

三维巷道模型空间交汇自动分割与连接

陈应显, 李星华*, 徐梦飞, 王璞, 周涛

辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000



摘要:在矿山智能化建设中,三维巷道模型的快速、精确和自动生成是迫切需要解决的难题之一,由于巷道空间复杂交错,如何实现三维巷道模型空间交汇自动分割与连接是解决这一难题的关键。在分析巷道模型空间交汇方式的基础上,提出了一种空间交汇巷道自动分割连接方法。该方法基于分层处理框架,通过粗筛阶段、精修阶段与容错阶段的协同优化,实现了“粗筛—精修—容错”一体化处理,显著提升了三维巷道模型空间交汇处处理的稳定性与效率。首先通过AABB相交检测快速筛选潜在相交的巷道三角面,并对包围盒相交的三角面进行精确求交运算;然后将闭合交线分别加入到巷道三角面网中,基于约束Delaunay剖分对相交区域进行局部拓扑重建,利用相交多边形将巷道三角面网分割为多个子区域;完成分割之后,确定在原始三角面网内部的子三角面网,并将其删除;最终将剩余的三角面网组合形成新的巷道网格结构,实现巷道空间交汇处的完全贯通。以某矿的巷道为例,运用该方法成功实现了巷道空间交汇处的自动分割与连接,交线闭合度达100%,拓扑错误率低于2%,验证了该方法在复杂三维巷道自动建模中的有效性。

关键词:三维巷道;空间交汇;自动分割连接;协同优化;Delaunay准则;相交多边形

中图分类号:TD803 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0900-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.351
引用格式:陈应显,李星华,徐梦飞,等.三维巷道模型空间交汇自动分割与连接[J].黄金科学技术,2025,33(4):900-910.
CHEN Yingxian, LI Xinghua, XU Mengfei, et al. Automatic Segmentation and Connection of Spatial Intersections of 3D Road-way Model[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 900-910.

作为我国重要的资源产业,金属矿和非金属矿的安全与高效生产始终备受关注。随着信息技术和智能化设备的快速发展,矿山行业正在全面推进数字化矿山建设,不断提升生产安全水平与运营效率(王金华等,2016;李彩琴,2021;王国法等,2024)。在数字化矿山建设中,矿山井巷的三维可视化展示一直是研究的重点(Jin et al, 2011; Cheng, 2021),如何快速、精确地构建出矿山三维巷道模型,是井巷三维可视化的依据,也是构建数字化矿山的重要基础(Ren et al, 2017; 张帆等, 2020; 李杰林等, 2021;

Zhang et al, 2022; Ren, 2023)。矿山三维巷道模型对井下空间进行三维展示,有利于矿井施工设计方案的调整优化,为矿业生产和环境保护提供依据,便于采矿作业的顺利开展(Wang et al, 2019; 祝斐, 2023)。

近年来,诸多学者在三维巷道模型构建方面开展了深入研究。在建模方法上,组件式建模(贾庆人等, 2020)、分层建模(彭少坤等, 2022)和动态建模(李昀等, 2017; 王彬等, 2020)等不断发展,有效提升了巷道模型的构建效率。在建模技术上,周智

收稿日期:2024-11-06;修订日期:2025-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目“露天矿山全生命周期智能开采规划设计方法研究”(编号:52374123)、“露天煤矿含软弱夹层边坡滑坡启动机制研究”(编号:52204135)、辽宁省教育厅基本科研项目“露天矿山滑坡地质灾害精准防控技术”(编号:LJ222410147010)和辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院校地科技合作培育项目(编号:YJY-XD-2024-B-008)联合资助

作者简介:陈应显(1975—),男,四川中江人,副教授,从事露天开采理论、技术和数字矿山研究工作。E-mail: lntueyx@163.com

*通信作者:李星华(2000—),女,山西大同人,硕士研究生,从事数字矿山和三维地质建模研究工作。E-mail: li1357786280@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

勇等(2010)提出了基于矿山测量数据的巷道生成算法,Chen et al(2013)利用MATLAB建立了巷道三维模型,三维激光扫描技术的应用显著提升了复杂巷道的几何还原度(Guo et al, 2016; 赵小平, 2016; 王海军等, 2022),但点云数据的处理效率与拓扑重建精度之间的矛盾仍未完全解决。此外,针对三维巷道模型中常见的空间交汇难题,学者们提出了多种连接与优化策略,如六元组统一断面形状法(王红娟等, 2021)、布尔运算及其改进算法(刘雄等, 2021; 李梅等, 2022; 李明崑等, 2023)、空间分解策略(张志武等, 2016)、双层包围盒检测方法(王翀等, 2015)和基于中心线的拓扑建模方法(刘冰等, 2024),提升了空间交汇区域的几何表达能力。然而,现有方法在应对复杂空间交汇结构时,仍存在处理效率较低、拓扑关系构建不稳定等问题,难以满足高精度、自动化建模的实际需求。

目前,巷道三维建模研究在普通巷道空间的无缝连接方面已取得一定成果,但在处理复杂巷道系统的交叉点与交岔点时仍面临显著挑战。现有方法普遍存在人工干预依赖性强、几何容差适应性不足和建模稳定性差等问题,特别是在竖井多交叉口等复杂拓扑结构的建模中,其适用性和可靠性仍有待提升。为此,本文提出空间交汇巷道自动分割连接方法,采用分层处理框架实现“粗筛—精修—容错”一体化处理,完成巷道空间交汇处快速自动分割与无缝连接,为快速准确建立三维巷道模型提供了新的解决方案。

1 空间交汇巷道自动分割连接方法

1.1 三维巷道模型空间交汇分类

巷道的空间交汇包括巷道交叉和巷道交岔。巷道交叉是指2条或多条巷道在某个点相遇并穿过对方,如图1(a)所示。此情形不仅包含处于同一平面内的巷道交叉,还涉及立井与巷道等不同平面之间的交叉状况。巷道交岔是指一条巷道分成2条或多条巷道,或多条巷道汇合成一条巷道(宫文博, 2015),如图1(b)所示。柱墙式交岔点和穿尖交岔点是三维巷道的2种常见交岔形式。柱墙式交岔点,又称“牛鼻子”岔岔,该交岔点的两巷道相交部分共同形成一个渐变跨度的大断面。穿尖交岔点在

巷道网络中表现为2条巷道自然相交,且相交部分保持各自的巷道断面(刘笑笑等, 2017),如图1(c)所示。

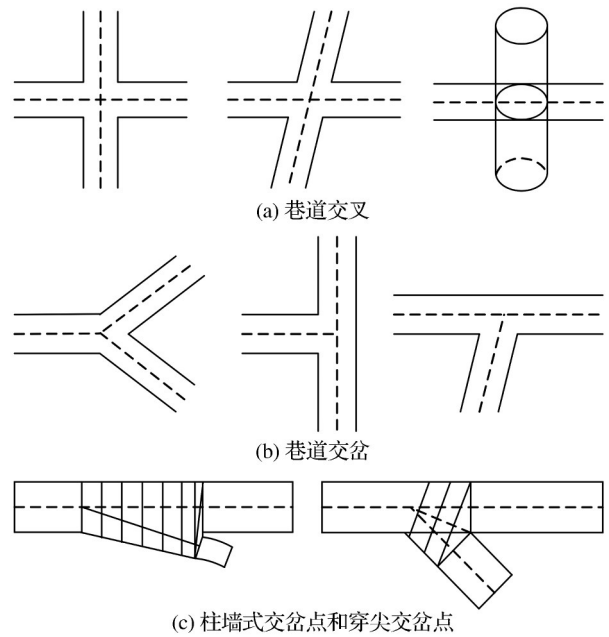


图1 巷道空间交汇分类

Fig. 1 Classification of roadway space intersection

1.2 井筒和平巷交叉点处的分割与连接

空间交汇巷道自动分割连接方法基于“粗筛—精修—容错”分层处理框架,通过AABB预筛选、约束Delaunay剖分与容差机制的协同优化,实现了复杂巷道空间交汇处的全自动处理。技术路线如图2所示。首先输入不同巷道的三角面网格模型并进行预处理;随后通过AABB预筛选快速排除非相交区域,仅对包围盒相交的三角面进行精确求交运算,生成闭合交线后分别加入到巷道三角面网中;基于约束Delaunay剖分对相交区域进行局部拓扑重建,利用相交多边形将巷道三角面网分割为多个子区域;判断三角形是否位于封闭巷道网格内部,通过容差机制修正浮点误差导致的误判,删除原始巷道三角面网内部的子三角面网,并将剩余三角面网进行组合;最终,通过对组合网格进行拓扑修复和数据优化处理,生成表面平滑、结构完整的三维巷道模型。该模型实现了巷道间的无缝衔接,有效避免了穿模、漏面等几何缺陷,满足高精度建模要求。

以井筒和平巷这两类相交井巷的分割和连接

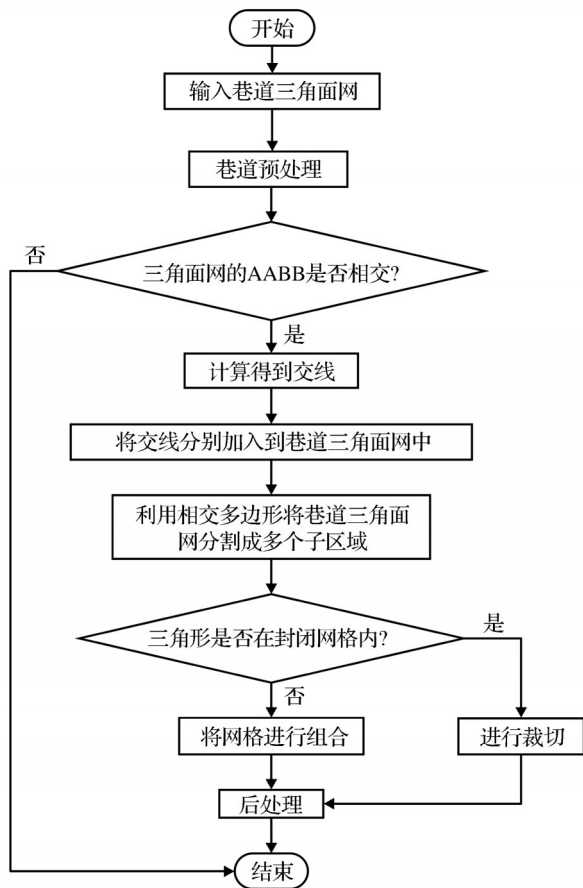


图2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

方法为例对方法进行详细描述。设井筒和平巷的封闭三角面网格集分别为 $A = \{t_{A_i} = \{v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}\} | i = 1, 2, \dots, n\}$, $B = \{t_{B_j} = \{v_{j1}, v_{j2}, v_{j3}\} | j = 1, 2, \dots, n\}$, 其中 t_{A_i} 和 t_{B_j} 分别表示井巷三角网 A 和 B 中的三角形, v_{i1}, v_{i2}, v_{i3} 和 v_{j1}, v_{j2}, v_{j3} 分别表示三角形 t_{A_i} 和三角形 t_{B_j} 的顶点坐标。

首先,对井筒 A 和平巷 B 进行预处理,确保两部分井巷三角网数据均已正确加载,并且坐标系统一致。若两部分井巷三角网数据在不同的投影坐标系下,需要进行投影转换以确保二者在同一空间参考下进行比较,处理后的井筒 A 和平巷 B 如图 3(a) 所示。

在精确计算三角面网 A 和 B 之间的交线之前,首先检查三角面网 A 和 B 的轴对齐包围盒 (AABB) 是否相交(关立文等, 2017; 孙敬荣等, 2018), 若二者的 AABB 不相交,那么相应的三角面网一定不相交,可以直接跳过计算,减少三角面求交计算的次

数。对于井巷三角面网 A 和 B ,包围盒的条件是:

$$AABB_A = [x_{\min}^A, x_{\max}^A] \times [y_{\min}^A, y_{\max}^A] \times [z_{\min}^A, z_{\max}^A] \quad (1)$$

$$AABB_B = [x_{\min}^B, x_{\max}^B] \times [y_{\min}^B, y_{\max}^B] \times [z_{\min}^B, z_{\max}^B] \quad (2)$$

式中: $[x_{\min}^A, x_{\max}^A]$, $[y_{\min}^A, y_{\max}^A]$, $[z_{\min}^A, z_{\max}^A]$ 分别表示 $AABB_A$ 的 x, y, z 范围,同理 $[x_{\min}^B, x_{\max}^B]$, $[y_{\min}^B, y_{\max}^B]$, $[z_{\min}^B, z_{\max}^B]$ 分别表示 $AABB_B$ 的 x, y, z 范围。若 $AABB_A \cap AABB_B \neq \emptyset$, 则 2 个三角面网相交,进而井巷三角面网 A 和 B 相交。

然后,通过三角面求交得到井筒 A 和平巷 B 的交线,根据交线的空间关系,建立交线顶点集 V_i 和闭合多边形集 Q_{inter} 。如图 3(b) 所示,图中红色线条为交线,右上角为沿图 3(b) 中虚线所在面切割所得的相交井巷内部。分别以交线为约束边按 Delaunay 准则(毛文山等, 2020)生成三角形并分别加入到 2 个井巷三角面网 A 和 B 中,实现拓扑一致,如图 3(c) 所示,得到新的井巷顶点集,即, $V_A = V_A \cup V_i$, $V_B = V_B \cup V_i$ 。

由闭合多边形集 Q_{inter} 分割原始井巷三角面网 A 和 B ,分割后的井巷三角面网分别表示为 A' 和 B' :

$$A' = \text{Split}(A, Q_{\text{inter}}) = \{A_1, A_2, A_3\} \quad (3)$$

$$B' = \text{Split}(B, Q_{\text{inter}}) = \{B_1, B_2, B_3\} \quad (4)$$

式中: $A' = \{A_1, A_2, A_3\}$, $B' = \{B_1, B_2, B_3\}$, 分别为井巷 A 和 B 分割后生成的子网格集合。

如图 3(d) 所示, A 被相交多边形分割成 3 个独立的网格面,即 A_1, A_2 和 A_3 ; B 被相交多边形分割成 3 个独立的网格面,即 B_1, B_2 和 B_3 。

完成分割之后,确定在原始三角面网 A 和 B 内部的子三角面网,并将其删除,通过容差机制修正浮点误差导致的误判,实现三角面网裁切。具体步骤如下:

(1) 在 A' 选一个点作为测试点,这里选择 A' 中的某个三角形 $t_{A'_i}$ 的重心作为测试点 P_k :

$$P_k = \frac{v_{k1} + v_{k2} + v_{k3}}{3}, v_{k1}, v_{k2}, v_{k3} \in t_{A'_i} \quad (5)$$

(2) 从测试点 P_k 向 B' 发出射线,方向向量 \vec{D} 通过随机扰动策略生成。在 B' 上找到与 P_k 距离最近的三角形 $t_{B'_m}$, 其中 $t_{B'_m} = \{v_{m1}, v_{m2}, v_{m3}\}$ 。

(3) 计算此三角形 $t_{B'_m}$ 的法向量 $\vec{N}_{t_{B'_m}}$ 与射线方向向量 \vec{D} 的点积 F , 其中:

$$\vec{N}_{t'_m} = (v_{m2} - v_{m1}) \times (v_{m3} - v_{m1}) \quad (6)$$

$$F = \vec{D} \cdot \vec{N}_{t'_m} \quad (7)$$

若 $F > \varepsilon$ ($\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$), 则点 P_k 位于封闭井巷网格内部(花卫华等, 2006), 确定 $t_{A'_i}$ 所在的三角面网位于封闭井巷网格内部, 删除相应的三角面网; 若 $F < \varepsilon$ ($\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$), 则 $t_{A'_i}$ 所在的三角面网位于封闭井巷网格外部; 若 $|F| \leq \varepsilon$, 进入容差修正流程, 对该边界区域采用蒙特卡洛采样修正策略。当遍历完 A' 中的三角面网以后, 再选取 B' 中某个三角形的重心作为测试点 P'_k , 同理, 判断 P'_k 是否位于封闭井巷网格内部, 删除封闭井巷网格内部的三角面网。

井巷 A' 和 B' 经过裁切后的网格分别为 A'' 和 B'' ,

将裁切后的网格组合成新的网格结构 T_{new} :

$$T_{new} = A'' \cup B'' \quad (8)$$

对于井筒 A 和平巷 B , A_2 位于封闭井巷 B 内部, B_1 和 B_3 位于封闭井巷 A 内部, 因此删除 A_2 、 B_1 和 B_3 。图 3(e) 蓝色部分表示裁切掉的部分。 $A'' = \{A_1, A_3\}$, $B'' = \{B_2\}$, 组合后形成的新的网格结构 $T_{new} = \{A_1, A_3, B_2\}$, 组合后的井巷如图 3(f) 所示, 右上角为沿图 3(f) 中虚线所在面切割所得相交井巷内部。最后, 进行井巷拓扑关系修复和数据优化(刘平一等, 2015; 黄明等, 2019)。裁切后可能会破坏原有井巷的拓扑关系, 如邻接关系和边界关系等, 需要进行修复, 并根据需要对裁切后的数据进行优化处理, 如去除冗余数据和调整三角形大小等(黄明等, 2019)。

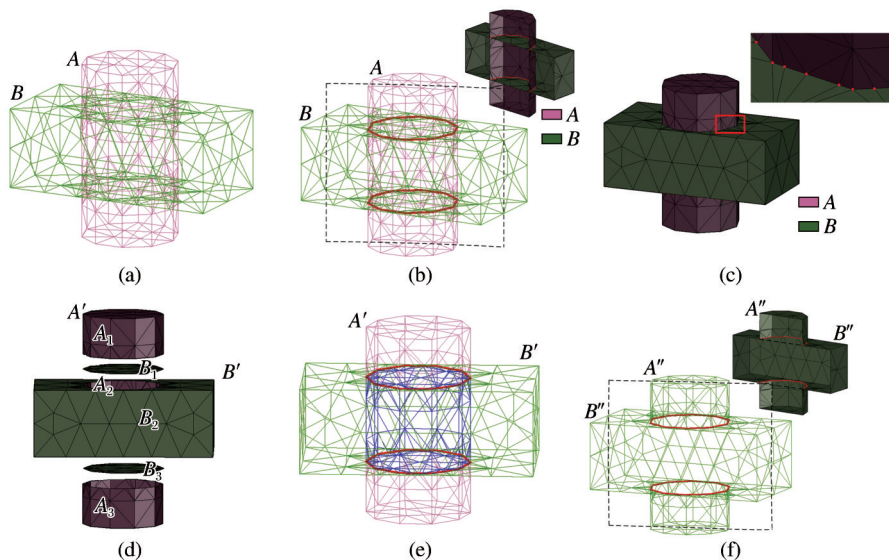


图3 井筒和平巷交叉点处的分割与连接

Fig. 3 Segmentation and connection at the intersection of shaft and roadway

1.3 巷道交叉点和交岔点处的分割与连接

当 2 条平巷 C 和 D 相交时, 对交叉点的处理如图 4 所示。图 4(a) 中, 红色线条为 C 和 D 的交线, 右上角为沿图 4(a) 中虚线所在面切割所得相交巷道内部。图 4(b) 中, 巷道 C 被相交多边形分割成 3 个独立的网格面, 即 C_1 、 C_2 、 C_3 ; D 被相交多边形分割成 3 个独立的网格面, 即 D_1 、 D_2 、 D_3 。对于巷道 C 和 D , D_2 位于封闭巷道 C 内部, C_1 和 C_3 位于封闭巷道 D 内部, 因此删除 D_2 、 C_1 和 C_3 。图 4(c) 蓝色部分表示裁切掉的部分。组合后形成新的网格结构 $T_{new} = \{D_1, D_3, C_2\}$,

组合后的巷道如图 4(d) 所示, 右上角为沿图 4(d) 中虚线所在面切割所得相交巷道内部。

与之相似, 巷道 E 和 F 交岔, 对交岔点的处理如图 5 所示。图 5(a) 中红色线条为 E 和 F 的交线, 右上角为沿图 5(a) 中虚线所在面切割所得交岔巷道内部。图 5(b) 所示巷道 E 被相交多边形分割成 2 个独立的网格面, 即 E_1 和 E_2 ; 巷道 F 被相交多边形分割成 2 个独立的网格面, 即 F_1 和 F_2 。对于巷道 E 和 F , F_1 位于封闭巷道 E 内部, E_2 位于封闭巷道 F 内部, 因此删除 F_1 和 E_2 。图 5(c) 蓝色部分表示裁切掉

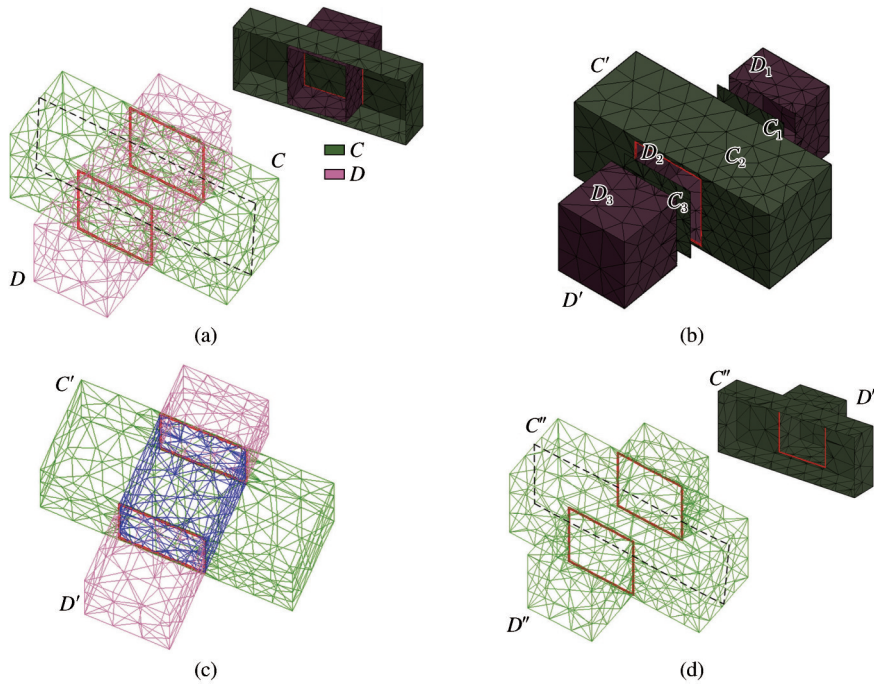


图4 两平巷交叉点处的分割与连接

Fig. 4 Segmentation and connection at the intersection of two lanes

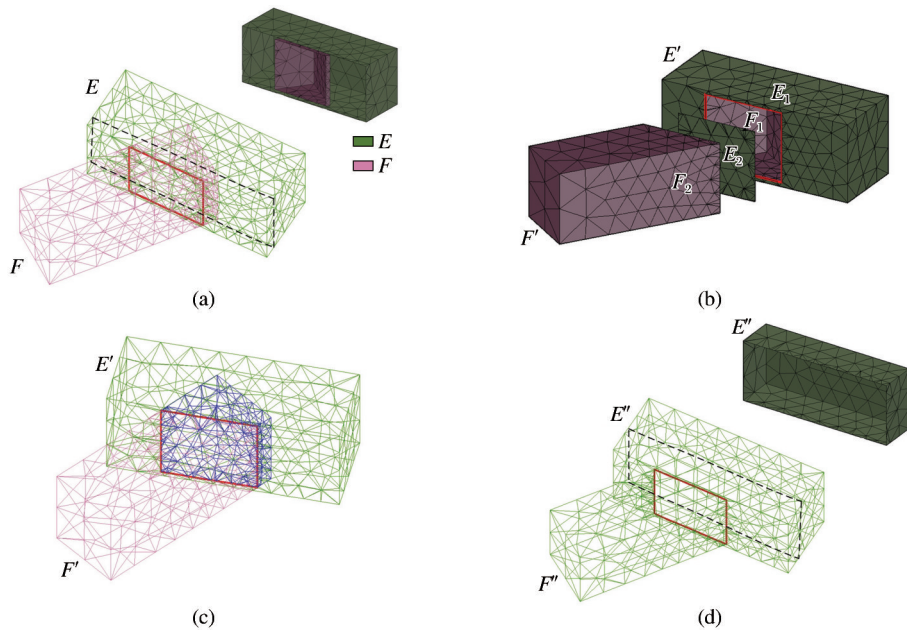


图5 两巷道交岔点处的分割与连接

Fig. 5 Segmentation and connection at the intersection of two lanes

的部分。组合后形成新的网格结构 $T_{new} = \{E_1, F_2\}$ ，组合后的巷道如图 5(d) 所示，右上角为沿图 5(d) 中虚线所在面切割所得交岔巷道内部。

对井筒和平巷相交、巷道交叉及巷道交岔的处

理结果表明，空间交汇巷道自动分割连接方法在处理不同空间交汇场景下的有效性。该方法能够准确识别空间交汇点，自动实现巷道分割、裁切和连接，显著提高巷道空间交汇处的处理效率，为三维

巷道自动建模等实际应用提供了有效的解决方案。

2 应用实例与算法效率分析

2.1 应用实例

为了验证空间交汇巷道自动分割连接方法的有效性,选取某矿山局部巷道导线数据作为数据源。该矿山巷道结构复杂,存在大量巷道交岔点、交叉点和井筒平巷交汇点,因此对巷道空间交汇处的处理尤为重要。该矿山的数据源包含大量无序的导线数据,经过预处理后形成了多条巷道的三角面网格数据。对于任意2条巷道的三角面网格 A_i 和 B_j ,首先通过AABB相交检测判断其包围盒是否相交,若相交,则精确计算交线,形成交线顶点集 V 和闭合多边形集 Q ,分别以交线作为约束边,按照Delaunay准则生成三角形并分别加入到2个巷道三角面网 A_i 和 B_j 中。利用相交多边形将 A_i 和 B_j 分割

成若干子网格集合,生成新的网格结构为 A'_i 和 B'_j 。

完成分割之后,判断子网格的内外关系并且调用容差机制,删除位于封闭巷道网格内部的冗余三角面网,将剩余的三角面网格组合为无缝连接的新巷道网格结构 G 。

使用空间交汇巷道自动分割连接方法共处理61条巷道,58个巷道交岔点,5个巷道交叉点,其中包括3个井筒与平巷的交叉点。图6所示为使用空间交汇巷道自动分割连接方法处理前的三维巷道模型局部图。由图6可以看出,处理前的模型在巷道空间交汇处并未连通且存在明显的几何问题,难以满足智能化矿山建设对高精度三维建模的需求。图7所示为使用空间交汇巷道自动分割连接方法处理后的三维巷道网格模型整体图和局部图,可以看出,生成的模型在巷道空间交汇处几何连续性良好,拓扑结构完整,且无穿模、漏面等现象。

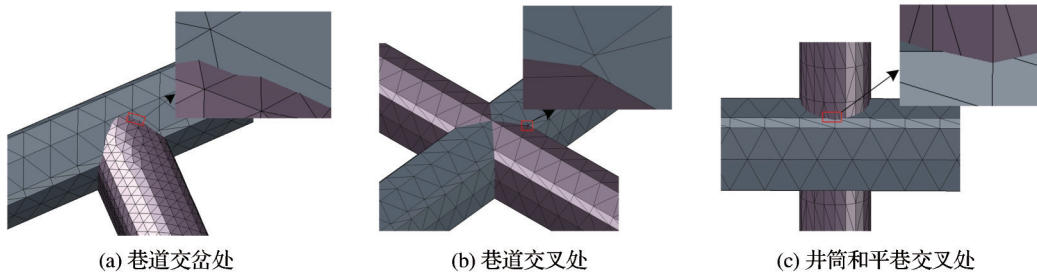


图6 处理前的三维巷道模型局部图(各分图右上角为红色方框的放大部分)

Fig. 6 Partial map of 3D tunnel model before processing (the upper right corner in each subgraph is the enlarged part of the red box)

井底车场的巷道空间交汇形式涵盖“十”字、“T”字及多巷道多角度交汇形态,几何复杂度高于常规区域,传统建模方法易导致拓扑断裂和几何失真,为实现精确建模带来极大挑战。如图8所示,通过在井底车场这一典型复杂区域成功应用空间交汇巷道自动分割连接方法,实现了三维巷道网格模型的无缝连接,充分证明该方法具备完成矿山复杂巷道三维建模的能力。

2.2 算法效率分析

试验硬件环境为 Intel (R) Core (TM) i7-14650HX CPU@2.1GHz,内存32 G,存储设备为1 TB NVMe SSD,操作系统为 Windows 11(x64)专业版。使用 Visual Studio 2019 作为编程环境,C++语言作

为开发工具。试验数据源为某矿山三维巷道网格模型,对该矿山巷道网格模型63个空间交汇处进行处理,耗时1 013 ms,交线闭合率达到100%,拓扑错误率低于2%。

为评估本方法在不同数据规模下的扩展能力,选取了4组不同复杂度的巷道模型进行性能对比,记录处理时间如表1所示,不同空间交汇处数量与时间关系如图9(a)所示。试验结果表明,随着数据规模的增加,本方法的性能提升保持稳定,展现出良好的扩展性。

为进一步验证本方法的效率优势,对比分析了传统布尔运算与空间交汇巷道自动分割连接方法在处理相同巷道模型时的交线闭合率和拓扑错误

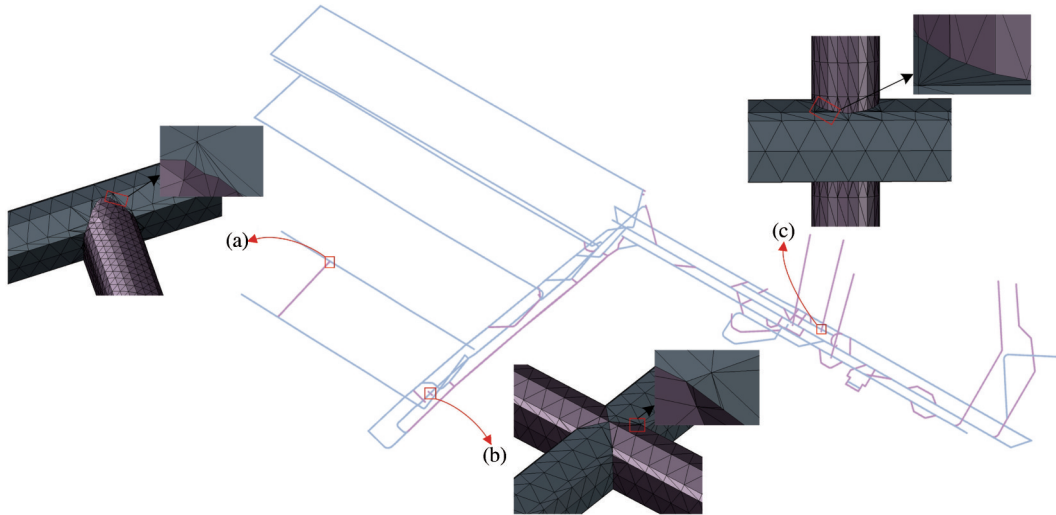


图7 处理后的三维巷道模型整体图和局部图

Fig. 7 Overall and local diagram of the 3D roadway model after processing

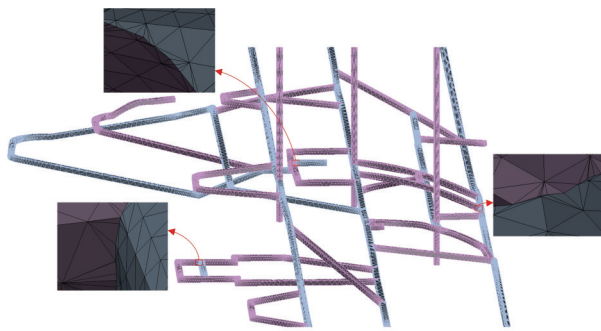


图8 处理后的井底车场巷道网格模型

Fig. 8 Roadway network model of shaft bottom yard after processing

率,试验结果如图9(b)所示。由图9(b)可以看出,本方法相比传统布尔运算处理速度提升一倍以上,且交线闭合率提升至100%,拓扑错误率下降至2%以下。尤其是在处理如图10所示的竖井多交叉口和斜坡道多岔口等复杂建模情况时,传统布尔运算因非流行边可能导致拓扑断裂且容易失败,而本方法则展现出更高的稳定性和适用性。

整体而言,得益于分层处理框架的协同优化,空间交汇巷道自动分割连接方法在时间效率和拓扑准确性方面表现优异,能够大幅缩短三维巷道模型处理时间,提高建模效率。

表1 不同数据规模总耗时

Table 1 Total time consumption of different data sizes

空间交汇处数量/个	交岔点数量/个	交叉点数量/个	空间交汇巷道自动分割连接方法耗时/ms	传统布尔运算耗时/ms
63	58	5	1 013	2 156
138	124	14	1 825	3 980
226	189	37	2 784	5 870
301	247	54	3 781	8 450

3 结论

通过分析三维巷道模型三角面网之间复杂的空间关系,提出基于“粗筛—精修—容错”分层框架的空间交汇巷道自动分割连接方法,实现了巷道空间交汇处的自动分割与连接,得出如下结论:

(1)针对复杂三维巷道网格模型空间交汇处需

要大量人工处理的问题,提出空间交汇巷道自动分割连接方法,通过AABB预筛选+约束Delaunay剖分+容差机制这种分层处理框架,实现了“粗筛—精修—容错”一体化处理,显著提升了三维巷道模型空间交汇处处理的稳定性和效率。

(2)试验结果表明,本方法在不同数据规模下性能稳定,具有良好的扩展性。相比传统布尔运

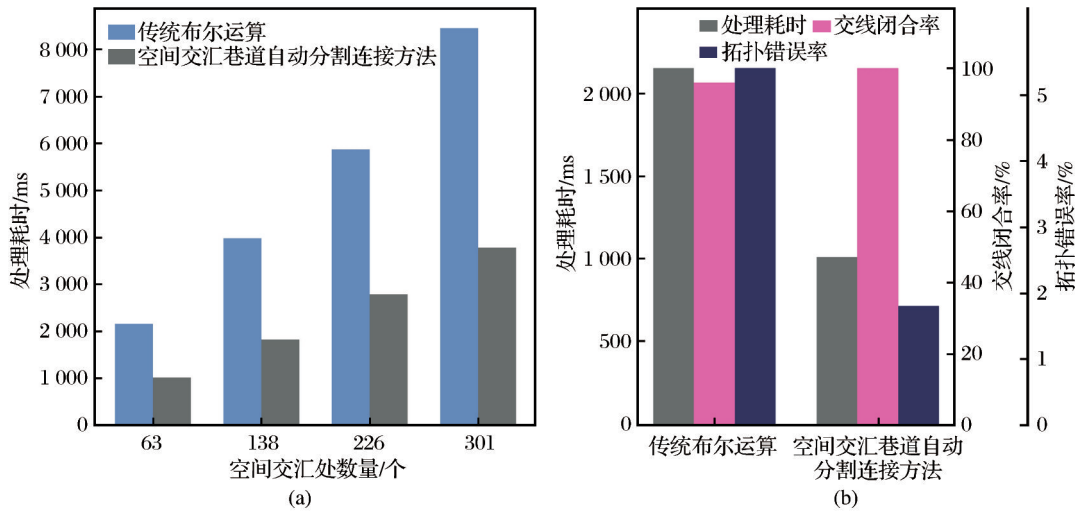


图9 不同数据规模算法耗时和对比试验柱状图

Fig. 9 Algorithm time consumption for different data scales and contrast experimental histogram

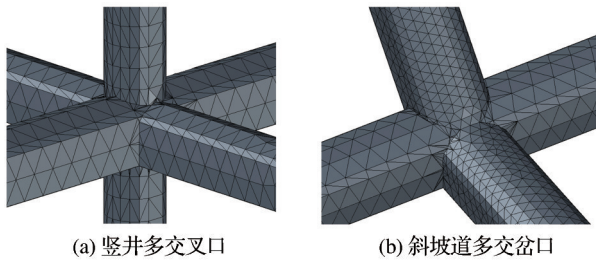


图10 复杂井巷空间交汇建模示意图

Fig. 10 Schematic diagram of modeling for complex roadway space intersection

算,处理速度提升一倍以上,交线闭合率达100%,拓扑错误率下降至2%以下。在井底车场、竖井多交叉口和斜坡道多岔口等复杂巷道三维建模任务中表现出较高的适用性和有效性。

参考文献 (References):

Chen L X, Zhao M N, 2013. Mine laneway modeling and realization based on the Matlab [J]. *Advanced Materials Research*, 690/691/692/693: 3512-3516.

Cheng J, 2021. Construction and visualization of a three-dimensional model of an engineering geological body [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5): 330.

Guo J T, Jiang J Z, Wu L X, et al, 2016. 3D modeling for mine roadway from laser scanning point cloud [C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). New York: IEEE.

Jin B X, Fang Y M, Song W W, 2011. 3D visualization model

and key techniques for digital mine [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21: s748-s752.

Ren J H, 2023. Research on accurate three-dimensional modeling technology and intelligent mining in coal mines [C]//2023 IEEE 3rd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA). New York: IEEE.

Ren L Y, Dai H Y, Li Y C, et al, 2017. Application of three-dimensional geological modelling in coal mining [J]. *Geo-Resources Environment and Engineering*, DOI: 10.15273/GREE.2017.02.040.

Wang K, Hao H Q, Jiang S G, et al, 2019. Escape route optimization by cellular automata based on the multiple factors during the coal mine disasters [J]. *Natural Hazards*, 99 (1): 91-115.

Zhang X Y, Hu M, 2022. Research and realization on three-dimensional visualization system of coal seam structure in minefield [C]//International Conference on Computer Application and Information Security (ICCAIS 2021). Bellingham: SPIE.

官文博, 2015. 三维巷道自动化建模方法的研究与实现 [D]. 淮南: 安徽理工大学. Gong Wenbo, 2015. The analysis and realization for automatic modeling method of 3D tunnel [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology.

关立文, 戴玉喜, 王立平, 2017. 空间三角面片对相交判断算法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 57(9): 970-974.

Guan Liwen, Dai Yuxi, Wang Liping, 2017. Intersection test algorithm for spacial triangular facets [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 57 (9):

- 970-974.
- 花卫华, 邓伟萍, 刘修国, 等, 2006. 一种改进的不规则三角网格曲面切割算法[J]. 地球科学, 31(5): 619-623. Hua Weihua, Deng Weiping, Liu Xiuguo, et al, 2006. Improved partition algorithm between triangulated irregular network [J]. Earth Science, 31(5): 619-623.
- 黄明, 王玥, 王成, 2019. 一种网格拓扑关系的三角网切割算法[J]. 测绘科学, 44(3): 39-46. Huang Ming, Wang Yue, Wang Cheng, 2019. A triangular mesh cutting algorithm for grid topology [J]. Science of Surveying and Mapping, 44(3): 39-46.
- 贾庆仁, 车德福, 钟壬清, 2020. 矿山复杂巷道网络组件式三维建模方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 41(12): 1774-1780. Jia Qingren, Che Defu, Zhong Renqing, 2020. Component-based 3D modeling method for complex mine roadway network [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 41(12): 1774-1780.
- 李彩琴, 2021. 东升庙铅锌矿矿井巷道和矿体三维建模与应用研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学. Li Caiqin, 2021. Application research on 3D modeling of mine and orebody in Dongshengmiao lead-zinc mine [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology.
- 李杰林, 杨承业, 彭朝智, 等, 2021. 三维激光扫描技术在地下巷道岩体结构面识别的应用[J]. 黄金科学技术, 29(2): 236-244. Li Jielin, Yang Chengye, Peng Chaozhi, et al, 2021. Application of 3D laser scanning technology to identification of rock mass structural plane in roadway of underground mine [J]. Gold Science and Technology, 29(2): 236-244.
- 李梅, 康济童, 刘晖, 等, 2022. 基于BIM与GIS的矿山巷道参数化三维建模技术研究[J]. 煤炭科学技术, 50(7): 25-35. Li Mei, Kang Jitong, Liu Hui, et al, 2022. Study on parametric 3D modeling technology of mine roadway based on BIM and GIS [J]. Coal Science and Technology, 50(7): 25-35.
- 李明崑, 王权锋, 杨宁, 等, 2023. 基于无序导线数据的井巷三维自动建模新方法及其应用[J]. 有色金属(矿山部分), 75(6): 7-14. Li Mingwei, Wang Quanfeng, Yang Ning, et al, 2023. New method and application of 3D automatic modeling of mine and roadway based on unordered traverse data [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 75(6): 7-14.
- 李昀, 苏小东, 董加岩, 等, 2017. 基于WebGL的三维矿山巷道系统研究[J]. 工矿自动化, 43(11): 70-74. Li Yun, Su Xiaodong, Dong Jiayan, et al, 2017. Research on three-dimensional mine roadway system based on WebGL [J]. Industry and Mine Automation, 43(11): 70-74.
- 刘冰, 崔航, 刘如飞, 等, 2024. 一种基于中线拓扑关系的巷道节点自适应平滑建模方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 43(4): 67-73. Liu Bing, Cui Hang, Liu Rufeif, et al, 2024. A self-adaptive smoothing modeling method for tunnel nodes based on centerline topology relationship [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 43(4): 67-73.
- 刘平一, 毛善君, 李梅, 2015. 煤矿三维巷道拓扑关系自动处理关键技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 43(4): 78-81, 56. Liu Pingyi, Mao Shanjun, Li Mei, 2015. Key technology and application of auto processing to topological relationship of 3D roadway in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 43(4): 78-81, 56.
- 刘笑笑, 汪云甲, 2017. 巷道交岔点的三维建模及实现[J]. 测绘通报, (5): 120-124. Liu Xiaoxiao, Wang Yunjia, 2017. 3D modeling of roadway intersection and its implementation [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (5): 120-124.
- 刘雄, 孙云川, 唐耽, 2021. 基于布尔并集运算的三维巷道快速建模研究[J]. 内蒙古煤炭经济, (1): 53-54. Liu Xiong, Sun Yunchuan, Tang Dan, 2021. Research on rapid modeling of 3D roadway based on Boolean union operation [J]. Inner Mongolia Coal Economy, (1): 53-54.
- 毛文山, 刘涛, 杜萍, 2020. 约束Delaunay三角剖分的“岛屿”类图斑符号填充[J]. 测绘通报, (6): 32-38, 44. Mao Wenshan, Liu Tao, Du Ping, 2020. A method for “Island” class patchsymbol filling of constrained Delaunay triangulation [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (6): 32-38, 44.
- 彭少坤, 刘良亮, 张璇, 等, 2022. 三维巷道拼接建模关键技术研究及实现[J]. 北京测绘, 36(11): 1470-1474. Peng Shaokun, Liu Liangliang, Zhang Xuan, et al, 2022. Research and implementation of key technologies of 3D roadway splicing modeling [J]. Beijing Surveying and Mapping, 36(11): 1470-1474.
- 孙敬荣, 卢新明, 2018. 基于混合包围盒与三角形相交的碰撞检测优化算法[J]. 计算机工程与应用, 54(19): 198-203. Sun Jingrong, Lu Xinming, 2018. Optimized collision detection algorithm based on hybrid bounding box and intersection of triangles [J]. Computer Engineering and Applications, 54(19): 198-203.
- 王彬, 冀虎, 戴锐, 2020. 矿山巷道三维动态建模机制研究[J]. 有色金属(矿山部分), 72(6): 1-4, 10. Wang Bin, Ji Hu, Dai Rui, 2020. A study on 3D dynamic modeling mech-

- anism of mine roadway [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 72(6): 1-4, 10.
- 王翀, 安伟强, 王红娟, 2015. 基于圆柱体一轴向包围盒检测的巷道相交建模[J]. *计算机应用*, 35(12): 3592-3596. Wang Chong, An Weiqiang, Wang Hongjuan, 2015. Tunnel intersection modeling based on cylinder-axis aligned bounding box detection [J]. *Journal of Computer Applications*, 35(12): 3592-3596.
- 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等, 2024. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. *煤炭学报*, 49(1): 181-202. Wang Guofa, Pang Yihui, Ren Huaiwei, et al, 2024. System engineering and key technologies research and practice of smart mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 49(1): 181-202.
- 王海军, 刘再斌, 雷晓荣, 等, 2022. 煤矿巷道三维激光扫描关键技术及工程实践[J]. *煤田地质与勘探*, 50(1): 109-117. Wang Haijun, Liu Zaibin, Lei Xiaorong, et al, 2022. Key technologies and engineering practice of 3D laser scanning in coal mine roadways [J]. *Coal Geology and Exploration*, 50(1): 109-117.
- 王红娟, 卢新明, 李金龙, 等, 2021. 基于布尔运算的巷道精准建模研究及应用[J]. *软件导刊*, 20(1): 21-25. Wang Hongjuan, Lu Xinming, Li Jinlong, et al, 2021. Research and application of precise roadway modeling based on Boolean operation [J]. *Software Guide*, 20(1): 21-25.
- 王金华, 汪有刚, 傅俊皓, 2016. 数字矿山关键技术研究及示范[J]. *煤炭学报*, 41(6): 1323-1331. Wang Jinhua, Wang Yougang, Fu Junhao, 2016. Crucial technology research and demonstration of digital mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 41(6): 1323-1331.
- 张帆, 葛世荣, 李闯, 2020. 智慧矿山数字孪生技术研究综述[J]. *煤炭科学技术*, 48(7): 168-176. Zhang Fan, Ge Shirong, Li Chuang, 2020. Research summary on digital twin technology for smart mines [J]. *Coal Science and Technology*, 48(7): 168-176.
- 张志武, 欧阳治华, 王纪鹏, 等, 2016. 基于面的矿山井巷三维模型算法研究与实现[J]. *化工矿物与加工*, 45(10): 51-54. Zhang Zhiwu, Ouyang Zhihua, Wang Jipeng, et al, 2016. Research and implementation of surface-based mine shaft model algorithm [J]. *Industrial Minerals and Processing*, 45(10): 51-54.
- 赵小平, 刘强, 2016. 基于点云数据的三维巷道快速建模研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 68(6): 90-93. Zhao Xiaoping, Liu Qiang, 2016. 3D rapid modeling for tunnel based on point cloud data [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 68(6): 90-93.
- 周智勇, 陈建宏, 汤其旺, 等, 2010. 巷道自动成图及三维建模[J]. *测绘科学*, 35(4): 182-183, 216. Zhou Zhiyong, Chen Jianhong, Tang Qiwan, et al, 2010. Automatic mapping and 3D modeling on the roadway [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 35(4): 182-183, 216.
- 祝斐, 2023. 数字化矿山建设中精细化采矿技术分析[J]. *中国金属通报*, (10): 20-22. Zhu Fei, 2023. Analysis of fine mining technology in digital mine construction [J]. *China Metal Bulletin*, (10): 20-22.

Automatic Segmentation and Connection of Spatial Intersections of 3D Roadway Model

CHEN Yingxian, LI Xinghua, XU Mengfei, WANG Pu, ZHOU Tao

College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China

Abstract: In the field of intelligent mine construction, the swift, accurate, and automated generation of three-dimensional roadway models remains a formidable challenge. The complex spatial interconnections inherent in roadways necessitate effective automatic segmentation and linkage at spatial intersections to address this issue. Conventional approaches frequently depend on substantial manual adjustments at roadway intersections, which are not only time-consuming and labor-intensive but also susceptible to inconsistencies in model accuracy. To mitigate these limitations, this study introduces an automatic method for spatial intersection segmentation and connection of roadways, based on a hierarchical processing framework. This framework amalgamates Axis-Aligned Bounding Box (AABB) pre-screening (coarse screening phase), constrained Delaunay triangulation (refinement phase), and tolerance mechanisms (error correction phase) to establish a cohesive “coarse-refine-

correct” workflow, thereby markedly enhancing the stability and efficiency of processing intricate 3D roadway intersections. The methodology is structured as follows: initially, potential intersecting triangular meshes are swiftly identified through AABB intersection detection. Subsequently, precise intersection calculations are conducted on the detected meshes to generate closed intersection lines. These lines are then integrated into the roadway’s triangular mesh network, and constrained Delaunay triangulation is employed to reconstruct the local topology of intersecting regions. By utilizing intersecting polygons, the original mesh is partitioned into multiple sub-regions. Sub-meshes located within the original mesh are identified and removed, while the remaining sub-meshes are amalgamated to create a seamless, interconnected roadway structure. This methodology facilitates the construction of high-precision and reliable 3D roadway models, significantly reducing the need for manual intervention and enhancing modeling efficiency. Validation using a real-world mine roadway model demonstrated the method’s efficacy: 63 spatial intersections (comprising 58 roadway junctions and 5 crossings) were automatically processed, achieving 100% intersection line closure and a topological error rate of less than 2%. These findings confirm the method’s capability to address complex 3D roadway modeling scenarios, offering a robust solution for intelligent mine planning and digital twin applications.

Key words: 3D roadway; spatial intersection; automatic segmentation and connection; collaborative optimization; Delaunay criterion; intersecting polygons

山东黄金集团荣登《财富》世界500强榜单

7月29日,《财富》世界500强榜单发布。总部位于济南的山东黄金集团首次登榜,位列排行榜第465位。

山东黄金集团成立于1996年,是以黄金及其他有色金属为主业的特大型矿业企业,是山东省属重点国有骨干企业,黄金产量、资源储备、经济效益、技术实力等均居行业前列。作为全球黄金行业的标志性企业,山东黄金集团旗下拥有4座累计产金超百吨金矿、16座“吨金矿山”、10座保有资源量超百吨金矿,连续多年保持中国境内黄金产量第一位。近年来,山东黄金集团积极向地球深部进军,成功探获新立、东风、南吕—欣木、西岭4个过百吨超大型金矿床,其中西岭金矿金金属量592 t。截至2024年底,山东黄金集团保有黄金资源储量超2 940 t,各类矿产资源总价值超万亿元。

目前,山东黄金集团已构建起深耕国内、布局全球、全产业链发展的业务格局。在国内,专注黄金主业,优化有色业务,在内蒙古、甘肃、青海、福建等省区建成矿产资源开发基地;同时,加快“走出去”步伐,在南美洲、非洲、大洋洲等进行并购开发,开拓发展空间。

多年来,山东黄金集团坚持创新驱动发展战略,着力塑强核心竞争优势,充分发挥行业引领作用,先后攻克了深部探矿、深井采矿、绿色选冶、智能矿山等行业技术难题。“十四五”以来,山东黄金集团承担(参与)省级以上重大科技项目30项,荣获省部级以上奖励229项,获得授权专利1 538项,主持或参与制定国家、行业及地方团体标准48项。目前正在中国胶东半岛建设12口千米以上“超深竖井”,其中亚洲第一深矿井——三山岛副井(设计井深1 915 m)已施工至1 880 m。

(来源:新华网)