引文格式：朱亮宝,刘聪,邓国成,等. 无人机倾斜摄影技术在高密度三维地震勘探中的应用[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):77-81. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.08.015

无人机倾斜摄影技术在高密度三维地震勘探中的应用

朱亮宝[1, 2]，刘　聪[1, 2*]，邓国成[1, 2]，皮　伟[1, 2]
（1. 河南省地球物理空间信息研究院有限公司，河南 郑州 450009；2. 河南省地质物探工程技术研究中心，河南 郑州 450009）

摘　要：基于无人机倾斜摄影技术生产的数字表面模型（digital surface model，DSM）、高清数字正射影像（digital orthophoto map，DOM），提出了一套高效合理布设炮检点的设计优化方法。以某高密度三维地震勘探项目为实例，在全要素实景三维模型基础上进行了地形地貌快速识别分析，按避高就低避厚避障的基本原则优化炮检点布设，基本解决了复杂表层地震地质条件下的观测系统设计难点，研究了高清航飞成果在高密度三维地震勘探优化设计的技术流程，分析了优化设计后的面元属性均匀性及应用效果，在安全生产、提质增效、控制成本等方面具备很好的实用性。

关键词：无人机；倾斜摄影；高密度；三维地震勘探；观测系统；DSM
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0077-05

Application of UAV Oblique Photography Technology in High-density 3D Seismic Exploration

ZHU Liangbao[1,2], LIU Cong[1,2], DENG Guocheng[1,2], PI Wei[1,2]
(1. Henan Institute of Geophysics and Spatial Information, Zhengzhou 450009, China;
2. Henan Geological and Geophysical Exploration Engineering Technology Research Center, Zhengchou 450009, China)

Abstract: We proposed a set of efficient and reasonable design optimization methods for deploying gun detection points based on the digital surface model (DSM) and high-definition digital orthophoto map (DOM) produced by UAV oblique photography technology. Taking a high-density 3D seismic exploration project for example, we carried out a rapid identification and analysis of terrain and landforms based on a full element realistic 3D model. We optimized the layout of shot detection points according to the basic principle of avoiding high, low, and thick obstacles, which basically solved the design difficulties of observation systems under complex surface seismic geological conditions. We studied the technical process of optimizing the design of high-density 3D seismic exploration using high-definition aerial flight results, and analyzed the uniformity of panel properties and application effects after optimized design, which had good practicality in safety production, quality and efficiency improvement, cost control, and other aspects.

Key words: UAV, oblique photography technology, high-density, 3D seismic exploration, observation system, DSM

无人机具有机动快速、经济可靠的优点，其应用范围和领域非常广阔，在自然环境、应急救灾及测绘领域有着突出的效率和优势，国内许多学者开展了无人机倾斜摄影技术在地质勘查的相关应用研究，取得了较好的效果[1-5]。

本文基于前人研究成果，将无人机倾斜摄影技术应用到复杂地形地貌的高密度三维地震勘探中，提出一种基于数字表面模型（DSM）、高清数字正射影像（DOM）的布设炮检点的设计优化方法，并以实例进行应用分析，分辨率更高，应用效果更直观。

1　无人机倾斜摄影技术

通过在同一飞行平台上搭载多台传感器（常用的是五镜头相机），从垂直、倾斜等不同角度收集影像，可以获取更为完整准确的地面物体信息[6]。以垂直地面的角度拍摄的图像为正片，以一定的角度拍摄的图像称为斜片。通过从多个角度收集信息，并将其与图像POS信息或已知的控制点结合，图像中的每个点都赋予了三维坐标。根据图像数据，可以测量每个点、线和面，测量精度可达厘米级，自动创建三维地理信息模型，以便快速获取地理信息并直接量算建筑物、树木、桥梁和其他地物高度。

2　复杂地形高密度三维观测系统设计难点

1）勘探区地表起伏大，静校正问题严重[7]。技术人员实地踏勘时视野严重受限，难以选择最佳的炮点

项目来源：河南省豫地科技集团重点科技计划资助项目（2023-3）。
第一作者简介：朱亮宝（1989—），本科，工程师，从事地球物理勘探工作，E-mail：809981040@qq.com。
通信作者：刘聪（1994—），本科，助理工程师，从事地球物理勘探工作，E-mail：511587487@qq.com。

位置，影响施工效率。

2）勘探区表层地震地质条件复杂，结合奥维地图与人工踏勘进行变观设计时，主观性大，变观设计效率低，预设炮检点难以到位，实际覆盖次数均匀程度未知，无法满足提质增效的需求。

3）未对成孔工具、激发药量等进行分区管理，不能及时有效的指导高效生产。

3 技术流程优化

1）利用无人机进行高精度的图像、高程采集，对勘探区进行全要素实景的三维建模，制作生产高清DOM及DSM。

2）对DSM、DOM数据进行加载处理，结合实景三维模型进行分析，快速划分不同的地形地貌，厚度与坡度分区。

3）结合黄土高原丘陵树枝状沟谷发育的的地貌特点，按“避高、避陡、避厚、避障碍”的原则进行炮检点优化，划分不同优先等级的布设区。

4）对障碍物区进行矢量化，软件自动避障后人工干预，对炮检点布设进行检查优化，布设钻机与药量，生成SPS及KML等数据指导生产。

通过优化技术流程，该技术体现了明显的优势，实时快速查看勘探区的地形地貌变化，取代了大量的人工踏勘工作，大幅提高了炮检点的布设效率，促进了安全生产，节省了生产成本，有效提高了工作效率。

4 实际应用分析

4.1 勘探区概况

勘探区为典型的黄土塬区，有复杂的地貌条件，即沟、梁、塬、峁、坡并存[8]，地貌景观受流水、应力作用变得较为复杂，沟谷发育，极为陡峭，呈树枝状，原始地貌被肢解得支离破碎。勘探区地面标高+1 157～+1 313 m，相对高差约156 m。勘探区内道路较少，大部分区域被林区覆盖，勘探区内有多个村庄，中部有铁路，西部边界附近有高速，勘探区内还分布多条高压线及多处坟地。勘探区内分布少量厚黄土区，厚度可达50 m以上，厚黄土使地震波吸收衰减严重[9]。

4.2 图像采集

本项目充分利用无人机倾斜摄影技术，使用长航时无人机搭载倾斜五相机采集项目区影像数据，利用倾斜摄影测量原理对作业区进行全要素实景三维建模，并制作生产作业区域高清数字正射影像。作业技术流程如图1所示。

在航摄实施前，首先对数码相机进行检校，保证相机主点坐标、主距和畸变差方程系数符合规范要求。

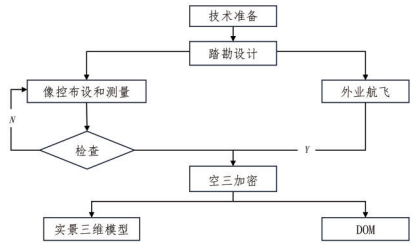


图1 作业技术流程

本次采用飞马无人机系统，根据影像精度要求，航向覆盖超出摄区边界线280 m，旁向覆盖超出摄区边界线4条航线，为了方便后期内业空三加密工作，地面采样距离（GSD）达到6 cm/像素，航向重叠度达到了80%，旁向重叠度达到了65%，航摄过程中，飞行速度12 m/s左右，相对飞行高度255 m，相同航线相邻图像间的航高差＜5 m，最大与最小航高差＜20 m。

4.3 实景三维建模与DOM数据生产

4.3.1 三维模型技术流程

利用PhotoMesh自动三维建模系统制作勘探区的真三维影像数据，制作流程如图2所示。

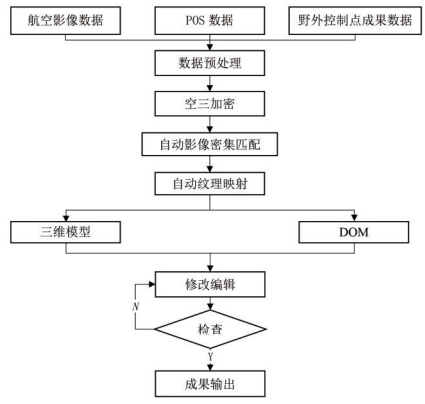


图2 三维建模工作流程

4.3.2 数据预处理

通过对数据的预处理，可以得到每幅影像的初始外方位元素，再加上提供的相机参数便可以将数据导入PhotoMesh自动三维建模系统模型制作。

4.3.3 全自动空三加密

在PhotoMesh自动三维建模系统中加载勘探区倾斜影像，输入相机参数，人为给定部分控制点，系统进行区域网的整体平差，通过各个光线束在空间范围的旋转与平移，模型之间的共同光线达到最佳交会，并且通过在控制点坐标系统中添加整体区域最佳地，实现目标对象的空间位置关系的恢复。

4.3.4　影像密集匹配

密集匹配技术：自动建模软件系统的影像匹配算法可达到高精度要求，自动匹配全部影像的同名点，通过提取影像中更多的特征点，构成密集点云，地物细节得以更精准的表达。

建筑物越稀疏，地物越简单的地方，点密集程度越低；反之则点密集程度高。

4.3.5　自动纹理映射

由于倾斜影像完全按照摄影测量原理进行同名点的匹配，保证了模型纹理的空间位置的准确性。利用影像密集匹配的结果，替换为：

白模的构成需要先经过空三建立的影像之间的三角关系构成三角TIN，自动建模软件可以实现从影像中对应纹理的计算，纹理可以自动映射到对应白模上，最后生成实景三维[10]。

4.3.6　实景三维模型输出

利用PhotoMesh软件输出制作成果要求坐标系下的OSGB格式三维成果。

4.3.7　数字正射影像生产

数据内容与格式：数字正射影像文件扩展名为*.TIF；影像坐标信息文件扩展名为*.TFW；数字正射影像文件以RGB色彩模式存储。

成果分辨率：数字正射影像成果分辨率统一设定为0.06 m。

精度指标：任务区数字正射影像成果精度和主要技术指标参照测绘行业规范CH/T 9008.3–2010《基础地理信息数字成果1∶500，1∶1 000，1∶2 000数字正射影像图》中1∶1 000数字正射影像成果精度指标。

数字表面模型生产：在空三加密成果基础上，进行点云数据生成，然后进行DSM数据编辑与拼接，编辑的重点区域包括房屋建筑、树木、路、水体及匹配出错的区域，再过DSM镶嵌、裁切与接边，即可生成DSM数据。

数字高程模型生产：数字高程模型（DEM）生产同样基于空三加密成果进行生产，经软件自动匹配、编辑生成DEM数据，生产过程中，重点做好DEM数据的拼接、图幅裁切、DEM接边工序。

数字正射影像生产流程：数字正射影像（DOM）生产是基于已获取的航空影像，使用已有合格的空三加密成果，利用满足精度指标的DEM数据对航空影像进行数字微分纠正和镶嵌匀色等工作，按照1∶500标准分幅裁剪生成数字正射影像图。

4.3.8　影像镶嵌

利用系统自动生成的镶嵌线加以人工编辑对纠正后的影像进行镶嵌、裁切。通过DSM和DEM智能判断地物并生成镶嵌线，绕开建（构）筑物，沿地物边缘生成，保证了房屋等建（构）筑物的完整性及接边的自然过渡，无明显的拼接痕迹。

4.4　地形地貌快速识别

本次生产的DSM不同于DEM，DSM包含了地表房屋、铁路、桥梁和树木等高度的地面高程模型，在DEM的基础上，进一步涵盖了地表建筑物及植被的高程信息，反映了最真实的地表情况[11]，搭配分辨率为0.06 m的高清数字正射影像DOM，二维、三维联动显示。

根据黄土高原丘陵地貌，综合人工踏勘黄土覆盖情况与高清实景三维模型分析，对黄土层厚度进行量化，把勘探区分为3种区域：①冲沟区–优先布设区（红色区域）；②薄黄土区–次等布设区（青色区域）；③厚黄土区–可选布设区（黄色区域）。如图3所示。

结合DSM生成的勘探区高程变化趋势图（见图4）提取勘探区坡度信息，按照不同的坡度值进行分区（见图5~6），图6为勘探区坡度0~90°分布图，图6a为20°以上斜坡，图6b为30°以上斜坡，图6c为40°以上斜坡，图6d为50°以上斜坡。30°以上斜坡区域是施工中需要重点避开的“避陡”区域，不布设炮点，追踪其边界进行矢量化，统计出禁炮区域的面积，应用到炮点布设中可以快速避开此类区域，指导生产，辅助安全施工。



图3　地形、地貌分类

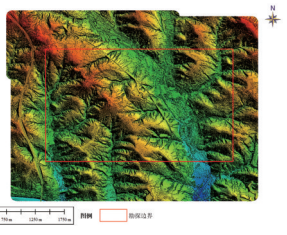


图4　勘探区高程图

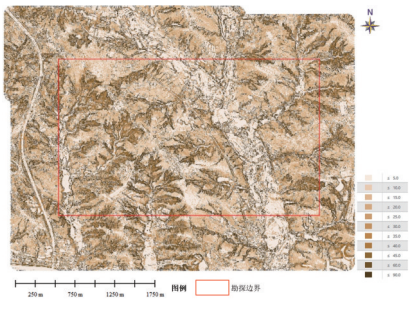
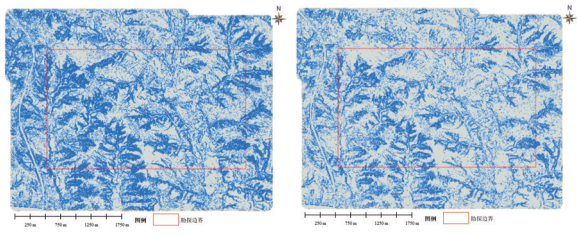
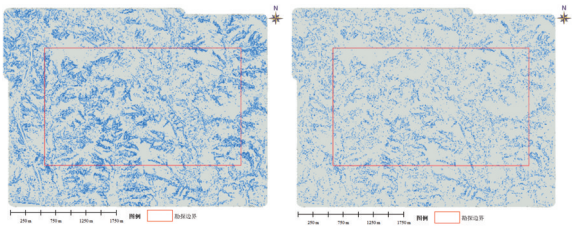


图5　勘探区0~90°坡度分区

结合岩性调查，可以圈定不同的黄土层厚度区域；在实景三维模型中可以直观识别道路，快速到达



a 勘探区20°以上斜坡区域 b 勘探区30°以上斜坡区域



c 勘探区40°以上斜坡区域 d 勘探区50°以上斜坡区域

图6 勘探区20~50°以上斜坡分区

勘探区；高精度识别各种障碍物，高压线及坟地清晰可见，避免出现工农关系处理难题。另外，高清数字正射影像及KML、SHP等文件可以导入手机端奥维地图，地图信息更新，分辨率及精度更高，可以有效地提高施工效率。

4.5 炮检点布设优化

4.5.1 炮检点位置优化

首先按照设计的观测系统布设理想状况下的炮检点，如图7所示，针对铁路、高速路、村庄等大型障碍物区，进行安全距离外的自动避障，如图8所示，部分炮点经自动避障后仍不合适，可以在实景三维模型中按炮点网格进行二维、三维联动人工检查调整，如图9所示。调整原则为：炮点布设避厚就薄，避陡就缓[12]，厚黄土区域少布设，避开≥30°斜坡区域及障碍物，障碍物区外适当加密布设。增加覆盖次数来改善低信噪比剖面[13]。检波点的布设调整同理，避开陡坡与障碍物。

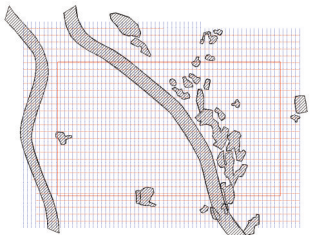


图7 理想布设观测系统

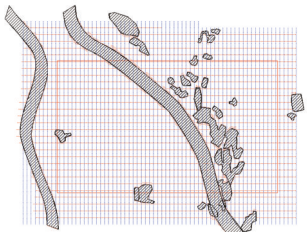


图8 观测系统自动避障

4.5.2 激发因素优化设计

通过对勘探区表层岩性分析，划分了不同岩性的分布范围，不同岩性区域采用不同成孔工具及井深，保障单炮激发质量。根据成孔深度、炮点与障碍物的安全距离及资料质量，确定最佳药量，厚黄土区适当增加激发深度选用大药量增强有效信号的能量[14]；

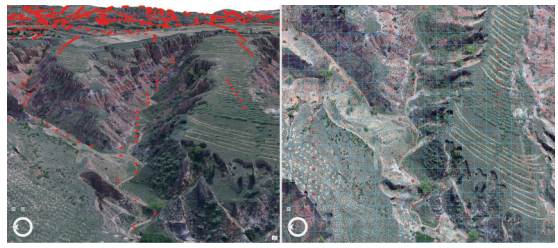


图9 二维、三维联动调整炮点

冲沟内及村庄附近适当减小药量。

实验工作确定激发因素后，综合分析勘探区黄土层厚度变化、坡度、道路及井深要求，进行成孔工具分区，洛阳铲布设在厚黄土区，井深不低于15 m，药量3 kg；气动钻布设在薄黄土区，“避干就湿，避黄就红”[15]，井深要求进入致密红土层以下3 m，药量2 kg；大部分区域约6~10 m，局部约10~15 m，水钻布设在冲沟区，井深6 m，药量1 kg。更为准确地估算成孔工作量、火工品用量、成本等，指导生产。

4.6 面元属性均匀性分析及应用效果

比较分析设计优化前后的覆盖次数，理论设计满覆盖次数80次，优化设计后，覆盖次数整体上较均匀，非变观区域满覆盖次数80次以上，变观区域的覆盖次数满足技术要求的覆盖次数不低于50次，优化设计后的面元内近、中、远炮检距及方位角分布均匀合理，满足设计的需要。

5 效果分析

基于无人机倾斜摄影技术进行设计优化，3个人5 d完成了原本10人15 d左右完成的炮检点布设工作，本勘探区高密度三维地震数据共采集67束，黄土塬上1 468炮，冲沟中、30°以下斜坡区域8 241炮，30°以上陡坡区域1 581炮，共计11 290炮，其中优化调整3 647炮，优化调整率32.3%。经过采集设计的优化，资料信噪比有较大提高，通过叠前偏移地震时间剖面可知，村庄障碍物区域下的目的层反射波组（T_6、T_9、T_o）齐全，连续性好，信噪比高[16]，为后续的精细解释打下坚实基础。

6 结 语

通过无人机倾斜摄影技术在复杂地形地貌的勘探区进行航飞，制作生产高清高精度的实景三维模型，结合钻孔等相关地质资料，快速识别地形地貌，划分不同勘探区，进行“避高、避陡、避厚、避障碍”的炮检点的优化设计，同时进行成孔工具及井深、药量的预设计，保障勘探区覆盖次数、炮检距、方位角的

均匀性，形成一套适用于复杂地形地貌的基于DSM、DOM数据的炮检点优化布设的技术，提高了地震资料的品质，对于提高设计精度、资料质量、施工效率、成本控制、保障安全等工作有科学的指导意义。本次研究通过无人机倾斜摄影技术生产的DSM、DOM数据信息丰富，目前仅提取了部分信息应用于高密度三维地震勘探的设计优化，更多的信息有待进一步发掘使用。

参考文献

[1] 朱守信,李军吉,梁作前. 无人机倾斜摄影在露天矿山开采监测中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(5):60-62

[2] 赵伟山,李治明,胡天明,等. 基于倾斜摄影空地一体单体化建模技术的研究[J]. 地理空间信息,2022,20(6):102-105

[3] 刘家橘,刘家橙,王晓燕,等. 倾斜摄影三维建模在矿山恢复调查中的应用[J]. 地理空间信息,2020,18(7):48-50

[4] 郝晓敏. 基于DEM的黄土塬三维地震采集优化设计方法[J]. 石化技术,2021,28(11):120-121

[5] 刘忠群,杜春江,金东民. 黄土塬区三维地震采集炮检点优化设计技术研究及应用[J]. 石油物探,2016,55(2):188-195

[6] 刘善彬,张蕊,李连苹. 农村房屋不动产调查中无人机倾斜摄影技术研究[J]. 能源与环保,2022,44(8):143-147

[7] 林伯香,肖万富,李博. 层析静校正在黄土塬弯宽线资料处理中的应用[J]. 石油物探,2007,46(4):417-420

[8] 程建远,李宁,侯世宁,等. 黄土塬区地震勘探技术发展现状综述[J]. 中国煤炭地质,2009,21(12):72-76

[9] 吕公河,张庆淮,段卫星,等. 黄土塬地区地震勘探采集技术[J]. 石油物探,2001,40(2):84-91

[10] 苏紫乾,周丽晨. 无人机倾斜摄影测量的影像处理技术与应用三维建模系统的研究[J]. 城市建设理论研究,2024,13(2):178-180

[11] 刘青,刘桢梦,李雅平,等. 基于DSM的城市公园对$PM_{2.5}$和PM10的消减特征研究:以南昌市人民公园为例[J]. 江西农业大学学报,2024,45(1):173-183

[12] 刘宝国. 鄂尔多斯盆地南部黄土塬区三维地震勘探关键技术研究[J]. 石油物探,2014,53(3):330-337

[13] 孙景旺,杜中东,任文军,等. 鄂尔多斯盆地黄土塬区多线地震采集技术[J].石油物探,2003,42(4):505-507

[14] 赵延江. 黄土塬地区地震勘探激发技术探讨[J]. 石油物探,2006,45(6):646-650

[15] 邓国振,张树海,龙利平,等. 黄土塬二维直测线地震勘探方法及效果[J]. 石油物探,2003,42(2):219-223

[16] 赵贤正,邓志文,白旭明,等. 基于视觉特征的地震资料品质分析方法[J]. 石油地球物理勘探,2016,51(增刊):42-46

(上接第76页)

Learning Algorithms for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal[J]. Sensors,2019,19(12):2 769

[11] Guyennon N,Salerno F,Rossi D,et al. Climate Change and Water Abstraction Impacts on the Long-term Variability of Water Levels in Lake Bracciano (Central Italy):A Random Forest Approach[J]. Journal of Hydrology:Regional Studies,2021,37:100 880

[12] Gao L,Wang X,Johnson B A,et al. Remote Sensing Algorithms for Estimation of Fractional Vegetation Cover Using Pure Vegetation Index Values:A Review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2020,159:364-377

[13] Jia K,Liang S,Gu X,et al. Fractional Vegetation Cover Estimation Algorithm for Chinese GF-1 Wide Field View Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 177(9):184-191

[14] Yi G,Zhang T. Delayed Response of Lake Area Change to Climate Change in Siling Co Lake, Tibetan Plateau, from 2003 to 2013[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2015,12(11):13 886-13 900

[15] 陆天启,邵长高,任旭光,等. 基于GEE平台的1990—2019年松涛水库水体面积时空变化[J]. 科学技术与工程,2021,21(27):11 472-11 479

[16] 李爱民,范猛,秦光铎,等. 卷积神经网络模型的遥感反演水质参数COD[J]. 光谱学与光谱分析,2023,43(2):651-656

[17] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):515-520

[18] 国家水利部水利局. 2005年水情年报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007

[19] 国家水利部水利局. 2010年水情年报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011

[20] 伍红雨,李春梅,王迪龙. 近55年广东“龙舟水”异常特征及成因分析[J]. 热带气象学报,2017,33(5):608-616

[21] 伍红雨,杜尧东,秦鹏. 华南暴雨的气候特征及变化[J]. 气象,2011,37(10):1 262-1 269