

# 无人机技术在露天矿无人驾驶中的应用研究

武讲 蔡杨

无人机有着独特的技术特性：使用方便、空中视角、采集快速，可以从多层面对各种类型的测区进行遥感测绘和地理信息数据采集。可为水利、交通、城区、野外、矿区等各类测区提供航拍视频、平面图、地形图、三维模型和方量数据测算，用以满足信息化工程建设和管理对信息数据日益剧增的需求。三维空间数据是现代工程设计和智能矿山的基础数据，露天矿山空间信息的实时海量收集，快速有效的自动化处理和量体裁衣的数据成果，是现代化工程设计、规划、建设、管理的必要基础。

无人机技术的空间数据精准采集和高精度地图快速制成，是建设智能露天矿无人驾驶系统的基础。无人驾驶系统对矿山的地形数据有时效性和精度方面的要求，传统测量方法无法满足。无人机技术在露天矿山数据生产中，能快速提供完整的矿山地形地貌数据，并处理生成无人驾驶所需要的底层地图信息。总之，无人机采集的数据可生成高精地理信息，通过后处理从高精地图中导出的行进路径和道路边界，是支撑露天矿无人驾驶应用的底层信息（图1）。高精度底层信息是露天矿无人驾驶系统生产作业的基本面，是无人驾驶系统高效安全作业的保障。

## 无人机技术概述

微电子、智能导航、多频段传感器、锂电池等技术的发展促使了无人机技术的快速发展，无人机小型化、高机动性、视野广泛的特点使其在商业和

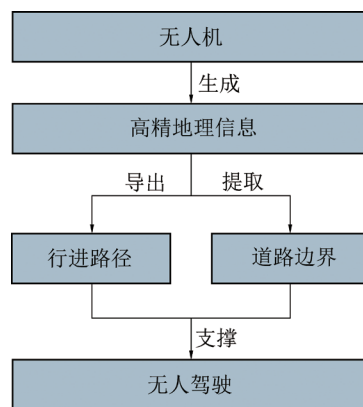


图1 无人机露天矿无人驾驶应用

工业领域的应用越来越广泛。无人机主要应用在军事和民用领域，随着无人机在民用领域商机的不断扩大，越来越多的行业诸如农林业、能源业、工程设计业等逐渐发现了无人机在本行业的应用前景。

无人机技术被重视的主要功能是能搭载飞行控制系统和相机传感器等，并执行空中数据采集任务。根据飞行原理不同，无人机大致分为固定翼型、多旋翼型2类。

1) 固定翼无人机。固定翼无人机飞行器使用固定成型的机翼来飞行，因其航程远、航道稳定、航速快、续航时间长等特点适用于开阔的大面积测区，固定翼无人机结合定位惯导技术以及机载主机进行远程或自主控制来完成整个起降和飞行过程。

2) 多旋翼式无人机。多旋翼式无人机由4个或更多螺旋桨所组成，最典型常见的就是四旋翼直升机，因其机动灵活、可悬停起降、携带方便，但航速慢、续航时间短的特点适合小范围高精度的作业。

## 无人机遥感制图技术

### 技术路径概况

低空遥感摄影测量源自较早的摄影测量技术,结合最新的无人机平台以低空多面模式进行作业,覆盖区域面积大、数据采集速度快。低空遥感摄影测量技术更成熟、成本相对较低,但处理速率不如激光扫描。这2种三维源数据采集都可以通过一定技术手段,提高所生成数字表面模型的离散点密度。而对于比较复杂和难以捕捉地形地貌的区域,少量的传统测量作业可以作为对无人机低空遥感测量方案的补充。随着近年来无人机技术、激光扫描技术、高清摄像技术、影像处理建模技术和电脑硬件的快速发展,无人机低空摄影测量和激光扫描仪的解决方案可以大幅提高现代工程应用对基础数据时效性的需求。

### 飞行控制系统

飞行控制、数据传输、地面监控是无人机系统的必备配套硬件,与地面计算机中安装的监控系统软件匹配使用,通过无线传输可操控无人机并同步记录航拍时的对应影像数据、飞行姿态等参数。飞行控制系统的重要性在于无人机运动完全取决于其控制系统的特征,为获取有效的遥感信息,控制系统必须具备高性能。在对无人机遥感技术要求不断提高的情况下,简单飞行控制无法满足商业应用,因此基于非线性控制方法已逐渐成为较好的替代方法。同时受无人机实际有效载荷的限制,数据存储设备和其他设备应减少,尽可能地保持高效稳定的数据输出环境。

飞行控制系统的核心工作包括原始数据的收集和参数设置。

1) 原始数据收集。前期需收集已知的地图影像数据、飞行器姿态数据、控制点数据以保证原始数据的完整,后期可通过对航带变化处的影像数据进行核验来提升数据精度。

2) 参数设置。飞行控制的参数输入是初始化

任务后生成的点云数据所需要的关键性参数,其中包括设置坐标系参数、地理定位参数、相机参数(被动式采集)以及生成数据类型参数等。

### 低空遥感作业操作流程

1) 根据前期的场景数据制定飞行扫描计划:按照实际需求(时间、精度)选取单一测量模组或复合式测量模组挂载在无人机上,根据目标场景的大小及复杂程度选取1组或者多组无人机进行拍摄。

2) 地面单位针对测区进行地面控制点布设及定位数据采集。

3) 无人机低空航飞扫描测区获得采集数据(倾斜影像数据/激光扫描数据、POS数据、外控数据)。

4) 工作站快速处理数据,构建大型空间数据模型,并和项目要求进行比对。

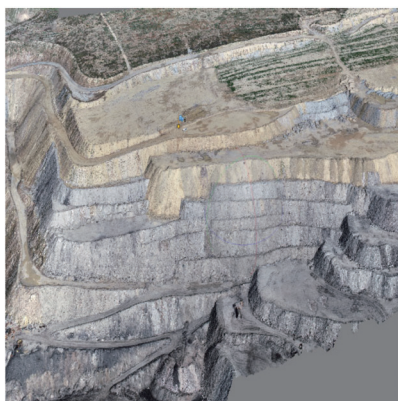
5) 将三维模型数据按照项目需求以不同的数据模式进行展示(航拍视频,地形图,方量测算)。

### 精度控制方法

1) 平面精准控制。采用区域像控点组纠正法进行平面控制测量,航拍前进行区域像控点布置,根据已知区域图,合理有效地分布用于低空航拍摄影测量的区域像控点。所布置的区域像控点中,有地面标识点、基于现场永久物的标识点、GPS控制点以及常规测量的临时像控标识点,用于在后期处理时进行误差校正。

2) 高程精准控制。高程控制测量也采用区域像控点模式,与平面控制测量同时进行,通过现场GPS控制点常规测量的(平面和高程)像控点组,在后期数据处理时作为标尺和观测对照组。

3) 航测规划控制。选用无人机低空航空摄影进行遥感数据采集,首先需要考察周围环境的地形地貌,确定飞行的大致区域,尽力避免航测区内一切潜在的障碍和危险。根据已有资料来规划合理的飞行航线,飞行高度预设50~130 m的低空,航



2	3	4
5	6	

图2 阴雨天航测影像数据

图3 晴天航测影像数据

图4 积水坑及周边区域拍摄数据

图5 采煤区、剥离区

图6 开挖区域点云数据

拍图保证不少于60%的航向和40%的侧向重叠度。标志的区域假定控制点建立地面数据参数，如有必要，采集并检查地形图数据及所有控制点数据，采集的地形图数据及控制点数据由手簿自动记录，形成相应的时序数据文件。

## 数据采集与实例分析

### 多气候、多区域数据采集

选取山西省某小型露天矿作为实测对象，面积 $3\text{ km}^2$ 。为保证研究的完整性和多样性，对不同天气、不同时段、不同区域的采集数据进行了横向对比。预先采集航测区大致的原始地理信息，整理出测区边界信息以及优化规划的飞行航测路线，确保没有其他干扰和安全疑虑。

本次拍摄图片共计1 980张（包含阴天、晴天、降雨天气），将同一地区在不同时段、不同天

气状况下的照片单独提取进行数据对比。

选择如图2所示的无人机摄影测量作为数据对比，因为该地区为车辆交汇、停靠、维修区域，又紧靠两侧坡道，适合作为数据对比。在拍摄时场地正处于降雨状态且温度较低，气温接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，对无人机的工作状况有明显影响。后期数据分析中，在该状态下航飞影像捕捉到降雨痕迹，但处理后点云数据并无捕捉到任何雨点的数据，且可生成的单幅连接点数量减少。因此可以获得以下结论：因降雨原因空气中的湿度上升，低温环境下镜头遇冷与潮气形成雾气，气候环境条件影响了单幅数据信息量的获取。

在同一地区不同时间、天气状况下进行有效的数据对比。图3为晴天时无人机摄影测量，地面物体清晰可见，点云数据更加准确，精度更高。

无人机数据采集经常受到地面积水或覆冰的影响。无论阴雨天或晴天，水体、冰雪覆盖区（如矿区的尾矿库、深坑积水、大面积冰雪覆盖的地表）对太阳光线的反射强度会对最后生成的点云数据产



生一定影响,图4为矿区场地内符合该条件的场景,场景内有2处积水坑,且数据采集时处于阴雨天。

### 排土场区域实测

排土场的作业是矿区生产过程中的重要环节,承担着将剥离之后的土料、石块转移的任务,重点对排土场进行了多次数据采集预处理。考虑到排土场可能发生滑坡,在场地内进行了小降雨及短时强降雨的观测。

在对排土场坡道、坡面,以及平台区域无人机航测时,通过倾斜摄影采集数据后利用空三角算法将数据中的点云数据进行排列组合,通过GPS-RTK数据进行纠正后形成整体的矿区数据。单独把排土场整体提取出来进行分析,这片区域也是无人矿车的行进重点区域,由图5可以判定矿区道路位置、中线位置,可以依靠这些数据进行无人矿车的前期路线规划,使无人矿车根据现有的实时地貌进行排土作业;考虑到矿区排土场的地形、地貌、道路会随着开挖和排土作业而变化,无人机需要定时更新数据信息、后期拟合数据、绘图处理等最新道路信息,然后提供给矿车新的作业路线。

开挖区域是指在煤层所在的区域进行挖掘作业,开挖包括土的开挖、土块与煤层的剥离,车辆分别将剥离出的土块与煤炭运往排土场和煤场。在作业时逐个平台向下开挖,层层降低,在无人机测

量时需要注意整体进度,保证数据的时效性。开挖区域点云数据如图6所示。

### 生成的高精地理信息成果

2000国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000)是现行建立基本地理信息数据平台的标准。同时,矿区综合集控平台的运营和智能解决方案的基础数据通常是基于经纬度的大地坐标,且行业内很多传感器和科技类设备的定位数据也是以经纬度作为源数据格式,即使为了满足国内工程设计的标准要求将CGCS2000作为默认坐标系,经纬度数据仍是不可或缺的高精数据中的组成部分。本次研究为了满足各个团体对数据格式的要求,选取生成基于CGCS2000的坐标以及经纬度坐标,如图7所示。

### 点云集(X、Y、Z、R、G、B、i格式)

点云数据是通过复合式采集的方式,利用空三角和数据融合算法得出以点的形式集成的地形数据。数据通过人工稀释和预设过滤,制成高精地图所需要的底层信息,是最为基础的信息数据存储方式。

1) 高密度点云CGCS2000坐标(图8)。

2) 低密度点云CGCS2000坐标(稀释过滤后,图9)。

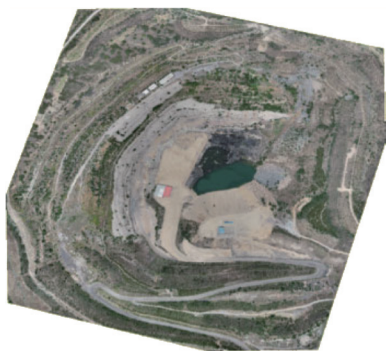


图7 正射影像图(可转化为经纬度)

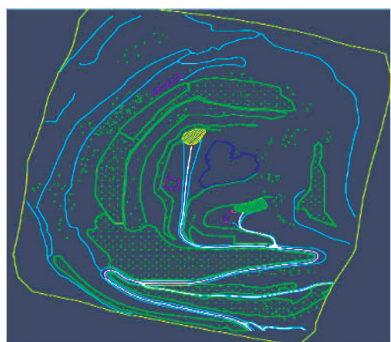
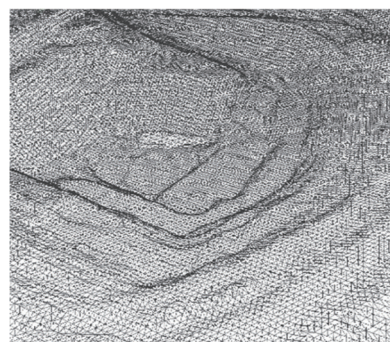
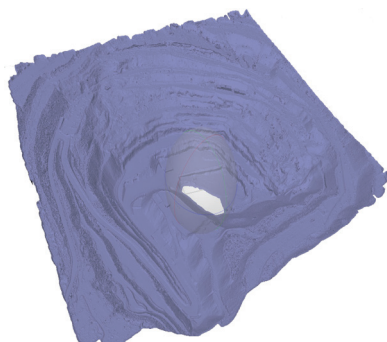
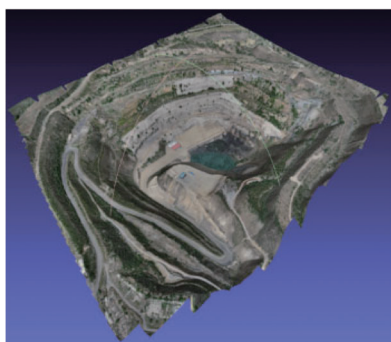


图8 高密度点云(6300万点含控制点)



图9 低密度点云(37万点)





10	11	12
13	15	
14		

图10 含三维纹理皮肤模型

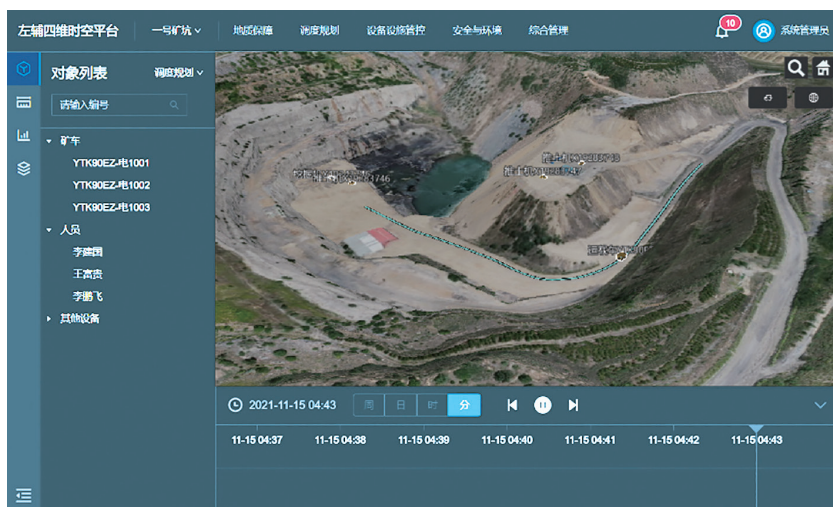
图11 平滑三角曲面无纹理模型

图12 三角网格模型

图13 DWG格式数据（CGCS2000坐标系）

图14 无人矿车调度平台

图15 路径展示（CGCS2000）



的方式，将矿区边坡、道路中线、预计运行轨迹、房屋设备等永久物、植被和地貌、山川河流等信息制成可以作为底图的DWG格式数据（图13）。三维数据采集与建模、高精地图的一个核心目的就是保证无人矿车在运行时拥有精度高、数量大、规划合理的底图和路径信息。

### 三维模型展示（obj 格式）

采用自主研发的三维建模软件，将点云数据转化为用于展示平台应用的三维模型数据。

- 1) 含三维纹理皮肤模型（474万面）（图10）。
- 2) 平滑三角曲面无纹理模型（图11）。
- 3) 三角网格模型（图12）。

### 矢量数据（DWG 格式）

矢量数据是由高精度正射影像图利用人工提取

### 无人机技术在露天矿山无人驾驶应用的案例

无人机技术最终需要服务于矿区无人驾驶实际需求，其中比较常用的应用是将建成的高精度三维模型用于矿区无人驾驶调度平台和矿车路径规划。

### 无人驾驶调度平台展示（三维模型）

通过无人机技术成果生成的点云数据和三维模型可完美实现矿区的三维仿真，生成矿山的数字孪

生。三维可视化的无人驾驶调度平台通过可实时更新的无人机技术成果,直观有效地展示矿区三维实时环境,精准反映地形道路的起伏变化,帮助平台后端精准地完成无人车队智能化调度和无人车辆的规划,是智能矿山无人运输生产的核心环节之一。无人矿车调度平台如图14所示。

### 无人驾驶路径规划

通过正射影像图和三维高精度模型提取的无人车路径可用于调度和规划无人车的行驶路径。

无人驾驶矿车路径规划是由提取的路径来完成实时的规划和作业,根据已采集的点云数据和高精度三维模型数据提取用于规划无人矿车行驶的通用路径数据,并在无人矿车上进行测试。在试验区内,黄色区域为指定装载区、绿色区域为卸载/排土区、蓝色路径为驶入装载区路径,黄色线条为驶离装载区路径、白色线条为预先指定的道路中线(图15)。

路径数据可依据实际需求进行路径点间隔的选择,默认的路径点间距为0.5 m。

具体无人矿车路径实例见表1。经纬度数据直观反馈矿车所处的路径位置;高程是相对海拔高度,用以导出高度相关的系统参数;方向角是矿车行进时预计的与正北方向的夹角;坡度是2个路径点之间的高度差与水平距离的百分比,正数为上坡,负数为下坡。

## 无人机技术应用优势

### 矿山无人驾驶场景下的优势

1) 安全高效。无人机遥感技术消除了派遣地面人员的需要,并且可以在不中断采矿作业的情况下进行数据采集,符合智能矿山减员增效和安全作业的要求。

2) 主动性作业。无人机能依据实际需求,自主组织最小成本的作业,定期定量收集地形数据,

表1 路径文件实例

东经/(°)	北纬/(°)	高程/m	方向角/(°)	坡度/%
112.325	39.5	1 273	320	3.4
112.326	39.5	1 273	317	1.6
112.326	39.5	1 273	318	1.6
112.326	39.5	1 273	3 167	1.4
112.326	39.5	1 273	306	1.4
112.325	39.5	1 273	314	1.6

使用者可以更自由地进行作业规划和更清晰地了解矿山地形地貌的变化。

3) 海量的数据。现有的无人机抗风雨能力和传感器准确性相当高,能在各种气候条件和环境下作业。依赖价格低廉的优势,无人机可以进行可靠的部署且更频繁地获取数据。

4) 精确的数据。无人机通过精准布设控制点,处理后的数据精度能达到0.1 m甚至更高。这些高质量的地图数据是智能矿山无人驾驶系统能运行的基础。

### 综合技术优势

无人机低空遥感测量技术以其高效便捷的优势,是露天矿无人驾驶系统应用场景中不可替代的数据获取方式。该技术可以高效测量无人驾驶运行区域内的地理信息数据,并可以拓展运用到智能矿山规划和管理领域。大量且准确的空间信息可以全方面地满足露天矿对于空间数据的海量高效、无人化、周期短、成本低、精度高、安全性高的要求,是实现智能矿山无人驾驶以及后期需要开发的各个子系统不可或缺的环节。

■ 责任编辑: 李金松

#### 作者简介:

第一作者: 武讲,高级工程师,所长。  
E-mail: 1260292294@qq.com

作者单位: 中煤西安设计工程有限责任公司  
(中煤能源研究院) 露天与路桥所;  
思地三维科技有限公司