\boldsymbol{M}_j \tag{33}$$

$$k=L_s\times\sum_{i=i_1}^{i_2}(h_i-\tan\theta iL_s-b) \tag{34}$$

式中：j 为当前位置下刮板机对应网格的列数；x 为刮板机当前位置，m；L_s 为网格的边长，m，$\boldsymbol{h}_j$ 为第 j 列所对应的料场高度矩阵；$\boldsymbol{M}_j$ 为输入点云高度灰阶矩阵中第 j 列的值；i_1 为第 j 列中，刮板与料堆相交第一行边缘的网格序列号；i_2 为第 j 列中，刮板与料堆相交最后一行边缘的网格序列号；k 为刮板机在作业时所刮去的截面积，即对其累加求和并乘以网格边长，m^2。

首先将刮板机当前位置转换为点云灰阶图的列数 j，获取对应列数的高度矩阵 h_j，并且计算出 θ 所对应的每个 i 的高度值。进一步地，实时计算在作业时刮板机位置所对应的 k，并代入式(23)中，计算得到刮板机的实时作业流量。

2.2.4　程序设计

基于上述算法的具体实现，其程序流程如图 3 所示。由图 3 可见，通过 3D 扫描仪获取料场的模型图，形成料场原始点云数据，通过点云过滤算法进行过滤平滑处理，计算出最终的网格高度图。

进一步地，系统将读取刮板机上 PLC 的角度值、位置值，以获取实时状态信息。将这些信息输入到料流计算算法中，计算得到刮板机作业位置及角度所对应的 k 值。保证刮板机在满足作业料流恒定以及满足作业功率安全性的条件下，能够稳定维持所需的作业流量。

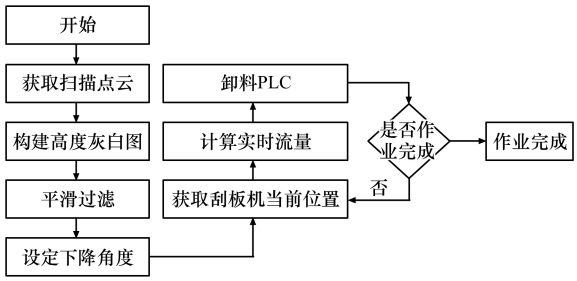


图 3　程序设计流程

Fig. 3　Programming flow chart

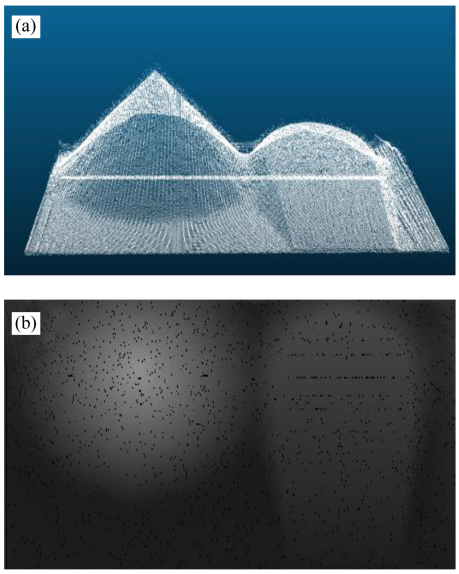
3　结果与讨论

3.1　高度灰阶图

通过 3D 扫描仪采集原始点云数据，应用高度灰阶图算法进行处理，该算法输入为原始点云的 *XYZ*，输出为灰阶图中每个点的像素。这种转换的对比效果如图 4 所示。由图 4 可见：将料堆原始点云图通过线性矩阵变换转换为高度灰阶图，其结构简单，计算方便。通过对比发现，料堆高度灰阶图保留了原始点云图的相关信息。此外，高度灰阶图进行矩阵逆变换后，其形状和轮廓能够精确地还原为最初的点云图。

进一步地，对比点云压缩前后计算机内存空间的占用情况，结果如表 1 所示。由表 1 可知，采用高度灰阶图表示点云模型时，可以节省计算机 95% 以上的内存资源，计算机加载以及保存数据的能力都有了很大的改善与提高。

同时，点与点之间形成了拓扑关系，通过网格索引可以快速定位到高度值。点云查询效率对比如表 2 所示。由表 2 可知，对比传统方式，新方式的查询效率得到了极大的提高，这为后续快速计算点云的特征点提供了条件。



（a）料堆原始点云图；（b）料堆高度灰阶图

图 4 料堆原始点云和高度灰阶图

Fig. 4 Original point cloud and height gray scale diagram of material pile

表 1 点云模型保存不同类型内存对比

Table 1 Comparison of different types of memory saved in point cloud models **kB**

文件名称	格式类型			
	xyz	bin	E57	本文格式
测试文件 1	1 989	1 542	1 556	26
测试文件 2	16 440	8 860	8 899	56
测试文件 3	34 093	18 168	18 245	120

表 2 点云查询效率对比

Table 2 Comparison of point cloud query efficiency

点云点数量/个	查询时间/ms	
	传统方式	本文方式
1 000	0. 205	0. 004
10 000	1. 543	0. 009
100 000	6. 754	0. 019
1 000 000	15. 75	0. 024

3. 2 过滤平滑

将上述原始点云图输入到过滤平滑算法中，可得到平滑过滤后的图像，如图 5 所示。由图 5 可知：原始图中的噪点得到了有效过滤；变换为高度灰阶图后，其点云的平滑度有显著的提升。

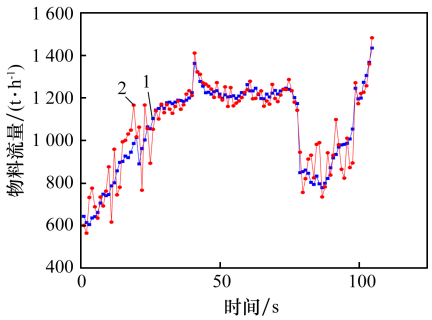
3. 3 料流流量模型

根据上述算法构建物料流量模型，将理论计算的物料流量与皮带秤实际称量的物料流量进行对比分析。通过设定刮板机取料下降的角度以及格雷姆线来获取刮板机当前的位置，计算出刮板机的流量值，采集数据并绘制曲线如图 6 所示。由图 6 可知，刮板机在作业时，皮带秤料流与计算出的理论料流曲线基本吻合。在实际生产中，其瞬时料流的误差在可接受的范围内，理论料流的趋势与实际皮带秤料流的趋势相近。因此，本文的刮板机作业料流计算方法对实际生产计算料流具有指导意义。

（a）过滤后点云图；（b）过滤后高度灰阶图

图 5 过滤后点云图和高度灰阶图

Fig. 5 Point cloud image and highly gray image after filtering



1—实际值；2—理论值。

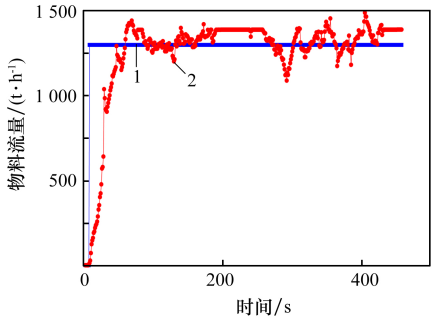
图 6 料流流量对比

Fig. 6 Comparison of material flow

3. 4 速度控制模型

通过上述的模型算法，通过设定初始的取料量，可得到刮板机在作业过程中的流量，如图 7 所示。由图 7 可知：刮板机作业时，通过自动调

节速度使得实际的物料流量与设定的流量相差不大，满足自动调节刮板机速度的需求；同时，刮板机作业速度的算法采用安全额定功率进行计算，因此可避免刮板机作业功率过载的情况，提高设备运行的安全性以及可靠性。经核算，本文提出方案减少刮板机设备故障率为 5.24% 以上，提高现场生产作业效率为 9.68%。



1—设定值；2—实际值。

图 7　刮板机作业流量曲线

Fig. 7　Flow curve of scraper operating

4　结　论

（1）本文设计了一种刮板机取料速度的实时控制方案。建立基于点云的高度灰阶图，在有效保持点云轮廓的同时缩小点云的内存空间。通过线性矩阵变换以及其逆变换可有效对点云进行编码以及解码，为后续算法的数据查找以及数据存储都有着重要的意义。

（2）通过变换高度灰阶图的方法，可有效利用图像处理卷积核相关的算法对点云进行平滑过滤处理，结合多项式插值算法可以补全点云中的离散点，提高料场模型的精度。

（3）本文方法可以实时计算出刮板机的取料流量，克服传统皮带秤称量方法的时间滞后的劣势，为料流恒定提供基础数据支撑。开发的系统有效降低了设备的故障率，提高了设备的生产效率，极大提高了设备智能化、无人化水平。

参考文献：

[1] 陶伟平．宝钢 C 型封闭料场改造项目进度管理研究[D]．沈阳：东北大学，2018.
TAO Weiping. Research on progress management of Baosteel C-type closed material yard renovation project [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.

[2] 云东．新型 C 型料场优化[J]．冶金设备，2022(5)：64－67.
YUN Dong. New C-shaped stockyard optimization[J]. Metallurgical Equipment, 2022(5): 64－67.

[3] 段成银．钢铁企业原料场中三维数字化料场系统的应用[J]．山西冶金，2023，46(1)：169－171.
DUAN Chengyin. Application of 3D digital material yard system in raw material yard of iron and steel enterprises [J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(1): 169－171.

[4] 顾奕华，胡震豪．钢铁企业原料场智能化建设[J]．冶金自动化，2023，47(增刊 1)：349－355.
GU Yihua, HU Zhenhao. Intelligent construction of raw material yards in steel enterprises [J]. Metallurgical automation, 2023, 47(Suppl 1): 349－355.

[5] 孟凡光，高振涛，张利峰．原料场堆取料机自动盘库系统[J]．河北冶金，2023(9)：67－70.
MENG Fanguang, GAO Zhentao, ZHANG Lifeng. Automatic inventory system for stacker-reclaimer in raw material yard[J]. Hebei Metallurgy, 2023(9): 67－70.

[6] 杜中义，肖春霞．基于保特征无参数投影的快速几何重建[J]．计算机辅助设计与图形学学报，2010，22(7)：1138－1144.
DU Zhongyi, XIAO Chunxia. Feature-preserving and parameterization-free projection for fast geometry reconstruction[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(7): 1138－1144.

[7] LIU K C, GAO Z, LIN F, et al. FG-net: A fast and accurate framework for large-scale LiDAR point cloud understanding[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(1): 553－564.

[8] HUANG H, WU S H, GONG M L, et al. Edge-aware point set resampling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(1): 1－12.

[9] LEVIN D. The approximation power of moving least-squares[J]. Mathematics of Computation, 1998, 67(224): 1517－1531.

[10] 张释如，温一帆，文猛，等．点云投影采样及新型大容量三维信息隐藏方法[J/OL]．计算机辅助设计与图形学学报，2024：1－8[2024－02－05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2925.TP.20240204.1349.035.
ZHANG Shiru, WEN Yifan, WEN Meng, et al. projection sampling of point clouds and a novel high - capacity 3D

（下转第 116 页）

measurement at an evaporating liquid meniscus[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2/3/4):157 – 162.

[12] SUTTER G, FAURE L, MOLINARI A, et al. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(7):671 – 678.

[13] 毛尹航. 基于CCD摄像机的高温目标测温系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
MAO Yinhang. Research on measurement system of high-temperature target based on CCD camera[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.

[14] 莫苏新. 基于CCD的高温温度场测量方法研究[D]. 长春:长春理工大学,2020.
MO Suxin. Research on high temperature field measurement method based on CCD[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.

[15] BÜNGER L, ANHALT K, TAUBERT R D, et al. Traceability of a CCD-camera system for high-temperature measurements[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(8):1784 – 1802.

[16] 任建新. 锅炉过热器壁面温度红外图像测量技术研究[D]. 南京:东南大学,2017.
REN Jianxin. Study of temperature measurement system for boiler superheater wall based on the infrared image technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[17] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.

(上接第87页)

information hiding method[J/OL]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2024:1 – 8[2024 – 02 – 05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2925.TP.20240204.1349.035.

[11] 黎瑾慧,贺里梅. 一种利用LiDAR点云的水域DEM快速精细生成算法[J]. 海洋测绘,2023,43(4):62 – 66.
LI Jinhui, HE Limei. A fast and fine generation algorithm of water DEM using LiDAR point cloud[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2023, 43(4):62 – 66.

[12] 杜中义,肖春霞. 基于保特征无参数投影的快速几何重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(7):1138 – 1144.
DU Zhongyi, XIAO Chunxia. Feature-preserving and parameterization-free projection for fast geometry reconstruction[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(7):1138 – 1144.

[13] 林松,田林亚,毕继鑫,等. 基于最优邻域局部熵的点云精简算法[J]. 测绘工程,2021,30(5):12 – 17.
LIN Song, TIAN Linya, BI Jixin, et al. Point cloud simplification algorithm based on local entropy of optimal neighborhood[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(5):12 – 17.