



基于无人机影像的露天煤矿短期生产计划可视化编制

付恩三 白润才 张雯慧 袁杰

引用本文：

付恩三, 白润才, 张雯慧, 等. 基于无人机影像的露天煤矿短期生产计划可视化编制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 222–234.

FU Ensan, BAI Runcai, ZHANG Wenhui. Short term production planning of open-pit coal mine based on UAV data[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 222–234.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1271>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿区无人机影像采动地裂缝提取方法研究

Research on extraction method of ground fissures caused by mining through UAV image in coal mine areas
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 187–196 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1204>

灾后煤矿物联网无人机辅助节能数据采集方法

UAV-assisted energy-efficient data gathering method of mine IoT after disaster
煤炭科学技术. 2023, 51(8): 228–238 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1151>

基于无人机影像的西部矿区地表沉陷信息提取方法改进

Improvement of surface subsidence information extraction method based on UAV image modeling in Western Mining Area
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 334–342 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1381>

基于无人机倾斜摄影测量技术的露天矿生态修复研究

Study on ecological restoration of open pit mines based on UAV oblique photogrammetry technology
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a26bf3d9-c86d-410b-b9d5-d10ff41f4f85>

基于无人机影像的采动地表裂缝特征研究

Research on characteristics of mining-induced surface cracks based on UAV images
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/196bf575-a03b-4f18-bf95-3823bf17a3cb>

高寒地区露天矿无人机移动测量适用性研究

Study on applicability of unmanned aerial vehicle mobile survey of open-pit mine in alpine region
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/72337742-a7cf-49ef-928c-fab22afcff05>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

付恩三,白润才,张雯慧,等.基于无人机影像的露天煤矿短期生产计划可视化编制[J].煤炭科学技术,2024,52(7):222-234.

FU Ensan, BAI Runcai, ZHANG Wenhui, et al. Short term production planning of open-pit coal mine based on UAV data[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 222-234.

基于无人机影像的露天煤矿短期生产计划可视化编制

付恩三^{1,2},白润才²,张雯慧¹,袁杰²

(1.应急管理部信息研究院,北京 100029;2.辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000)

摘要:为提高露天煤矿短期(日、周)生产计划编制效率、快速分析设备计划完成情况以及可视化设计和直观性表达的效果,提出基于无人机影像数据进行短期生产计划快速编制,利用C++语言开发了基于无人机影像的露天煤矿短期生产计划可视化软件系统(Intelligent Mining Design Software System),简称“IMDS”软件。结果表明:①采用无人机影像数据进行短期计划的编制可视化视觉效果增强;②采用无人机影像数据进行局部1500 m×1500 m范围的露天煤矿采场台阶线自动生成,用时为17.392 s,而人工绘图需要5 min;③利用软件平台编制周计划、日计划,降低采矿人员需要反复去现场查验的频率以及突破传统采矿实体、块体算量的复杂性,内部预设设备能力分析模块,直接分析出短期计划内设备完成情况信息;④基于影像数据进行斜坡道快速绘制,自动计算坡道填挖土方量,实现运输道路修筑的精准性;⑤“IMDS”软件提供十大功能模块,235个子功能,可实现对无人机影像数据短期计划编制和基于三维地质实体模块的月度、年度计划快速工程量和工程位置精准确定的编制;⑥短期生产计划编制后,可通过数据发布的方式将短期生产计划发布至露天煤矿综合管控平台,实现计划数据直观展示,实现数据一数一源,保证了数据的准确性和安全性。该系统软件的开发,有助于促进智能化采矿设计软件系统的进一步发展。

关键词:无人机;可视化;露天煤矿;影像数据;短期计划

中图分类号:TD216 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2024)07-0222-13

Short term production planning of open-pit coal mine based on UAV data

FU Ensan^{1,2}, BAI Runcai², ZHANG Wenhui¹, YUAN Jie²

(1. Information Institute, Ministry of Emergency Management of the PRC, Beijing 100029, China;

2. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of making short-term (daily and weekly) production plan, fast analysis of the completion of equipment plan and the effect of visual design and visual expression, based on the UAV image data, the paper puts forward the method of making short-term production plan quickly, and develops the Intelligent Mining Design Software System by C++ language, “IMDS” software for short. The results show that: ① the visual effect of short-term planning is enhanced by using UAV image data; ② the Stope Step Line of opencast coal mine in the range of 1500 m × 1500 m is automatically generated by using UAV image data; The time is 17.392 s, but the manual drawing takes 5 min; ③ the weekly plan and daily plan are made by using software platform, which reduces the need of repeated on-site inspection by miners and the complexity of calculation of traditional mining entity and block, the internal pre-equipment capability analysis module directly analyzes the short-term plan of the completion of equipment information; ④ based on image data for ramp rapid rendering, automatic calculation of ramp fill and excavation volume, to achieve the accuracy of transport road construction; ⑤ “IMDS” software provides 10 functional modules, 235 sub-functions, the short-term planning of UAV image data and the rapid monthly and annual planning of engineering quantities and precise determination of engineering positions based on three-dimensional geological entity modules can be realized; ⑥ the short-term production plan can be released to the Integrated Management and control platform of

opencast coal mine by the way of data release, which can realize the visual display of plan data, realize the data one by one, and ensure the accuracy and safety of data. The development of the system software contributes to the further development of the intelligent mining design software system.

Key words: UAV; visualization; opencast; image data; short-term planning

0 引言

实现露天煤矿平稳接续生产,采矿设计是一个重要环节。采矿设计是融合矿山地质、测量、设计的综合体,是指导露天煤矿生产各环节协同发展的决策性工序。采矿设计其本质是采矿设计师思想的最终体现;从设计方法学上来说,露天煤矿设计是一个如何让煤矿开采与生态自然协调平衡的过程,体现了设计所能提供的功能性作用;而从煤矿生产者的角度来说,采矿设计其本质上是为其带来的成本与利润的关系。不论从哪个维度来看,露天煤矿采矿设计都是一项智力型的工作,体现的是设计的理念与思想,而其中设计的合理性、可实施性对于煤矿生产来说具有重要的意义。

回顾我国露天煤矿建设发展的百年历程,露天采矿设计的设计思想、设计方法、设计手段也在随着科学技术的不断发展而不断更新,露天煤矿经济剥采比从经验值到动态变化,采矿设计从最初的人工手绘描图到计算机技术的应用,从二维制图出图再到三维立体呈现,每一次采矿设计理念和手段的变革,带来的是生产效率的提升和设计理念的革新^[1-2]。随着我国露天煤矿智能化建设以及我们对采矿生产理念的理解,如何将设计者的思想更加直观、更加便捷的与计算机技术融合,实现设计过程中的便捷化操作、人性化功能、可视化表达和设计理念引导是现阶段露天煤矿设计工作需要思考的问题。目前国内学者对露天煤矿设计软件的研究,大多集中在三维地质建模和采矿设计制图,基本实现了三维地质模型、测量数据成图以及剖切剖面、手动台阶线绘制等功能^[3]。通过对全国62处大型和特大型露天煤矿调研可知,Vulcan^[4]、3Dmine^[5]、中南大学王李管教授团队的Dimine软件^[6-7]、Surpac^[8]、辽宁工程技术大学白润才、刘光伟团队的SMCAD采矿设计^[9-10]具备了在二三维平台下的软件绘制和三维算量,从一定程度上提升了采矿设计效率。但即便在三维软件平台下采矿设计环节的投入使用,还是存在设计人员对露天采场现状了解不足、设备作业范围不确定、采矿设计直观性不强、设备效率估算不直接等问题,需要采矿设计人员在拿到测量图后,反复去现场进行核对校验,从而进行下一步的采矿设计工作。

因此,如何进一步解决图纸的可视化、设备能力快速校核及能力分配等问题,将为提升露天煤矿生产计划效率、设计精准度和设计与施工贴合度提供重要手段,也是实现露天煤矿智能决策系统的一个重要组成部分。

近年来随着无人机测量技术的不断提升,露天煤矿开始转变测量环节的工作模式,引入无人机开展外业土方测量、内业成图等工作,大大提升了测量环节的效率,同时提升了测量的精准度^[11-12]。无人机倾斜摄影测量可生成为数字正射影像(DOM)、数字高程模型(DEM)、数字表面模型(DSM)等成果,其中DSM包含的信息丰富、直观性强,具有可量测性,可导出多种三维数据交互格式(OBJ/FBX/OS-GB等)^[13-18],为各种模型应用提供高效精准的数据,同时可通过无人机影像数据进行露天煤矿内业台阶线的快速成图工作^[19-22]。基于此,笔者提出基于无人机影像数据的露天煤矿生产计划可视化编制方法,实现融合应用无人机影像数据进行采矿计划编制和露天煤矿台阶之间联络道路的快速生成,快速得出修路工程量等关键信息,提升可视化程度和设计效率,并将研究成果应用在我国某特大型露天煤矿,进一步提升采矿设计效率和可视化效果,具有重要意义,同时为其他露天煤矿提供借鉴与参考。

1 短期生产计划编制内容

本文中提到的露天煤矿短期计划为周计划和日计划。采用无人机航测数据作为短期生产计划编制的底图,可实现短期计划编制的可视化,打通地质、测量、采矿3个生产环节的数据共享、模型更新与采矿计划,实现“①+②+③”三位一体的“DCC”采矿生产计划模式。“DCC”采矿生产计划模式,解决传统“地质、测量、采矿”环节的数据更新不及时,采矿设计可视化效果不强,算量过程繁琐等问题,露天煤矿“DCC”关联关系如图1所示。

1.1 短期计划编制流程

露天煤矿短期计划编制是以年计划为总体目标^[23-24],在年计划的基础上,结合国家政策、当地气候条件、设备效率信息,将采剥生产量分配至每月当中,但严禁“超能力、超强度或者超定员组织生产”。将分配好的月计划量分解成周计划和日计划^[25],实

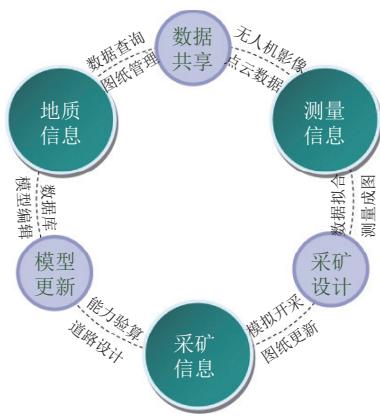


图1 露天煤矿 DCC 关联关系

Fig.1 DCC relation of surface coal mine

现露天煤矿短期计划的精细化规划和执行,对于日计划需要实现采剥区域的划分、设备日采动区域分配、排土区域分配和生产完成情况校对、日生产计划成图,当日设备效率分析、爆破区域规划、修路工程、拖拽电缆等工作。短期计划编制流程如图2所示。目前,国内露天煤矿对日生产计划并未进行深度设计和生产执行。其根本原因是日生产计划需要依托各生产环节数据的快速反馈和采矿计划的快速计算。早期网络数据不通、数据采集难度大、生产可视化效果不高的情况下,想要实现周计划、日计划的精细化开采准备和生产计划下达执行,需要采矿设计工程师前一天形成第二天的各设备生产计划图,而小区域多点范围的生产计划编制,造成日计划出图困难,工作量大。与此同时,露天煤矿开采现状反馈不及时,可视化效果不理想,生产过程中计划双向反馈时间长等因素,均导致日计划出图与执行之间差异大、时效性不强、执行效果不理想。随着露天煤矿基础网络设施建设、采矿三维软件制图系统发展、无人机测量效率的大幅度提升,可实现露天煤矿采场内各类设备状态的实时监控、采场采动范围的及时更新,采矿软件的稳定性及操作功能人性化、快速化、智能



图2 短期生产计划流程

Fig.2 Intelligent mining production planning mining simulation process

化,为我国露天煤矿实现短期计划设计、下达、执行提供了技术支撑。

1.2 短期计划编制内容

短期计划编制内容包括设备作业区域划分、车铲设备分配、斜坡道工程以及编制短期计划生产图表。

1)设备作业区域划分。为实现短期计划的精细化编制,首先需要根据露天煤矿采场的形态,进行台阶自上而下的区域划分,每一台阶需要按照设备的采掘带宽度来进行划分。采掘带划分效果如图3所示。

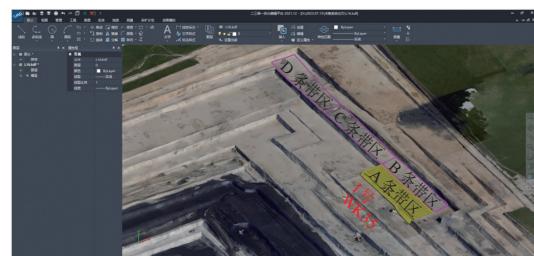


图3 无人机影像采掘带划分

Fig.3 Division map of UAV image mining belt

2)作业区域工程量计算。根据划分的每一个采掘带信息,进行采场内单个采掘带宽度条件下的工程量计算,并给出每一台阶工作线长度。

3)作业区域设备关联。初步计算每一台采掘设备的日生产能力,并进行作业区域与设备关联。

4)设备日采动范围确定。根据周计划,反推至设备日计划完成情况,确定日采动范围。采动范围包括,开采水平,采动范围的坐标区域(按照8个坐标点来确定范围),以及采动量。8个点的坐标标号如图4所示,标号⑦、⑧分别在标号①、②对应位置的垂直面以下。

5)日计划报表生成。日计划报表包括开采区域范围,物料形态、设备类型型号、开采水平,日计划完成量、运输设备以及辅助工程信息。日生产计划报表见表1,由于电铲作业的机动灵活性,存在一个电铲有多个作业区域的现象,因此,日生产计划报表同

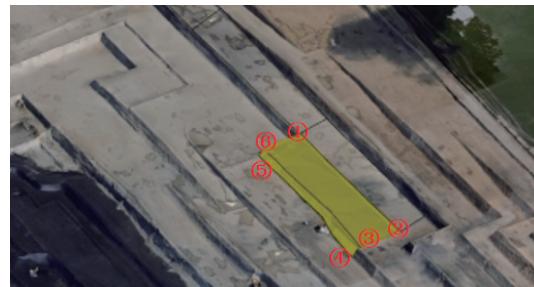


图4 开采范围8个点标号顺序

Fig.4 Mining area 8 dot-mark sequence

一台电铲可以对应多个区域, 按照多行的方式进行呈现。

表1 日生产计划报表及设备关联

Table 1 Daily production plan report

计划	项目	采掘设备	
		WK35-01	WK35-02
采场采掘工程日计划	开采水平	+980 m	+965 m
	工作线长度	800 m	750 m
	采掘带宽度	35 m	35 m
	条带量	84万m ³	79万m ³
	计划完成量	10万m ³	10万m ³
	条带剩余量	74万m ³	69万m ³
	物料类型	煤	煤
	车辆信息	6辆220 t	6辆220 t
	运距	3.6 km	3.8 km
采场爆破工程日计划(若有)	项目	钻孔设备	
		别拉斯01	别拉斯02
		爆破水平	+980 m
		爆破方式	松动爆破
		爆破范围	+980 m全部
		爆破工程量	84万m ³
		爆破时间	6 h
		爆破孔数	960个
		排距	5 m
洒水辅助环节	项目	辅助洒水设备	
		辅助设备1	辅助设备2
	洒水时间	8 h	8 h

1.3 短期排土计划编制

排土场短期计划编制与采场短期计划编制相同, 排土场短期计划需要快速实现排土场位置选择和排土空间快速计算, 需要实现采场与排土场之间的物料流的规划。排土短期计划编制步骤如下:

1)排土位置选择。选择露天煤矿排土场中可以排弃的位置, 排土过程需要保证采排过程均衡、尽量控制重车下行比例, 防止发生重车碰撞事故;

2)排土线绘制。在无人机影像数据的基础上, 绘制排土区域范围, 包括排土场的坡顶线和坡底线;

3)排土量快速计算。根据排土场规划的排土坡顶线和坡底线的空间范围, 进行排土场排弃位置的空间量计算, 计算结果如图5所示。

根据剥离物排弃计划, 排土场容量计算如下:

$$V_p = V_o K_s K_b \quad (1)$$

式中, V_p 为排土场所需容量, m³; V_o 为总外排量, m³; K_s 为排弃物最终松散系数, 取1.10; K_b 为排土场容量备用系数, 取1.10。

4)排土范围精准确定。根据排土场的范围, 对排土场可容纳量进行估算, 利用二分法等算法进行排土场排弃量的快速计算, 精准确定排土范围。



图5 排土场空间算量结果

Fig.5 Results of spatial calculation of dump

2 无人机影像数据应用

2.1 无人机短期计划可行性分析

为实现无人机影像数据满足短期采矿计划编制, 无人机影像数据需要满足周计划的成图周期或者3d周期的影像成图周期。通过对全国大型和特大型露天煤矿应用无人机影像数据进行测量成图来看, 最快成图时间为3 d, 可生成矿区的全部影像数据, 但对于短期计划编制来说, 未采动部分的数据, 占据大量数据资源, 为了控制成图效率和数据量, 每次短期计划编制过程中的航测数据为露天煤矿采场和排土场采动范围的数据图像, 再将采动数据与底图进行拼接成图, 成图时间控制在2 d, 即第1天进行航测, 第2天生成影像图, 用于采矿计划。因此, 采用无人机影像数据进行露天煤矿短期计划的编制工作是可行的。

2.2 基于无人机影像台阶线提取

通过采集露天煤矿采场及排土场点云模型, 进行三角网倾向分布规律分析, 可知三角网具有空间地理位置的自相关性, 台阶坡面、道路和台阶坡度临界值一般在30°, 同一片区域中, 采场、排土场边坡朝向基本一致。为减少运算负担, 在生成OSGB数据的过程中, 将三角网还原为点集, 利用密度聚类的方法对采场点集重新聚类, 再利用Alpha Shape方法重新提取点集轮廓线得到所需的台阶线。方法流程如图6所示。

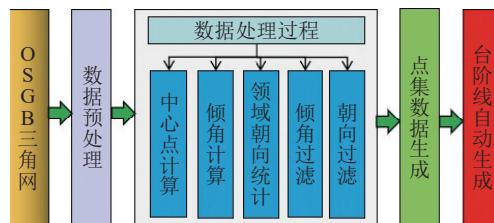


图 6 台阶线特征线提取流程

Fig.6 Feature line extraction process

以倾斜测量数据通过利用 Smart3D 软件解算后的 OSGB 三角网作为数据源。

1) 对数据进行预处理操作, 利用一种非线性的双边滤波方法, 结合图像的空间邻近度和像素值相似度处理, 考虑空间信息和灰度相似性, 进行数据去噪处理。基于三角网的各向同性去噪的全局非迭代的双边滤波, 从空间距离和数值距离 2 个维度, 对三角网的每一个三角形根据其相邻三角形的形态分布进行了过滤降噪。

2) 为了更方便且均匀的分割点集, 在 xyz 三个维度中选择维度上尽可能分散的维度进行划分, 选取当前离散度最大的维度作为分割面。

3) 由于采用倾斜测量的区域面积过大, 在生成 OSGB 数据的过程中, 为减少运算负担, 采用 DBSCAN 基于密度的空间聚类算法。将具有足够密度的区域划分为簇, 并在具有噪声的空间数据库中发现任意形状的簇, 它将簇定义为密度相连点的最大集合。筛选后聚类如图 7 所示(标号是聚类的结果集)。测试区域的坡面延纵向分布, 呈条带状, 符合露天煤矿现场的呈阶梯状分布特征, 少数边缘地区存在离散点集, 可以用点集数量过滤。

4) 台阶线优化。将聚类后的点簇进行提取即可获得台阶线。但直接利用点集建立三角网后提取三角网轮廓边缘不平整, 存在一定误差。采用 Alpha Shapes 凹包腐蚀的方法, 进行边缘提取和平滑处理并合并距离较近的破碎三角网, 得到符合真实的台

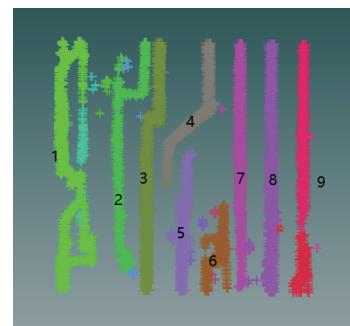


图 7 DBSCAN 聚类

Fig.7 Diagram of DBSCAN

阶轮廓线。Alpha Shapes 算法提取示意如图 8 所示, 图中蓝色线为三角网轮廓, 红色线为 Alpha Shapes 提取后的边缘。

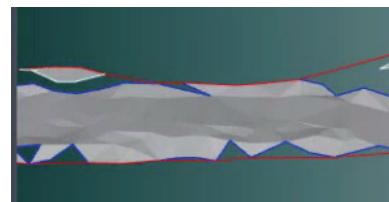


图 8 Alpha Shapes 凹包腐蚀

Fig.8 Diagram of Alpha Shapes

5) DBSCAN 聚类半径分析。按照不同的半径, 聚合的效果不同, 产生的点集数量也不同, 因此选择合适的聚合半径对于生成精准的台阶线具有重要意义, 通过选取不同的聚类半径进行测试, 当选择半径为 300 时, 生成的台阶线与人工手动生成效果最为匹配, 因此, 本文后续台阶线生成过程中, 采用聚类半径为 300 作为实际参数。通过对不同聚合半径下的台阶线提取聚合结果, 如图 9 所示。

通过调节 DBSCAN 聚类边缘阈值还能够对噪点进行聚类优化, 排除边缘离聚类较远的点集, 如图 10a 所示。DBSCAN 聚合较好地实现数据点集的聚合, 生成了不同的聚类簇。通过在凹包腐蚀前设置点数阈值可以过滤平面上的车辆聚类, 如图 10b 所示。

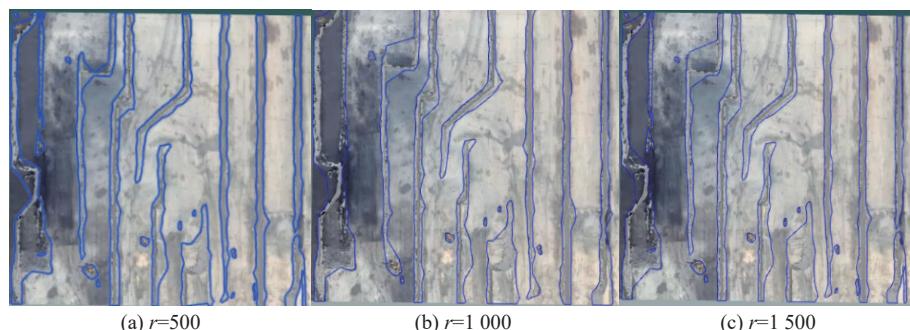


图 9 不同聚类半径下的台阶线提取效果

Fig.9 Effect of step line extraction under different clustering radius

经过调参优化处理提取出的边缘区域基本与矿区实际台阶线保持一致,大部分区域的台阶线都能被完整地提取,但在台阶呈直角处提取结果存在截弯取直的现象,如图 11 所示,虽然不可避免,但可通过设定凹包腐蚀圆半径来减小对提取的影响。

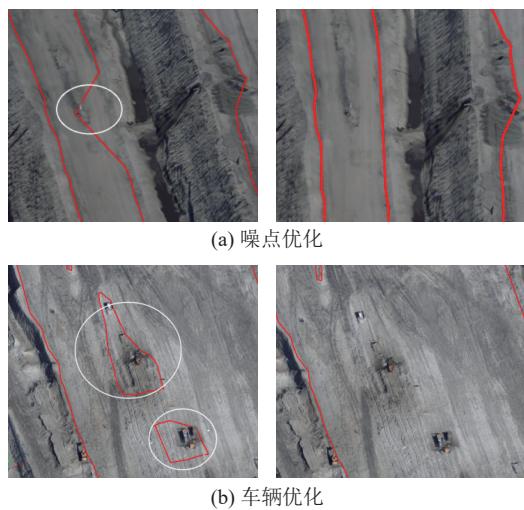


图 10 结果优化

Fig.10 Optimization results



图 11 提取缺陷

Fig.11 Extraction defect

通过上述的无人机影像数据的加载、数据处理、算法融合等步骤后,利用区域面积为 $1500\text{ m} \times 1500\text{ m}$,无人机倾斜模型空间分辨率为 0.5 m ,采用上述台阶线的提取流程方法,台阶线生成用时为 17.392 s ,而用人工进行该范围面积的提取成图,需要 5 min ,测量内业成图效率大大提高。

3 生产计划软件系统与实例应用

在前文所述的基础上,为实现利用无人机影像数据进行采矿短期计划的编制,开发研究了露天煤矿智能采矿设计软件系统 (Intelligent Mining Design Software System, 简称“IMDS”软件)。通过开发基于无人机影像露天煤矿短期生产计划可视化编制系统,该系统应用在内蒙古东北部某特大型露天煤矿,该露天煤矿为复合煤层。该矿生产能力大,采场范

围内自上而下布设设备多,依托无人机影像图为底图,航测底图进行短期(周、日)生产计划编制,可快速清晰展示各设备短期计划(周、日)开采范围和对应设备工程量信息。

3.1 软件开发环境

本文以实测露天煤矿采场 OSGB 无人机倾斜数据作为试验数据。利用普通 PC(Intel Corei7/16 G/Win10)电脑,采用 C++结合 CGAL 开源库等进行台阶线自动提取;结合采矿生产计划的各项实际业务功能,开发了一套露天煤矿短期生产计划软件系统。

3.2 软件登录界面

通过电脑注册码注册成功后,登录软件系统,软件登陆页面如图 12 所示,默认系统界面为采矿绘图操作界面,主要为基础图元功能模块,采矿设计人员可在绘图空间中进行采矿计划的编制。

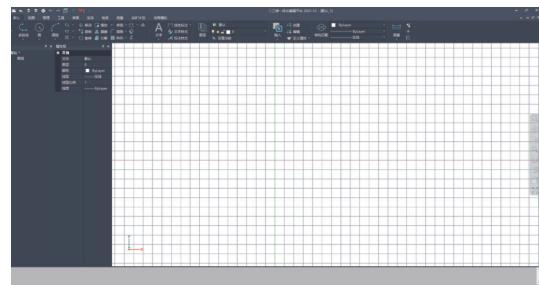


图 12 IMDS 软件登录界面

Fig.12 IMDS software login interface

3.3 软件系统功能

软件系统功能包括十大功能模块,共计 235 个子功能,十大功能模块分别是:基础功能、视图功能、管理功能、工具功能、表面功能、实体功能、测量功能、采矿计划功能、动画模拟以及地质功能。软件系统功能关联关系如图 13 所示。

基础功能具备采矿软件的基础性功能,包括图形的绘制、图形的基础性操作、文字的编辑等;视图功能主要具备展示的各视角下的视图功能以及二三维切换时的旋转中心;管理功能主要具备点线面的属性功能;工具功能主要是二三维数据发布以及出图坐标网格;表面功能主要是具有 DTM 面模型的基础性构建、计算以及线、面、体的空间计算;实体功能具有实体的布尔运算等功能;测量功能具有无人机影像数据的导入,台阶线提取以及测量点数据的处理;采矿计划具备基础的采矿设计、长短期的采矿模拟开采、斜坡道以及 VP 曲线绘制等;动画功能可实现对短期计划的动态仿真回放,以关键帧动画的方式,实现短期计划的智能呈现;地质功能包括钻孔数据导入、查询、提取、储量计算等功能。

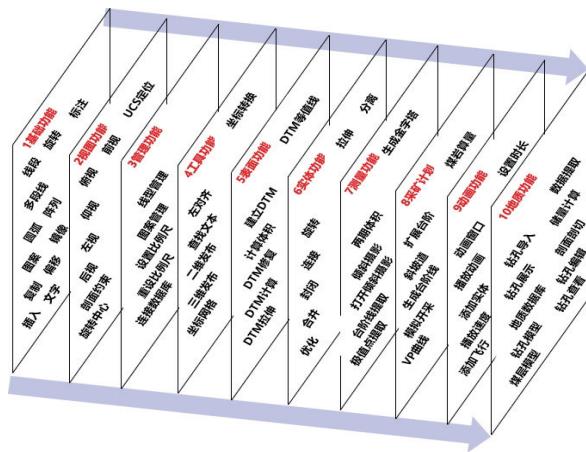


图 13 软件系统功能关联关系

Fig.13 Software system function correlation diagram

3.3.1 台阶线快速提取

加载无人机采动范围影像数据,提取框选区域范围数据。首先,将三角网调整成为俯视图,输入命令,框选需要提取台阶线范围。弹出如图 14 所示的参数框,填写参数,坡度角填写值范围规则,通过前文叙述,角度值在 30° 左右适宜;最小聚集数,该参数用来过滤噪点,当一个聚类里点数大于该值时,该聚集被保留。聚合半径大小取决于三角网密度,若密度大聚合半径可以取较小的值,若密度小则需要较大的聚合半径,本文取 300。边缘曲率半径,主要体现在露天煤矿台阶直角转弯处的台阶处理。边缘的精细程度,越精细程序处理的越慢耗时越长。点击确定,参数设置页面如图 14 所示。

3.3.2 斜坡道快速生成

①加载无人机影像和自动生成的台阶线 CAD 线框图；②选择命令斜坡道计算，提示输入道路坡度、道路宽度以及台阶坡面角；③按照路的顺时针或者逆时针方向修路，点击确定；④生成斜坡道，按照布尔运算，计算修路的填方量和挖方量。无人机影像数据，斜坡道计划流程如图 15 所示。

3.3.3 封闭区快速算量

以台阶坡顶线和坡底线为约束,快速生成面模

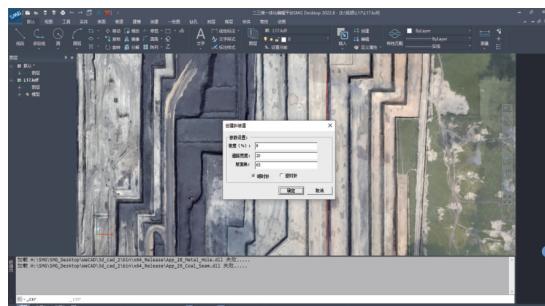


图 15 无人机影像斜坡道绘制流程
Fig.15 UAV image ramp rendering process

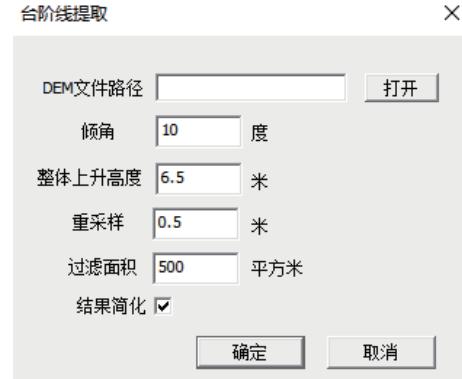


图 14 参数设置页面

Fig.14 Parameter settings page

型,实现台阶方量的快速解算。①在影像数据绘制坡顶线和坡底线,保证台阶线带标高落在影像图中;②输入封闭区域算量命令,以此选择坡顶线和坡底线,封闭区域台阶坡面角可进行预设值,如程序默认台阶坡面角为65°,生成体模型左右和后方角度为65°,前方为影像现状面;③功能执行,生成体模型,进行方量查询。封闭区域算量效果如图16所示。

3.3.4 封闭区精准切量

封闭区域计算出量后,由于排弃或采掘范围不精准,导致采掘范围需要进行调整,因此,提出对生成的封闭区域进行精准切量,按照指定画线和指定方向分割出目标体积的三角网。①将三角网调整成为俯视图,输入命令,选择待分割三角网。②绘制分割折线,右键结束绘制。③指定折线移动方向。有上下左右4个移动方向。当指定方向为斜线时,以其方向线的坐标差最大方向为移动方向。④弹出对话框,显示待分割三角网最大体积,用户输入需要的体积,点击确定。存在2种特殊情况需要说明。①若用户输入值小于0或大于体积最大值,则在下方输出栏显示“数据不合理”,结束程序。②程序运行时,若用户指定的切分方式无法满足用户输入体积,则在下方输出栏显示“分割区块体积未达标,建议延长分割线后重新计算”。

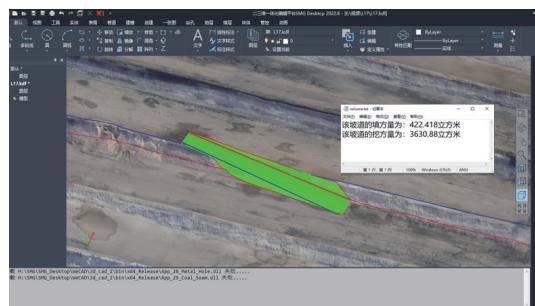


图 15 无人机影像斜坡道绘制流程
Fig.15 UAV image ramp rendering process



图 16 封闭区域算量

Fig.16 Calculation of enclosed area

3.3.5 排土场快速算量

排土场快速算量是采场封闭区域算量的逆向过程,也是进行坡顶线和坡底线的绘制,生成排土场的回填模型。①打开捕捉,绘制坡顶线和坡底线;②选择 mesh 模型,再选择坡底线和坡顶线(选择时不分前后),右键执行命令。③排土模型的坡面角后台程序默认为 33° ,为松散岩土体的自然安息角,因此,排土模型的前方、左右方向角度为 33° ,背面为影像的现状角度。排土场算量效果如图 17 所示。

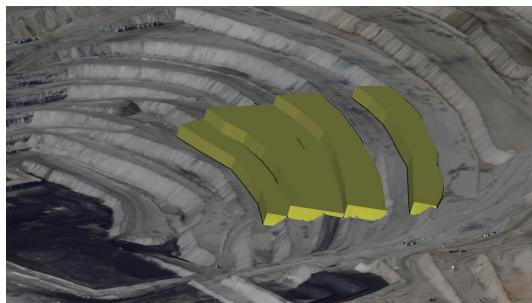


图 17 排土场算量效果

Fig.17 Calculation effect diagram of dump

3.3.6 设备能力快速计算

在短期计划编制中,设备能力分析是重要环节,包括挖掘机、卡车能力计算。短期计划带有设备能力计算的后置公式,相关公式如式(2)—(12)所示。系统设备测算功能界面如图 18 所示。

1) 挖掘机日生产能力

$$V_w = \frac{3600}{t_1 n + t_2} \frac{v_1 \eta}{\varphi} n \times 24 \quad (2)$$

式中: V_w 为挖掘机日能力, m^3 ; t_1 为装载时间, min ; n 为装载次数; t_2 为等待时间, min ; v_1 为挖掘机斗容, m^3 ; η 为挖掘机满斗率; φ 为物料松散系数。

2) 卡车日运输能力

$$V_k = \frac{w_2 m}{1000 r} \quad (3)$$

式中: V_k 为日能力, 万 m^3 ; w_2 为实际每车装载质量, t ; m 为日运行次数, 次; r 为物料容重, t/m^3 。



(a) 电铲能力计算页面



(b) 卡车能力计算页面

图 18 设备能力计算页面

Fig.18 Device capability calculation page

$$m = \frac{24}{t_6} \times 60 \quad (4)$$

式中, t_6 为车辆循环时间, min 。

$$t_6 = t_3 + t_4 + t_5 + t_8 \quad (5)$$

式中, t_3 为往返运行时间, min ; t_4 为等调时间, min ; t_5 为卸车时间, min ; t_8 为装车时间, min 。

$$t_3 = \frac{120L}{v} \quad (6)$$

式中: L 为运距, 运距取值为修路前卡车调度系统中该车对应的所有有效数据中, 运距的加权平均值, km ; v 为运行速度, km/h 。

$$t_8 = \frac{t_7 n}{60} \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{w\varphi}{r} \quad (8)$$

式中: v_2 为卡车装载体积(车斗容积), m^3 ; w 为卡车载重, t ; w_1 为挖掘机单勺装载质量。

$$w_1 = \frac{v_2 t_7 r}{\xi} \quad (9)$$

式中, t_7 为每勺循环时间, min ; ξ 为勺斗内松散系数; n 为挖掘机装载斗数。

$$n = \frac{w}{\left(\frac{v_2 \eta}{\xi} r\right)} \quad (10)$$

$$w_2 = w_1 \times n \quad (11)$$

$$\eta_1 = \frac{w_2}{w} \quad (12)$$

式中, w_2 为实际每车装载质量, t ; η_1 为卡车载重利用系数; 设备能力计算界面如图 18 所示, 其中页面中基础参数需要手动填写, 点击计算, 其他参数通过后台逻辑公式关系, 自动计算得出。

3.3.7 短期计划快速编制

由于无人机影像数据自身具备三维高程坐标, 选取 A 条带区域的下部台阶的坡底线和上部台阶的坡底线, 进行三角网实体的布尔运算, 运算算法逻辑

为: ①进行台阶线及封闭区域的选择, 绘制下部台阶坡底线范围, 台阶线可以捕捉三角网最近点, 因此, 绘制计划台阶线是带有标高的三维线; ②绘制上部台阶坡底线范围; ③封闭台阶坡底线与坡顶线台阶标高约束; ④封闭区域正面和侧面坡面约束; ⑤布尔运算, 计算出来的体模型结果保留以及开挖后体结果保留; ⑥采掘设备完成时间分析; ⑦日计划范围确定及短期日计划成图; ⑧开挖后三角网, 依然为一个完整体, 可进行上述过程的循环计算。基于无人机单一条带生产计划编制流程如图 19 所示。

内蒙古东部地区某特大型露天煤矿通过采用基于无人机影像图进行短期生产计划编制, 按照不同颜色的方式对各设备开采范围和工程量进行标注, 更加直观的展示采场以及排土场的工程量变动范围。

通过无人机进行设备开采工程量快速计算, 打破了传统的块体和实体布尔运算的多步骤添加约束的繁琐过程。采用无人机进行短期计划编制, 提升了采用实体和块体进行方量解算效率。目前, 对短期计划单台设备作业方量解算, 从无人机底图采动范围绘制、封闭区域快速算量、到精准方量

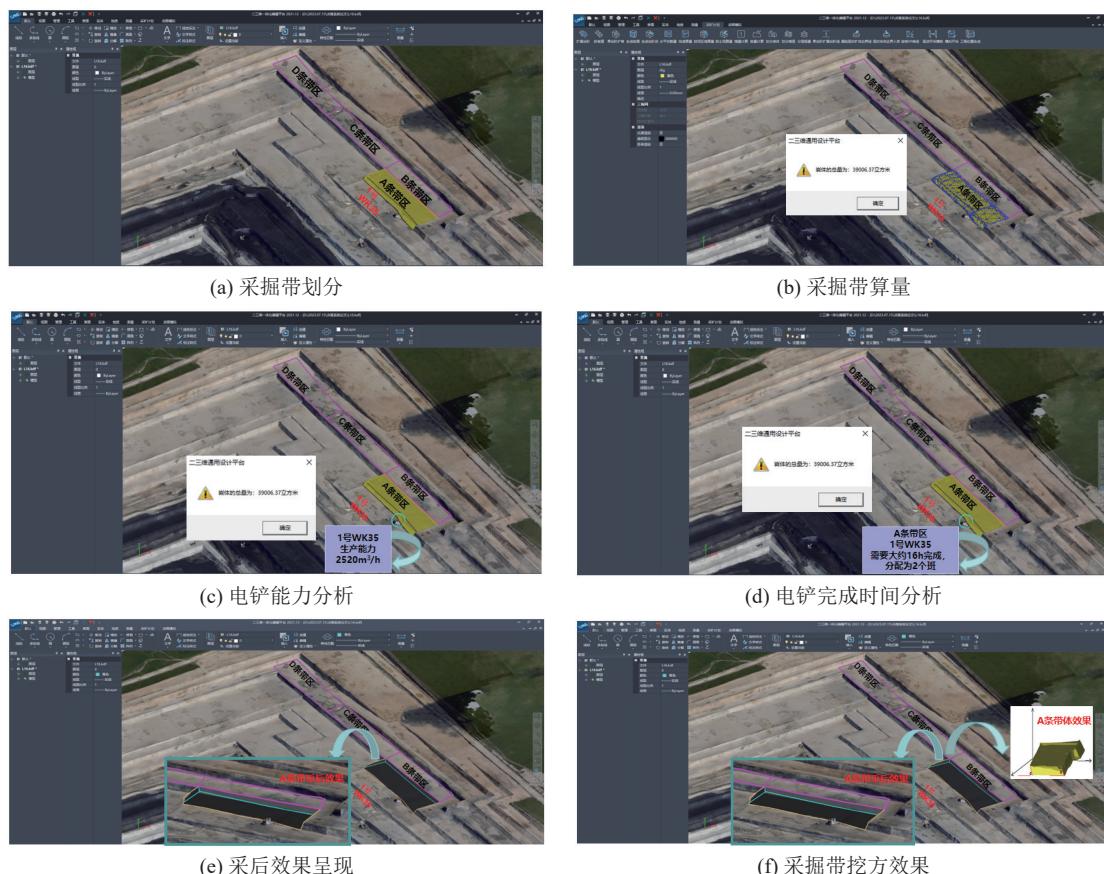


图 19 无人机短期计划编制流程
Fig.19 UAV short-term planning process

确定,仅需要3个步骤,比原来的采动区域确定、采动区域面模型生成、采动区域模型加载、采动区域布尔运算、采动区域方量生成5个步骤更加便捷,且单台设备采动范围土方量计算时间,由原来的7~8 min,降低至现在的2~3 min。所有设备采动范围工程量,均可以在无人机底图上进行多次布尔运算操作,不会损坏底图,使得短期生产计划

编制成为可落地、可操作、可执行的效果。短期生产计划成图后,采用图纸发布的方式,将短期计划发布至露天煤矿综合管控平台,保证了图纸计算效果的唯一性,也解决了图纸传输过程中的各类版本不兼容等问题,实现计划效果一数一源,数据一经发布,其他用户可自行下载使用。短期生产计划发布在综合管控平台效果如图20所示。



图20 短期计划发布后开采效果
Fig.20 Effect chart of short-term planned mining

4 基于地质体模型模拟开采

在无人机数据基础上,完成日周计划后,需要对月度计划进行模拟开采设计,月度计划工程量受限于年度计划,且露天煤矿剥离工程受季节性影响较大。因此,在月度计划编制上,采用基于地质体模型为基础的生产计划编制。

目前国内三维采矿软件系统,对月度模拟开采依然采用工程量试算的方式进行煤量与剥离量的手动寻找,给月度计划或者年度计划生产带来复杂性。为解决煤岩量快速精准确定等问题,提出2种基于复合煤层地质体模型的模拟开采方法。一种是根据露天采场推进度快速给出工程量,另一种是根据工程量快速确定工程位置。由于在生产过程中每月的煤量是定值,且布设煤台阶的设备型号基本保持不变,因此,在采煤生产过程中,露天煤矿工作平盘参数基本保持不变。因此,为实现上述2种结果,开发相应算法和程序,基于地质体模型模拟开采月度计划编制流程如图21所示。

为快速根据推进度来确定工程量时,首先需要输入推进度,推进度阶数、选择煤层以及煤层容重等信息,选择开采模板以及推进方向,点击确定后,系统自动进行200 m推进度条件下的煤量信息;根据

煤量来反推工程位置时,先进行预期煤量输入、煤层容重、工作线长度、煤层厚度等参数输入,在进行需要计算煤层实体添加,选择推进模版和推进方向,点击确定后,即可生成相应煤量。上述2个实例分别是选取推进度200 m和煤量200万t条件下的具体计算过程,2种方式方法流程及生产效果如图22,23所示。

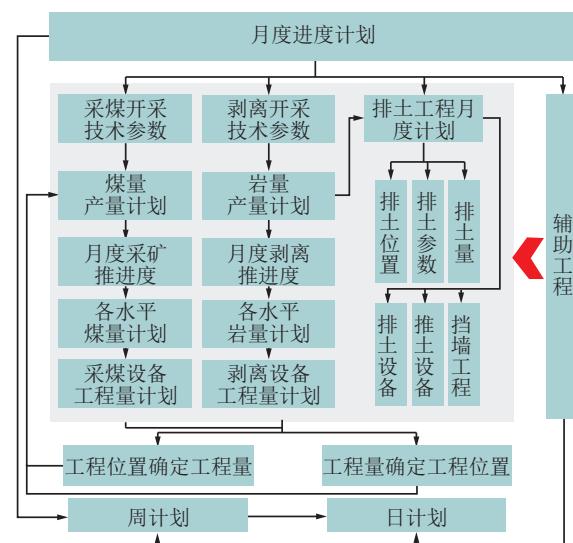


图21 月度进度计划编制内容
Fig.21 Content of monthly schedule preparation

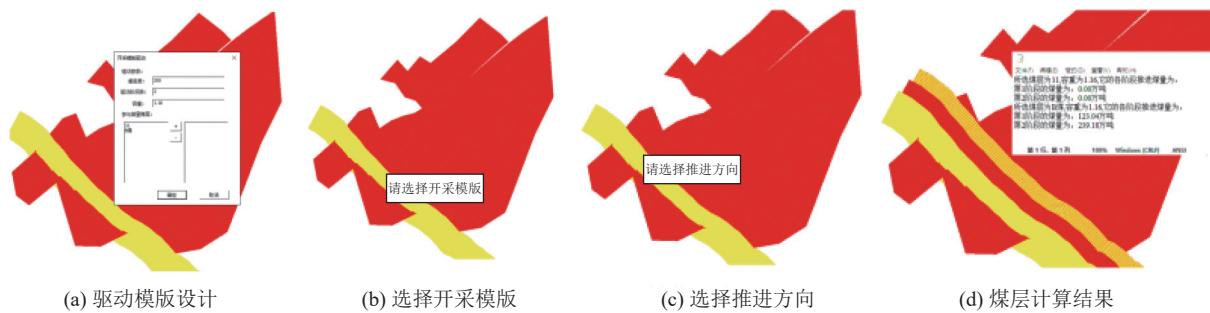


图 22 根据推进度确定煤量
Fig.22 Determine amount of coal according to progress

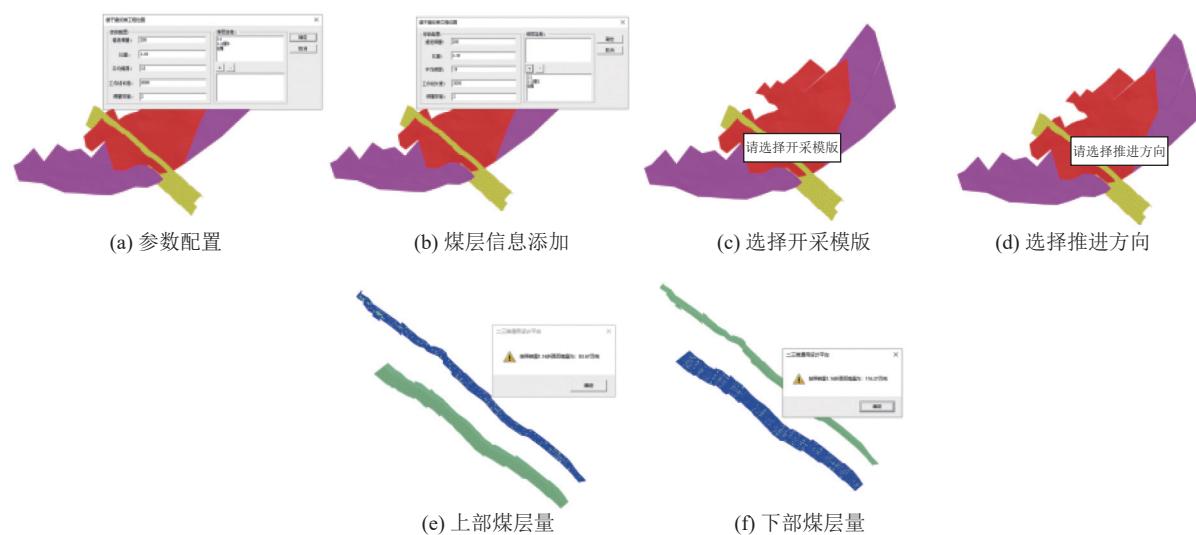


图 23 根据煤量确定工程位置
Fig.23 Determine project location according to amount of coal

5 结 论

1) 梳理确定露天煤矿短期生产计划编制流程、主要内容以及短期排土计划编制流程;提出基于无人机影像数据进行短期计划编制。

2) 对无人机影像数据进行短期计划编制进行可行性分析,依托无人机影像数据进行台阶线提取。通过对 OSGB 数据进行预处理操作,采用 DBSCAN 基于密度的空间聚类算法,进行台阶线提取,优化 DBSCAN 聚类半径分析、噪点优化、提取缺陷等流程,实现台阶线的快速精准提取。结果表明:1 500 m×1 500 m,无人机倾斜模型空间分辨率为 0.5 m,采用上述台阶线的提取流程方法,台阶线生成用时为 17.392 s,而用人工进行该范围面积的提取成图,需要 5 min。

3) 设计开发露天煤矿生产计划软件系统,包括十大功能 235 个子功能,实现短期计划中台阶线快速提取、斜坡道快速生成、封闭区域算量、排土场算量、设备能力计算以及短期计划编制等。

4) 基于地质体模型实现月度、年度生产计划按照工程量快速找到工程位置以及按照工程位置快速反推工程量等功能,提升采矿计划编制效率。

但需要指出的是,由于每个露天煤矿的地质条件、开采条件不同,各类生产需求有所不同。文中提到的便于采矿生产计划操作的功能会存在一定局限性。但对于今后开发普适性功能需要进一步优化。同时,文中所有功能的实现是依托相应算法作为支撑,包括布尔运算、二分法、拉格朗日逼近、距离幂次反比法等一系列后台算法,由于研究侧重点的原因,不在本文中进行呈现,同时软件开发代码也不在文中给出。下一步,也将继续针对复杂矿体条件下的露天煤矿进行智能化采矿设计软件功能开发,不断深入优化研发采矿设计软件界面友好化、操作便捷化、系统智能化。

参考文献(References):

- [1] 张瑞新,毛善君,赵红泽,等.智慧露天矿山建设基本框架及体系设计[J].煤炭科学技术,2019,47(10):1-23.

- ZHANG Ruixin, MAO Shanjun, ZHAO Hongze, *et al.* Framework and structure design of system construction for intelligent open-pit mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 1–23.
- [2] 王忠鑫, 辛凤阳, 宋波, 等. 论露天煤矿智能化建设总体设计[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 37–46.
- WANG Zhongxin, XIN Fengyang, SONG Bo, *et al.* Overall design of intelligent construction in open pit coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 37–46.
- [3] 付恩三, 刘光伟, 赵浩, 等. 智慧露天矿山总体框架及关键技术研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(8): 27–32.
- FU Ensan, LIU Guangwei, ZHAO Hao, *et al.* Research on the overall framework and key technologies of smart open-pit mines[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(8): 27–32.
- [4] 郝英杰. 基于 Vulcan 三维软件的采矿单体设计应用[J]. *世界有色金属*, 2021(14): 171–173.
- HAO Yingjie. Application of mining monomer design based on Vulcan 3D software[J]. *World Nonferrous Metals*, 2021(14): 171–173.
- [5] 高艳磊. 基于 3DMine 的露天采矿设计[J]. *金属矿山*, 2015(4): 255–258.
- GAO Yanlei. Design of 3DMine software in open-pit mining[J]. *Metal Mine*, 2015(4): 255–258.
- [6] 赵辉军, 崔冰, 任旭东, 等. 基于 DIMINE 软件的某矿三维建模与储量估算[J]. *采矿技术*, 2022, 22(6): 21–25.
- ZHAO Huijun, CUI Bing, REN Xudong, *et al.* 3D modeling and reserves estimation of a mine based on DIMINE software. [J]. *Mining Technology*, 2022, 22(6): 21–25.
- [7] 牛学永, 吴帆, 张加旺, 等. DIMINE 软件在云南鹤庆北衙金多金属矿山的应用[J]. *云南地质*, 2023, 42(1): 62–68.
- NIU Xueyong, WU Fan, ZHANG Jiawang, *et al.* Application of dimine software in Beiyia gold poly metallic mine in Heqing, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2023, 42(1): 62–68.
- [8] 相轩, 杨峻懿, 任大陆, 等. 基于 Surpac 的新民铁矿三维可视化建模[J]. *华北自然资源*, 2023(1): 32–37.
- XIANG Xuan, YANG Junyi, REN Dalu, *et al.* 3D visualization modeling of Xinmin iron mine based on Surpac[J]. *Huabei Natural Resources*, 2023(1): 32–37.
- [9] 刘光伟, 白润才, 付恩三. SMCAD 矿业工程软件在露天煤矿的应用[J]. *露天采矿技术*, 2013(1): 74–78.
- LIU Guangwei, BAI Runcai, FU Ensan. Application of SMCAD mining engineering software in open-pit coal mine[J]. *Opencast Mining Technology*, 2013(1): 74–78.
- [10] 刘光伟, 成功, 宋佳琛, 等. 非连续煤层实体模型一体化构建技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(5): 205–211.
- LIU Guangwei, CHENG Gong, SONG Jiachen, *et al.* Study on integrated construction technology of non-continuous coal seam solid model[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(5): 205–211.
- [11] 时天东, 毕林. 基于 DEM 的露天矿坑坡面顶底线自动提取方法研究[J]. *黄金科学技术*, 2021, 29(4): 612–619.
- SHI Tiandong, BI Lin. Research on automatic extraction method of top and bottom line of open-Pit slope based on DEM[J]. *Gold Science and Technology*, 2021, 29(4): 612–619.
- [12] 王继野. 基于密集匹配点云的露天矿台阶线提取方法研究[J]. *金属矿山*, 2022(9): 155–160.
- WANG Jiye. Study on step line extraction method of open-pit mine based on dense matching point cloud[J]. *Metal Mine*, 2022(9): 155–160.
- [13] 于秋宇. 基于点云数据的露天矿山测量验收技术研究及应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- YU Qiuyu. Research and application of measurement and acceptance technology for open-pit mine based on point cloud data[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [14] 史红霞, 王建民. 基于法向量区域聚类分割的点云特征线提取[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(21): 2552–2561.
- SHI Hongxia, WANG Jianmin. Feature line extraction for point cloud based on normal vector region clustering segmentation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(21): 2552–2561.
- [15] 王植, 安世缘, 邹俊, 等. 露天矿点云数据中台阶线提取[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(9): 1323–1328.
- WANG Zhi, AN Shiyuan, ZOU Jun, *et al.* Step line extraction from point cloud data of open pit mines[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science Edition)*, 2021, 42(9): 1323–1328.
- [16] 杨欢. 基于离散曲率分析的露天矿三维点云特征变化检测算法[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- YANG Huan. Three-Dimensional point cloud feature change detection algorithm of open-pit mine based on discrete curvature Analysis[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [17] 王焱, 陈应显. 露天矿全站仪数据自动形成台阶线的方法[J]. *中国煤炭*, 2008(5): 57–58.
- WANG Yan, CHEN Yingxian. Method for automatic formation of step line from total station data in open pit mine[J]. *China Coal*, 2008(5): 57–58.
- [18] 宋阳, 陈鑫, 李金玲, 等. 露天开采环状推进采剥计划自动编制方法[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(5): 167–172.
- SONG Yang, CHEN Xin, LI Jinling, *et al.* Automatic planning method for ring advancing mining and stripping in open-pit mining[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(5): 167–172.
- [19] 张冰洁, 蔡来良, 王鑫, 等. 基于数量场梯度的露天矿点云台阶线自动提取算法[J]. *测绘通报*, 2023(7): 63–68.
- ZHANG Bingjie, CAI Lailiang, WANG Xin, *et al.* Automatic extraction algorithm of step lines from point cloud in open-pit mine based on gradient of scalar field[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(7): 63–68.
- [20] 吕欣阳, 樊冬丽, 张广运, 等. 无人机影像匹配点云的露天矿台阶高度计算方法[J]. *测绘通报*, 2023(5): 135–139.
- LYU Xinyang, FAN Dongli, ZHANG Guangyun, *et al.* Calculation method of step height in open-pit mining area based on UAV image matching point cloud[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(5): 135–139.
- [21] 孙效玉, 田凤亮, 张航. 基于 GPS 数据的露天矿道路网自动提取[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 3059–3064.
- SUN Xiaoyu, TIAN Fengliang, ZHANG Hang, *et al.* Automatic extraction of road network in open-pit mine based on GPS[J].

- Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 3059–3064.
- [22] 刘光伟, 于秋宇, 李浩然, 等. 高寒地区露天矿无人机移动测量适用性研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 43–50.
LIU Guangwei, YU Qiuyu, LI Haoran, *et al.* Study on applicability of unmanned aerial vehicle mobile survey of open-pit mine in alpine region[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 43–50.
- [23] 肖兵, 陈鑫, 毕林, 等. 平行推进采剥模式下露天矿开采计划自动编制方法[J]. 煤炭工程, 2023, 55(3): 89–93.
XIAO Bing, CHEN Xin, BI Lin, *et al.* Automatic plan preparation method under parallel advance mining and stripping model for open-pit mine[J]. Coal Engineering, 2023, 55(3): 89–93.
- [24] 韩流, 秦梓赫, 舒继森, 等. 基于多目标优化的露天矿进度计划编制方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 146–155.
HAN Liu, HAN Zihe, SHU Jisen, *et al.* Research on open-pit mine schedule planning method based on multi-objective optimization[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 146–155.
- [25] 付恩三, 刘光伟, 邸帅, 等. 露天矿山无人驾驶技术及系统架构研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(1): 34–39.
FU Ensan, LIU Guangwei, DI Shuai, *et al.* Unmanned driving technology and system architecture in open-pit mines[J]. Coal Engineering, 2022, 54(1): 34–39.