

# 无人机吊运模块化钻机技术研究与应用

王文彬<sup>1</sup>, 龙安<sup>2</sup>, 吴荣华<sup>3</sup>, 李卫武<sup>1</sup>, 朱贤<sup>2</sup>, 朱森林<sup>1</sup>

(1. 湖南省地球物理地球化学调查所湖南省绿色智能勘探工程技术研究中心, 湖南长沙 410114;  
2. 湖南省自然资源调查所, 湖南长沙 410007; 3. 广西九重天智航科技服务有限公司, 广西南宁 530201)

**摘要:** 根据推动绿色勘查工作、构建统筹生态环境保护与找矿突破的现代化装备体系的要求, 本文针对南方地区典型的森林覆盖区地貌特征, 探索了无人机吊运模块化钻机技术。分析了TF-500系列型重载无人直升机系统和ZY-800P型便携式全液压模块化钻机的性能及其选型适合性, 并实际应用在湖南新化县月光冲矿区金矿详查项目钻机搬迁中。展示了该技术出色的环境适应性和应用实用性, 利用无人机的飞行能力来实现对钻机设备的高效、精准吊装和运输, 大幅缩短了搬运周期, 减少了对生态的破坏, 提高了作业的安全性和效率。

**关键词:** 绿色勘查; 森林覆盖区; 重载无人机; 便携式全液压模块化钻机; 地质钻探; 无人机搬迁

**中图分类号:** P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0208-08

## Research and application of UAV lifting modular drill technology

WANG Wenbin<sup>1</sup>, LONG An<sup>2</sup>, WU Ronghua<sup>3</sup>, LI Weiwu<sup>1</sup>, ZHU Xian<sup>2</sup>, ZHU Miaolin<sup>1</sup>

(1. *Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Hunan Green Intelligent Exploration Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410114, China*;  
2. *Natural Resources Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410007, China*;  
3. *Guangxi JiuChongTian Zhihang Technology Service Co., Ltd., Nanning Guangxi 530201, China*)

**Abstract:** According to the requirements of promoting green exploration and constructing a modern equipment system that integrates ecological protection and mineral exploration breakthroughs, this paper explores the application of modular drilling technology using unmanned aerial vehicles (UAVs) for typical forest covered terrain in southern regions. The performance and suitability analysis of TF-500 series heavy-lift unmanned helicopter systems and ZY-800P portable fully hydraulic modular drilling rigs are conducted, focusing on their application in the detailed exploration of gold deposits in the Yueguangchong Mine Area, Xinhua County, Hunan Province. This technology demonstrates outstanding environmental adaptability and practicality, utilizing UAVs' flight capabilities for efficient, precise hoisting and transportation of drilling equipment, significantly shortening the relocation cycle, minimizing ecological impact, and enhancing operational safety and efficiency.

**Key words:** green exploration; forest covered areas; heavy loaded drones; portable fully hydraulic modular drill; geological drilling; UAV relocation

## 0 引言

自然资源部《关于加强新一轮找矿突破战略行动装备建设的指导意见》提出, 要积极推动绿色勘查工作, 解决急需关键的技术装备问题, 加快构建统筹生态环境保护与找矿突破的现代化装备体系。

湖南为典型的森林覆盖区地貌, 作为地质找矿不可或缺的技术工作, 在该环境下绿色勘查施工中面临着诸多困难, 这些困难主要来源于地形复杂和生态环境敏感等因素<sup>[1]</sup>。

首先, 钻探设备的传统搬迁方法往往依赖山地

收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2024-08-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.031

第一作者: 王文彬, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 长期从事钻探技术研究及施工管理工作, 湖南省长沙市天心区万家丽南路二段898号, 574937489@qq.com。

引用格式: 王文彬, 龙安, 吴荣华, 等. 无人机吊运模块化钻机技术研究与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 208-215.

WANG Wenbin, LONG An, WU Ronghua, et al. Research and application of UAV lifting modular drill technology[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 208-215.

设备或大量人力,这在森林覆盖区往往对生态环境造成较大的干扰,在一些特殊的复杂地形,这些钻探设备甚至难以抵达预定目的地。其次,森林覆盖区对钻探施工的设备和技术要求较高,即要求具备较高的环保性能,能够在保证钻探效果的同时,最大限度地降低对生态环境的负面影响。

针对森林覆盖区的上述钻探施工难题,湖南省地球物理地球化学调查所开展了“TF-500系列重载无人机+ZY系列便携式模块化钻机”的无人机吊装模块化钻机技术的研究,并在湖南新化县月光冲矿区金矿详查项目中进行了工程实践,取得了良好的应用效果。

## 1 TF-500系列重载无人直升机系统

### 1.1 结构组成

TF-500系列重载无人直升机系统主要由无人直升机平台系统、地面控制系统、飞控系统、运输保障车系统及任务模块系统5部分组成。

#### 1.1.1 机体结构

TF-500系列重载无人直升机的平台采用模块化设计,便于日常维护和任务设备的装卸(见图1)。机体结构中大量使用了钛合金及复合材料,大大降低了整机的空机质量,有效提升了重载无人直升机的任务载荷能力。经过全面强度校核,全机强度满足设计要求,机体结构疲劳寿命达到3000 h以上<sup>[2]</sup>。



图1 TF-500型重载无人直升机

#### 1.1.2 便携式地面站系统

便携式地面站系统采用数字电子地图作为无人机飞行参考背景地图,可以显示地面站所在位置。同时,地面站控制界面简单明了,显示无人机的状态及各项参数,为操作人员提供友好的人机界面,完成对飞行器状态的监控。系统支持地平仪、数据帧显示、飞行状态信息显示、数据曲线显示、实

时轨迹显示和任务设备信息显示,并具备异地起降、组网控制、一键起飞降落、一键抛投等功能。

#### 1.1.3 飞控系统

飞控系统主要包括飞行控制与管理计算机(以下简称飞控计算机)、传感器和执行机构。为保证飞行安全,提高系统的任务可靠性,部分关键部件采用双余度配置。飞控计算机中的导航模块作为位置备份传感器,组合导航内的双卫星天线测向作为航向备份。飞控计算机计算模块含双CPU和双数据记录模块,实时热备份处理和数据记录;舵控系统采用电气双余度设计,并且与飞控计算机采用双串口通信;飞控计算机中的导航模块可为外置组合导航提供备份原始卫星数据,磁航向计为组合导航提供备份航向。

#### 1.1.4 运输保障车系统

TF-500系列重载无人直升机拆卸完后,可以整体收纳至一辆4.2 m的蓝牌厢式货车中(见图2)。针对地质勘查行业多在山区,道路狭窄崎岖,蓝牌厢货采用了越野底盘,增加其在野外作业的环境适用性和实用性。后期可将地面站系统集成至运输保障车上,实现真正意义上的测控一体车。

#### 1.1.5 物资吊挂系统

物资吊挂系统主要用于物资的空中吊挂运输,具备遥控投放功能。常规吊挂作业最大能力为200

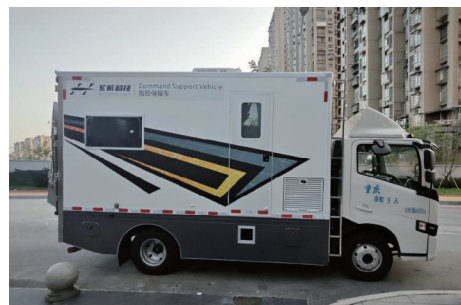
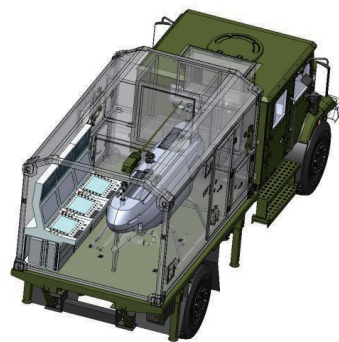


图2 TF-500型重载无人直升机运输保障车

kg,物资吊挂系统对作业风力环境要求为起降时 $<10\text{ m/s}$ 、飞行中 $<16\text{ m/s}$ 。

## 1.2 无人直升机平台性能参数

见表1。

表1 TF-500系列重载无人直升机平台性能参数

型号	TF-500(汽油版)	TF-500H(重油版)
最大起飞质量	600 kg	660 kg
最大控制半径	30 km(标配)、100 km(可选配)	
载重/航时(刚性连接)	300 kg/1 h, 220 kg/3 h	330 kg/1 h, 250 kg/3 h
吊挂作业能力	200 kg(常规作业)	250 kg(常规作业)
燃油类型	95号汽油	0号柴油
最大平飞速度	144 km/h(空速)	
经济巡航速度	100 km/h	
起飞/降落模式	自主起降、遥控起降	
航线飞行模式	姿态、GPS、全自主等模式	
起降场地要求	20 m $\times$ 20 m	
工作温度	-20~40 $^{\circ}\text{C}$	
贮存温度	-40~55 $^{\circ}\text{C}$	
相对湿度	95%	

## 1.3 无人直升机吊运模式

TF-500系列重载无人直升机共有6种吊运模式。

### 1.3.1 单站单控模式

这是最基本的作业模式,适用于物资运输需求较为简单的场景。作业全程在可视范围内,无人机从起飞点起飞,飞行至装货点进行物资装载,然后直接飞行至卸货点进行物资卸载。此模式的优点是流程简单、易于控制,适用于单点物资运输需求的任务。通过优化起飞点和卸货点之间的航线,可以提高吊运效率,减少单次吊运的时间和成本。

### 1.3.2 双站双控模式

此作业模式亦称为“接力模式”,在航线需要跨越较高的山峰后在山背面进行装卸货物时,山体对数据链路产生了信号阻挡,需要在山体背面架设另一套地面控制系统来进行接力操控,故称双站双控模式。适用于地形复杂、超视距飞行。

### 1.3.3 一机多站模式

是指通过3套或以上的地面控制站对一架重载无人机进行控制作业的一种模式。此作业模式是专为地质勘查研发的,针对地质勘查的特点,如完

成一个钻孔施工后,需将设备转运至下一个施工平台,此时,起降点、已完成钻孔平台与下一个施工平台3个点处于不同位置,且航线中间均有山体阻挡。此时就需要通过架设更多的地面控制站来实现整个吊运过程的操控。

### 1.3.4 异地转场模式

异地转场作业模式是指无人机在不同地点之间进行转场作业。无人机从一个起飞点起飞,完成装货和卸货任务后,直接飞行至另一个起飞点,继续进行下一阶段的作业。此模式适用于需要在多个地点之间进行物资运输的任务。异地转场作业模式的优点在于其高度的灵活性,可以根据实际需求灵活调整作业计划和航线,适应多变的作业环境和需求。

### 1.3.5 数据中继模式

无人机数据中继是指无人机在执行超视距飞行任务时,为延伸数据链路的作用距离,采用中继通信的方式来确保数据稳定传输的技术。可以极大地提高无人机在复杂环境下的通信能力和数据传输效率,从而拓展无人机在各个领域的应用范围。单站中继模式研发成功后,可完美地解决山区山体阻挡数据链路信号问题,实现安全高效的吊运作业。

### 1.3.6 集群控制模式

集群控制是指一个地面站同时控制2架以上的无人机进行作业。地面站专员通过高效的监控和协调,确保多架无人机的飞行和作业互不干扰,并能够最大化利用时间和资源。此模式特别适用于大规模物资运输和复杂的作业环境。通过集群控制作业模式,可以显著提高作业效率,减少单架无人机的等待时间,提高整体吊运量<sup>[2]</sup>。

## 2 ZY-800P型便携式全液压模块化钻机

### 2.1 钻机的结构特点

ZY-800P型钻机是由湖南某地质装备企业研发的高性能钻探设备,设计理念集中在优质、高效、安全的钻探能力和适应绿色勘查工作要求(见图3)。该钻机主要由机体结构、液压系统、顶驱式动力头、卷扬机、给进梁与桅杆等部分组成,整体采用模块化设计,钻机性能优越<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.1 机体结构

ZY-800P型钻机整体采用了模块化设计,使其

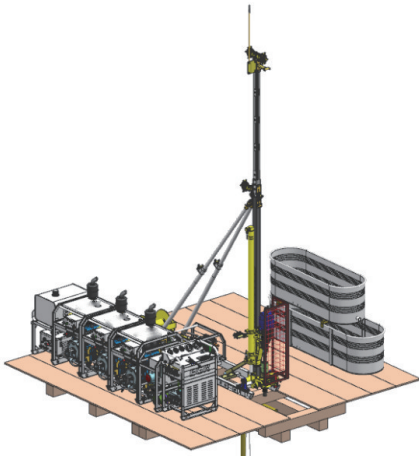


图3 ZY-800P型便携式全液压模块化钻机示意

在运输和现场组装过程中更加便捷和高效,为重载无人机吊运提供了先决条件。机体采用高强度航空铝材制造,不仅保证了钻机的坚固性,还显著降低了整机质量,从而提升了作业效率和操作灵活性。模块化设计使得各个部件的维护和更换更加方便,进一步提高了钻机的使用寿命和稳定性。

在钻杆钻具方面选用高精密薄壁材料,在破碎地层、基岩风化层和土层中仍具有较高的岩心采取率;机台占用面积小,进场只需要修1 m左右宽道路即可;压力和泵量采用无级变速调节,可根据钻进需要随时调节。

### 2.1.2 钻机综合设计

ZY-800P型钻机的综合系统设计,涵盖液压系统、顶驱式动力头、卷扬机、以及给进梁与桅杆系统。这些系统的精密结合,确保了钻机在各种地质条件下的高效运转<sup>[4-8]</sup>。

其中液压系统是钻机的重要组成部分,采用美国Parker操作阀,确保了系统的稳定性和可靠性。液压系统能够提供充足的动力支持,使钻机在不同的地质条件下仍能保持高效运转。其次顶驱式动力头是ZY-800P型钻机的核心组件之一,具备高扭矩和高转速的特点。其最大扭矩可达650 N·m,最高转速为1300 r/min,能够满足多种钻探需求,确保在复杂的钻探任务中表现优异。卷扬机保证了在钻探过程中物料的高效提升和传送,极大地提升了钻机的工作效率和安全性。给进梁与桅杆系统提供了足够的操作空间和灵活性,满足各种钻探角度的需求,提高了钻探作业的灵活性和适应性<sup>[9-12]</sup>。

## 2.2 钻机性能参数

见表2。

表2 ZY-800型钻机性能参数

性能		参数值
钻探能力	HTW/NTW/BTW	300/600/800 m+
钻孔直径	钻杆长度 1.5 m	96/75.7/60 mm
取心直径		63.5/56/42 mm
钻机动力	久保田柴油发动机, 3×33.5 kW/3000 r/min	
液压系统	美国Parker操作阀	
	最大扭矩	650 N·m
顶驱式动力头	最高转速	1300 r/min
	给进行程	1.83 m/油缸驱动
	提升力/给进力	50 kN/30 kN(单条油缸)
	平均速度	150 m/min
卷扬机	提升力	700 kg
	钢丝绳直径	5 mm
	容绳量	900 m
给进梁与桅杆	钻架 90 度时总高	5 m
	钻进角度	45°~90°
外形与质量	机台面积/模块数量	4 m×4 m/13 件
	总质量/最重模块质量	1150 kg/180 kg

## 3 重载无人机优选

由于山区钻探施工受限于地形地貌及地表覆盖物的影响,在优选重载无人机时,应考虑载重能力、航程、环境适应性、以及安全性等因素。

### 3.1 载重能力

选择无人机时,首先要确保其载重能力满足吊装设备的质量要求。ZY-800型钻机采用模块化轻量设计,最重模块为180 kg,TF-500型(汽油版)无人机最大吊挂作业能力为200 kg,因此选用TF-500型(汽油版)可满足载重要求。

### 3.2 航程

重载无人机的航程应满足运输要求,确保无人机能够在较远距离进行有效运输。由于重载无人机在山区往往需要覆盖更远的距离,因此,其航程和留空时间就显得尤为重要。结合湖南山区钻探的实际情况,单边航行距离为2~4 km,因此来回飞行一次需达到10 km以上的续航要求。TF-500型重载无人机在满油状态及重载200 kg的情况下,最大续航为3 h,按100 km/h的巡航速度计算,理想状态下可达300 km的续航距离。综合风力及其它环

境因素考虑,保守估计也能达200 km以上的飞行距离,完全满足山区钻机吊运的条件。

### 3.3 环境适应性

重载无人机应具备良好的环境适应性,能够在不同气候和地形等各种条件下稳定运行。TF-500型重载无人机具备出色的起降能力,可在6级风力以下自主垂直起降,空中抗风能力达到7级。其施工作业温度区间 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,符合我国绝大部分地区的作业温度条件。其实用升限为6000 m,适用于青藏高原外的其它地区进行作业。

### 3.4 安全性

安全性是选择的首要考虑因素,尤其是重载无人机,因为它们在进行事故时可能造成更大的损害。因此,重载无人机应配备先进的安全特性,如避障系统、自动紧急降落程序、通讯性能和实时监控功能,以确保即使在复杂或高风险的环境中也能保持安全操作。

TF-500型重载无人机设计了一系列先进的安全特性,使其能够在各种复杂或高风险的环境中始终保持出色的安全性和稳定性。

这款无人机配备了精密的避障系统,该系统利用先进的传感器和算法,实时扫描周围环境,确保无人机在飞行过程中能够准确识别并避让障碍物,从而大大降低了碰撞的风险。

TF-500型重载无人机还具备自动紧急降落功能。在面临突发的动力系统故障、燃料不足等紧急情况时,无人机能够迅速启动自动紧急降落程序,确保安全降落,从而避免了因失控导致的潜在风险。这一功能的实现,为无人机在紧急情况下的安全提供了坚实的保障。

TF-500型无人机在通讯方面也表现出色,采用点对点电台通讯方式,最远可到100 km。还可选装卫通通讯链路,使控制距离不受限制,上传速率达6 Mbps,下传速率高达40 Mbps,确保通讯的高效与稳定。

实时监控功能是TF-500型重载无人机不可或缺的一部分。通过实时监控系统,无人机可以实时传输飞行数据和图像信息,使地面控制人员能够随时掌握无人机的运行状态和周围环境。这为地面控制人员提供了极大的便利,使他们能够在第一时间发现并处理异常情况,确保无人机的安全。

## 4 项目应用情况

### 4.1 矿区概况

#### 4.1.1 矿区地理位置

新化县月光冲矿区金矿详查项目,工作区位于新化县城 $85^{\circ}$ 方向直线距离46 km处,属新化县奉家镇管辖,地理坐标:东经 $110^{\circ}49'45''\sim 110^{\circ}50'45''$ ,北纬 $27^{\circ}41'30''\sim 27^{\circ}43'00''$ 。矿区内多为山地,纵向跨度大,森林覆盖面积大,钻探点位置险峻,对生态环境要求高,传统钻探设备物资运输方式存在较大困难(见图4)。



图4 矿区野外实地踏勘照片

#### 4.1.2 矿区地层情况

区内出露地层由老至新依次为青白口系砖墙湾组(Qbz)、架枳田组(Qbj)、岩门寨组(Qbym)。矿区位于月光冲倒转背斜南西倾伏端的北西翼,报木田区域性断裂的南东盘,构造形态相对简单,褶皱不发育,总体呈一倾向北西的单斜,与北东向韧性推覆剪切变形带方向一致的断裂构造发育。区内未见岩浆岩出露。

区内出露地层有青白口系砖墙湾组(Qbz)、架枳田组(Qbj)、岩门寨组(Qbym)。由老至新分述如下:

(1)砖墙湾组(Qbz)。分布于勘查区东部及东南部,约占全矿区面积的30%。上部为灰至灰绿色、深灰色粉砂质板岩,厚179 m;中部为灰黑色、黑色炭质板岩夹少量含炭粉砂质板岩,厚739 m;底部为灰至灰白色厚层状含长石石英砂岩,延伸不稳定,时断时续,厚约20 m。基本不产金。

(2)架枳田组(Qbj)。分布于勘查区在中部及西部地区,约占全矿区面积的60%。顶部灰色、灰绿色粉砂质板岩、砂质绢云母板岩、凝灰质板岩与

变质石英细砂岩、粉砂岩互层。下部灰至深灰色、浅灰色、灰白色厚层状中细粒石英杂砂岩、变质粉砂岩、含长石石英砂岩夹、凝灰质板岩或砂质板岩。厚 795 m,由北往南厚度递减。与下伏地层整合接触。为矿区主要赋矿层位。

(3)岩门寨组(Qbym)。分布于勘查区北西角及南西角,约占全矿区面积的 10%。下部为灰绿色、黄绿色条带状含砂质、粉砂质绿泥石绢云母板岩、千枚状板岩;中部为紫灰色条带状绿泥石绢云母板岩;顶部为灰绿色黄绿色条带状粉砂质绿泥石绢云母板岩、千枚状绢云母板岩夹少量变质粉砂岩,厚度 >389 m。本段为金的矿源层,含 Au 最高达 1000 ppb。为次要产金层位。

## 4.2 无人机飞行流程及作业模式

### 4.2.1 飞行流程

该项目采用 TF-500(汽油版)无人机,其飞行流程主要包括起飞准备、起飞、航行、装货、运输和卸货 6 个环节。无人机飞手和地勤人员负责准备无

人机,确保设备正常工作;地面站专员规划航线并进行设备检查。飞手在起飞点起飞无人机后,按照规划的航线进行飞行,平均高度为 280 m,平均长度为 1322 m。到达装货点后,地勤人员协助完成物资的吊运准备,单次吊运物资的平均质量为 172kg,总吊运量达到 16772 kg。运输过程中,共计飞行时长为 24 h(4次搬家作业),总油耗为 550 L。到达卸货点后,地勤人员协助完成物资的卸载,确认卸载完成后,无人机返回起飞点或进行下一次吊运任务(见图 5)。

### 4.2.2 吊装作业模式

本项目主要采取 3 种作业模式:单站单控模式、双站双控模式、一机多站作业模式,此次施工过程中,ZK302 孔的设备运输采取的是单站单控模式(图 6a),ZK1103 孔施工完毕后设备吊运回起降点的过程采取的是双站双控模式(见图 6b),ZK302 孔施工完毕后将设备转运至 ZK303 孔采取的是一机多站模式(见图 6c)。

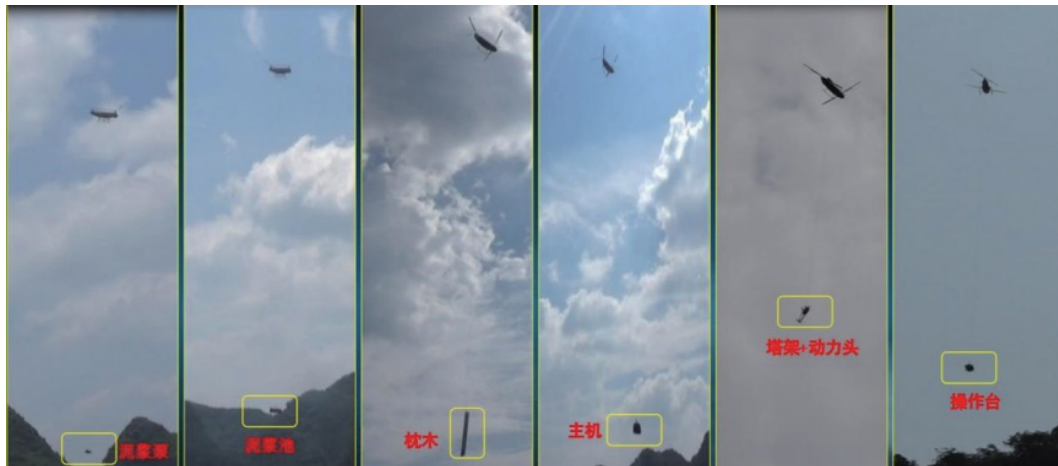


图 5 TF-500 型无人机吊装施工作业



(a) 单站单控作业模式 (b) 双站双控作业模式 (c) 一机多站作业模式

图 6 不同吊装作业模式

### 4.2.3 应用效果

该项目中无人机吊装相关数据统计见表 3。平

均无人机吊装模块化钻机线高度为 280 m,航线长度为 1322 m。共进行了 16 个飞行架次,平均每架次

吊运物资 1048 kg。总计进行 98 次吊运,平均每次吊运物资 172 kg。共计飞行时长 24 h,平均每小时

吊运物资 700 kg。所有吊装总油耗为 550 L,平均每小时油耗为 23 L;每吊运 1t 物资的油耗为 32.8 L。

表 3 TF-500 型无人机吊装项目相关数据统计

日期	航线高度/m	航线长度/m	架次	运次	飞行时长/min	总油耗/L	总载货量/kg	备注
2023/10/6	350	1070	4	20	330	101	3628	H-ZK302
2023/10/22	240	1600	3	19	258	99	3488	H-ZK302-ZK303 (三点作业)
2023/11/12	190	1400	4	22	350	110	3890	H-ZK303-ZK1103 (三点作业)
2023/11/28	340	1220	5	37	514	240	5766	ZK1103-H点
总计			16	98	1452	550	16772	

### 4.3 便携式全液压钻机使用情况

#### 4.3.1 钻孔施工概况

本项目均采用金刚石绳索取心钻进,采用  $\varnothing$  110、95、75 mm 三级成孔。 $\varnothing$ 110 mm 孔段选用细分

散膨润土冲洗液, $\varnothing$ 95 mm 及  $\varnothing$ 75 mm 选用低固相聚合物冲洗液体系。不同孔段的钻进参数及冲洗液性能见表 4,钻探施工现场见图 7。

表 4 钻孔结构设计

开次	孔深/m	钻头尺寸/mm	套管尺寸/mm	钻进参数			冲洗液配方
				钻压/kN	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	泵量/ (L·min <sup>-1</sup> )	
1	20~50	110	108				水 1 m <sup>3</sup> + 钠基膨润土 7 kg + 原浆植物胶 6 kg + 聚丙烯酰胺 0.2 kg
2	50~260	95	89	10~15	800~1000	50~90	水 1 m <sup>3</sup> + 膨润土 20~40 kg + NaOH 2~5 kg + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 2~4 kg + KPAM 5~6 kg + NPAN 5~10 kg + CMC 10~25 kg + KHM 5~10 kg
3	260~孔底	75	/	10~12	850~1100	50~70	

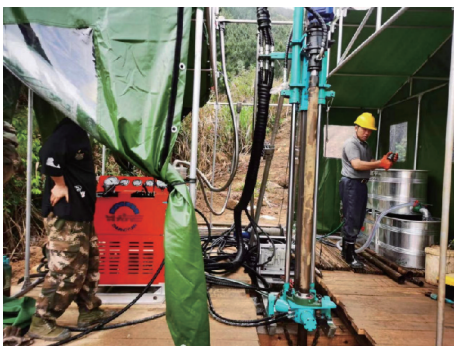


图 7 ZY-800 型钻机现场施工

#### 4.3.2 钻效统计分析

模块化便携式钻机对比传统立轴式钻机提高了钻进效率,其台月效率是传统立轴式钻机的 1.5~2.0 倍,详见表 5<sup>[13-14]</sup>。

### 4.4 对生态环境影响对比

#### 4.4.1 模块化钻机与立轴式钻机对比

便携式钻机机场约 25 m<sup>2</sup>,传统立轴式钻机机场为 120~150 m<sup>2</sup>,相比较机场修筑地面积减少 80%~85%<sup>[15-16]</sup>。使用便携式钻机,不仅降低了对生态环境的破坏,还大大减少了修筑地基、青苗补偿、环境修复的费用。

#### 4.4.2 无人机吊运与非无人机吊运对比

传统立轴式钻机临时运输便道宽 2.5~3 m,便携式钻机临时便道宽 0.8~1 m<sup>[17-18]</sup>。一个钻孔平均按修 2 km 便道计算,使用立轴式钻机需 6000 m<sup>2</sup> 便道,采用地面运输模式的便携式钻机需修 2000 m<sup>2</sup> 便道。而采用无人机吊运方案,则无需修建便道,修路对生态环境的破坏为零,真正实现了运输过程中的绿色勘探。

表5 新化月光项目钻孔施工情况统计

孔号	设计倾角/(°)	终孔孔深/m	台月效率/(m/月)	主要地层	钻机型号
ZK501	80	492.77	575.8	板岩	XY-5型立轴式钻机
ZK302	80	627.69	923.8	板岩	ZY-800型便携式钻机
ZK303	80	590.14	906.6	板岩	ZY-800型便携式钻机
ZK1103	80	425.71	847.4	板岩	ZY-800型便携式钻机
ZK1001	80	287.69	787	板岩	其它厂家便携式钻机

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

(1)无人机吊运模块化钻机技术是一种创新的施工方法,它利用无人机的飞行能力来实现对钻机设备的高效、精准吊装和运输。

(2)无人机吊装模块化钻机技术在恶劣的地形和气候条件下,展示了出色的环境适应性和应用实用性,大幅缩短了搬运周期,减少了对生态的破坏,提高了作业的安全性和效率。

(3)便携式全液压模块化钻机机场仅需 25 m<sup>3</sup>,综合钻月效率是传统立轴式钻机的 1.5~2.0 倍,符合绿色勘查要求。

(4)钻探设备模块化是实现无人机吊装的前提,两者的匹配取决于钻探设备的最重模块质量。

### 5.2 建议

(1)无人机吊运模块化钻机普遍采用吊绳进行作业,吊运过程中不能有效控制吊装装置在空中的姿态和方向,提高了作业难度,后期可吊装稳定性工具及自动脱钩装置等的研制。

(2)无人机一次性投入较大,利用率不高。无人机实现模块化、多用途设计,实现一机多用和服务的专业化、集约化是以后应考虑的方向。

(3)目前无人机管控较严,需要去吊运所在地军区及航空部门审批通过方可飞行,建议相关审批部门将地质勘探领域的飞行纳入低空经济服务范围,减少审批环节及审核时间,提高工作效率。

### 参考文献:

[1] 李奋强,栗琼玉,叶见玲,等.绿色勘查钻井(深孔钻探)技术规

范诠释[J].国土资源导刊,2023,20(1):95-99.

- [2] 王强,陈向.“驼峰”重载无人机的探索与跨越[J].交通建设与管理,2022(5):86-88.
- [3] 唐黔,左明武,蒋微,等.ZY便携式钻机在地质灾害快速调查中的应用[J].地质装备,2020,21(1):11-14.
- [4] 曹灶开,白超,罗龙,等.便携式钻机在八字岭锡铜多金属矿区地质钻探的应用[J].地质装备,2024,25(1):32-35.
- [5] 曾志方,左明武,潘军华,等.多用途便携式地质钻机的研发与应用[Z].
- [6] 刘蓓,寇少磊,朱芝同,等.便携式模块化钻机在绿色地质勘查工作中的应用实践[J].钻探工程,2022,49(2):30-39.
- [7] 刘蓓,张晨,杨可,等.便携式全液压钻机在秦岭地区地质钻探中的应用[J].钻探工程,2021,48(11):93-102.
- [8] 刘曼.便携式全液压钻机在矿产勘查中的应用探讨[J].西部资源,2023(6):12-14.
- [9] 罗龙,廖麟祥,曹灶开,等.MD300便携式全液压钻机在云南大关铝土矿岩心钻探中的应用[J].世界有色金属,2024(2):173-175.
- [10] 孔二伟,张锋,李大鹏,等.便携式全液压钻机在地质勘查中的应用[J].西部探矿工程,2021,33(1):71-74.
- [11] 孟祥瑞,武飒.河南某金矿项目绿色勘查技术研究与实践[J].钻探工程,2023,50(S1):286-290.
- [12] 王沐泓,王彩根.西非某金矿勘探中便携式钻机快速钻探方法及施工管理[J].四川地质学报,2022,42(S1):100-104.
- [13] 钟方红,黄鸿新.绿色勘查技术在广丰许家桥黑滑石矿详查中的应用[J].钻探工程,2021,48(12):32-37.
- [14] 周锋,李堃,白金贵.绿色勘查技术在矿山地质钻探施工中的应用效果研究[J].世界有色金属,2023(21):109-111.
- [15] 郭维.绿色勘查技术在矿山地质钻探施工中的应用分析[J].世界有色金属,2024(5):169-171.
- [16] 姜春雷.金属矿山复杂地层深孔岩心钻探技术分析[J].中国金属通报,2023(12):141-143.
- [17] 刘蓓,蔡正水,杨可,等.寨上金矿复杂地层深孔岩心钻探技术[J].钻探工程,2023,50(S1):240-245.
- [18] 刘蓓,杨可,张晨,等.固体矿产绿色勘查钻探技术方法探索与实践[J].钻探工程,2021,48(S1):39-46.

(编辑 王文)