

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.013

露天爆破体三维边界的识别与重构研究*

王铭鑫¹, 王应明², 于永军³, 陈明¹, 卢文波¹, 曾凡杜³, 隗传旭¹

(1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072;

2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610051; 3. 中国水利水电第八工程局有限公司, 长沙 410004)

摘要: 针对三维数字化露天爆破设计中, 爆破体模型存在边界模糊、倒角过渡、形状不规则, 且边界确定严重依赖人工经验的问题, 基于爆破体自身的几何特征, 提出一种层次化的边界识别与重构框架: 首先采用多特征加权融合策略进行顶面识别, 综合考虑法向量朝上性、坡度、圆形度与水平度四个几何特征, 通过特征间的协同验证提升识别精度; 然后基于法向量一致性与空间连通性原理, 设计两阶段分离算法, 将侧面划分为轮廓面与自由面; 最终结合最小二乘法、Alpha Shape 算法与弧长参数化技术, 重构并优化定义了爆破体轮廓的坡顶线、坡底线等关键边界线。在上述研究基础上开发了边界识别系统, 实现了对三维爆破体模型的边界识别与重构。使用长峡矿区实际模型进行测试, 系统运行稳定, 识别效果良好, 与人工识别结果相比, 顶面识别面积误差为 1.70%, 空间重叠率达 98%, 坡顶线长度误差为 1.94%, 相对均方根误差为 0.56%, 验证了方法的有效性与工程适用性。本研究为露天爆破设计的数字化提供了新的技术支撑。

关键词: 露天爆破; 三维边界识别; 多特征加权融合; Alpha Shape 算法; 边界重构

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0129-09

Identification and Reconstruction of Three-dimensional Boundaries of Open-pit Blast Blocks

WANG Ming-xin¹, WANG Ying-ming², YU Yong-jun³, CHEN Ming¹,
LU Wen-bo¹, ZENG Fan-du³, WEI Chuan-xu¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China; 3. Sino-hydro Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: To address the issues of blurred boundaries, chamfered transitions, irregular geometries, and excessive dependence on empirical judgment in determining blast body model boundaries for 3D digital open-pit blasting design, this study proposes a tiered boundary identification and reconstruction methodology grounded in geometric feature analysis of the blast formations. Firstly, a multi-feature weighted fusion strategy was employed for top surface identification, systematically integrating four key geometric characteristics: normal vector orientation, slope gradient, circularity index, and horizontal alignment. This synergistic multi-criteria validation significantly improved detection

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-29

网络首发日期 (Published online): 2026-01-29

作者简介: 王铭鑫 (2003-), 男, 硕士生, 研究方向为智能爆破, (E-mail) 2380517714@qq.com。

通信作者: 陈明 (1977-), 男, 博士、教授, 主要从事工程爆破与岩石动力学研究, (E-mail) whuchm@whu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金 (雅砻江流域水电开发有限公司) 资助 (U24B20110)

About the author: WANG Ming-xin (2003-), male, master degree candidate, mainly engaged in intelligent blasting, (E-mail) 2380517714@qq.com.

Corresponding author: CHEN Ming (1977-), male, Ph. D, professor, mainly engaged in engineering blasting and rock dynamics research, (E-mail) whuchm@whu.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China Corporate Innovation and Development Joint Fund (Yalong River Hydropower Development Co., Ltd.) (U24B20110)

precision. Secondly, a two-stage segmentation algorithm incorporating normal-vector alignment principles and spatial connectivity analysis was developed to classify side surfaces as contour faces or free faces. Finally, through the combined application of least-squares fitting, the Alpha Shape algorithm, and arc-length parameterization techniques, critical profile boundaries, including the bench crest line and toe line of the blast body geometry, were accurately reconstructed and mathematically optimized. Based on the above research findings, a boundary recognition system was successfully developed to accurately identify and reconstruct a 3D blast model. Practical validation using operational models from the Changlai mining area demonstrated the system's stable performance and reliable recognition capabilities. Comparative analysis with manual identification demonstrated a 1.70% area deviation in top-surface recognition, 98% spatial overlap accuracy, a 1.94% bench-face line-length discrepancy, and a 0.56% relative root-mean-square error, confirming the method's reliability and practical viability. This study contributes novel technical solutions for advancing digital transformation in open-pit blasting design.

Key words: open-pit blasting; 3D boundary recognition; multi-feature weighted fusion; Alpha Shape algorithm; boundary reconstruction

在露天采矿、水电站边坡开挖等工程建设过程中,爆破作业是岩石破碎的关键环节。在进行露天台阶爆破设计时,传统爆破设计依赖人工经验确定爆破体边界,存在主观性强、效率低、一致性差等问题。随着计算机技术的飞速发展,爆破领域的数字化已成为现实^[1],研究一种能够识别三维爆破体特征边界方法,对爆破工程领域的数字化设计具有重要意义。

在三维地质与爆破模型构建方面,国内外学者已取得显著进展。Song Renbo 等提出了一种半自动的复杂地质体三维建模和可视化方法^[2],能够快速构建地层缺失、断层等地质结构复杂的地质体的三维模型;CHE Defu 等在采用加权克里金方法和断层建模方法来建立断层的几何结构及煤层的三维模型^[3];陈应显等以炮孔岩性数据为样本^[4],使用距离平方反比法对爆破区域范围内的实体单元进行插值,从而得到爆破岩体的三维实体模型;张云鹏等利用 ShapeMetrix3D 三维摄影测量系统获得三维地形资料并建立爆区三维模型^[5],可以准确再现爆区的地形地质条件;王根涛等将 GPS 收集到的三维坐标转化为可视三维立体地形^[6],进而方便后续的爆破设计;王洋等基于地质统计学原理^[7],根据矿区多年的勘探数据成果,利用 3Dmine 软件建立了三维立体模型;段玉贤等将等高线数据还原成点集^[8],按照 Delaunay 算法进行三角剖分得到三角网模型,还原各点高程便完成了地表三维模型的建立;施富强等使用三维激光扫描技术快速准确地获取物体表面点的三维坐标数据^[9],然后由点云构建出物体的立体模型;曾微波、李斯、刘一等利用无人机航测建模和倾斜摄影技术^[10-12],能够快速构建具有极强真实感的矿山地表及地物模型,方便开展相关研究。通过建立三维模型并用于爆破设计中,能够为爆破

设计提供一种科学化、规范化的三维可视化技术和方法^[13]。然而,现有研究多聚焦于爆区三维建模,对于在获得三维模型后,如何识别其边界条件以服务于爆破设计的研究仍较为缺乏。特别是在爆破体顶面凹凸不平、侧面边界模糊、存在倒角过渡等复杂情况下,边界识别仍严重依赖人工干预,制约了爆破设计的数字化进程。

针对上述问题,开发得到边界识别系统,提出一种层次化边界识别框架:(1)采用多特征加权融合方法识别三维爆破体模型的不规则顶面;(2)基于法向量一致性与空间连通性分离模型自由面与轮廓面;(3)通过 Alpha Shape 算法重构并均匀化得到特征边界线。该方法基于爆破体三维模型的几何特征,实现了边界的识别与重构,有助于提升爆破设计的数字化水平,为后续工程应用提供技术支持。

1 爆破体边界的类别

在爆破工程设计中,对爆破体几何形态的精确描述是确保爆破效果与施工安全的基础。根据边界的空间位置、形成机制及其几何维度,可将爆破体边界划分为边界面与边界线两大类,为后续的边界识别算法建立清晰的理论框架。

1.1 边界面

边界面是构成爆破体外表面的几何区域,包括以下四类:

(a) 顶面是爆破体与大气接触的上部界面,受地质构造、风化作用及前期开挖扰动的影响,常呈现不规则起伏、局部凹陷或凸起等复杂形态。

(b) 底面是爆破体与下部原岩或下一台阶的分界面,是一个由工程设计定义的、理想化的几何边界,拥有统一的法向量方向,在实际操作中,底面通常被设置为水平面。

(c) 轮廓面是爆破设计中人为规划形成的侧面,如预裂面、光爆面或最终边坡面,特征是高度的规整性,其表面在宏观上平坦,且面片法向量方向高度一致。

(d) 自由面是爆破工程中被爆介质与空气的交界面,它可以改善爆破的夹制作用从而使得爆破阻力大大降低^[14]。自由面的核心特征是其天然的不规则性,表面粗糙,曲率变化连续,不存在明确的几何规律。

1.2 边界线

边界线是不同特征界面之间相交形成的空间曲线,是爆破体几何形态的骨架,是不同特征区域的分割线。从几何构成上看,所有的界面两两相交,可产生多种交界线,但最重要的是以下两类:

(a) 坡顶线是顶面与轮廓面、自由面的交界线,位于爆破体顶部边缘。

(b) 坡底线是底面与轮廓面、自由面的交界线,位于爆破体底部边缘。

在露天台阶结构中,坡顶线与坡底线共同定义台阶坡面的范围,是爆破参数计算、钻孔定位和效果评估的关键依据,明确这两类边界线,对于爆破设计与施工具有重要意义。

2 爆破体边界识别算法

针对露天三维爆破体的边界由人工规则面与自然不规则面共同构成、边界模糊不清、形状凹凸不平的复杂性,本研究提出一种基于模型自身数据的由面到线、逐层细化的层次化识别框架,通过对现有成

熟技术的针对性组合与工程化定制,以实现爆破体边界识别,具体体现在三个方面:(1) 使用多特征融合识别顶面,充分考虑三维面片的四种几何特征,通过特征间的相互验证与补充,实现对不规则顶面的识别;(2) 设计了从法向量聚类到连通性约束的阶段分离算法,服务于轮廓面与自由面的二元分类需求;(3) 构建了平面拟合、Alpha Shape 算法提取、弧长参数化均匀优化的连续模式,将散乱复杂的边界点云重构为标准化边界线。

2.1 多特征融合的顶面识别算法

爆破体顶面往往呈现不规则形态:表面凹凸不平,存在局部起伏与凹陷,与侧面交界处缺乏明确分界线,常以倒角形式过渡。这种复杂性使得基于单一几何特征的识别方法难以奏效。为此,定义并综合考量法向量朝上性、坡度、圆形度、水平度、高度的多维几何特征,其中朝上性和水平度共同约束空间朝向,坡度和圆形度共同描述几何表面,用高度对面片进行筛选,与单一特征的识别方法相比,多维度综合考量能减少过识别、漏识别情况的发生,如图1所示。在边界识别系统中,参数权重基于对模型进行测试得到,也提供了实时调整的方法,以应对顶面不规则性带来的识别挑战,为后续爆破设计提供可靠的顶面边界信息。

相较于利用深度学习进行边界识别的技术,这种方法只基于模型自身的几何形状和模型特征,无需训练数据,方法透明且可解释性强,同时与人工识别相比,该方法具有识别效率高、结果唯一的优点。

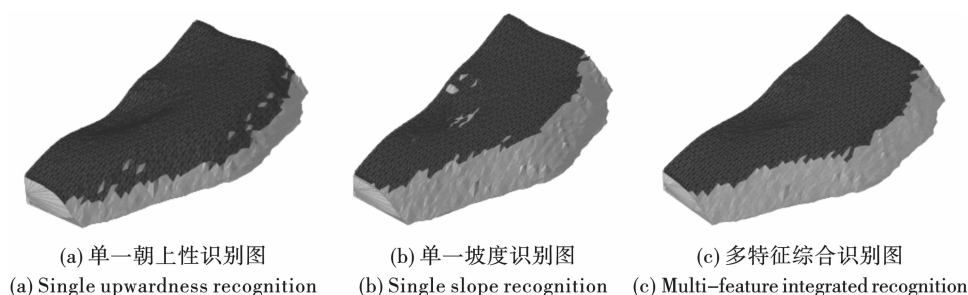


图1 识别效果对比图

Fig. 1 Comparison of recognition performance

2.1.1 朝上性

爆破体的三维模型是由极多的三角面片组成的,每个三角面片都具有表征其空间朝向的法向量,定义朝上性为面片法向量在垂直方向(Z 轴)上的投影分量,符号为 Δ ,其计算公式及其它参数的计算方法如表1所示。朝上性的值越大,表示法向量越

朝向正上方。朝上性特征是识别的主要权重,目的是解决空间朝向模糊问题,用于模型面片的基础筛选,以排除侧面。

2.1.2 坡度

坡度表征了面片相对于水平面的倾斜程度,定义符号为 φ 。可利用面片法向量的 Z 轴分量计算坡

度,坡度越小,表示面片越平坦,越水平。坡度特征将面片的倾斜程度转化为统一的评分标准,可以量

化局部倾斜,辅助验证,确认平坦程度。

表 1 特征参数计算表
Table 1 Calculation of feature parameters

特征参数 Feature parameter	计算公式 Formula	公式说明 Description
朝上性 Upwardness	$\Delta = n_z$	
坡度 Slope	$\theta = 1 - \frac{\arccos(n_z) \times 180}{\pi \times 90}$	n_z 为面片法向量的 Z 轴分量。
水平度 Horizontality	$\varphi = 1 - n_z $	
圆形度 Circularity	$\gamma = \frac{4\pi A}{P^2}$	A 是三角面片的面积, P 是面的周长。
归一化高度 Normalized height	$H = \left(\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 z_i - H_{\min} \right) / (H_{\max} - H_{\min})$	z_i 为三角面片第 i 个顶点的 Z 坐标值, $H_{\max}$ 为模型最高点 Z 坐标, $H_{\min}$ 为模型最低点 Z 坐标。

2.1.3 圆形度

圆形度是基于面积-周长关系计算面片与圆的接近程度的指标,定义符号为 γ 。在三角网格模型中,可采用圆形度指标来量化面片的平坦程度,圆形度值越大,说明面片越规则。在三维爆破体模型中,顶面通常由相对规则的面片构成,侧面面片则呈现更高的不规则性,如图 2 所示,应用圆形度特征可辅助区分规则顶面与不规则自由面。见图 3。

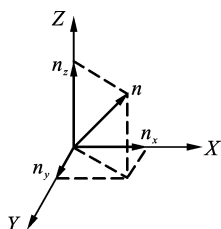


图 2 三维空间向量示意图
Fig. 2 Schematic of a 3D vector

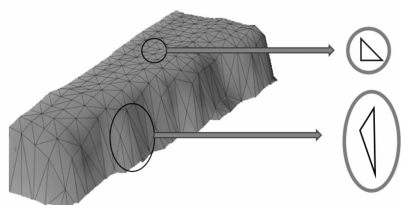


图 3 三维模型面片形状示意图
Fig. 3 Schematic of the patch shape in a 3D model

2.1.4 水平度

水平度用于量化面片法向量与水平方向的对齐程度,定义符号为 φ 。通过法向量垂直分量的绝对值来定义水平度指标,水平度的值越小,表示面片越水平。水平度特征的目的是精细化识别边界缓坡过渡。

2.1.5 归一化高度

顶面一定是位于模型的最高区域,为了提升顶面识别的准确性和计算效率,可以使用基于归一化高度的预筛选方法。通过计算面片顶点的平均高度得到其高度特征,归一化计算得到 H ,再设置高度阈值进行高度过滤,可在计算时只对设置的阈值的上部区域的面片进行顶面识别计算,防止受到底部和中部的面片的干扰,避免误识别,更符合顶部识别需求,同时高度过滤也能减少对面片进行识别时的计算量,提高算法运行效率。

对于大多数露天台阶爆破体,设置阈值 0.7 能有效保留顶面区域,同时过滤约 70% 的非顶面面片,提升计算效率并减少误识别。考虑到工程灵活性,边界识别系统中高度过滤阈值支持实时调整,例如当顶面存在局部凹陷时,凹陷区域高度可能低于阈值,此时可调整阈值以满足需求。

2.2 轮廓面与自由面的分离算法

在爆破体三维模型中,爆破体侧面由轮廓面和自由面两类面组成。基于两类面的不同几何特征,算法使用法向量聚类与连通性分析的层次化分离方法,通过多阶段特征分析与几何约束验证,实现轮廓面与自由面的准确识别和分离。

2.2.1 法向量导向的聚类

在三维离散网格模型中,每个三角面片的法向量都表征了其空间朝向。轮廓面作为人工切割形成的平面区域,其内部面片法向量具有高度一致性;而自由面作为自然曲面,面片法向量呈现连续变化特征。基于这一几何特性,算法采用法向量相似性作为初始聚类的依据。

空间法向量夹角的计算公式为

$$\theta_{ij} = \arccos\left(\frac{n_i \cdot n_j}{|n_i| \cdot |n_j|}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

式中: n_i 和 n_j 分别为面片 i 和面片 j 的单位法向量; θ_{ij} 为两法向量之间的夹角, ($^\circ$)。

聚类的目的是初步分离轮廓面与自由面, 基于轮廓面与自由面的几何特性差异, 设定角度阈值 $\theta_{\text{阈}} = 1^\circ$, 当 $\theta_{ij} < \theta_{\text{阈}}$ 时, 认为两个面片法向量相似, 归

属于同一聚类组, 这样可将法向量夹角相近, 尤其是呈现明显平面特性的轮廓面片从模型中初步分离出来。为提升算法效率, 采用按面片面积降序处理的策略, 优先保证大面积平面区域的完整识别。聚类过程如图4所示, 聚类分组中相同颜色的即是被聚类为同一组的三维面片。

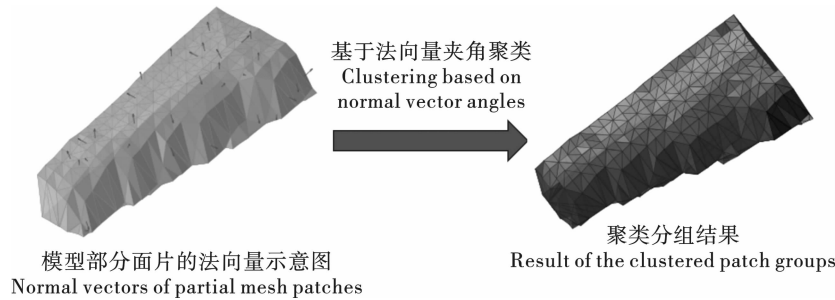


图4 基于法向量的初始聚类示意图

Fig. 4 Schematic of initial clustering based on normal vectors

2.2.2 连通性约束的区域生长

法向量聚类仅考虑了几何特征的相似性, 但同一区域还需满足空间连通性要求。为此, 在法向量聚类的基础上引入连通性约束的区域生长算法。以

每个法向量相似组为输入, 再基于网格的面邻接关系进行连通区域检测, 从组内任一未访问面片出发, 通过广度优先搜索算法遍历所有空间邻接且法向量相似的面片, 形成一个连通区域, 如图5所示。

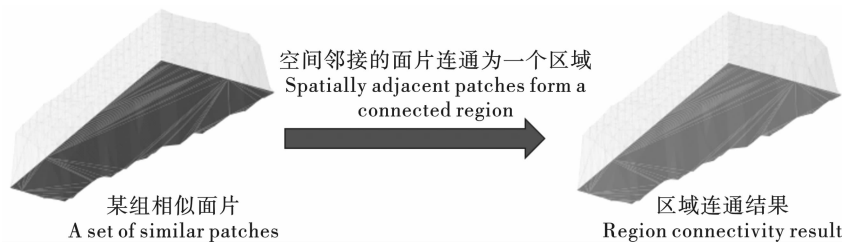


图5 基于连通性的区域生成示意图

Fig. 5 Schematic of region generation based on connectivity

2.2.3 基于侧面识别的交集分离

获得候选平面区域后, 算法首先识别爆破体的整体侧面集合。侧面定义为除已识别的顶面和底面外的所有面片, 其数学表达为

$$S_{\text{all}} = F_{\text{total}} - (F_{\text{top}} \cup F_{\text{bottom}}) \quad (2)$$

式中: S_{all} 为侧面集合; F_{total} 为模型所有面片集合; F_{top} 为顶面集合; F_{bottom} 为底面集合。

在此基础上, 定义非平面区域集合为模型所有面片与候选平面区域的差集, 其数学表达式为

$$F_{\text{free}} = S_{\text{all}} - F_{\text{plane}} \quad (3)$$

式中: F_{free} 为非平面区域集合; F_{plane} 为候选平面区域集合; F_{plane} 由上文两小节得到。

随后, 基于侧面进行轮廓面和自由面的精细化分类。轮廓面定义为侧面中的平面部分, 自由面定

义为侧面中的曲面部分。在前两步已得到侧面集合、非平面区域集合、后续平面区域集合, 将侧面集合分别与这两个集合求交集, 即可得到轮廓面和自由面的面片集合, 其数学表达为

$$C_1 = S_{\text{all}} \cap F_{\text{plane}} \quad (4)$$

$$C_2 = S_{\text{all}} \cap F_{\text{free}} \quad (5)$$

式中: C_1 为轮廓面集合; C_2 为自由面集合。

2.2.4 参数敏感性分析

为确保轮廓面识别算法参数选择的合理性与鲁棒性, 对法向量夹角阈值进行敏感性分析, 取一示例模型为测试对象, 令角度阈值 θ 在 0.5° 至 4.0° 范围内变化, 测试7个不同取值, 得到的分析结果如表2所示。

表 2 敏感性分析结果表

Table 2 Results of sensitivity analysis

角度 Angle $\theta/^\circ$	聚类组数 Number of clusters	轮廓面数 Number of contour faces	轮廓面面积 Area of contour faces/ m^2
0.50	860	232	1136.033
1.08	550	232	1136.033
1.67	384	233	1137.245
2.25	278	233	1137.245
2.83	213	234	1138.456
3.42	171	234	1138.456
4.00	142	234	1138.456

分析数据可知,当 θ 从 0.5° 增大至 4.0° 时,识别的轮廓面面积变化率为 0.21% ,轮廓面数量变化幅度 0.86% ,表明算法计算稳定,同时聚类组数单调递减,符合理论预期。本研究设置 1° 为阈值,相较更小的阈值能减少过多的聚类组数,提升计算效率,同时保留一定聚类组,为识别留有充分余量。

2.3 边界线的重构与优化

在工程实践中,坡顶线与坡底线不仅定义了爆破体的上下边界,更是后续爆破参数设计与施工控制的重要依据。为得到三维爆破体的边界线,算法使用一种基于投影拟合与弧长参数化的边界线重构方法,通过平面投影、Alpha Shape 重构、均匀优化三个阶段,实现边界线的高精度重建与优化。

2.3.1 平面投影与边界线重构

爆破体顶面与底面往往由大量三角面片组成,其边界点云分布散乱、密度不均,以顶部识别为例,其边界点云如图 6 所示。为重构连续的边界线,首先采用最小二乘法,求解得到投影误差最小的平面方程

$$Ax + By + Cz = 0 \quad (6)$$

式中: A 、 B 、 C 是平面的法向量; D 是常数项。

顶部面片的所有顶点会被投影到拟合平面上,再使用 Alpha Shape 算法重构边界点和边界线。Alpha Shape 算法是一种从离散空间点击重建二维或三维边界的方法^[15]。该算法处理数据时速度快、精度高,能够检测凹多边形和凸多边形^[16]。Alpha Shape 算法需要找到一个合适的 Alpha 值,让边界既能贴合点集,又不至于复杂。对 Alpha 的取值采用基于点集密度的自适应算法,对于点集中的每个点 p_i ,计算得到其到最近邻点的距离 d_i ,将 α 值设为平均最近邻距离的 3 倍,使 α 值能随点密度自适应调整,具体计算公式如下

$$\alpha = \min \left[\max \left(3 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i, 0.2 \right), 15 \right] \quad (7)$$

以示范模型为例,将其顶部顶点投影到虚拟平面后,会得到一个平面点集,该点集的边界如图 7 所示。将二维边界映射到拟合的虚拟平面的上,就可以得到顶面的三维拟合边界线,即拟合坡顶线,如图 8 所示。

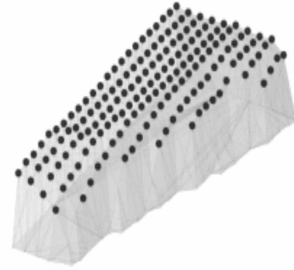


图 6 顶部表面点云示意图

Fig. 6 Schematic of the top surface point cloud

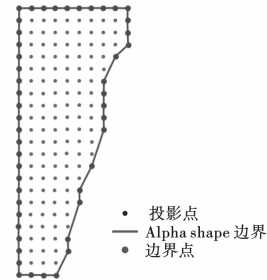


图 7 平面边界示意图

Fig. 7 Schematic diagram of planar boundary

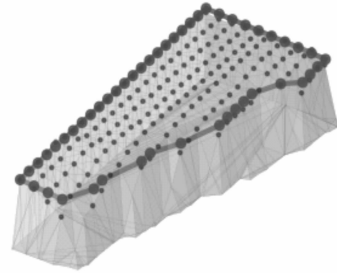


图 8 三维坡顶线重构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of 3D bench face reconstruction

2.3.2 弧长参数化与均匀优化

初始边界虽然能反映爆破体大致轮廓,但其顶点数量有限且分布不均,难以精确描述复杂几何形状。为此,使用弧长参数化均匀优化算法,通过对边界线重新采样,可以生成分布均匀且密度可控的边界点序列。

设边界多边形点序列为 $P_{close} = [p_0, p_1, \dots, p_{n-1}, p_0]$, 计算相邻点之间的欧氏距离并累加,得到累计弧长 S , 公式为

$$S = \sum_{i=1}^{m-1} \|p_{i+1} - p_i\| \quad (8)$$

设定目标采样点数 N , 在区间 $[0, S)$ 上均匀生成 N 个采样位置 t_k 。对于每个 t_k , 通过线性搜索确定其所在边界段 $[p_i, p_{i+1}]$, 并采用线性插值计算其三维坐标, 公式为

$$p(t_k) = p_i + \frac{t_k - s_i}{s_{i+1} - s_i}(p_{i+1} - p_i) \quad (9)$$

式中, s_i 为点 p_i 对应的累计弧长。

该采样方法保证了边界点集的均匀分布特性, 在保证精度的同时具有较高的计算效率, 最终采样均匀优化效果如图 9 所示。采样密度参数 N 可根据边界复杂度和工程精度要求进行灵活调整。

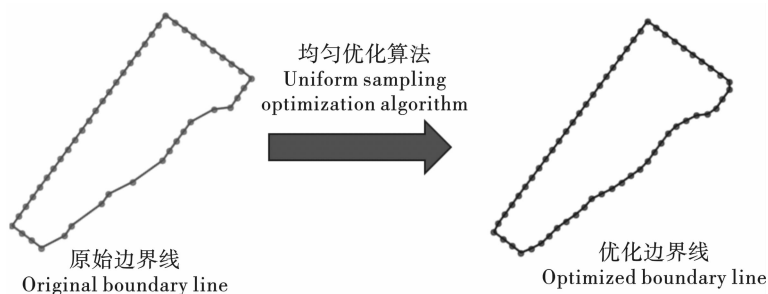


图 9 边界线均匀优化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of uniform optimization for boundary lines

3 边界识别系统研发

3.1 系统简介

使用 Python 语言开发得到爆破体边界识别系统, 系统算法流程如图 10 所示, 具体流程为: (1) 算

法开始, 导入准备好的三维爆破体模型; (2) 设置顶部识别权重参数, 对模型进行顶面识别; (3) 对模型进行底面识别; (4) 设置轮廓面识别参数, 识别模型轮廓面和自由面; (5) 设置边界线拟合参数, 重构优化边界线。

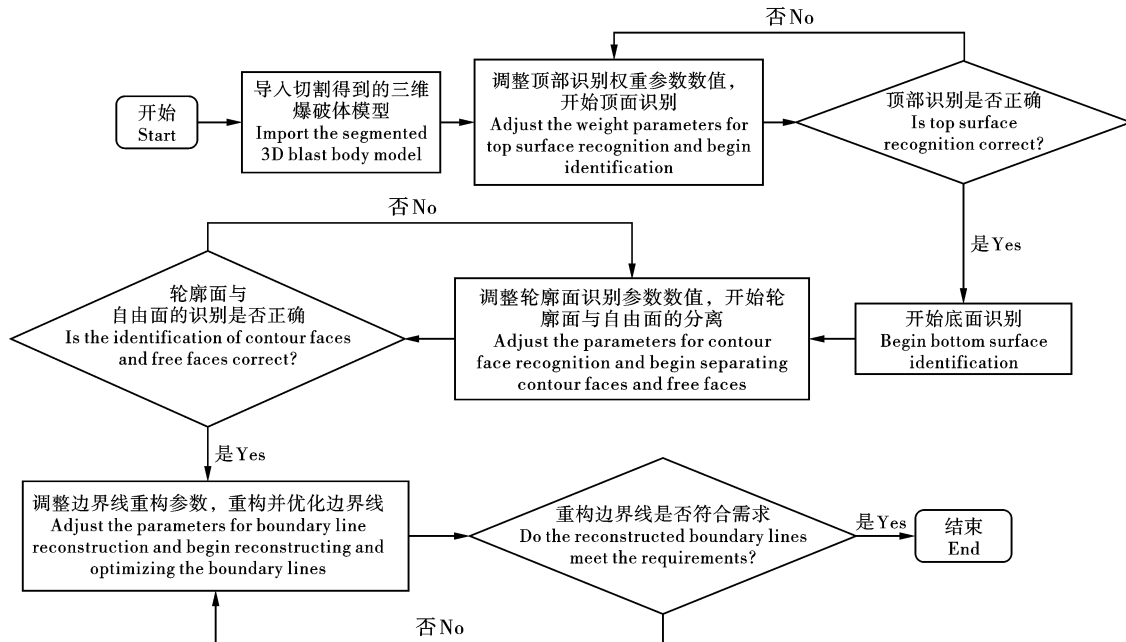


图 10 算法流程图

Fig. 10 Algorithm flowchart

3.2 应用实例

中电建长峡矿区位于湖北省黄冈市浠水县清泉镇马畈村、袁畈村及兰溪镇周边。2024 年 4 月, 原卧龙庵矿区与相邻的马畈矿区合并为“卧龙庵—马畈矿区”, 主要为高品质建筑用花岗岩、片麻

岩, 矿体品质达 I ~ II 级, 平均饱和抗压强度大于 120 MPa。

为验证系统的可行性, 取长峡矿区开挖过程中通过倾斜摄影技术得到的周边山体模型, 如并从模型中切割出台阶爆破体进行边界识别, 以验证系统

的运行效果,如图 11 所示。

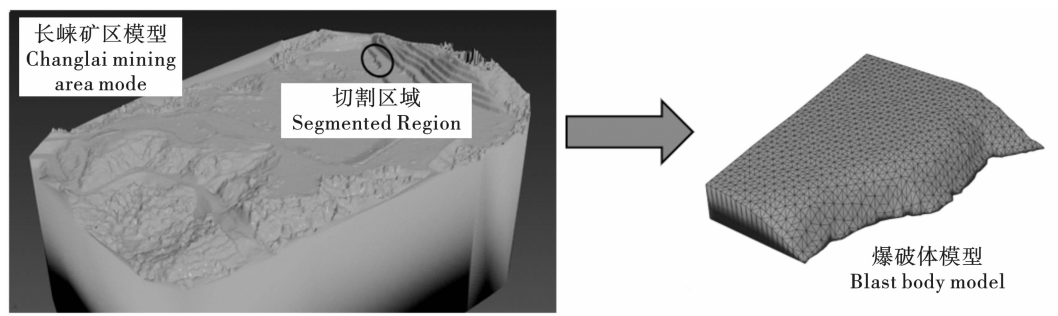


图 11 长崮矿区表面模型及切割爆破体模型示意图

Fig. 11 Schematic of the surface model and segmented blast models of the Changlai mining area

截取爆破体时使用了三个侧边竖直平面与底部平面,模型顶部较为平整,侧面坡度变化较大,顶面与侧面以平缓倒角形式连接,与理想爆破体相差较

大,因此认为爆破体具有示范意义。将模型导入程序后,依次识别顶面、底面、轮廓面、自由面,并重构坡顶线、坡底线,得到如图 12 所示结果。

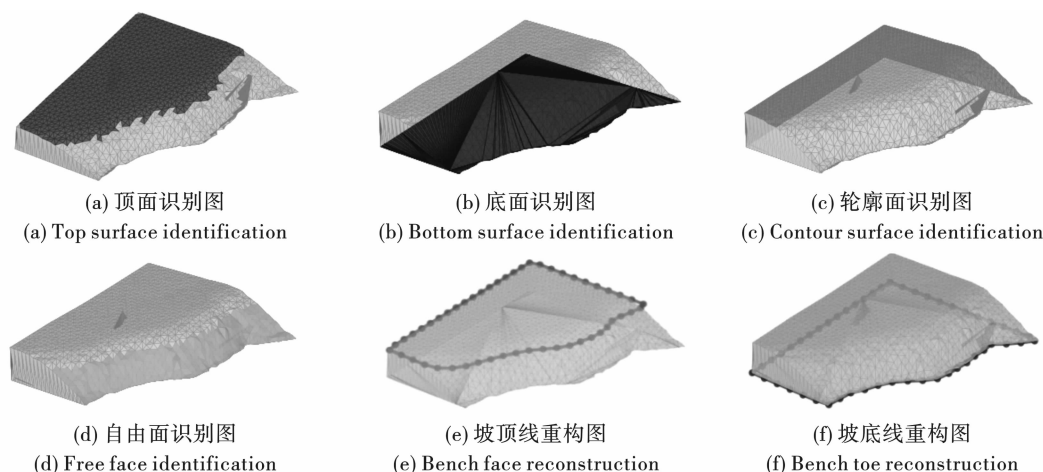


图 12 系统运行结果图

Fig. 12 System operation results

为验证识别准确性,对该模型进行人工识别,如图 13 所示,考虑到顶面对爆破设计的重要性,主要对比顶面识别和坡顶线的相关数据,得到表 3 结果。经过数据分析,与人工标记的顶面相比,系统识别的顶面表面积误差为 1.70%,顶面空间重叠率为 98%,坡顶线长度误差为 1.94%,坡顶线相对均方根误差为 0.56%,因此认为系统识别效果良好,可用于辅助爆破设计工作。

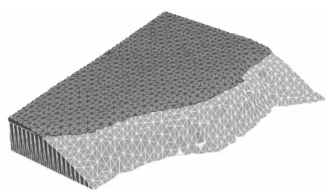


图 13 人工识别顶面图

Fig. 13 Manual top surface recognition

表 3 数据对比表
Table 3 Data comparison

对比数据 Comparison metric	数值 Value
顶面表面积误差 Top surface area error	1.70%
顶面空间重叠率 Top surface spatial overlap rate	98%
坡顶线长度误差 Bench face line length error	1.94%
坡顶线相对均方根误差 Relative root mean square error of the bench face line	0.56%

4 结论

针对三维爆破体边界识别过度依赖人工经验的

问题,研发了一种基于三维模型的爆破体边界识别系统,利用长嵯矿区的地形地表模型进行工程应用,结果表明,系统表现良好,有利于爆破设计工作的开展,得到的结论如下:

(1) 研究了爆破体三维模型的数字处理方法,根据三维模型的点、线、面数据,通过多特征加权融合方法有效解决了爆破体顶面因凹凸不平与倒角过渡导致的边界模糊识别难题,利用法向量聚类与连通性分析实现了轮廓面和自由面的自动识别分离。

(2) 形成了基于最小二乘法、Alpha Shape 算法与弧长参数化的边界线重构与优化流程,所获得的坡顶线、坡底线等关键边界精度高、点序均匀,可服务于爆破参数设计。

(3) 基于提出的边界识别框架,实现了爆破体边界识别系统的开发,并在长嵯矿区山体模型中截取爆破体模型以测试算法的可行性。测试结果表明,系统识别结果与人工识别结果误差较小,顶面识别面积误差为 1.70%,坡顶线长度误差为 1.94%,具有较高的识别精度。

当前算法在长嵯矿区的典型爆破体上验证有效,但其在复杂多变地质条件下的泛化能力仍有待进一步验证,部分识别参数仍依赖人工经验设定,尚未实现自适应优化。后续研究的重点在于研发基于模型特征的自适应参数优化方法,减少人工干预,提高系统的智能化水平与工程适用性。

参考文献 (References)

- [1] 费鸿禄,郭连军. 爆破施工的数字化[J]. 爆破,2015,32(3):31-39.
- [1] FEI Hong-lu, GUO Lian-jun. Digitization of blasting construction[J]. Blasting, 2015, 32(3): 31-39. (in Chinese)
- [2] SONG Ren-bo, QIN Xiao-qian, TAO Ye-qing, et al. A semi-automatic method for 3D modeling and visualizing complex geological bodies[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(3): 1371-1383.
- [3] CHE De-fu, JIA Qing-ren. Three-dimensional geological modeling of coal seams using weighted Kriging method and multi-source data[J]. IEEE Access, 2019(7): 1.
- [4] 陈应显,王鹏飞. 基于智能岩性识别的爆破岩体三维实体模型建立[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(4): 92-97.
- [4] CHEN Ying-xian, WANG Peng-fei. Establishment of a 3D solid model blasting rock mass based on intelligent lithology identification[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(4): 92-97. (in Chinese)
- [5] 张云鹏,张玲,武旭. 三维摄影测量用于露天深孔爆破设计初探[J]. 爆破, 2014, 31(4): 68-71, 91.
- [5] ZHANG Yun-peng, ZHANG Ling, WU Xu. Open deep-hole blasting design by three-dimensional photogrammetry[J]. Blasting, 2014, 31(4): 68-71, 91. (in Chinese)
- [6] 王根涛,何成龙,杨军,等. 三维空间模型的露天台阶爆破专家系统及应用[J]. 黑龙江科技大学学报, 2014, 24(5): 534-538.
- [6] WANG Gen-tao, HE Cheng-long, YANG Jun, et al. Development and application of open-pit bench blasting expert system based on three-dimensional model[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2014, 24(5): 534-538. (in Chinese)
- [7] 王洋,杨建文,董京浩,等. 基于地质统计的矿体三维建模及采矿应用[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(1): 17-22.
- [7] WANG Yang, YANG Jian-wen, DONG Jing-hao, et al. 3D modeling and mining application of orebody based on geological statistics[J]. China Mine Engineering, 2022, 51(1): 17-22. (in Chinese)
- [8] 段玉贤,李发本. 基于三维模型的露天矿台阶爆破设计及其应用[J]. 现代矿业, 2011, 27(8): 10-12, 25.
- [8] DUAN Yu-xian, LI Faben. Open-pit mine bench blasting design and the application based on three-dimensional model[J]. Modern Mining, 2011, 27(8): 10-12, 25. (in Chinese)
- [9] 施富强,廖学燕,裴尼松,等. 基于三维激光扫描技术的爆破对象数字化研究[J]. 爆破, 2015, 32(3): 45-48.
- [9] SHI Fu-qiang, LIAO Xue-yan, PEI Ni-song, et al. Study on digitalization of blasting object based on 3D laser scanning technology[J]. Blasting, 2015, 32(3): 45-48. (in Chinese)
- [10] 曾微波,童矿,江岭. 基于倾斜摄影与BIM的矿山实景建模方法研究[J]. 金属矿山, 2019(10): 172-177.
- [10] ZENG Wei-bo, TONG Kuang, JIANG Ling. Research on mine real scene modeling method based on oblique photography and BIM[J]. Metal Mine, 2019(10): 172-177. (in Chinese)
- [11] 李斯,杨自安,李冬月,等. 基于无人机倾斜摄影三维建模技术的赤马山铜矿地质环境调查及评价[J]. 地质与勘探, 2023, 59(6): 1271-1281.
- [11] LI Si, YANG Zi-an, LI Dong-yue, et al. Geological environment investigation and evaluation of the Chimashan copper deposit based on 3D modeling technology of UAV tilt photography[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(6): 1271-1281. (in Chinese)