

doi: 10.12097/gbc.2024.01.039

卓武, 陈松, 冯美娜, 赵秋茹, 陈艳君. 2025. 基于无人机倾斜摄影的地震勘探创新应用技术[J]. 地质通报, 44(7): 1350-1358.

Zhuo Wu, Chen Song, Feng Meina, Zhao Qiuru, Chen Yanjun. 2025. Innovative application technology of seismic exploration based on UAV tilt photography[J]. Geological Bulletin of China, 44(7): 1350-1358(in Chinese with English abstract).

# 基于无人机倾斜摄影的地震勘探创新应用技术

卓武<sup>1</sup>, 陈松<sup>2\*</sup>, 冯美娜<sup>1</sup>, 赵秋茹<sup>1</sup>, 陈艳君<sup>1</sup>

(1. 中国石油东方物探公司辽河物探分公司, 辽宁 盘锦 124010; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心  
(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205)

**摘要:**【研究目的】现今地震勘探的复杂程度逐步加大,同时也亟需提高地震勘探的野外施工效率。随着无人机技术的快速发展,其在地震勘探中的应用范围逐步扩大,且取得了较好的实际效果。【研究方法】主要论述了无人机倾斜摄影技术的原理方法、三维建模技术及通过三维实景模型,对各类地理和地物信息进行识别提取,并且全局优化与共享提取的各类信息。【研究结果】基于上述方法,可实现无人机仿地飞行进行激发井口的巡查和地震勘探无线节点质控数据的回收,以及复杂地震勘探区域工序人员行进路径的优化选择,切实提高了生产效率。【结论】在复杂环境下地震生产当中,该方法促进了地震野外数据采集的高效生产与管理,在智能油气地震勘探中具有广泛的应用前景。

**关键词:** 无人机倾斜摄影;地震勘探;复杂区域;巡井;质控数据回收;信息共享

**创新点:** 基于无人机倾斜摄影三维建模技术对各类地理和地物信息进行识别提取,并且全局优化与共享;依据无人机倾斜摄影成果创新性地实现无人机仿地飞行,进行激发井口的巡查和地震勘探无线节点质控数据的回收,以及复杂地震勘探区域工序人员行进路径的优化选择。

中图分类号: P631.4; P315.61 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)07-1350-09

## Innovative application technology of seismic exploration based on UAV tilt photography

ZHUO Wu<sup>1</sup>, CHEN Song<sup>2\*</sup>, FENG Meina<sup>1</sup>, ZHAO Qiuru<sup>1</sup>, CHEN Yanjun<sup>1</sup>

(1. Liaohe Geophysical Prospecting Company, BGP Inc., PetroChina, Panjin 124010, Liaoning, China; 2. Wuhan Center, China Geological Survey(Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China)

**Abstract:** This paper is the result of geophysical exploration engineering. **[Objective]** The complexity of seismic exploration is gradually increasing currently, and it is also urgent to improve the construction efficiency of seismic exploration. With the development of UAV technology, its application scope in seismic exploration is gradually expanding and has achieved good results. **[Methods]** This paper discusses the principles, methods, 3D modeling techniques, the recognition and extraction of various geographic, and the global optimization and sharing of the extracted information. **[Results]** Based on the above method, it is possible to implement the inspection of the stimulation well and the recovery of QC data from wireless nodes, and optimization of personnel travel paths in complex seismic exploration areas, and effectively improving the seismic exploration production efficiency. **[Conclusions]** Therefore, in complex seismic exploration production environments, this method promotes efficient production and management of the field data acquisition

收稿日期: 2024-01-24; 修订日期: 2024-10-08

资助项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项课题《辽河油田千万吨稳产关键技术研究与与应用》(编号: 2017E-1602)

作者简介: 卓武(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事地球物理勘探与研究。E-mail: zhuowu2007@163.com

\* 通信作者: 陈松(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地震处理与解释工作。E-mail: anhuisongchen@163.com

inseismic exploration, and it has broad application prospects in intelligent oil and gas seismic exploration.

**Key words:** UAV tilt photography; seismic exploration; complex region; well inspection; recovery of QC; data information sharing

**Highlights:** The recognition and extraction of various geographic and terrain information based on UAV tilt photography 3D modeling technology, and the global optimization and sharing of the extracted information; Innovative implementation for the inspection of the stimulation well and the recovery of QC data from wireless nodes, and optimization of personnel travel paths in complex seismic exploration areas based on UAV tilt photography results.

**About the first author:** ZHUO Wu, male, born in 1986, master, engineer, mainly engaged in geophysical exploration and research; E-mail: [zhuowu2007@163.com](mailto:zhuowu2007@163.com)

**About the corresponding author:** CHEN Song, male, born in 1986, master, senior engineer, mainly engaged in seismic data processing and interpretation. E-mail: [anhuisongchen@163.com](mailto:anhuisongchen@163.com)

**Fund support:** Supported by Major Science and Technology Special Project of China National Petroleum Corporation "Research and Application of Key Technologies for Stable Production of Ten Million Tons in Liaohe Oilfield" (No. 2017E-1602)

随着无人机航拍技术的迅速发展并日益成熟, 航拍影像在地表形态起伏大、坡度陡、植被茂盛、障碍物多、交通条件差等复杂施工区域, 得到了较好的应用(袁建国等, 2020; 舒艳等, 2021; 肖关华等, 2022), 促进了无人机航测技术在复杂区域地震勘探中全方面的应用发展。现今无人机航拍技术在地震勘探中应用的数据主要是影像图和数字三维模型(翟俊伟等, 2014), 可以满足地面不同分辨率的要求(王艳梅等, 2013), 为地震勘探提供真实、准确的地形地貌特征、地表岩性、人文、交通、水文、构造特征等直观信息, 实现了室内踏勘、地貌分区、坡积带识别、测线调整、物理点偏移布设、施工设备配置、采集导航、数字化地震队等要求(史小奇等, 2016)。

由于现今的地震勘探野外施工对航测数据的要求显著提高, 已经不能仅参考无人机航测正射影像, 还需要通过无人机倾斜摄影, 对高清航测数据进行精细化处理, 以此构建高精度的立体三维模型, 获取高精度的地理信息。本文依托鄂尔多斯黄土塬地区、青海海西沙漠戈壁某区域的三维地震勘探项目无人机倾斜摄影应用, 实施地震勘探工程, 当使用炸药作为激发源时, 需要对激发点井口进行巡查, 确认井口环境及民爆物品是否安全, 在地表复杂区域无人机仿地飞行可高效实现激发点井口巡查任务。本文研究无人机倾斜摄影原理方法, 并以此为基础研究无人机仿地飞行技术, 实现地震勘探巡井应用, 基于此进行无人机对无线节点质控数据的回收, 通过地物信息全局优化与共享技术实现地震勘探的精细化预案, 进行地震勘探区域的危险源识别及标识, 以

及地震勘探工序人员行进路径的优化选择。这些基于无人机的应用将为复杂区域地震勘探创新施工方式提供更多有利的应用条件, 可进一步实现地震勘探生产的精细化设计施工要求, 有效提高地震数据采集效率和及时地提供安全保障。

## 1 无人机倾斜摄影系统

无人机倾斜摄影是在无人机正射的基础上增加 4 个方位摄影的无人机航空摄影技术(田文斌等, 2023)。如图 1 所示, 无人机倾斜摄影能够同时从前视、后视、左视、右视和下视 5 个不同角度采集影像, 其中下视为和地面垂直的正射影像, 前后左右视为和地面有一定倾斜角度的倾斜摄影, 可获取到更加丰富的建筑物等地物的顶面及侧视图的高分辨率纹理, 能够真实、高效地反映地面物体的情况, 高精度地获取地表地物空间位置、地质、纹理等信息。并且可以通过先进智能定位、建模、融合等技术, 精准构建真实的三维实景模型。

无人机倾斜摄影系统主要由飞行平台、搭载的载荷和地面站构成。现今, 飞行平台主要是固定翼和多旋翼的无人机, 倾斜摄影搭载的载荷为五镜头倾斜摄影相机与定位定向系统, 地面站主要是实时获取无人机的飞行高度、速度及航线执行情况, 也可通过其给无人机发送相关指令(张林杰等, 2023)。

无人机倾斜摄影分为外业采集和内业数据处理 2 个部分。外业采集根据需求采用不同特点的无人机系统, 一般而言, 低空、大比例尺无人机倾斜摄影采用多旋翼无人机, 其体积相对较小, 运输携带方便

灵活,对起降地表条件要求低,基本不受限制。而大范围、小比例尺多采用固定翼无人机,其单次作业时间长、飞行快、效率高,但对起降地表条件有一定要求。可根据地震勘探生产要求和无人机的特点及其适用领域选择合适的无人机。内业数据处理主要包括空中三角测量、影像匹配、点云加密与纹理生成、三维模型构建、影像数字地表模型和数字地表模型生成、实景三维建模等(田文斌等,2023)。

## 2 无人机倾斜摄影原理

### 2.1 相机测量系统

无人机摄影相机是专业测量相机,与普通非测量相机在结构和性能上差异较大,如镜头、像素、传感器等需满足测量设计要求。倾斜摄影采用的是五目(前视、后视、左视、右视和下视)倾斜摄影相机。同时,还搭载高精度 GNSS-RTK/PPK 定位系统,无人机在飞行采集作业时会获取拍摄照片的高精度空间位置坐标和姿态参数。GNSS-RTK 定位是实时输入差分数据(宋伟等,2023),需要很高的定位频率;在空间环境简单,小范围航测中可有效定位。而 GNSS-PPK 定位技术是一种动态后处理差分技术(孙斌等,2023),利用载波相位进行事后差分获得高精度的定位,在提高 POS 数据精度的同时消除相机拍照瞬间和卫星导航记录拍照点坐标之间的时间差,适合地形复杂、障碍物较多、大范围区域的无人机航测。相较而言,GNSS-PPK 定位技术更适合高速飞行的无人机,既能提高无人机航测精度,又能扩展无人机航测的应用环境。本次倾斜摄影搭载的即为此系统。

### 2.2 像片内方位元素

像片内方位元素是确定摄影光束在像方几何关系的基本数据,表征摄影中心(摄影物镜的像方节点)与像平面的相关位置,是摄影测量中的重要参数。如图 2 所示,其包括摄影中心  $S$  至像平面的垂直距离(即焦距) $f$ 和像主点  $O$  在像片平面坐标系中的坐标  $x_0$ 、 $y_0$  三个参数, $P$  是像片平面坐标系原点,像片内方位元素的测定严格由相机检校来完成。

### 2.3 像片外方位元素

像片外方位元素是确定摄影光束在物方的几何关系的基本数据,表征摄影光束在摄影瞬间的空间位置,其包括摄影中心  $S$  在某一空间直角坐标系中的三维坐标值( $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$ )和确定摄影光束空间方位

的 3 个角定向元素,共 6 个参数。其中的 3 个角定向元素,常因采用的转角系统不同而用不同的元素表示,在中国通常采用以  $Y$  轴为主轴的转角系统,即表示为航向倾角  $\psi$ 、旁向倾角  $\omega$  和像片旋角  $\kappa$ ,如图 3 所示。

### 2.4 无人机航飞参数

无人机航飞参数主要包括地面分辨率、飞行航高、航向重叠度、旁向重叠度等。由于倾斜摄影的成像方式与正射影像不同,所以为了保证后期处理影像成果的精度,以及满足地震生产的需求,无人机倾斜摄影的采集参数也不同于正射影像,其航拍的航向重叠度不低于 80%,旁向重叠度不低于 60%,并且 5 个方位的影像分辨率要一致。航拍的地面分辨率根据具体的要求设计,它涉及相机的镜头焦距、像元尺寸、无人机的摄影航高等因素,地面分辨率计算公式如下:

$$GSD = \frac{a * H}{f} \quad (1)$$

式中: $H$  为航高(m); $f$  为镜头焦距(mm); $a$  为相机的像元尺寸( $\mu\text{m}$ ); $GSD$  为地面分辨率。

由公式(1)可知,像片的地面分辨率与无人机飞行航高成正比,而无人机有一定的安全飞行高度,所以对于地面分辨率,在镜头焦距、像元尺寸确定的情况下,其值不能无限降低。对于地震勘探生产而言,像片的地面分辨率不大于 0.1 m 就足以满足地震生产施工的要求。

### 2.5 像控点布设

在倾斜摄影航测作业中,为了保证后期成果模型精度,像控点布设是一种最基本的保证精度的方法。其位置的选择和坐标的测定直接影响到内业成图的数学精度(李亚东等,2018)。一般根据测区范围统一布置像控点,且应均匀、立体分布,布设在同一位置的像控点应联测成平高点。此外,像控点点位的分布应避免形成近似直线;若无法回避,点位应尽量选在旁向重叠中线附近。

以辽河油田某勘探区域部分航飞区域像控点布设前后的处理成果精度做分析,如图 4 所示,该航飞区域内共布设 5 个像控点,其中 4 个作为参与处理的像控点,另 1 个为检核点,其测量坐标见表 1。

对加入像控点前后的处理成果进行精度对比分析(表 1、表 2),可以看出,加入像控点的成果精度明

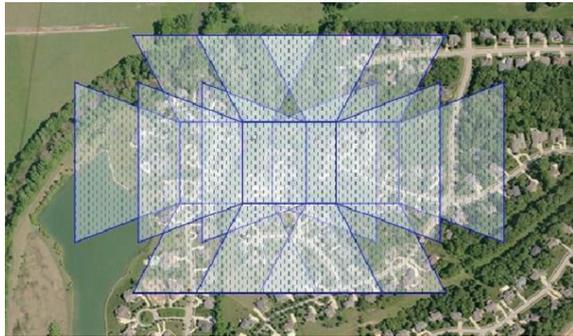


图 1 倾斜摄影方式

Fig. 1 Tilt photography method

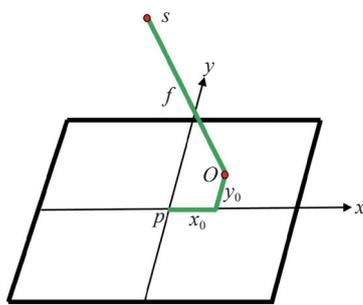


图 2 像片内方位元素

Fig. 2 Interior orientation elements of photo

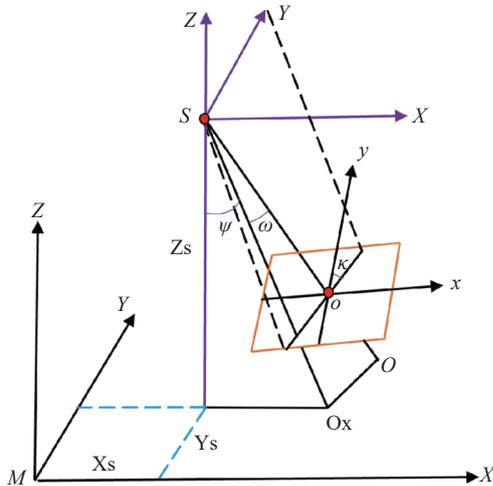


图 3 像片外方位元素

Fig. 3 Exterior orientation elements of photo

航向倾角  $\psi$ —SO 在 XZ 平面上的投影 SOx 与 Z 轴的夹角; 旁向倾角  $\omega$ —SO 与其在 XZ 平面上的投影 SOx 的夹角; 像片旋角  $\kappa$ —YSO 平面在像片上的交线与像平面坐标系 y 轴的夹角

Course tilt angle  $\psi$ —The angle between the Z-axis and SOx which is projection of SO on the XZ plane; Lateral tilt angle  $\omega$ —The angle between SO and SOx which is projection of SO on the XZ plane; Photorotation angle  $\kappa$ —Included angle between the intersection line of YSO plane on the photo and the y-axis of the image plane coordinate system



图 4 像控点位置图

Fig. 4 Location map of image control points

表 1 未加像控点精度

Table 1 Accuracy without image control points

序号	平面坐标差/m	原高程/m	处理成果高程/m	高程差/m	备注
k1	0.172	7.481	11.313	3.832	像控点
k13	0.217	5.192	8.889	3.697	像控点
k14	0.261	6.432	9.702	3.270	像控点
k15	0.089	5.523	9.037	3.514	检核点
k16	0.110	4.688	8.254	3.566	像控点

表 2 加入像控点精度

Table 2 Accuracy with image control points

序号	平面坐标差/m	测量高程/m	处理成果高程/m	高程差/m	备注
k1	0.000	7.481	7.365	0.116	像控点
k13	0.000	5.192	5.268	0.076	像控点
k14	0.000	6.432	6.437	0.005	像控点
k15	0.244	5.523	5.530	0.007	检核点
k16	0.000	4.688	4.641	0.047	像控点

显优于未加入像控点的, 并且满足陆上石油物探测量与定位技术规范的要求。

### 2.6 处理软件

无人机航测常用的处理软件包括 PIX4DMapper、ContextCapture、Inpho、UASMaster、大疆智图等。对于无人机倾斜摄影, ContextCapture 和大疆智图处理软件在三维建模等方面精度更高, 处理成果效果更好。

### 3 高分辨率高精度三维建模

无人机摄影三维建模以往采用 3dsMax、CAD

等软件,需手动操作建模,步骤繁杂,效率不高,模型成果精度低。现今采用ContextCapture、大疆智图等软件进行建模,其采用三维可视化技术建立纹理信息,同时结合人工调整修饰,使后期处理出来的三维实景模型更符合实际。

无人机倾斜摄影影像获取方式和成像方式的改变,使资料处理方法更复杂。图5为三维建模流程图,具体如下:首先准备整理航测数据,包括POS数据、像控点和航摄照片,其中POS数据经过PPK后差分解算处理校正,包含空间坐标和姿态数据。其次导入POS数据、像控点和航摄照片,设置坐标系统和相机参数,进行初始化处理,对相机进行检校和影像畸变修正,自动提取连接点和自由网平差,进行影像相对定向(张坤鹏等,2017)。然后使用控制点进行刺点,以平差和纠正区域网,进行绝对定向。完成后进行空三处理得出质量参数,包括相机参数优化后的相对误差,照片位置计算后的相对误差等参数。若质量不合格则修改相应参数重新进行空三处理,直至达到精度要求,若质量合格则采用多视影像密集匹配技术生成高密度三维点云,建立不同复杂程度的三角格网模型,从而生成三维TIN模型矢量构造,再将TIN模型封装成三维白膜模型,而后在白膜模型的基础上进行纹理映射,最后完成三维建模。

无人机倾斜摄影技术已应用于辽河油田在鄂尔

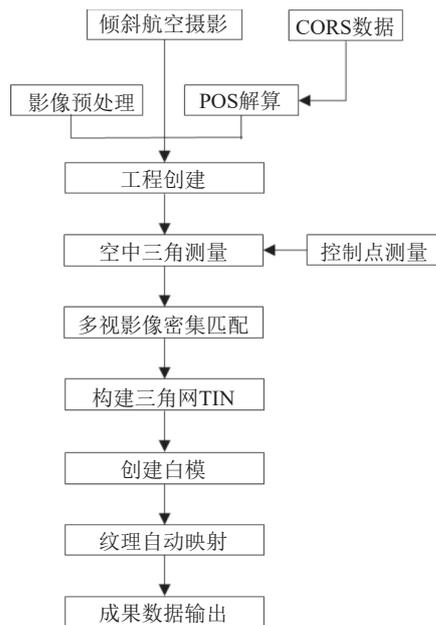


图5 三维建模流程图

Fig. 5 Modeling flowchart

多斯盆地实施的地震勘探中,航拍采用架构航线,飞行转弯半径为100 m,飞行速度达到19 m/s,摄影航高358 m,旁向重叠率50%,航向重叠率65%。图6为三维数字地表模型,清晰地展示了该区域的地表起伏,且可以分辨出地表建筑、树木等,将地表各种地物的高精度高程落差刻画地非常精细,这是后期利用无人机技术实现地震勘探创新性应用的地理信息数据基础。

## 4 地震勘探应用

基于无人机倾斜摄影和石油地球物理勘探的特点,本次选用灵活高效的垂直起降固定翼无人机作为倾斜摄影的无人机平台,对地震勘探区域进行了无人机倾斜摄影的外业采集和内业处理,获得了高精度的三维模型,运用在基于仿地飞行的激发井口巡查,节点质控数据回收等(李珊珊,2019),实现了地物信息全局优化与共享。

### 4.1 基于仿地飞行井口巡查

在实施地震勘探工程时,使用炸药作为激发源,按照地震勘探激发点钻井下药规范,需核查井口环境安全是否合理,并拍摄现场照片。在人文活动频繁和自然条件恶劣时期,前期已经确认安全合理的激发点井口会出现被破坏的情况,因此,须对激发点井口进行巡查,确认井口环境及民爆物品是否安全。

在地表复杂区域无人机仿地飞行可高效实现激发点井口巡查任务,无人机仿地飞行(图7)的实现主要取决于无人机飞行控制系统的支持,目前主要有2种方式实现仿地飞行,分别基于高程数据库和基于三维数字地表模型(图6)。本次采用后一种方式。将航测处理后的三维模型数据导入到无人机飞控系统中,根据勘探区域不同地表环境来规划实施无人机仿地飞行巡井(图8)。可将工区情况进行敏感区域划分,即人文活动频繁区和人烟稀少的区域,采用视频和照片相结合的方式拍摄,保障激发点井口巡查效率、质量及安全。

#### (1) 人文活动频繁区

在交通便利、人员易到达的敏感区域,如鄂尔多斯黄土塬地区的激发井口容易被人为破坏,宜采用“点点到位”巡查方式,炮点正上方低空拍照,清晰度较好,炮线和标志旗能够清晰分辨,具有较好的效果。

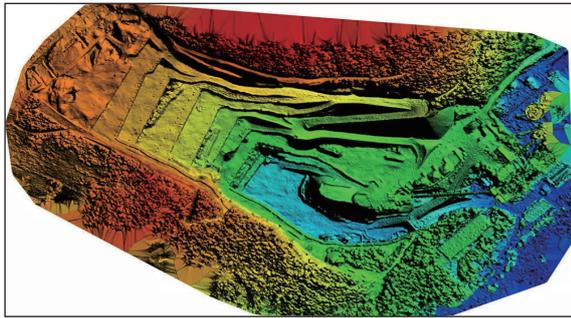


图 6 三维数字地表模型(局部)

Fig. 6 3D Digital surface model(part)

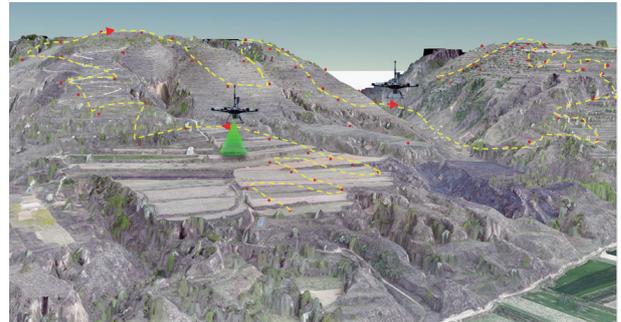


图 8 无人机仿地飞行巡井

Fig. 8 Patrol well by UAV simulating ground flight

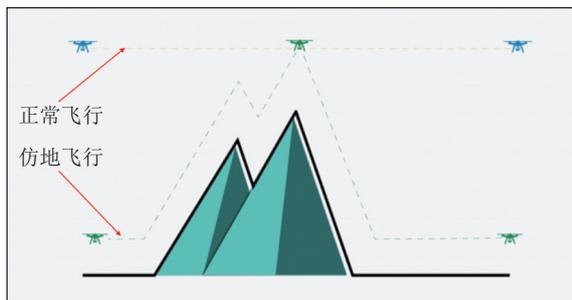


图 7 无人机仿地飞行示意图

Fig. 7 Schematic diagram of UAV simulating ground flight

不定期针对巡查过的区域进行同航线、同高度复飞,通过软件进行 2 次照片的对比分析(图 9),能够即时辨识不合格点位,并分析其原因。针对可能存在风险的点位,派人实地核查,流程如下:①制定仿地飞行拍照任务;②第一次飞行拍照;③建立井口基准;④第  $n$  次飞行拍照;⑤与基准进行比对;⑥分析结果。图 9 展示了在青海海西沙漠戈壁某区域激发井口无人机巡查结果,此次无人机飞行航高为

280 m,云台角度为 $-28^\circ$ ,可高频次巡查,3 d 一循环,单个架次覆盖面积达  $4.86 \text{ km}^2$ ,1 d 完成 4~5 个架次,覆盖范围为  $19.44\sim 24.3 \text{ km}^2$ ,拍摄照片的分辨率能达到  $0.05 \text{ m}$ 。通过 2 次飞行所拍照片(图 9)目视化对比,可直观地发现异常现象,再通过实地勘察确为井口异常,显著地提高了野外数据采集效率。

#### (2)人烟稀少的区域

对于人烟稀少的区域,可以采用无人机仿地飞行拍摄视频的方式,对炮排进行“大面积的巡查”(图 10)。这种方式能够缩短巡查区域的循环周期,及时发现工区内的可疑人员、车辆活动。

对任务进行科学的划分,根据目前无人机巡井效率,可以 3 d 一个循环,实现高频次巡查,单个架次覆盖面积为  $4.86 \text{ km}^2$ ,1 d 可完成 4~5 个架次,覆盖范围为  $19.44\sim 24.3 \text{ km}^2$ 。

#### 4.2 节点质控数据回收

无线节点采集技术(王玉伟等,2022)已广泛应用于石油地震勘探中。目前,对节点采取的质控方

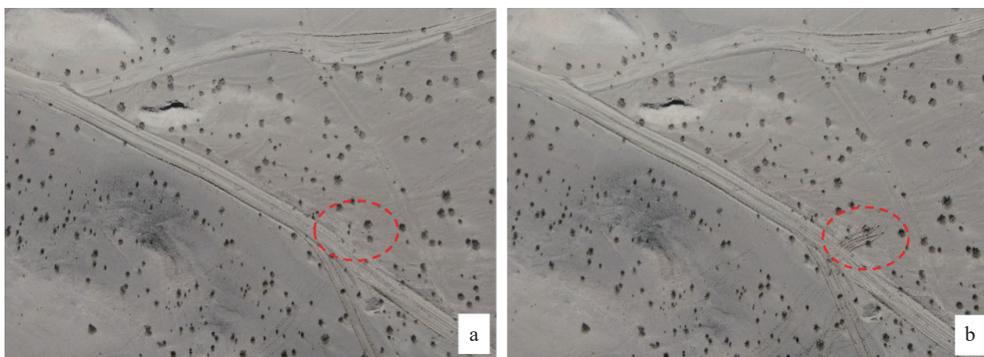


图 9 照片对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of photos

a—第一次拍摄照片;b—第  $n$  次拍摄照片

a—First time taking photos; b—The nth taking photos

式多为基于人工的现场巡查方式,以获取相关质控数据,其耗时长、效率低,不能满足地震生产的高效要求。为快速高效获取节点质控数据,采用无人机搭载无线节点数据回收设备对节点质控数据进行回收(黄兴琦等,2015),从而可以快速有效地获取无线节点设备的状态信息,保障无线节点设备的正常运行,可满足高效地震施工。

无人机搭载的节点质控数据回收设备采用无线方式在空中与地面节点进行连接,从而获取其质控数据。这种无线连接方式对距离有一定的要求。根据搭载设备的功率不同,其连接距离也不同,为了保障无人机回收节点数据的有效性,无人机飞行高度必须始终保持在一定范围内。通过倾斜摄影(图1)建立的地表三维模型(图6)可以为搭载质控回收设备的无人机飞行提供飞行航线规划依据,可根据不同地形设计不同的飞行路线,保证无人机快速准确地实现节点质控数据的回收(图11)。其流程为:①接收任务设计轨迹;②航飞质控数据采集;③数据实时上传服务器;④云端数据分析、下发整改

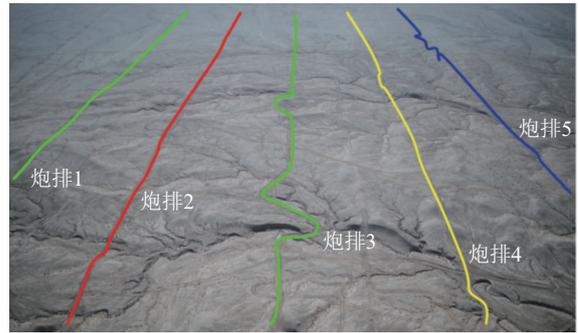


图10 无人机仿地飞行视频巡查

Fig. 10 Video inspection by UAV simulating ground flight

任务;⑤野外整改闭合。

如图12所示,以接收线距160 m,道距40 m的三维地震勘探为例,本次做了12种飞行方案回收节点质控数据,其中包括4种三线同时收取,4种四线同时收取,3种五线同时收取和1种二维线直飞收取节点质控数据。

采用12种飞行方案回收节点质控数据,其中三线收取4次,四线收取4次,五线收取3次,二维线直飞1次,线距160 m,道距40 m,各种飞行方案的



图11 无人机回收节点质控数据流程图

Fig. 11 Flowchart of recycling node QC data by UAV



图12 无人机回收节点数据方式

Fig. 12 Method of recycling node QC data by UAV

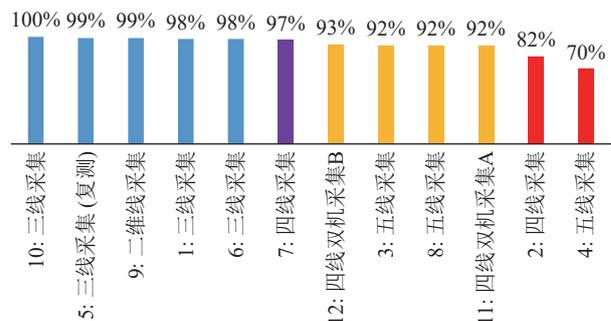


图13 无人机回收节点数据效率

Fig. 13 Efficiency of recycling node QC data by UAV

飞行位置关系如图 12 所示。得出的采集效率如图 13 所示, 直观地说明无人机采用三线拾取节点质控数据的方式为最佳。在鄂尔多斯盆地宜川地区某地震项目中, 采用无人机回收节点数据, 飞行航高为 130 m, 飞行速度为 13 m/s, 单次飞行回收节点数据的回收率能达到 95%。

### 4.3 地物信息全局优化与共享

在复杂地区实施地震勘探时, 由于探区内城镇密集, 地形起伏大, 中大型障碍物众多, 给包括预案、测量、钻井、下药、放线、放炮、收线等工序的地震勘探作业造成了很大困难, 加之地震勘探施工对基础地理信息的要求越来越高, 由此无人机倾斜摄影获取的三维模型可以有效解决以上问题。

根据无人机航拍高清三维实景模型和数字地表模型(图 6), 可对各类地理信息和地物信息进行识别提取, 包括坡度、障碍、道路、塬台、断崖、陡坡、沟壑等。同时将野外一线人员现场工作时采集的路线轨迹与航测模型进行匹配、优化, 获取勘探区域的人员、车辆等路线轨迹信息, 将上述地理信息进行全局融合与优化, 并通过数字化生产系统平台分享给地震勘探各工序人员(图 14)。

将采用地物信息全局优化与共享技术前后的地震勘探各工序效率进行对比(表 3), 结果表明, 采用地物信息全局优化与共享技术显著地提高了工序效率, 实现了地震数据采集生产路径统一化、

找点精准化、风险可视化、作业规范化, 且能增加作业时间、提高生产日效、降低找点时间、降低野外风险。

## 5 结 论

随着无人机倾斜摄影技术的高速发展, 在复杂区域的地震勘探技术也可随之向高效快速生产施工方向进一步发展, 实现地震勘探更多的创新性应用。

(1) 无人机倾斜摄影技术在原理方法上已经趋于成熟, 由此依据三维建模技术可以获得复杂地震勘探区域高精度立体三维实景和数字模型, 更加精准地呈现地理和地物信息。

(2) 通过无人机倾斜摄影构建的三维模型, 可以实现无人机仿地飞行进行地震勘探井口巡查、节点质控数据的快速高效回收, 以及利用数字化地震队平台共享基于三维模型的地理信息和地物信

表 3 工序效率对比  
Table 3 Comparison of process efficiency

工序	优化前效率 (/点·组 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	优化后效率 (/点·组 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	节约时间 /h
包药	18	22	2
排列	70	100	2.5
放炮	60	85	1.5



图 14 地物信息优化共享

Fig. 14 Optimization and sharing of terrain information

息优化融合后的成果,使各工序人员高效安全地实施地震生产。

(3)随着无人机智能化、小型化、低成本化加速推进,其在地震勘探应用中的范围可进一步扩大,应用前景会更广泛,如利用无人机实现地震生产管理指挥智能化、实时化、现场化,如此会加速无人机技术与地震勘探的深度融合,实现数智化地球物理勘探。

## References

- Huang X Q, Yi B J, Zhong M W, et al. 2015. QC data collection of HAWK node seismic data acquisition system[J]. EGP, 25(2): 136-139 (in Chinese with English abstract).
- Li S S. 2019. Improving deployment effect of peripheral seismic exploration using QC method[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 35(3): 18-19,27 (in Chinese with English abstract).
- Li Y D, Wang Q, Gao S W. 2018. Analysis of factors influencing aerial survey accuracy[J]. Journal of Beijing Polytechnic College, 17(2): 5-8 (in Chinese with English abstract).
- Shi X Q, Chang Y, Si H X, et al. 2016. The optimization design of seismic line with UAV photo graphs[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 26(4): 265-267,272 (in Chinese with English abstract).
- Shu Y, Sun X D, Li J P. 2021. Application of UAV aerial photography in 3D high-precision seismic acquisition[J]. Natural Gas and Oil, 39(6): 69-74 (in Chinese with English abstract).
- Song W, Mao W, Zhang Y Z. 2023. Achievements and opportunities in the development of GNSS RTK positioning technology[J]. World Sci-Tech R&D, 45(3): 294-305 (in Chinese with English abstract).
- Sun B, Zhang J X, Chai J B, et al. 2023. Application of PPK in vibroseis seismic survey[J]. EGP, 33(4): 224-227 (in Chinese with English abstract).
- Tian W B, Ji Z Q. 2023. Application value of UAV tilt photogrammetry in seismic exploration[J]. EGP, 33(3): 181-184 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y M, Zheng Y M, Gu Y R, et al. 2013. Application of high-resolution image acquired by UAV in geophysical exploration production[J]. Geophysical Equipment, 23(1): 19-25 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y W, Wang M Y, Xu W R, et al. 2022. Wireless node acquisition technology and its applications[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 61(6): 975-984,1005 (in Chinese with English abstract).
- Xiao G H, Zhang W, Zhuo W, et al. 2022. Application of UAV aerial survey technology in seismic exploration in complex area[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 32(2): 106-111 (in Chinese with English abstract).
- Yuan J G, Zhang B. 2020. Application of high definition aerial survey image in the design of 3D object detection point[J]. Petrochemical Industry Technology, 27(11): 148-149 (in Chinese with English abstract).
- Zhai J W, Ning H X, Fu Q. 2014. Application of the UAV high resolution image and DEM data for geophysical prospecting in complex areas[J]. EGP, (1): 55-60 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K P, Yu G R, Gu G J. 2017. The use of differential GNSS to obtain high-precision UAV image line of exterior orientation elements[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 26(7): 5-11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L J, Huang X, Rao W D, et al. 2023. NRTK PPK aided 3D modeling analysis of image free UAV tilt photogrammetry for water conservancy projects[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (4): 115-120 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 黄兴琦, 易碧金, 仲明帷, 等. 2015. HAWK 节点式地震仪 QC 数据回收[J]. 物探装备, 25(2): 136-139.
- 李珊珊. 2019. 运用 QC 方法提高外围地震勘探部署成效[J]. 石油工业技术监督, 35(3): 18-19,27.
- 李亚东, 王强, 高绍伟. 2018. 无人机航测精度的影响因子分析[J]. 北京工业职业技术学院学报, 17(2): 5-8.
- 史小奇, 畅毅, 司海新, 等. 2016. 利用无人机航测影像进行物探测线优化设计[J]. 物探装备, 26(4): 265-267,272.
- 舒艳, 孙向东, 吕金蓬. 2021. 无人机航拍在三维高精度地震勘探采集中的应用[J]. 天然气与石油, 39(6): 69-74.
- 宋伟, 毛威, 张益泽. 2023. GNSS RTK 定位技术的发展历程和机遇[J]. 世界科技研究与发展, 45(3): 294-305.
- 孙斌, 张浚显, 柴军兵, 等. 2023. PPK 在可控震源地震勘探中的应用[J]. 物探装备, 33(4): 224-227.
- 田文斌, 季志强. 2023. 无人机倾斜摄影测量在地震勘探中应用探讨[J]. 物探装备, 33(3): 181-184.
- 王艳梅, 郑永明, 谷艳如, 等. 2013. 利用无人机获取高分辨率影像在物探生产中的应用[J]. 物探装备, 23(1): 19-25.
- 王玉伟, 王铭义, 徐文瑞, 等. 2022. 无线节点采集技术及应用[J]. 石油物探, 61(6): 975-984, 1005.
- 肖关华, 张伟, 卓武, 等. 2022. 无人机航测技术在复杂地表区地震勘探中的应用[J]. 物探装备, 32(2): 106-111.
- 袁建国, 张波. 2020. 高清航测影像在三维物探测点设计中的应用[J]. 石化技术, 27(11): 148-149.
- 翟俊伟, 宁宏晓, 付强, 等. 2014. 无人机航拍影像及 DEM 数据在复杂区地震勘探中的应用[J]. 物探装备, 24(1): 55-60.
- 张坤鹏, 于广瑞, 顾广杰. 2017. 利用差分 GNSS 获取高精度无人机影像外方位线元素[J]. 测绘工程, 26(7): 5-11.
- 张林杰, 黄筱, 饶维冬, 等. 2023. 网络 RTK 和 PPK 辅助水利工程免像控无人机倾斜摄影测量三维建模分析[J]. 测绘通报, (4): 115-120.