引文格式：刘丽,刘少宇,宋永飞,等. 露天矿山超层开采工程量测算[J]. 地理空间信息, 2024, 22(12): 110-113. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.12.025

露天矿山超层开采工程量测算

刘　丽[1]，刘少宇[1,2*]，宋永飞[1]，黄　川[1]
（1. 宁夏回族自治区国土资源调查监测院，宁夏 银川 750002；2. 北方民族大学，宁夏 银川 750030）

摘　要：随着倾斜摄影技术的发展，施工动态监测和工程量测算精度逐渐提高。为测算A矿超层开采工程量，基于无人机影像，借助Pix4D、大疆智图软件分别进行空中三角建模，生成2种3D模型和DOM（数字正射影像图）、DSM（数字表面模型）等，利用EPS软件提取高程信息，通过CASS软件测算超采量、挖方量，将基于无人机数据与传统测绘数据获得的超采量、挖方量分别与实际超采量、挖方量对比，发现：①随提取高程点间距减小，基于2种模型的测算结果越接近实际超采量、挖方量，准确率均升高，由97.00%增至99.00%以上，差异较小；②5 m间隔下，无人机数据与传统测绘数据测算结果基本一致，但与实际超采量、挖方量存有一定误差，误差均高于0.60%；③除5 m间隔下，DTM（数字地面模型）法的测算结果准确率均高于99.00%，准确率较高，更加稳定。

关键词：超层开采；方格网法；DTM；工程量；无人机
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）12-0110-04

Engineering Quantity Calculation of Super-layer Mining in Open-pit Mine

LIU Li[1], LIU Shaoyu[1,2], SONG Yongfei[1], HUANG Chuan[1]
(1. Department of Natural Resources of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, China;
2. Northern University for Nationalities, Yinchuan 750030, China)

Abstract: With the development of oblique photography technology, the accuracy of construction dynamic monitoring and engineering quantity calculation has gradually improved. In order to calculate the engineering quantity of overmining work in mine A, based on UAV images, we used Pix4D and DJI Zhitu software to conduct 3D modeling, respectively, used EPS to extract elevation information, and used CASS to calculate the amount of overmining and excavation. Comparison of engineering quantities obtained based on UAV data and mapping data with actual data, we found that ①as the spacing of extracted elevation points decreased, the measurement results based on the two models increased from 97.00% to more than 99.00%. ②At 5 m interval, the UAV data was generally consistent with the mapped data, and the errors were all higher than 0.60%.③ The result accuracy of DTM method were higher than 99.00%, except under the 5 m interval.

Key words: super-layer mining, grid method, DTM, engineering quantity, UAV

随着数字摄影测量技术的发展，无人机摄影测量技术已广泛应用于露天矿山工程动态监测与工程量测算等[1-5]。为探讨利用无人机影像测算土方量的可行性以及利用传统测绘数据测算得到的土方量精度进行对比，本文在获取无人机影像的同时获取传统测绘数据，分别利用CASS的方格网法和DTM法测算超采量、挖方量，并与实际超采量、挖方量进行对比分析，验证基于3D建模数据进行A矿工程量测算的可行性，以进一步实现通过无人机影像数据对矿区开采的实时、精细化、全覆盖监管[6-12]。

1　研究区概况

研究区处宁夏回族自治区东南方向105°～109°E，35°～29°N，矿区整体呈五边形，南北长约693 m，东西宽约703 m，面积为0.49 km^2。属山丘陵区，地势起伏较小的，海拔范围为1 455~1 500 m之间，相对高差为45 m。植被稀少，基岩未露出，地表多被第四系覆盖。研究区构造区划属华北陆块区，地处盐池—彭阳拗陷范围内，西北高，东南低，倾斜坡度为10°左右，新生界广为覆盖，褶皱断裂构造均不发育，出露地层为第四系上更新统洪积层。

收稿日期：2023-10-17。
项目来源：宁夏自然科学基金资助项目（2021AAC03432，2021AAC03431）；宁夏重点研发计划资助项目（2021BEG03001）。
第一作者简介：刘丽（1986—），硕士研究生，工程师，研究方向为矿产资源监管，E-mail：ll_nxjcy@126.com。
通信作者：刘少宇（1990—），本科，工程师，研究方向为矿产资源监管，E-mail：lsy_nxjcy@126.com。

2　数据来源与方法

2.1　数据来源与处理

2.1.1　数据来源

所用原始数据为：①影像数据，通过大疆精灵4pro RTK航拍获取两期影像，依照划定航拍范围，设置航高、重叠度等参数，生成飞行航线，从5个角度（包含1个垂直角度和4个倾斜角度）同时采集影像，并在研究区内均匀地设置8个像控点；②测绘数据，由专业测绘员使用测绘仪器测得，采样点间隔为5 m；③实际挖方量，来源于实际采矿统计数据。

2.1.2　数据预处理

对于无人机数据，利用Pix4D软件，对一期、二期的影像进行POS数据解算、空中三角测量加密、刺点矫正、建模等处理，最终得到成果点云数据、三维实景模型、DOM和DSM数据；同样利用大疆智图软件对二期影像进行3D建模。为消除研究区域内建筑物等非采区的影响，将原始正射影像导入ArcGIS软件中，新建面图层提取研究区范围，并抠除建筑物所在区域，得到实际采矿区面图层。对于测绘数据，由专业人员通过RTK外业实测获得，采样点间隔为5 m，利用CASS软件构建三角网高程数据，并结合实际地形剔除异常值。

2.2　研究方法

2.2.1　空中三角形测量

空中三角形测量指通过已有连接点和控制点将整个影像信息匹配到研究区控制点范围内，该步骤的数据计算与信息处理直接影响后续3D建模数据的质量与精度。因此，采用精度高且严密的光束网法进行平差处理，将点坐标方程中非线性未知数线性化，计算公式如式（1）：

$$\begin{cases} x-x_0=-f\dfrac{a_1(X_A-X_S)+b_1(Y_A-Y_S)+c_1(Z_A-Z_S)}{a_3(X_A-X_S)+b_3(Y_A-Y_S)+c_3(Z_A-Z_S)} \\ y-y_0=-f\dfrac{a_2(X_A-X_S)+b_2(Y_A-Y_S)+c_2(Z_A-Z_S)}{a_3(X_A-X_S)+b_3(Y_A-Y_S)+c_3(Z_A-Z_S)} \end{cases} \tag{1}$$

式中，(x, y)为像点a在像平面坐标系中的坐标；f为相机焦距；a_i，b_i，c_i为影像3个外方位角元素的余弦值；i取值为1，2，3；(X_A, Y_A, Z_A)为地面点A的坐标；(X_S, Y_S, Z_S)为S（摄影中心）在地面摄影测量坐标系中的坐标。

2.2.2　方格网法

方格网法依设计高程、密集点云，设定方格网大小，将研究区划分为若干方格，每个方格4个顶点上的数值代表内高程差值，该高程差值与方格面积的乘积代表该方格的工程量，各方格工程量累加求和即为区域总工程量。因密集匹配产生密集点云，将各网格内各高程相加，取平均值并与设计高程值相减，计算公式如式（2）：

$$H_{ij}=\frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\left(H_j-H_D\right) \tag{2}$$

式中，H_{ij}为计算得到的网格高程数值；k为所求方格中点的个数；H_j为真实高程值；H_D为设计标高。

求取每个方格网面积后，按照长方体体积的公式计算每个网格的工程量，最终工程量为各方格工程量之和，计算公式如式（3）：

$$V=\sum_{i=1}^{n}H_{ij}ab \tag{3}$$

式中，V为总工程量；n为研究区内方格个数；a、b均为方格网边长。

2.2.3　DTM法

DTM法通过地面点的坐标（X，Y，Z）与高程来描述地表形态，相邻高程点间可以建立三角网，不规则三角网可以更好的贴合地面实际起伏形态。在进行土方量测算时，高程数据生成的三角网面与设计标高参考面构建形成一个三棱柱，所有三棱柱体积累加求和即为工程土方量，计算公式如式（4）：

$$V=\frac{(Z_1+Z_2+Z_3)}{3}\times S \tag{4}$$

式中，V为填、挖方总量；Z_1、Z_2、Z_3分别为形成的三角形3个顶点与设计标高参考面的高差；S为三棱柱的底面积。

3　工程量测算

为探讨不同3D建模软件对同一时期的影像处理后工程量测算的精度，以及同种软件对两期间的影像处理后工程量测算的精度，利用Pix4D基于研究区一、二期影像进行3D建模；大疆智图基于研究区二期影像进行3D建模。

3.1　构建3D模型

利用Pix4D软件进行刺点矫正、空三处理，生成一期、二期3D建模数据（图1）。优化后的摄像头参数与初始数据差异分别为：一期1.13%、二期1.18%，均在误差允许的范围内。利用大疆智图软件对二期影像进行刺点矫正、空三处理等，生成3D建模数据（图1），地理配准均方根误差为0.044 m，误

差较小，在可控范围内。



a Pix4D基于一期影像处理得到的3D模型局部示意图　b Pix4D基于二期影像处理得到的3D模型局部示意图　c 大疆智图基于二期影像处理得到的3D建模局部示意图

图1 3D建模数据

借助EPS软件，基于Pix4D软件生成的DOM与DEM数据构建垂直摄影模型，大疆智图软件生成的3D模型则以osgb格式呈现。利用ArcGIS软件提取开采区域的精准范围，提取高程点面文件，从5 m开始以1 m为单位递减到1 m提取高程点，建立三角网，结合实际情况，剔除建筑物所在范围的异常高程点（图2），5种高程点密度下构建的三角网面整体起伏趋势相同，高程点间隔越小越贴合地面实际状况。

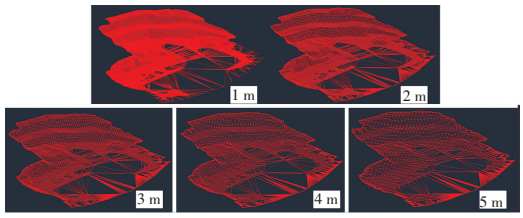


图2 不同间隔获取高程点构建三角网示意图（以基于Pix4D生成的第一期数据为例）

3.2 超采量测算

基于Pix4D软件和大疆智图软件得到二期3D建模数据分别测算超采量。超采量为超出设计标高的开采量，依据采矿权证书设计标高为1 900～1 837 m。为探讨高程点取点间距对超采量测算结果的影响，分别选取5、4、3、2、1 m作为高程点间距，利用EPS软件分别提取高程点，并借助CASS软件采用方格网法、DTM三角网法测算A矿区的超采量，与传统测绘数据测算的超采量和实际超采量对比（表1、图3），验证其精度，绝对差值越小，精度越高。

对数据结果对比分析可知：①高程点间距减小，测算的超采量越趋于实际超采量，准确率越高。基于Pix4D、大疆智图软件生成的3D数据，高程点取点间距为5 m时，超采量为35 973.90~36 598.60 m^3，与实际超采量的误差为1.07%~2.76%；高程点取点间距为1 m时，超采量为36 926.30~37 019.60 m^3，与实际超采量的误差为0.03%~0.18%；较高程点取点间距为5 m时的误差减小，其中，基于大疆智图软件生成的3D数据，利用DTM法测算的超采量最接近实际超采量，两者的绝对差值为11.4 m^3，准确率为99.97%。②在不同的超采量测算方法中，基于Pix4D软件和大疆智图软件生成的数据变化趋势保持一致。其中，通过DTM法测算得到的超采量准确率较高，变化趋势较缓，结果相对稳定；通过方格网法测算的超采量随取点间距增大，准确率加速降低。③取点间距越小，通过DTM法与方格网法的测算结果越接近，且与实际超采量相差越小；由挖方量结果趋势变化可以预测，当取样点间距无限小时，测算结果与实际超采量无限接近。④当高程点取样间距同为5 m时，通过3D建模数据测算的超采量接近传统测绘数据测算的超采量，差值约为0.3%，差异较小；与基于无人机数据3D建模获取高程数据相比，传统测绘受环境影响大，人力财力投入高，效率低，存有一定局限性。

表1 矿区二期工程完结后超采量测算对照表

模型方法/m^3	高程点间距/m				
	5	4	3	2	1
Pix4D（方格网法）	36 021.80	36 211.90	36 434.70	36 745.40	36 926.30
Pix4D（DTM法）	36 598.60	36 695.30	36 768.60	36 907.90	37 019.60
大疆智图（方格网法）	35 973.90	36 210.50	36 441.10	36 776.40	36 975.20
大疆智图（DTM法）	36 548.20	36 690.70	36 801.90	36 956.70	36 982.60
传统测绘（方格网法）	36 104.30	—	—	—	—
传统测绘（DTM法）	36 634.50	—	—	—	—
实际超采量	36 994.00				

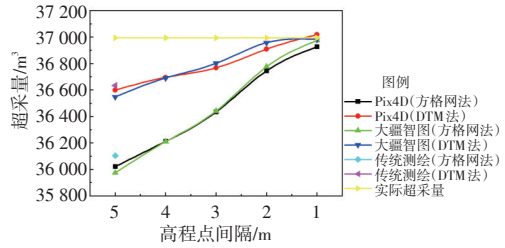
3.3 挖方量测算

基于Pix4D软件处理得到的研究区一期和二期3D建模数据，同样选取5、4、3、2、1 m为间距提取高程点，借助CASS软件采用方格网法和DTM三角网法测算A矿两期间的挖方量，分别与传统测绘数据测算的两期间挖方量和实际挖方量对比（表2、图3），绝对差值越小，精度越高。

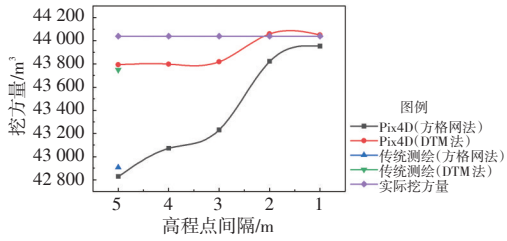
由数据结果对比分析可知：①随高程点取样间距减小，基于Pix4D软件处理数据测算的两期间挖方量增大，逐渐趋近实际挖方量，准确率升高。②对比方格网法和DTM法测算的挖方量，基于方格网法测算的结果随取样间距增大，准确率加速减小；基于DTM法的测算结果波动较小，更稳定。当高程点间隔为1 m时，DTM法测算结果最接近实际挖方量，绝对差值为19.7 m^3，准确率为99.98%。③当高程点取样间距同为5 m时，3D建模数据获取的两期间挖方量接近传统测绘数据获取的挖方量，差值约为0.1%，差异微小（表3）。

表2　矿区一、二期工程间土方量测算对照表

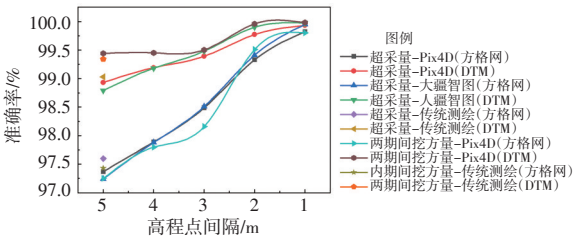
模型方法/m³	高程点间距/m				
	5	4	3	2	1
Pix4D（方格网法）	42 827.60	43 072.30	43 230.60	43 22.40	43 952.10
Pix4D（DTM法）	43 793.70	43 798.90	43 818.80	44 049.90	44 059.70
传统测绘（方格网法）	42 906.40	—	—	—	—
传统测绘（DTM法）	43 748.90	—	—	—	—
实际挖方量	44 040.00				



a 基于PixD、大疆智图的二期数据测算所得超采量与实际超采量对比折线图



b 基于Pix4D的一、二期数据测算所得两期间挖方量与实际挖方量对比折线图



c 各种测算方法准确率对比折线图

图4　比折线图

综上，Pix4D、大疆智图软件通过无人机影像3D建模所获取的高程信息准确率较高。选取的高程点间距越小，测算的超采量和两期间挖方量均越接近实际工程量，验证了基于无人机影像的Pix4D、大疆智图软件3D建模数据测算A矿工程量的可行性。

4　结　语

相较于传统测绘，基于无人机影像3D建模测算工程量更加方便快捷，人力物力投入更低，且管理者可通过3D建模将矿区实况可视化，以便实时、精细化监测。后续的研究可进一步探讨其他3D建模软件对地形复杂研究区的长时序监测研究，以总结规律，为不同类型研究区基于无人机影像的研究提供参考依据。

表3　各种测算方法准确率对比表

模型方法/%	高程点间距/m				
	5	4	3	2	1
超采量-Pix4D(方格网)	97.37	97.89	98.49	99.33	99.82
超采量-Pix4D(DTM)	98.93	99.19	99.39	99.77	99.93
超采量-大疆智图(方格网)	97.24	97.88	98.51	99.41	99.95
超采量-大疆智图(DTM)	98.79	99.18	99.48	99.90	99.97
超采量-传统测绘(方格网)	97.60	—	—	—	—
超采量-传统测绘(DTM)	99.03	—	—	—	—
两期间挖方量-Pix4D(方格网)	97.25	97.80	98.16	99.51	99.80
两期间挖方量-Pix4D(DTM)	99.44	99.45	99.50	99.96	99.98
两期间挖方量-传统测绘（方格网）	97.43	—	—	—	—
两期间挖方量-传统测绘（DTM）	99.34	—	—	—	—

参考文献

[1] 李明. 基于倾斜影像的城市三维场景重建若干关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2016

[2] 芦彦霖,张森,汲姣. 低空无人机倾斜摄影测量测图精度实证[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1 921-1 931

[3] 赵琪. 低空无人机倾斜摄影测量实景三维模型构建[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(4):230-236

[4] 冯增文,李珂,李梓豪,等. 低空无人机的倾斜摄影测量技术在城市轨道交通建设中的应用[J]. 测绘通报,2020(9):42-45

[5] 李英杰. 航空倾斜多视影像匹配方法研究[D]. 北京:中国测绘科学研究院,2014

[6] 孙玉超,杨帆,田松,等. 基于多源遥感影像的围填海项目监视监测系统的设计与应用[J]. 海洋开发与管理,2020,37(10):84-88

[7] 李廷,郭永刚. ENVI遥感影像制作解译及分析:以林芝县为例[J]. 西藏科技,2020(1):34-36

[8] 吴僭,胡腾胜,宋刚,等. 基于大疆悟2和Pix4D的小区域航测与地理空间建模[J]. 农技服务,2019,36(7):80-81

[9] 张雪冰,韦璐,郑湘辉,等. 无人机倾斜摄影三维建模软件对比分析[J]. 辽宁科技学院学报,2022,24(6):17-21

[10] 王壮壮. 倾斜摄影三维模型构建及其优化研究[D]. 赣州:江西理工大学,2022

[11] 卢亚龙. 基于Pix4D软件和EPS软件生产地形图的方法对比探讨[J]. 科学技术创新,2021,36(31):81-83

[12] 刘坦. Inpho、PhotoScan及Pix4D无人机正射影像处理软件对比[J]. 海峡科技与产业,2017(11):82-84