

面向装船作业的物料堆圆锥法高效仿真与工程应用分析

林志鹏^{1,2,3}, 胡康杰⁴, 徐 迟^{1,2,3*}

¹中国地质大学(武汉)自动化学院, 湖北 武汉

²复杂系统先进控制与智能化湖北省重点实验室, 湖北 武汉

³地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉

⁴中国电建集团武汉重工装备有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年10月7日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月6日

摘 要

在散货无人化装船作业中, 料堆形态的准确建模与预测是实现智能卸料控制和防碰撞规划的关键环节。针对传统方法在复杂堆积环境下建模精度低、计算效率差的问题, 本文设计了一种基于圆锥法的料堆快速模拟与重构方法。该方法将复杂的堆积过程抽象为可参数化的几何圆锥模型, 通过点云投影、交点求解与逐步演化三个阶段, 实现了对料堆堆积过程的高效建模与形态重构。实验在真实港口装船环境中进行, 结果表明, 该方法能够在不同堆积条件下生成与真实煤堆高度一致、形态相近的几何模型。

关键词

料堆建模, 点云投影, 形态重构, 自动化装船

Efficient Simulation and Engineering Application Analysis of the Conical Method for Material Piles in Ship Loading Operations

Zhipeng Lin^{1,2,3}, Kangjie Hu⁴, Chi Xu^{1,2,3*}

¹School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

²Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan Hubei

³Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education, Wuhan Hubei

⁴Power China Wuhan Heavy Equipment Co., Ltd., Wuhan Hubei

*通讯作者。

文章引用: 林志鹏, 胡康杰, 徐迟. 面向装船作业的物料堆圆锥法高效仿真与工程应用分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 72-78. DOI: 10.12677/mos.2025.1411640

Received: October 7, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 6, 2025

Abstract

Unmanned bulk cargo loading operations, accurate modeling and prediction of pile morphology are crucial for intelligent discharge control and collision avoidance planning. To address the limitations of traditional methods, such as low modeling accuracy and poor computational efficiency in complex stacking environments, this paper proposes a rapid simulation and reconstruction method for material piles based on a conical approach. This method abstracts the complex stacking process into a parameterized geometric cone model, achieving efficient modeling and morphological reconstruction of the pile formation process through three stages: point cloud projection, intersection solving, and step-wise evolution. Experiments conducted in a real port loading environment demonstrate that the proposed method can generate geometric models highly consistent with and closely matching the morphology of actual coal piles under various stacking conditions.

Keywords

File Modeling, Point Cloud Projection, Morphological Reconstruction, Automated Ship Loading

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在自动化堆场中，堆取料机的悬臂与料堆之间必须保持安全距离[1]。散货通过传送带从堆场运至装船机，通过溜筒向船舱加料，在人工装船时，工人通过察看溜筒和船舱相对位置和船舱加料情况，根据一定操作规程控制溜筒移动，进行加料完成散货装船[2]。但由于船舱内部空间深邃、视觉透视效应显著，指挥工难以精准判断料堆顶点与装船机溜筒之间的实时距离。因此需要通过算法实时对料堆进行建模，计算料堆高度，增强了装船作业的安全性与自动化程度。

当前，料堆形态预测的传统方法主要包括元胞自动机、离散元法(DEM)和连续介质法：元胞自动机将堆积空间离散为规则网格，通过局部状态转移规则模拟颗粒的沉积和料堆演化，适合捕捉宏观形态变化但难以反映颗粒微观力学；离散元法将物料视为单个颗粒，计算颗粒间接触力、摩擦力和重力作用下的运动轨迹，以模拟料堆的形成与演化过程，精度较高但计算量大且难以处理大规模系统；连续介质法将料堆视为连续均匀介质，通过求解质量、动量和能量守恒方程，并结合本构关系描述整体流动和堆积行为，计算效率高但忽略颗粒离散特性，难以捕捉局部颗粒结构。这些方法在定性上能够反映堆积趋势，但在复杂几何约束和大规模点云数据场景下，参数敏感性高、计算成本大，限制了其在实时控制和在线决策中的应用[3]。

为克服传统方法在计算效率、参数敏感性和规则设计复杂度等方面的局限性，本文设计了一种基于几何建模思想的圆锥仿真算法。该方法将料堆的宏观形态抽象为可参数化的圆锥几何体，并通过将点云数据沿特定方向投影到圆锥表面，实现了料堆形态的快速重构与演化仿真。与传统方法相比，圆锥仿真算法无需依赖复杂的演化规则，显著降低了计算成本，同时具备良好的可控性与可解释性，为实时堆积预测、形态重构以及自动化装卸系统提供了一种高效可行的新途径。

2. 方法原理

2.1. 圆锥仿真算法核心数学原理

颗粒受力分析基础：颗粒物料的运动行为与最终堆积形态本质上受其受力平衡关系支配，这一基本原理可由牛顿运动定律描述。在分析单个颗粒时，其所受的力主要包括重力、颗粒间的接触力以及边界约束力。重力表现为竖直向下的力，大小为 $F_g = mg$ 。颗粒间的接触力则包括法向弹力 F_n 和切向摩擦力 F_f 。当两个颗粒或颗粒与边界接触时，法向弹力抵抗压缩变形，而切向摩擦力抵抗相对滑动，且该摩擦力遵循库仑摩擦定律，即 $F_f \leq \mu F_n$ ，其中 μ 为颗粒间的摩擦系数。此外，边界约束力来自容器壁面或挡板等边界，通过法向反力和摩擦力限制颗粒的运动空间，从而影响颗粒的堆积形态与整体力学行为。当以上力的矢量合力为零时，颗粒的加速度为零，系统进入静力平衡状态，颗粒停止运动，形成稳定堆积结构。对于宏观尺度的连续介质型散体物料，可进一步采用连续介质力学模型描述整体受力与稳定性。此时，不再分析单颗粒，而是通过应力 - 应变关系研究料堆整体响应。常用的强度准则如莫尔 - 库仑 (Mohr-Coulomb) 准则，用于判断堆体是否会发生滑动或坍塌： $\tau = c + \sigma \tan \phi$ ，其中 τ 为抗剪强度、 σ 为法向应力、 c 为内聚力、 ϕ 为内摩擦角。堆体内局部应力状态超过该强度条件时，将产生剪切破坏或坍塌。

堆积形态的几何与统计规律：当颗粒物料自由下落并堆积时，系统会自发趋向于能量最低、力学平衡的稳定结构，其宏观几何特征主要由休止角 (Angle of Repose) 决定。休止角是物料自然堆积表面与水平面的夹角，反映了物料抗剪切能力与颗粒间摩擦特性。例如：细砂休止角约为 30 度至 35 度，块状岩石约为 40 度至 45 度。在仿真中，休止角通常作为几何约束条件，用于控制堆积体表面的最大坡度，满足条件：

$$\tan \alpha = \frac{h}{r}$$

其中， α 为休止角、 h 为堆体高度、 r 为堆体底面半径。在数值建模与仿真中，常用的几何模型主要包括圆锥堆积模型和楔形堆积模型两种。圆锥堆积模型用于物料在自由落体条件下的堆积过程，此时料堆呈对称圆锥形，表面倾角等于休止角，适合无约束条件下的形态估算与仿真。楔形堆积模型适用于存在边界约束的情形，如料仓或料槽内，料堆受壁面摩擦力和侧向压力影响而呈非对称楔形结构，需要引入壁面摩擦角和静止压力系数等参数以提高模型精度。

2.2. 圆锥仿真算法的数学方法

圆锥仿真算法以圆锥模型为全局结构先验，通过点云投影、交点求解与逐步演化三个环节，将原始空间点云逐步映射到目标几何表面，并在迭代过程中重构出符合实际堆积规律的宏观形态。接下来，将围绕这三个核心步骤，对算法的整体流程与数学机制进行详细介绍。

(1) 点云投影：圆锥仿真算法的第一步是建立点云到圆锥表面的映射路径。考虑到锥体生成方向处于世界坐标系下，点偏移方向处于船舱坐标系下，选择圆锥生长方向与点偏移方向作为函数参数。设原始点云为 $P = \{p_i \in \mathbb{R}^3\}_{i=1}^N$ ，其中， $P_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 代表第 i 个点的三维坐标。定义目标圆锥的几何参数为顶点位置 $V \in \mathbb{R}^3$ ，单位轴向向量 $\vec{a} \in \mathbb{R}^3$ (满足 $|\vec{a}| = 1$)，半顶角 $\alpha \in (0, \pi/2)$ 。为使点云中的每个点能够收敛至圆锥表面，需为其定义一条指向该表面的投影路径。设投影方向为单位向量 $\vec{d}$ ，则第 i 个点沿此方向的运动轨迹可参数化表示为：

$$l_i(t) = P_i + t\vec{d}$$

此投影路径的建立，不仅实现了点云在几何空间中的定向映射，更重要的是将三维空间中的交点搜索问题转化为沿一维参数 t 的求解问题，为后续的解析计算奠定了理论基础。

(2) 交点求解：在明确投影路径后，需计算该路径与圆锥表面的几何交点。圆锥表面的隐式方程定义：

$$[(X - V) \cdot \vec{a}]^2 = \cos^2(\alpha) \cdot \|X - V\|^2$$

其中 x 为圆锥表面上的任意点。将投影路径方程 $l_i(t)$ 代入上述圆锥方程，并令 $\vec{w}_i = p_i - V$ ，可得到关于参数 t 的二次方程：

$$At^2 + Bt + C = 0$$

其中系数为：

$$\begin{aligned} A &= (\vec{d} \cdot \vec{a})^2 - \|\vec{d}\|^2 \cdot \cos^2(\alpha) \\ B &= 2[(\vec{w}_i \times \vec{a})(\vec{d} \times \vec{a}) - (\vec{w}_i \times \vec{d})\cos^2(\alpha)] \\ C &= (\vec{w}_i \cdot \vec{a})^2 - \|\vec{w}_i\|^2 \cdot \cos^2(\alpha) \end{aligned}$$

求解该二次方程，并选取最小的正实根 t^* ：

$$t^* = \min\{t > 0 \mid At^2 + Bt + C = 0\}$$

当 $A=0, B \neq 0$ 时，二次方程将会变为线性方程，此时：

$$t = \frac{A}{B}$$

若 $t > 0$ ，可选取此时的 $t^* = t$ 。由此可得点 P_i 在圆锥表面上的投影点：

$$P_{new} = P_i + t^* \cdot \vec{d}$$

该交点 P_{new} 表征了点云在当前圆锥几何约束下的平衡位置，是形态演化过程的初始状态。

(3) 逐步演化：圆锥仿真算法采用逐步演化的策略，动态模拟料堆从初始散乱状态到最终稳定形态的自然形成过程。该方法并非进行一次性投影，而是通过迭代更新圆锥参数，驱动点云逐步收敛。

设圆锥顶点向量的目标长度为 L ，总演化时间为 T 。在时间步 $t_k = k\Delta t$ （其中 $0 \leq t_k \leq T$ ）时，圆锥的轴向尺度参数更新为：

$$V(t_k) = \frac{t_k}{T} V_{target}$$

其中 V_{target} 为最终的目标顶点向量。随着 $V(t_k)$ 的逐步增长，圆锥的顶点位置 $V(t_k)$ 与轴向 $a(t_k)$ 随之动态调整，进而影响投影方向 $\vec{d}$ 和交点解 t^* 。在每一轮迭代中，点云的新位置均由上一时间步的几何交点决定，而交点解又依赖于当前时刻的圆锥参数与投影路径。通过这种多步、反馈式的演化机制，点云最终在强几何约束下稳定地收敛至目标圆锥表面，从而高精度地近似出真实料堆的静态堆积形态。

3. 实验结果与分析

全面、客观地评估本文所设计的圆锥仿真算法在实际料堆模拟任务中的适用性与有效性，本研究在长江中游某大型散货港口进行了实地数据采集，获取了真实装船作业过程中的煤堆三维点云数据。由于实际工况的复杂性，煤堆形态存在显著差异：一方面，部分料堆是在空载船舱内直接形成的近似规则圆锥堆；另一方面，更为普遍的情况是，船舱内已存在一定量的残留煤堆，新一轮落料在其表面继续堆积，从而形成具有明显非规则特征的复合堆体。为充分验证简易圆锥法在不同装船场景下的泛化能力与形态

重构精度, 本文将基于该方法生成的模拟料堆与上述多种真实工况下的点云数据进行定量和定性对比分析, 从而全面评估算法在复杂环境中的建模表现。

3.1. 测试方案设计

测试为了全面评估圆锥仿真算法在不同工况下的建模精度与几何一致性, 本文采用两种对比手段对生成料堆与真实料堆进行评估。首先, 对两者的整体几何形态进行定量对比分析, 包括高度分布、体积变化和料堆轮廓差异等指标。其次, 引入交并比(Intersection over Union, IoU)指标对二者的空间重合程度进行量化评价。IoU 是常用的三维形状重建精度衡量指标, 其基本思想是将生成料堆和真实料堆分别表示为空间占据体(例如通过体素化得到的点云体素集合), 并计算两者在空间中的交集与并集的比例。其数学定义为:

$$\text{IoU} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

其中, A 表示由圆锥仿真算法生成的料堆占据体集合, B 表示真实料堆的占据体集合, $|A \cap B|$ 表示两者在空间上重叠的体素数, $|A \cup B|$ 表示两者的总体覆盖体素数。IoU 值越接近 1, 说明生成料堆与真实料堆在空间位置、体积和形态上的一致性越高; 反之则说明模型存在较大的偏差[4]。

3.2. 测试结果与分析

经对比与 IoU 定量评价可知, 圆锥顶角为 120 度时的生成结果较优。针对顶角分别取 110 度、120 度和 130 度的三组仿真结果, 采用体素分辨率为点云平均间距约 3 倍(平均间距 0.55 m, 体素大小 1.4 m)进行 IoU 计算, 得到的 IoU 值分别为 0.82、0.89 和 0.84。由此可见, 随着顶角从 110 度增大到 120 度, 生成模型与真实料堆的空间重合度显著提升; 当顶角继续增至 130 度时, IoU 开始下降。120 度对应的 IoU 最大, 表明在所用数据与测量精度下, 该项角能更好地再现实际料堆的几何轮廓和空间占据特性。基于上述结果, 建议在类似工况下优先选用圆锥顶角 120 度作为仿真与重构的参数基准。

图 1 展示了空载船舱中一次堆积的煤块, 通过圆锥算法生成的煤堆形态, 其中圆锥顶角为 120 度, 顶点距船舱底部约 3 m。该算法采用“由顶点向外推导圆锥表面”的策略, 当顶点高度接近实际煤堆几何中心时, 生成模型与真实料堆在整体轮廓上具有较高一致性。图 2 为同条件下实际堆积的煤堆形态。对比可见, 生成煤堆与真实煤堆在宏观形态上差异较小, 验证了圆锥仿真算法在料堆形态重构和仿真建模中的可行性与有效性, 并为后续的堆积行为分析提供了可靠依据。

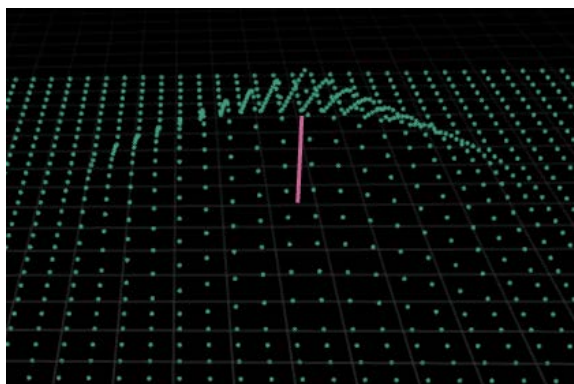


Figure 1. Coal pile morphology generated by the algorithm under a single accumulation condition

图 1. 在煤块一次堆积情况下算法生成的煤堆形态

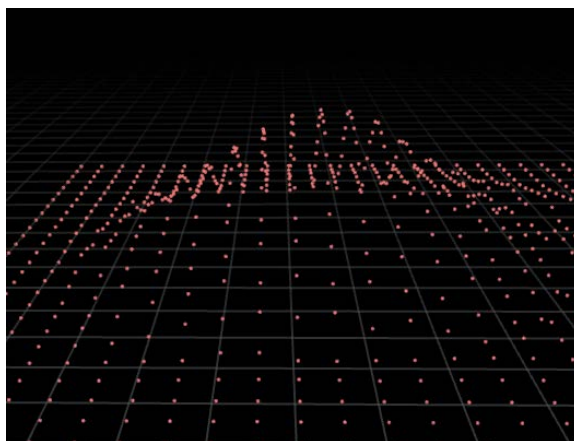


Figure 2. Actual coal pile morphology under a single accumulation condition

图 2. 在煤块一次堆积情况下真实煤堆形态

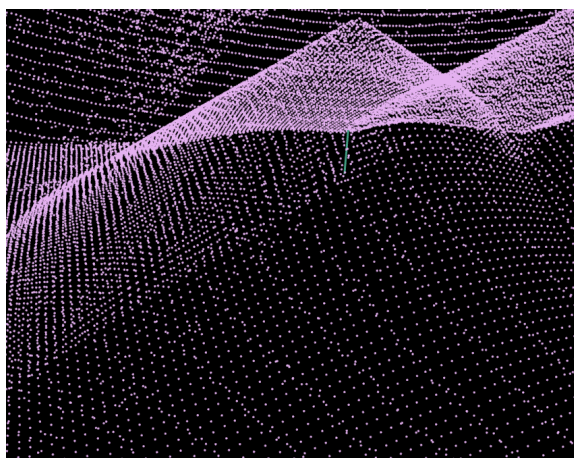


Figure 3. Morphology of the coal pile generated by the algorithm under secondary accumulation operating conditions

图 3. 在二次堆积工况下算法生成煤堆的形态

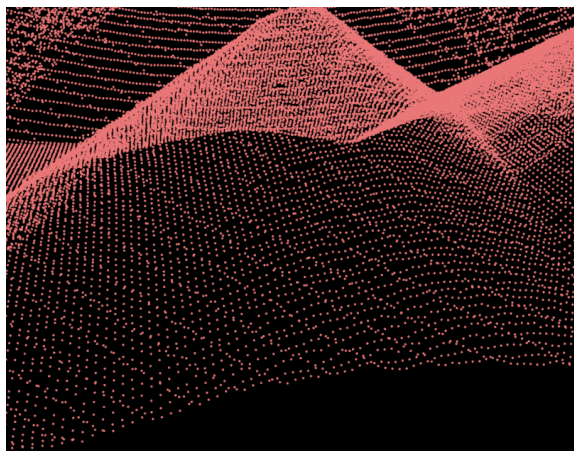


Figure 4. Actual coal pile morphology under secondary accumulation operating conditions

图 4. 在二次堆积工况下真实煤堆的形态

图3与图4展示了在船舱内已存在一定量残留煤堆的条件下,新增落料在其表面继续堆积形成的复合型煤堆形态。图3为基于圆锥仿真算法生成的模拟结果,图4为现场采集的真实煤堆点云。在这一实验场景中,我们同样采用了控制变量法,即通过调整生成煤堆的顶点高度,使其与真实煤堆的最大高度保持一致,以保证比较的公平性和一致性。从对比结果可以看出,即便在非理想的堆积环境下,生成煤堆在整体几何外形、轮廓趋势以及高度分布上均与真实煤堆高度一致,形态差异较小。该结果表明,圆锥仿真算法不仅在理想的初始堆积条件下具备良好的重构能力,在更为复杂的二次堆积工况下同样能够保持较高的形态拟合精度和几何一致性。

4. 讨论与展望

本文提出的圆锥仿真算法在煤堆形态建模与几何重构中表现出良好的几何一致性与较高的工程可行性,但仍存在一定的局限与改进空间。

单一圆锥模型的几何表达能力有限。该模型假设堆积过程近似轴对称,能够较好地反映整体堆体趋势,但难以准确描述实际装船环境中因溜筒摆动、舱壁约束或残余煤堆等因素引起的非对称、多峰或不规则堆积形态。当出现局部塌陷或堆高突变时,模型在边缘区域的拟合误差会明显增大,导致几何一致性下降。因此,现阶段算法更适用于整体形态重建,而非局部精细建模。

算法在实际部署中对感知精度与坐标配准准确度依赖较高。雷达点云受粉尘、遮挡或多路径干扰的影响,会导致投影误差与噪声累积;同时,传感器坐标系与船舱参考系之间若存在偏差,也可能引起堆体位置或高度误差。这些问题会削弱模型在复杂作业场景下的稳定性与可靠性,需要通过联合标定、滤波与误差补偿等手段加以修正。未来的改进方向主要包括模型结构与感知融合两方面。在模型层面,可采用复合圆锥或多段拟合形式,以增强对复杂堆体几何特征的适应性;同时引入自适应参数调整机制,使模型能够根据实时点云反馈动态修正顶角与姿态,提高重建精度。在感知层面,可融合激光雷达、深度相机与视觉重建等多源数据,提升点云密度与重构鲁棒性,并结合设备运动学约束实现几何建模与控制的闭环反馈。

总体而言,圆锥仿真算法为散料堆积的快速建模与几何分析提供了一种简洁、可扩展的思路。虽然在复杂工况下仍存在一定误差,但通过模型复合化与多源感知融合,其应用潜力有望进一步扩大,为无人化装船系统的智能感知与自动控制奠定基础。

5. 结论

综上所述,本文设计的圆锥仿真算法以圆锥几何模型为基础,将散料堆积过程转化为可参数化的几何建模问题,并通过点云投影、交点求解与逐步演化三个环节实现了料堆形态的几何重构。与元胞自动机、离散元法及连续介质法等传统方法相比,该算法在计算效率与模型简化程度之间取得了较为合理的平衡。实验结果表明,圆锥仿真算法能够在理想条件下重建出与实际煤堆高度及整体轮廓较为一致的几何模型;在存在残余堆体或二次堆积等复杂工况下,仍能保持较好的几何一致性与形态稳定性。具体而言,当圆锥顶角取120度时,生成模型与实际料堆的IoU达到0.89,验证了该方法在料堆形态重构中的有效性。总体来看,圆锥仿真算法为散料装船过程中的料堆几何建模与仿真分析提供了一种具备较好适应性的建模方案,对无人化装船系统的智能决策与控制策略研究具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 闫海龙. 干散货港口数字化堆场自动作业系统研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- [2] 贺俊吉, 史立. 散货自动装船检测系统[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 52-56+119.
- [3] 石崇, 徐卫亚, 张玉, 李德亮, 刘和. 基于元胞自动机模型的堆积体动力学参数研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1795-1800.
- [4] 赵文仓, 徐长凯, 王春鑫. 基于优化边界框回归的目标检测[J]. 高技术通讯, 2021, 31(7): 747-753