

文章编号: 1671-251X(2024)07-0123-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023120089

与矿山三维地质模型自动关联的剖面图更新方法

陈应显, 李佳莹, 杨红霞, 叶永超

(辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 露天煤矿开采过程中矿山三维地质模型不断变化, 需要随之更新地质剖面图以真实反映当前矿山的地质构造与地层性质。针对目前剖面图更新方法存在剖面图内部图元属性信息与空间信息交互不畅导致剖面图更新不够准确的问题, 提出了一种与矿山三维地质模型自动关联的剖面图更新方法。通过设计矿山三维地质模型与剖面图元关联关系的概念模型与逻辑模型, 实现模型图元与剖面图元对象名称的关联; 通过在剖面图上设置水平和高程位置的定位坐标, 将剖切所得对象关联至相应的剖面图位置, 实现模型图元与剖面图元空间位置坐标的关联, 以达到矿山三维地质模型与剖面图属性信息、空间信息等图元数据关联的目的; 根据矿山三维地质模型中发生改变的图元确定需要更新的区域, 提取区域内各剖面线并根据关联关系得到相应的剖面图, 进一步通过遍历判断图元属性更新标志位和几何更新标志位的状态, 自动更新各剖面图中属性或几何形状发生变化的剖面图元。应用结果表明, 该方法实现了剖面图与矿山三维地质模型的关联, 以及剖面图的自动更新; 利用该方法自动更新后的剖面图中定位坐标数据与更新前一致, 验证了剖面图更新方法的准确性。

关键词: 露天煤矿; 三维地质模型; 剖面图自动更新; 图元关联; 剖面线

中图分类号: TD67

文献标志码: A

A method for updating sectional view automatically associated with mine 3D geological model

CHEN Yingxian, LI Jiaying, YANG Hongxia, YE Yongchao

(The College of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: During the process of open-pit coal mining, the 3D geological model of the mine is constantly changing. It is necessary to update the geological sectional view accordingly to truly reflect the current geological structure and stratigraphic properties of the mine. A method for updating sectional view automatically associated with mine 3D geological model is proposed to address the problem of inaccurate sectional view updates caused by poor interaction between internal graphic element attribute information and spatial information in current sectional view updating methods. By designing conceptual and logical models of the relationship between 3D geological models of mines and sectional view elements, the association between model elements and sectional view element object names can be achieved. By setting the positioning coordinates of horizontal and elevation positions on the sectional view, the objects obtained from the section are associated with the corresponding sectional view positions, achieving the association between the spatial position coordinates of the model elements and the sectional view elements. The purpose of associating the 3D geological model of the mine with the attribute information, spatial information, and other graphic data of the sectional view is achieved. The method determines

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-07-28; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374124, 52204135, 52204136); 辽宁省国际科技合作计划项目(2022JH2/10700004); 辽宁省自然科学基金计划项目(2022-BS-327); 辽宁省高等学校基本科研项目(LJKQZ2021155); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01)。

作者简介: 陈应显(1975—), 男, 四川德阳人, 副教授, 博士, 研究方向为露天开采、数字矿山, E-mail: lntucyx@163.com。通信作者: 李佳莹(1995—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 研究方向为数字矿山, E-mail: evelyn_xcx@163.com。

引用格式: 陈应显, 李佳莹, 杨红霞, 等. 与矿山三维地质模型自动关联的剖面图更新方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(7): 123-129, 164.

CHEN Yingxian, LI Jiaying, YANG Hongxia, et al. A method for updating sectional view automatically associated with mine 3D geological model[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(7): 123-129, 164.



扫码移动阅读

the area that needs to be updated based on the changed graphic elements in the 3D geological model of the mine. The method extracts various section lines within the area, and obtain corresponding sectional views based on their correlation relationships. Further, by traversing and judging the status of the graphic element attribute update flag and geometric update flag, the method automatically updates the sectional view elements with changed attributes or geometric shapes in each sectional view. The application results show that this method achieves the correlation between sectional views and 3D geological models of mines, as well as automatic updating of sectional views. The accuracy of the sectional view update is verified by using this method to automatically update the positioning coordinate data in the sectional view, which is consistent with the pre update data.

Key words: open-pit coal mine; 3D geological model; automatic updating of sectional views; graphic element association; section line

0 引言

三维建模基于其能够更直观清晰地表征真实世界中实体性质的优势^[1-3], 现已成为露天煤矿开采设计中的重要环节^[4-5]。剖面图作为矿山三维地质模型可视化分析的辅助工具, 可获取模型细部构造、分布范围、走向、形态等信息, 为后续工程设计施工、相应数值计算提供了有力支持。在露天矿开采过程中, 矿山三维地质模型不断变化, 需要随之更新剖面图, 以保证剖面图能够真实反映当前矿山的地质构造与地层性质^[6-8], 保障开采顺利进行。

在剖面图更新方面已有相关研究。文献[9]将三维地质模型和地矿点源数据库作为剖面图的数据来源, 通过结构化的样式模板控制剖面图的绘图样式, 实现了剖面图的动态更新。文献[10]提出了一种地层分布模型自匹配的地质剖面图构建算法, 通过地层分布模型规则和匹配算法判断地层点的剖面线从属关系, 有效动态更新剖面图以处理地层尖灭、地层缺失等问题。文献[11]利用 AutoCAD 二次开发技术, 解决了带弧段剖面图自动更新过程中剖面图长度小于实际长度的问题。文献[12]提出了一种智能化与人机交互相结合的方法, 实现了地质界线的动态提取, 从而快速构建更新剖面图。文献[13]通过引入动态二叉树索引, 依据交线位置关系快速生成剖面的轮廓多边形集合, 进而对应更新地质剖面图。文献[14-19]从隐函数的角度出发, 提出了直接由地质调查源数据快速生成地质剖切面的隐式剖切方法, 使剖切深度和更新的剖面图表达精度可控。文献[20]从图像处理的角度, 引入 RTT(Render to Texture)相机对动态剖切取得的高分辨率剖面图像矢量化处理, 得到带属性的矢量图, 实现了地质剖面图的实时自动更新。文献[21]基于 ArcGIS 提取三维地质空间点, 构建非直接 GIS 数据模型, 进行地质数据插值并将数据录入 ArcGIS 平台, 实现剖面图与三维地质模型的自动更新。

然而上述剖面图自动更新方法存在剖面图内部图元属性信息与空间信息交互不畅的问题, 剖面图更新的准确性有待提高。本文提出了一种与矿山三维地质模型自动关联的剖面图更新方法。通过建立模型图元与剖面图元对象名称和空间位置坐标的关联关系, 实现矿山三维地质模型与剖面图属性信息、空间信息等图元数据的关联; 在矿山三维地质模型与剖面图关联的基础上, 当模型图元属性或几何形状发生变化, 与之关联的剖面图元随之更新, 实现剖面图属性与几何形状的自动更新, 以保证剖面图更新的准确性。

1 矿山三维地质模型与剖面图自动关联方法

剖面图是假想用—个剖切平面(本文均以垂直剖面为例)将三维模型剖开, 移去介于观察者和剖切平面之间的部分, 对于剩余的部分向投影面所做的正投影图。三维模型中的图元对象与其剖面图上图元的属性存在关联; 三维模型处于三维坐标系, 而剖面图处于二维坐标系, 要将矿山三维地质模型与剖面图建立关系, 需要在矿山三维地质模型和剖面图中设置坐标关联对象。矿山三维地质模型与剖面图之间的关联如图 1 所示。

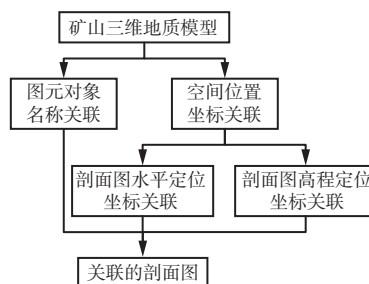


图 1 矿山三维地质模型与剖面图之间的关联

Fig. 1 Association between mine 3D geological model and sectional view

1.1 矿山三维地质模型与剖面图元对象名称关联

1.1.1 关联关系概念模型设计

矿山三维地质模型与剖面图存储于不同的图形

数据库中,二者中的图元相互对应,可通过图元名称进行关联;矿山三维地质模型中的剖面线与剖面图一一对应,通过剖面名称将矿山三维地质模型与剖面图进行关联。矿山三维地质模型与剖面图之间关联关系的概念模型(E-R图)如图2所示。

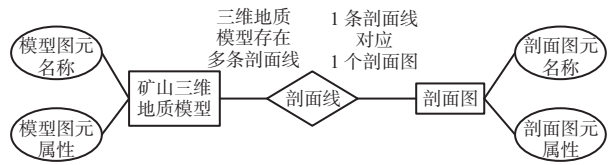


图2 矿山三维地质模型与剖面图关联关系的E-R图
Fig. 2 E-R diagram of association between mine 3D geological model and sectional view

1.1.2 矿山三维地质模型关联关系逻辑模型设计

在关联关系E-R图的基础上,对矿山三维地质模型中的模型图元和剖面线的关联关系进行逻辑模型设计。在三维地质模型中存在多条剖面线,每条剖面线都必存在与其相关联的模型,而每条剖面线有且仅有唯一与之相对应的剖面图,因此,每个剖面图都有唯一与其关联的剖面线名称。模型图元的关联关系数据包括模型图元名称和模型图元属性,其数据结构见表1。剖面线的关联关系数据包括剖面线名称和剖面名称,其数据结构见表2。

表1 模型图元关联数据结构

字段名	字段类型	字段长度/bit	说明
entityName	nvarchar	50	模型图元名称
entityParaVal	nvarchar	50	模型图元属性
onlyProperty	bool	1	模型图元属性更新标志位
onlyShape	bool	1	模型图元几何更新标志位

表2 剖面线关联数据结构

字段名	字段类型	字段长度/bit	说明
sctnLnName	nvarchar	50	剖面线名称
sctnName	nvarchar	50	剖面名称

1.1.3 剖面图关联关系逻辑模型设计

由于每个剖面图都仅对应1条剖面线,在单个剖面图内部,每个剖面图元都存在唯一相关联的剖面线名称。剖面图关联关系包括剖面图元名称、剖面图元属性和剖面线名称,其数据结构见表3。

表3 剖面图元关联数据结构

字段名	字段类型	字段长度/bit	说明
sctnEleName	nvarchar	50	剖面图元名称
sctnEleParaVal	nvarchar	50	剖面图元属性
sctnLnName	nvarchar	50	剖面线名称

1.1.4 矿山三维地质模型与剖面图元关联实施

矿山三维地质模型和剖面图元的关联数据均以图形扩展数据的形式进行赋值。在矿山三维地质模型中,每条剖面线都赋予唯一的剖面名称,每个模型图元均赋予相应的图元名称和属性参数;在剖面图中,所有图元(模型图元、水平坐标线、竖直坐标线及标注等)赋予相应的剖面名称,另外模型图元还需要赋予相应的图元名称和属性参数。

在具体实施中,矿山三维地质模型的剖面线对应的剖面名称与剖面图中所有图元的剖面名称实现关联;矿山三维地质模型的模型图元通过图元名称和属性参数与剖面图中模型图元的相应字段实现关联。

1.2 矿山三维地质模型与剖面图空间位置坐标关联

空间位置坐标的关联需在剖面图上分别设置水平和高程位置的定位坐标,以将剖切所得对象关联至相应的剖面图位置。

剖面图坐标关联过程如图3所示。

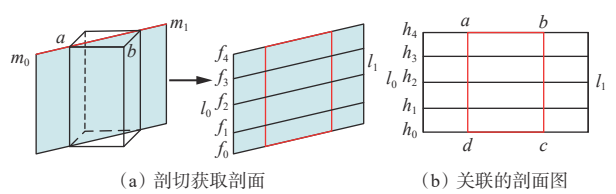


图3 剖面图坐标关联过程

Fig. 3 Coordinate association process of sectional view

设剖面线 m_0m_1 (m_0 为剖面线首点, m_1 为剖面线末点)与模型相交的两端顶点分别为点 a 和点 b ;取剖面线 m_0m_1 对应的剖面图上的2条竖直水平定位线 l_0 和 l_1 ,将剖面线 m_0m_1 两端点水平坐标分别设置为剖面图水平定位线 l_0 与 l_1 的链接数据,其中 m_0 点的水平坐标链接至水平定位线 l_0 , m_1 点则链接至 l_1 ,所得结果即为剖面图水平定位线 l_0 与 l_1 的水平定位坐标,实现水平定位坐标的关联。

由于剖面图的图形高程不是实际高程,在剖面图中需要使用高程定位线来进行高程定位。高程定位线 $f = \{f_0, f_1, f_2, f_3, f_4\}$ 是多条在纵向上等间距的水平直线,每条高程定位线均代表1个实际高程。剖面线 m_0m_1 剖切后得到相应剖面图形 $abcd$,按剖面图纵坐标数值范围取合适数量的高程定位线,通过剖面图元与剖面线的剖面名称相关联,将高程定位线 f 与实际高程 $h(h = \{h_0, h_1, h_2, h_3, h_4\})$ 相关联,实现高程定位坐标的关联。

2 剖面图自动更新方法

2.1 属性更新

遍历矿山三维地质模型各图元实体,其中图元

属性更新标志位 `onlyProperty` 值为 1 的实体,说明其属性已发生变化,仅针对与 `onlyProperty` 值为 1 的实体相关联的剖面图多边形属性参数进行更新。

设矿山三维地质模型各图元实体集 $E = \{e_e\}$, e_e 为图元实体,遍历后获取 `onlyProperty` 值为 1 的实体属性及实体属性名称。假定 e_e 的图元属性更新标志位 `onlyProperty` 值为 1,在获取其实体属性 `entityParaVal` 和实体名称 `entityName` 后,将这 2 个字段参数分别赋予实体属性参数 `propPara` 与实体属性名称 `propName`。设剖面图集 $S = \{s_q\}$, s_q 为剖面图,在所有剖面图中遍历轮询所有多边形的实体名称。在剖面图 s_q 中存在多个多边形图元,遍历轮询 s_q 中所有多边形的实体名称,与图元实体 e_e 实体属性名称 `propName` 进行比对,查找与 `propName` 字段内容相一致的剖面图多边形图元,若剖面图 s_q 所对应剖面线的实体名称 $s_q.poly.entityName$ 与实体属性名称 `propName` 内容一致,说明剖面图 s_q 所对应剖面线 $s_q.poly$ 为与图元实体 e_e 相关联的剖面图多边形,则将 e_e 的实体属性参数 `propPara` 赋予 $s_q.poly$ 的多边形属性参数 $s_q.poly.sctnEleParaVal$,完成与图元实体 e_e 相关联的剖面图多边形的属性自动更新。所有属性参数均更新完毕后,将 `onlyProperty` 值置为 0,表示当前模型图元属性未发生变化或属性已更新完毕。

2.2 几何更新

2.2.1 几何更新方法

与属性更新相似,几何更新是对与模型图元几何更新标志位 `onlyShape` 值为 1 的实体相关联的剖面图多边形几何形状进行更新。首先通过模型图元几何更新标志位 `onlyShape` 确定出三维模型中变化的部分实体,圈定各实体范围,提取区域范围内剖面线及与剖面线关联的剖面图,对剖面图中与模型图元实体对应的剖面图多边形几何形状进行更新,之后将模型图元几何更新标志位 `onlyShape` 值置 0。几何更新流程如图 4 所示。

更新与矿山三维地质模型图元实体相关联的剖面图多边形的几何形状,需生成剖面线与当前矿山三维地质模型间的交线,将交线顶点集转换到相关的剖面图,在与相关联的剖面图多边形进行比较后进行几何更新。设与实体相关联的剖面图多边形的顶点集 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{n_0}\}$, $r_i (i = 1, 2, \dots, n_0, n_0$ 为交线的顶点总数) 为交线的第 i 个顶点, r_i 的坐标为 (x_i, y_i) 。对剖面线所在竖直面与矿山三维地质模型三角面求交线,剖面线所在竖直面可表示为 2 个三角面,即将问题转换为三角面与三角面之间求交线,最后将这些交线按顺序连接起来,得到剖面线所在竖直

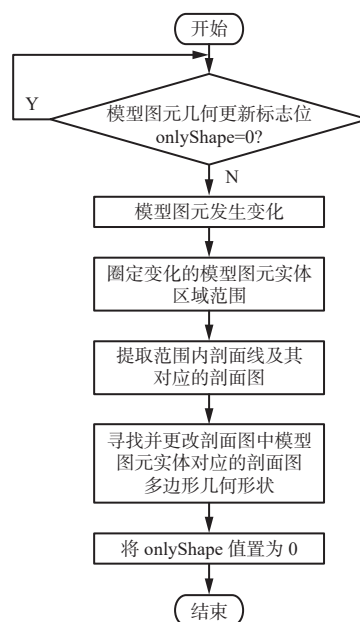


图 4 几何更新流程

Fig. 4 Geometric update flow

面与矿山三维地质模型的交线。设当前矿山三维地质模型几何形状改变后得到三维交线的顶点集 $R' = \{r'_1, r'_2, \dots, r'_{n_1}\}$, $r'_i (i = 1, 2, \dots, n_1, n_1$ 为几何形状改变后交线的顶点总数) 为几何形状改变后交线的第 i 个顶点, r'_i 的坐标为 (x'_i, y'_i, z'_i) 。

将顶点集 R' 中元素坐标由空间直角坐标转换为到剖面线首点水平距离的二维相对坐标,将三维图形降至二维。通过对各顶点进行坐标转换计算,可得模型更新后的剖面图多边形顶点集 $R'' = \{r''_1, r''_2, \dots, r''_{n_2}\}$, $r''_i (i = 1, 2, \dots, n_2, n_2$ 为经过几何形状改变与空间坐标转换后交线的顶点总数) 为经过几何形状改变与空间坐标转换后交线的第 i 个顶点, r''_i 的坐标为 (x''_i, y''_i) 。顶点坐标转换公式为

$$\begin{cases} \Delta x''_{\text{after}} = \sqrt{(x''_i - x_{t_0})^2 + (y''_i - y_{t_0})^2} + x_s \\ \Delta y''_{\text{after}} = y''_i + y_s - h_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta x''_{\text{after}}$, $\Delta y''_{\text{after}}$ 分别为经坐标转换计算后与三维交线相对应剖面图上的二维顶点横坐标、纵坐标的变化量; (x_{t_0}, y_{t_0}) 为剖面线 $t_0 t_1$ 的首点 t_0 的坐标; x_s 为剖面图上左侧水平定位线的横坐标; y_s 为剖面图上任意一条高程定位线的纵坐标; h_s 为与剖面图高程定位线关联的实际高程。

对比新顶点集 R'' 与原来的剖面图多边形顶点集 R , 实现剖面图元坐标校验, 校验 R'' 中各顶点坐标是否改变, 若 $R'' \neq R$, 说明交线已发生改变, 顶点集 R'' 覆盖 R 中原有数据, 得到更新后的剖面图多边形顶点集。待所有剖面图多边形形状均更新完毕后, 将实体的 `onlyShape` 值置为 0, 即实现剖面图几何形状

的自动更新。

2.2.2 几何更新过程

几何更新方法的实现过程如图 5 所示。模型经剖面线剖切后得到的关联剖面图形为 $abcd$ ；当模型第 1 次发生几何形状改变，变为棱锥模型后，剖面线与模型上表面相交点变为 a_1 ，关联的剖面图形随之更新为 $a_1c_1d_1$ ；当模型第 2 次发生几何形状改变，变为棱台模型后，剖面线与模型上表面相交点变为 a_2 和 b_2 ，关联的剖面图形随之更新为 $a_2b_2c_2d_2$ ；同理，当模型第 j 次发生几何形状改变，其关联的剖面图形更新为 $a_jb_jc_jd_j$ 。

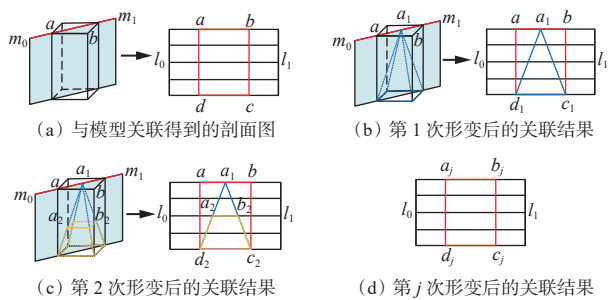


图 5 几何更新方法的实现过程

Fig. 5 Implementation process of geometric update method

3 应用验证

以内蒙古自治区锡林浩特乌兰图嘎锆煤露天矿为工程背景，验证与矿山三维地质模型自动关联的剖面图更新方法的可行性。

研究区域采场三维地质模型地层的主要岩性为第四系、砂岩、泥岩和煤，共有 364 条台阶线和 640 条地形等高线，以这些台阶线和地形等高线为约束边进行 Delaunay 约束三角形剖分，生成露天矿采场三维地质模型的三维网格，并将模型岩性参数作为矿岩封闭网格的扩展数据。采场推进前的三维地质模型如图 6 所示。

三维地质模型剖面线形状如图 7 所示，C1—C5 为在模型上取得的 5 条剖面线。将剖面名称分别设置为各剖面线的扩展数据，并将各矿岩的封闭网格模型图元填至以相应矿岩名命名的图层；在剖面

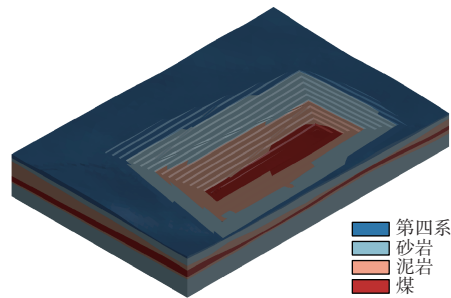


图 6 采场推进前的三维地质模型

Fig. 6 3D geological model before mine advancing

图中，对所有岩层多边形、采场台阶、水平坐标线、竖直坐标线及标注各种类型的图元均设置对应的剖面名称为扩展数据。

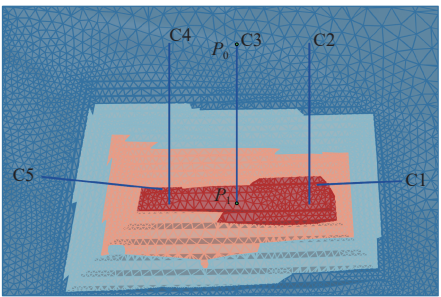


图 7 三维地质模型剖面线形状

Fig. 7 Section line contours of 3D geological model

以剖面线 C3 为例，设剖面线 C3 位于采场坡顶的端点为首点 P_0 ，位于采场坡底的端点为末点 P_1 ，模型经剖切空间坐标转换至二维平面直角坐标。将 P_0 与 P_1 的坐标设置为剖面线 C3 对应剖面图的水平定位线的链接数据；分别将 860, 910, 960, 1 010, 1 060, 1 010, 1 160 m 共 7 个高程设置为自下而上的 7 条高程定位线的链接数据，将链接数据与实际高程相关联，作为剖面图的高程定位坐标。剖面线 C3 对应剖面图的剖面图元关联结果如图 8 所示，剖面图内共有 6 个岩层多边形、1 条边坡台阶线、2 条水平定位线、7 条高程定位线。设置剖面名称作为剖面图元的扩展数据，并将剖面图二维交线顶点数据集的顶点坐标数据存储至剖面图元的扩展数据。

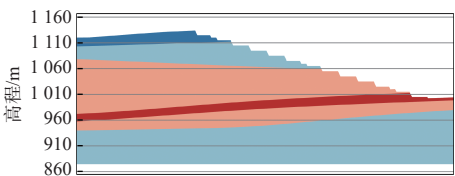


图 8 剖面线 C3 对应剖面图的剖面图元关联结果

Fig. 8 Section element association result of sectional view corresponds to section line C3

随着采场工作面不断推进，采场几何形状随之改变，采场推进后的三维地质模型如图 9 所示。

通过剖面线 C3 可求得该剖面线与采场三维地

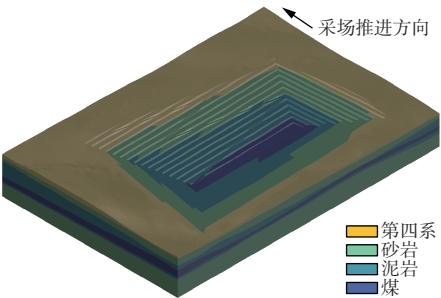


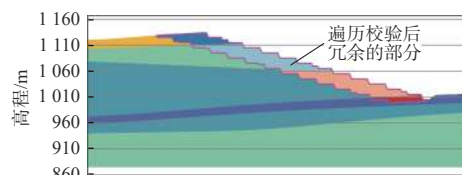
图 9 采场推进后的三维地质模型

Fig. 9 3D geological model after mine advancing

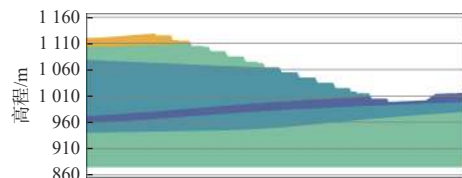
质模型更新后的三角面之间的交线。对采场推进更新后的三维地质模型进行剖切,将剖切得到的三维顶点集 R' 中元素坐标由空间直角坐标转换为到剖面线首点水平距离的二维相对坐标,将三维图形降至二维。对各顶点进行坐标转换,计算得到模型更新后的剖面图二维交线顶点集,并将顶点坐标数据存储至剖面图元的扩展数据中。

遍历扩展数据中模型更新后的所有图元元素与原来的剖面线 C3 对应的剖面图进行比对,校验模型更新后各顶点坐标是否改变,并在剖面图中高亮显示比对不一致的部分,如图 10(a)所示。校验结束后变化坐标数据覆盖更新至扩展数据中原有剖面图各顶点坐标,得到采场推进更新后 C3 对应的剖面图,如图 10(b)所示。

按此方法依次可得采场三维地质模型其他剖面图自动更新结果。将推进前采场三维地质模型与 C1—C5 这 5 条剖面线相关联,可得采场推进前剖面图,如图 11(a)所示;当采场推进时,三维地质模型发



(a) 剖面图元坐标校验



(b) 采场推进更新后的剖面图

图 10 采场推进后剖面图校验及更新

Fig. 10 Check and update of sectional view after mine advancing
生形变,发生改变的图元构成了新图层,与之对应的剖面图也随之改变,如图 11(b)所示;关闭新图层后,可得采场推进后的三维地质模型各剖面线对应的剖面图更新结果,如图 11(c)所示。经比对,更新前后剖面图中的定位坐标数据一致,验证了剖面图更新的准确性。

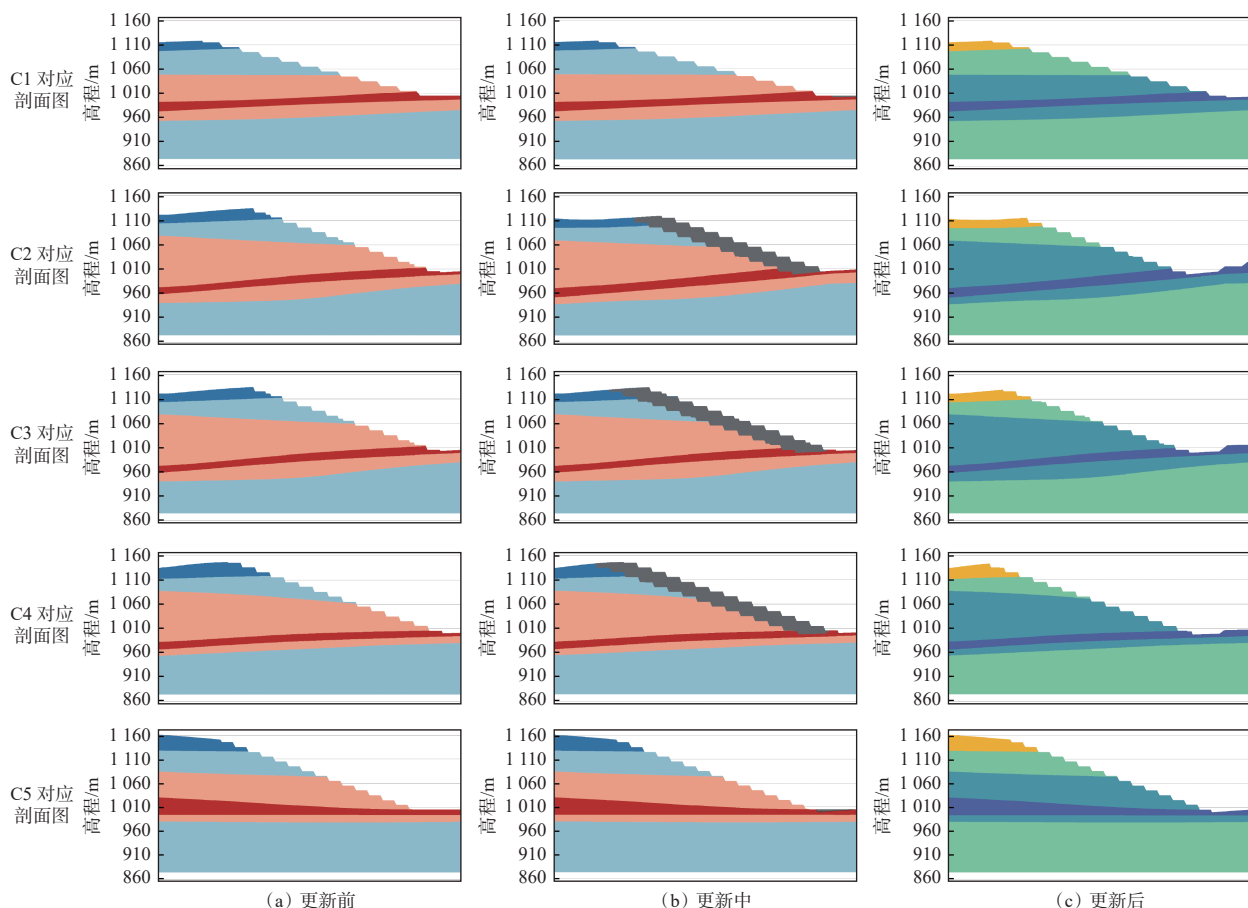


图 11 三维地质模型剖面图自动更新过程

Fig. 11 Automatic update process of sectional view of 3D geological model

4 结论

1) 在对矿山三维地质模型与剖面图元之间关系

进行分析的基础上,通过对图元关联的概念模型设计和逻辑模型设计,建立了矿山三维地质模型与剖面图元的关联关系;通过在剖面图上进行水平和高

程位置的定位坐标设置,建立了矿山三维地质模型与剖面图的空间位置关联关系。

2) 基于矿山三维地质模型与剖面图的关联关系,提出了剖面图自动更新方法。当矿山三维地质模型图元属性发生变化时,能够自动对与模型图元相关联的剖面图多边形属性参数进行更新;当矿山三维地质模型图元几何形状发生变化时,通过对模型重新剖切、交点集空间坐标转换和剖面图元坐标校验等过程,能够自动实现对相关联的剖面图多边形进行几何更新。

3) 在乌兰图嘎锗煤露天矿应用了与矿山三维地质模型自动关联的剖面图更新方法,当三维地质模型发生形变时,与之相关联的剖面图实现了自动更新,验证了该方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] CAUMON G, COLLON-DROUAILLET P, LE CARLIER DE VESLUD C, et al. Surface-based 3D modeling of geological structures[J]. *Mathematical Geosciences*, 2009, 41(8): 927-945.
- [2] PARK H, SCHEIDT C, FENWICK D, et al. History matching and uncertainty quantification of facies models with multiple geological interpretations[J]. *Computational Geosciences*, 2013, 17(4): 609-621.
- [3] PONCHIO F, CALLIERI M, DELLEPIANE M, et al. Effective annotations over 3D models[J]. *Computer Graphics Forum*, 2020, 39(1): 89-105.
- [4] WANG Shufan, LAI Shanghong. Reconstructing 3D face model with associated expression deformation from a single face image via constructing a low-dimensional expression deformation manifold[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(10): 2115-2121.
- [5] GHADI Y, AKHTER I, ALARFAJ M, et al. Syntactic model-based human body 3D reconstruction and event classification via association based features mining and deep learning[J]. *PeerJ Computer Science*, 2021, 7. DOI: 10.7717/peerj-cs.764.
- [6] AL-BALUSHI S M, AL-HAJRI S H. Associating animations with concrete models to enhance students' comprehension of different visual representations in organic chemistry[J]. *Chemistry Education Research and Practice*, 2014, 15(1): 47-58.
- [7] FRANÇOIS T, CALVET L, SÈVE-D'ERCEVILLE C, et al. Image-based incision detection for Topological intraoperative 3D model update in augmented reality assisted laparoscopic surgery[C]. 24th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, Strasbourg, 2021: 647-656.
- [8] 王元昊, 高振记, 宋越. 三维地质模型质量评估方法研究进展综述[J]. *华北地质*, 2023, 46(1): 80-86.
WANG Yuanhao, GAO Zhenji, SONG Yue. Review of research progress on quality assessment methods of 3D geological models[J]. *North China Geology*, 2023, 46(1): 80-86.
- [9] 张军强, 吴冲龙, 刘刚, 等. 基于三维地质模型的勘探剖面图快速动态绘制[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(6): 230-234.
ZHANG Junqiang, WU Chonglong, LIU Gang, et al. Fast and dynamic method for drawing exploration section based on 3D geological model[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2015, 34(6): 230-234.
- [10] 李晓娟, 何育枫, 王桂春, 等. 地层分布模型自匹配的剖面图动态生成算法[J]. *物探与化探*, 2017, 41(5): 939-945.
LI Xiaojuan, HE Yufeng, WANG Guichun, et al. Drill section algorithm based on auto-matching of stratigraphic distribution pattern[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(5): 939-945.
- [11] 裴丽娜, 齐菊梅, 刘振红, 等. 基于 AutoCAD 的弧段地质剖面精确绘制算法与实现[J]. *人民长江*, 2019, 50(7): 123-127, 149.
PEI Lina, QI Jumei, LIU Zhenhong, et al. Accurate drawing algorithm and realization of arc geological section based on AutoCAD[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(7): 123-127, 149.
- [12] 陈国旭, 田宜平, 张夏林, 等. 基于勘探剖面的三维地质模型快速构建及不确定性分析[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(2): 275-280.
CHEN Guoxu, TIAN Yiping, ZHANG Xialin, et al. Rapid construction and uncertainty analysis of 3D geological models based on exploration sections[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(2): 275-280.
- [13] 代欣位, 郭甲腾, 刘善军, 等. 基于动态二叉树索引的三维地质模型组合剖切算法[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(4): 8-13.
DAI Xinwei, GUO Jiateng, LIU Shanjun, et al. A combined cutting algorithm for 3D geological model based on dynamic quadtree index[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(4): 8-13.

(下转第 164 页)

enggeo.2022.106851.

- [13] RIQUELME A J, ABELLÁN A, TOMÁS R, et al. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 68: 38-52.
- [14] COVER T, HART P. Nearest neighbor pattern classification[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1967, 13(1): 21-27.
- [15] LATO M J, DIEDERICH S M, HUTCHINSON D J. Bias correction for view-limited lidar scanning of rock outcrops for structural characterization[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(5): 615-628.
- [16] RENCHER A C, CHRISTENSEN W F. Methods of multivariate analysis[M]. Hoboken: Wiley, 2012.
- [17] ESTER M, KRIEGER H P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]. 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, 1996.
- [18] TONINI M, ABELLÁN A. Rockfall detection from terrestrial LiDAR point clouds: a clustering approach using R[J]. *Journal of Spatial Information Science*, 2014(8): 95-110.
- [19] 何旷宇. 基于无人机贴近摄影高陡边坡岩体表面信息识别方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- HE Kuangyu. Study of rock mass surface information identification in high steep slopes based on nap-of-the-object photography[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [20] 郭戈. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面识别与岩体完整性评价研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- GUO Ge. Study on rock mass structural plane identification and rock mass integrity evaluation based on 3D laser scanning technology[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2023.
- [21] 叶震, 许强, 刘谦, 等. 无人机倾斜摄影测量在边坡岩体结构面调查中的应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1739-1746.
- YE Zhen, XU Qiang, LIU Qian, et al. Application of unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry to investigation of high slope rock structure[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1739-1746.
- [22] 陈昌富, 何旷宇, 余加勇, 等. 基于无人机贴近摄影的高陡边坡结构面识别[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(1): 145-154.
- CHEN Changfu, HE Kuangyu, YU Jiayong, et al. Identification of discontinuities of high steep slope based on UAV nap-of-the-object photography[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(1): 145-154.
- (上接第 129 页)
- [14] GUO Jiateng, WU Lixin, ZHOU Wenhui, et al. Section-constrained local geological interface dynamic updating method based on the HRBF surface[J]. *Journal of Structural Geology*, 2018, 107: 64-72.
- [15] DE LA VARGA M, SCHAAF A, WELLMANN F. GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(1): 1-32.
- [16] 郭甲腾, 吴立新, 王江梅, 等. 基于隐式化 Coons 曲面的局部地质构造区域集成建模方法[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(1): 1-6.
- GUO Jiateng, WU Lixin, WANG Jiangmei, et al. A regional integrated geological modeling method based on the implicitization of Coons surface[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(1): 1-6.
- [17] GUO Jiateng, WANG Jiangmei, WU Lixin, et al. Explicit-implicit-integrated 3-D geological modelling approach: a case study of the Xianyan Demolition Volcano (Fujian, China) [J]. *Tectonophysics*, 2020, 795. DOI: 10.1016/j.tecto.2020.228648.
- [18] 代欣位. 自动可交互隐式区域三维地质建模与剖切分析研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- DAI Xinwei. Research on 3D geological modeling and cutting analysis of automatic interactive implicit region[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.
- [19] 郭甲腾, 代欣位, 刘善军, 等. 一种三维地质体模型的隐式剖切方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(11): 1766-1773.
- GUO Jiateng, DAI Xinwei, LIU Shanjun, et al. An implicit cutting method for 3D geological body model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1766-1773.
- [20] 花卫华, 肖旖旎, 王振娟, 等. 基于三维地质模型的矢量地质剖面图实时生成技术[J]. *地球科学*, 2022, 47(11): 4256-4266.
- HUA Weihua, XIAO Yini, WANG Zhenjuan, et al. Real-time generation technology of vector geological profile based on 3D geological model[J]. *Earth Science*, 2022, 47(11): 4256-4266.
- [21] 李鸿卫, 闫文超. 基于 ArcGIS 的三维地质模型自动构建方法[J]. *世界有色金属*, 2024(7): 25-27.
- LI Hongwei, YAN Wenchao. Automatic construction method of 3D geological model based on ArcGIS[J]. *World Nonferrous Metals*, 2024(7): 25-27.