

多旋翼无人机在钻探设备搬迁中的应用与分析

方国庆, 王杰, 王虎, 蔡隽, 张昭, 唐敏, 徐秋文*

(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410000)

摘要:在固体矿产勘查中,因工作区地形复杂给钻探设备搬迁工作带来较大挑战,修建道路或人工搬迁存在工作量大、工期长、环境破坏大和安全风险高等问题。以湖南省安化县谟家仑、江华县麻江沅工作区为例,优选了3款多旋翼无人机,重点对设备拆卸与捆扎、路线规划、飞行吊装等无人机吊运流程及应用效果进行对比分析,应用结果表明,无人机搬迁具有效率高、人工强度低、绿色环保等优势,相比传统搬迁方式,有助于实现绿色勘查。同时,从提升无人机载重、续航能力,完善无人机多控模式,优化钻机模块分配集成等方面提出了建议。多旋翼无人机在复杂地形条件下的优势和应用效果,可为地形条件复杂地区的钻探设备搬迁提供有益借鉴。

关键词:固体矿产勘查; 钻探设备搬迁; 多旋翼无人机; 吊运; 便携式钻机; 绿色勘查

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)02-0072-08

Application and analysis of multi-rotor drones in drilling equipment relocation

FANG Guoqing, WANG Jie, WANG Hu, CAI Jun, ZHANG Zhao, TANG Min, XU Qiuwen*

(Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha Hunan 41000, China)

Abstract: In solid mineral exploration, the complex terrain of the work area poses significant challenges to the relocation of drilling equipment, and building roads or manual relocation involves high workload, long construction period, substantial environmental damage, and high safety risks. Taking the Chenjialun survey area in Anhua County, Hunan Province, and the Majiangyuan survey area in Jianghua County as examples, three types of multi-rotor drones were selected, and attention was taken on comparative analysis of the drone hoisting and transporting processes such as equipment disassembly and bundling, route planning, and flight hoisting, as well as their application effects. The application results show that drone relocation has advantages such as high efficiency, low labor intensity, and environmental friendliness. Compared with the traditional relocation methods, it contributes to the realization of green exploration. At the same time, suggestions were put forward in terms of enhancing the load-carrying and endurance capabilities of drones, improving the multi-control mode of drones, and optimizing the modular distribution and integration of drills. The advantages and application effects of multi-rotor drones under complex terrain conditions can provide useful reference for the relocation of drilling equipment in areas with complex terrain.

Key words: solid mineral exploration; relocation of drilling equipment; multi-rotor drone; hoisting and transporting; portable drill; green exploration

0 引言

绿色勘查,即以绿色发展理念为引领,以科学管理和先进技术为手段,通过运用先进的勘查手

段、方法、设备和工艺,实施勘查全过程环境影响最小化控制,最大限度地减少对生态环境的扰动^[1-2]。

中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心 2024

收稿日期:2024-12-30; 修回日期:2025-02-17 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.02.010

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“东部地区战略性矿产靶区查证技术支撑(长沙中心)”(编号:DD20242960)

第一作者:方国庆,男,汉族,1990年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,从事钻探工程技术研究和管理工作,湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号,1204112760@qq.com。

通信作者:徐秋文,男,汉族,1989年生,助理工程师,工程管理专业,从事钻探工程技术研究和管理工作,湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号,xlys768716188@qq.com。

引用格式:方国庆,王杰,王虎,等.多旋翼无人机在钻探设备搬迁中的应用与分析[J].钻探工程,2025,52(2):72-79.

FANG Guoqing, WANG Jie, WANG Hu, et al. Application and analysis of multi-rotor drones in drilling equipment relocation[J]. Drilling Engineering, 2025,52(2):72-79.

年承担的东部地区战略性矿产靶区查证技术支撑(长沙中心)项目,其工作区分布在中南片区5个省份12个区县,均为典型的南方丘陵山区,由于部分工作区孔位偏远、地形条件复杂、植被茂密,使用传统的人力搬迁,人工强度高、安全风险大,搬迁效率低、工期延误长^[3];使用大型机械设备修路、运送钻探设备物资,不仅施工成本高^[4],还会对环境造成较大破坏,不符合绿色勘查施工的要求,如何安全、高效、绿色的开展设备物资搬迁成为项目急需解决的首要难题^[5-6]。

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》(2024年4月20日印发)指出,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。目前,国内已有部分单位尝试使用重载无人直升机吊运钻探设备^[7],并取得较好的应用效果,为解决钻探设备搬迁难题提供了新的思路。随着科技的快速发展,多旋翼无人机的载重、续航能力等技术指标不断提升,且具有垂直起降、操作灵活、适应性强等特点^[8-10],能够在复杂地形和恶劣环境条件下执行吊运任务,在物流运输^[11-12]、应急救援^[13]等领域取得较好的应用,为钻探设备搬迁提供了新的选择。在此背景下,在湖南省安化县、江华县2个工作区,优选多旋翼无人机,开展绿色搬迁新型模式探索,通过对模块化便携式钻探装备吊运搬迁,开展应用效果分析。

1 项目概况

1.1 工作区概况

湖南省安化县谟家仑、江华县麻江沅2个工作区,均为典型的南方丘陵山区,孔位位置偏远、道路狭窄弯多、海拔高差大、沟谷纵横、植被茂密,设备搬迁难题尤为突出。

1.2 设备选型

湖南省安化县谟家仑、江华县麻江沅2个工作区钻探工作量为1200 m,设计钻孔5个,设计孔深150~340 m,钻孔倾角75°~90°。为保证钻机既能满足400 m以内斜孔钻探施工能力,又具备较强的地形适应性、满足绿色勘查施工需求,选用MD800型模块化便携式全液压钻机。该钻机由柴油机组、操作台、钻机底座、泥浆泵、卷扬机等组成,采用相对独立化模块设计,全液压驱动、无极调速,所有支

架采用铝合金制作而成,质量分配合理,最大模块质量<180 kg。

1.3 搬迁难点

2个工作区孔位布设的5个钻孔均不同程度的存在搬迁路程远、地形陡峭、通行困难等问题,面临很多搬迁问题。

(1)搬迁难度大。上述5个钻孔均处于深山密林,搬迁距离最小为1.4 km、最大为2.2 km,搬迁路程较远;且在工作区地形陡峭、沟谷纵横、溪流穿行,搬迁最大高差为240 m,通行条件极差。虽然选用了便于搬迁的模块化便携式钻机,但依然存在极大的搬迁难度。

(2)安全风险高。由于工作区地形切割强烈,即使勉强修筑林间栈道,也无法较好解决道路狭窄、一侧临陡坡、道路难行的问题。在这样的通行条件下,无论是使用人力搬迁还是大型挖掘设备修筑道路和吊运设备,都将不可避免的面临较大的安全风险。

(3)工期延误长。按照以往的搬迁经验,在该条件下通常选用人力搬迁模式。人力搬迁具有工人劳动强度大、搬迁效率低的缺点。按该区修路难度、搬迁路程、通行条件等推算,从道路修筑开始到设备进场完毕,单孔搬迁工期将超过10 d。同时,该工作区钻孔大部分为300 m以内的浅孔,频繁的搬迁,将大大降低该区钻探施工效率,从而造成工期延误。

(4)植被破坏严重。在道路修筑、拓宽过程中,需砍伐破坏沿路的植被。该区道路修筑路程远、工程量大,植被破坏范围广,人力修路困难,借助机械设备辅助道路修建,对森林植被的破坏将会更加严重,难以满足绿色勘查施工的要求。

2 无人机性能要求及选择

2.1 无人机性能需求

在山区使用无人机开展钻探设备搬迁,受设备物资质量、搬迁距离、地形地貌、地表覆盖物遮挡、天气状况等因素影响,优选无人机时,重点考虑无人机的载重能力、续航能力、安全性等方面性能^[7,14]。

2.1.1 载重能力

选择无人机时得确保其载重能力要大于钻机解体后的最大单元质量。项目所选用的钻机为MD800型模块化便携式全液压钻机^[15],其最大模块

质量 <180 kg(简易拆解后,可降至 150 kg)。出于吊运设备安全性考虑,无人机最大载重量 <200 kg。

2.1.2 续航能力

出于搬迁效率考虑,无人机的续航能力越强越好。目前,国内燃油版重载无人直升机续航里程可达 200 km,且燃油加注方便,能够较好的满足吊运续航要求。对于电池版多旋翼无人机,使用时一般配套 3 组以上电池,可实现迅速更换电池复飞。为了确保飞行吊运的连续性,要求单组电池续航里程高、充电效率高,确保单组电池电量消耗至安全电量前剩余的 2 组电池至少有 1 组已充至满电。结合 2 个工作区的孔位情况,单趟吊运往返距离最大为 4 km,此次按单组电池额定载重可往返飞行 3 趟要求,即单组单次续航 <12 km。

2.1.3 安全性能

使用无人机在山区开展钻探设备搬迁,飞行途中会经过森林、河流,甚至房屋和人员活动区,一旦发生落物或坠毁将会造成无可挽回的损失。所以,无人机的安全性能是优选时所考虑的重点,一方面需具备自动避障系统、自动返航、紧急降落、实时通讯和监控等安全飞行功能^[16-17],降低无人机坠毁的概率;另一方面,为了避免无人机坠毁引发森林火灾,还需具备一定的阻燃功能。

2.2 无人机优选

根据上述技术要求,考虑到燃油版无人机坠毁后存在一定的火灾风险,同时价格高(约为电池版的 3 倍),出于安全经济的原则,此次优选电池版无人机。结合当前市场上大型载重无人机的应用情况,此次优选了 3 款多旋翼无人机参与项目设备搬

迁,其性能参数见表1。

2.2.1 动力系统

3 款多旋翼无人机均选用高效率的电机,配合大容量、高能量密度的锂电池组^[18],确保足够的动力和续航。先进的电池管理系统可实时监测电池状态,优化充放电过程,提高电池使用寿命和安全性;电机的高效率运行也降低了能耗,具有较好的经济性和环保性。所优选的 3 款无人机最大飞行总质量(含自重和载重)均处于 $380\sim 400$ kg之间,动力差距较小。最大载重均 <200 kg,满足MD800型模块化便携式钻机吊运需求。

2.2.2 机体结构

无人机的旋翼采用轻质高强度的碳纤维^[19](见图1),结构件采用航空铝材^[20],保证机身强度的同时减轻质量,适应大载重需求。其中,联特LTY-460、风行智能Y-240型无人机具有较低的自重,在同等级动力情况下,具有更强的载重能力。



图1 多旋翼无人机机体结构

Fig.1 Body structure of multi-rotor drone

2.2.3 飞控系统

运用先进的飞行控制算法和高精度传感器,实现精准的姿态控制、定位导航和自主飞行功能,确

表1 多旋翼无人机性能参数

Table 1 Performance parameter of multi-rotor drones

性能参数	联特LTY-460	鹰航科技Y-200	风行智能Y-240
产品尺寸(桨叶折叠,机臂展开)/mm	3670×3670×1100	3737×3737×1455	3860×3860×750/1200
机身结构	8轴16旋翼		
裸机质量(含电池)/kg	160	180	158
最大载质量/kg	230	200	240
续航时间(载重 200 kg,单组电池消耗至安全电量)/min	10	20	18~20
电池充电时间(由安全电量 50% 充至 100%)/min	30~40	25~35	30~40
最大飞行速度/($m\cdot s^{-1}$)	20	22	20
信号传输	无线通信、实时传输		
悬停精度(GNSS信号良好)/m	RTK:水平 ± 0.1 ;垂直 ± 0.1		
抗风等级	≤ 7 级	≤ 6 级	≤ 7 级

保飞行稳定性与安全性^[21]。飞控系统能够自主规划最优飞行路径,躲避障碍物,适应复杂多变的作业环境,还可根据任务需求自动调整飞行参数和姿态,实现高度自动化作业,具备较好的安全性能,适用于丘陵山区吊运工作。

2.2.4 通信系统

配备可靠的无线通信,能实现远距离、实时的数据传输和指令控制,保障无人机在复杂环境下的通信稳定。高精度的定位和飞行控制技术,使其在物资投放、设备安装等任务中能达到厘米级的精度,提高作业的准确性和成功率^[22]。

2.2.5 运输保障

无人机拆卸完后,可以整体收纳至一辆4.2 m的蓝牌厢式货车中,针对地质勘查行业多在山区,道路狭窄崎岖,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,见图2。



图2 无人机收纳运输保障

Fig.2 Drone transportation guarantee

3 无人机应用

本项目采用3款多旋翼无人机在2个工作区5个钻孔的设备搬迁中进行了应用实践,无人机吊运设备流程大致包括设备拆卸与捆扎、路线规划、飞行吊装。

3.1 设备拆卸与捆扎

模块化便携式全液压钻机机台需搬迁的设备物资包括钻机、发电机、管材、泥浆材料、油料、封孔水泥、岩心(返程)等^[23-25]。为了在确保飞行安全的前提下尽量提高搬迁效率,对个别质量大的模块进行拆解,对部分零散物资进行打包捆扎。

MD800型模块化便携式全液压钻机动力部分(久保田发动机总成)在散热水箱满液的情况下,其质量可达200 kg左右,为了尽量减小单个模块的质

量,对散热水箱、液压马达等进行拆解,拆解后质量控制控制在150 kg左右;钻机其他部分按照出厂的模块设置各自分解。对于钻杆、油料、水泥、岩心等零散物资,按照100 kg的标准进行打包捆扎牢固。为了确保飞行安全,坚持现场称重(见图3),严格限制各吊运单元质量 ≥ 150 kg。



图3 吊运单元现场称重

Fig.3 Weighing the lifting unit at the site

3.2 飞行路线规划

飞行路线规划按照安全、高效、可靠、合规原则:

(1)避开机场净空保护区、军事管理区、国家重点机构及人口密集区域等禁飞区与危险区域;

(2)远离高楼、电线杆、树木等障碍物,预留足够的安全距离,与障碍物的水平距离应 ≤ 50 m,垂直距离 ≤ 20 m;

(3)避免在恶劣天气(如暴雨、大雾、强风、雷电等)下规划飞行路线;

(4)在满足安全要求的前提下,选择距离最短的路线,尽量保持直线飞行,避免不必要的高度变化和频繁的转弯,以减少飞行时间和能耗;

(5)避免经过山谷等信号遮挡严重的区域,确保飞行路线上无人机与操控站之间的通信信号稳定;

(6)严格遵守国家和地区关于无人机飞行的法律法规,申请必要的飞行许可。

基于以上路线规划原则,结合2个工作区实际和无人机性能情况,规划飞行路线如图4、图5。

3.3 飞行吊运

3.3.1 航线试飞

无人机抵达起飞点后,飞手和地勤人员设置安全警戒线,组装调试无人机,并根据规划路线进行



图4 谏家仑工作区无人机吊装飞行路线
Fig.4 Drone lifting flight route in Chenjialun work area



图5 麻江沅工作区无人机吊装飞行路线
Fig.5 Drone lifting flight route in Majiangyuan work area

1~2个航次的航线试飞。试飞过程中,结合吊运区地形实际情况,尽量减少水平飞行距离和爬升高

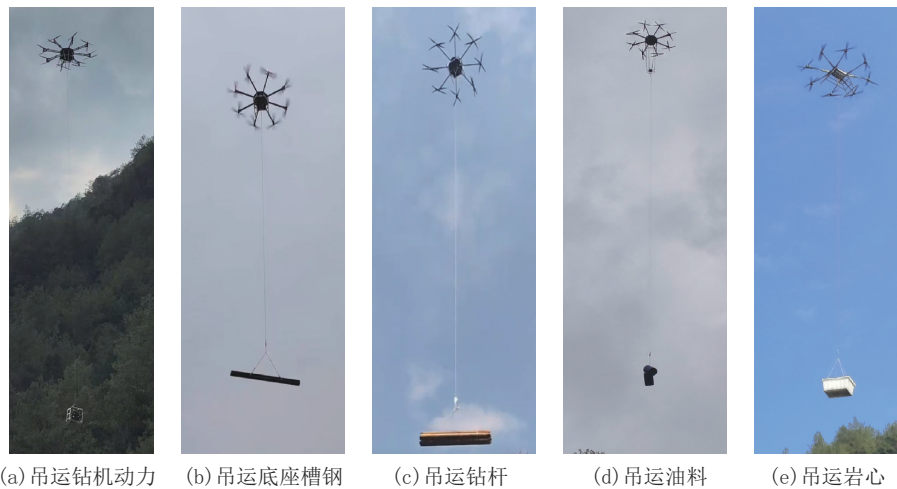
差,标注并远离风险隐患点,进一步优化航线,确保飞行安全高效。由于工作区地形复杂、飞行距离较远,在航线试飞过程中均不同程度存在信号丢失和飞行视距遮挡情况,遂采用双站双控、超视距飞行模式,并合理设计控制权转换点,确保飞行控制可靠。

3.3.2 电池充电与更换

无人机完成卸货返回起飞点后,检查电池剩余电量情况,当剩余电量<50%时,及时更换电池。起飞点使用柴油发电机供电,用于电池充电。经现场使用验证,在水平飞行距离1 km、垂直高差200 m左右,吊运设备物资质量在100~150 kg,所优选的3款无人机吊运设备往返一趟需要6~7 min,单组电池飞行作业时间20~30 min,在安全电量范围内可连续飞行吊运3~4趟。现场电池充电从安全电量(一般为50%)到100%,所需时间为25~35 min,配备3组电池循环充电即可满足连续作业所需。

3.3.3 载重飞行

出于飞行安全和经济考虑,5个钻孔的吊运均采用单机作业模式。首先,由起飞点飞手控制无人机起飞后,空中悬停,由地勤人员完成物资挂载;飞行至控制权转换点(进入卸货点飞手信号控制和视距范围)后,起飞点飞手将无人机控制全交予卸货点飞手,而后由后者控制无人机飞行;抵达卸货点后,悬停稳定物资状态并缓慢下降,设备触地自动脱扣完成物资卸载。无人机吊运钻探设备物资载重飞行见图6。



(a) 吊运钻机动力 (b) 吊运底座槽钢 (c) 吊运钻杆 (d) 吊运油料 (e) 吊运岩心

图6 无人机吊运钻探设备物资

Fig.6 Drone lifting of drilling equipment and materials

本项目在2个工作区使用3款无人机进行了5个钻孔设备搬迁,吊运货物共计93.9 t,累计飞行926航次,飞行时长146 h,吊运明细详见表2。

4 应用效果分析

使用多旋翼无人机在偏远、地形复杂地区开展钻探设备物资相比于传统人力搬迁和机械设备吊装具有人工强度低、搬迁效率高、安全可靠、对环境破坏扰动小等优势^[26-27],能够更好的缩短工期、确保安全、降低成本,有效推进绿色勘查施工,对比情况见表3。

4.1 搬迁效率高,有效缩短工期

以麻江沅工作区为例,该工作区2023年布设钻孔2个,均采用人力搬迁设备物资。据统计,单孔修筑人工搬迁栈道耗时7 d,搬迁设备耗时8 d,共需15 d。2024年采用无人机吊运模式,道路通行方面仅需保障个人林间行走,栈道要求低,修筑1 d即可完成,设备搬迁平均耗时2 d,单孔共计耗时3 d。无人机搬迁模式相比于人力搬迁效率提升4倍,可有

效缩短工期。

4.2 安全性高,降低风险

麻江沅工作区,地形切割严重,虽进行了道路修筑,但依然崎岖难行,人力搬运设备存在滑落悬崖、摔伤等安全风险;使用无人机搬迁,只要隔离飞行区域,基本无人员伤亡风险。

4.3 搬迁费用低,降低成本

该项目采用无人机吊运单孔价格为4.5万元左右,相对于人力搬迁和大型机械搬迁,价格适中。由于当前采用无人机吊运市场不够成熟,吊运价格未经市场调节,费用偏高;而且该项目为地质调查项目,单个工作区钻孔数量少,吊运工作不连续,相应提高了吊运成本。随着无人机吊运市场的不断成熟,无人机吊运成本将进一步降低。

4.4 环境破坏小,利于绿色施工

使用无人机搬迁模式,仅需保障个人上班通行,可借助林间老道,基本无需特意修筑栈道,平均单孔破坏面积<150 m²,相比于人力搬迁和挖掘机

表2 无人机吊运飞行统计

Table 2 Statistics of drone lifting flight

工作区	孔号	设计孔深/m	路线	水平距离/m	垂直高差/m	货物质 量/t	吊运 次数	吊运时 长/h	无人机 型号
谏家仑	ZK20101	260	起飞点1—ZK20101	1400	90	10.2	98	18	LTY-460
			ZK20101—起飞点1	1400	90	11.3	120	16	LTY-460
	ZK20301	340	起飞点2—ZK20301	1100	240	11.2	110	22	LTY-460
			ZK20301—起飞点2	1100	240	14.4	150	35	LTY-460
麻江沅	ZK201	150	起飞点1—ZK201	500	250	8.3	82	16	LTY-460
	ZK101	200	起飞点2—ZK201—ZK101—起飞点2	2000	330	9.8	96	15	Y-200
			ZK101—起飞点2	600	330	8.4	78	9	Y-240
	ZK501	250	起飞点3—ZK501	180	120	9.6	92	7	Y-240
ZK501—起飞点3			180	120	10.7	100	8	Y-200	
合计						93.9	926	146	

表3 各种搬迁模式对比分析(以麻江沅工作区为例)

Table 3 Comparative analysis of various relocation modes (taking Majiangyuan work area as an example)

搬迁模式	道路需求(宽度)/m	单孔道路修筑平均耗时/d	单孔设备搬迁 平均耗时/d	人工需求数 量/(人·d)	单孔平均搬迁 成本/(万元)	植被破坏面 积/m ²
人力搬迁	<1.2	7	8	150	4.5~6	1800
大型机械(挖掘 机)搬迁	<3	预计7~8(位于国有林场,不 允许大型机器开挖)	预计4	20	2.5~3	4500
无人机吊运搬迁	<0.4(人行路宽)	1	2	30	4.5	<150

注:植被破坏面积按平均修路1.5公里计。

搬迁模式,对环境破坏扰动小,更有利于绿色勘查施工。

5 结论与建议

5.1 结论

(1)多旋翼载重无人机具有载重大、航程远、性能稳定等特点,能够较好适应南方丘陵区极端地形钻探设备物资搬迁工作,在钻孔孔位偏远、地形条件复杂地区,采用多旋翼无人机吊运搬迁模式具有搬迁效率高、安全风险低、成本低、绿色环保等优势。

(2)无人机的载重能力、续航时间、安全性能是用于钻探设备搬迁所需考虑的首要参数,所优选的3款无人机在实际应用过程中,均能满足模块化便携式钻机搬迁需求。按照安全、高效、可靠、合规原则规划最优飞行吊运路线,能够有效提升搬迁效率、降低安全风险。

(3)无人机吊运钻探设备市场还不够成熟,单价偏高,合理的安排工作区钻孔设备搬迁进度,增强多个钻孔搬迁的连续性,将能够有效降低单个钻孔搬迁成本。

5.2 建议

(1)加强无人机的研发,进一步提升钻探设备搬迁效率。研发载重能力更大的无人机,以适用更大型号钻机的搬迁及减少吊运次数;加强无人机电池技术的研发,配备能量密度更高的固态电池,提升续航时间;完善无人机多控模式,实现钻孔间搬迁孔到孔飞行吊运,无需中转;进一步优化无人机作业模式,实现多台无人机无扰交叉搬迁作业,大幅提升搬迁效率。

(2)改进便携式全液压钻机模块的分配集成,使其更好的与无人机能力相匹配,共同推进绿色勘查有效实施。

参考文献(References):

- [1] 渠洪杰,谭春亮,冉灵杰,等.面向新一轮找矿突破战略行动绿色勘查的钻探技术研发与应用建议[J].中国矿业,2024,33(10):246-256.
- [2] 方国庆,潘德元,王杰,等.绿色勘查技术在湖南省幕阜山地区钻探工程中的应用与实践[J].钻探工程,2024,51(S1):

- 269-274.
- FANG Guoqing, PAN Deyuan, WANG Jie, et al. Application and practice of green exploration technology in drilling projects in the Mufu Mountain area of Hunan Province[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1):269-274.
- [3] 汤华贵,朱东明.长庆区域钻机专业化“拆搬安”实践与探索[J].设备管理与维修,2020(17):13-14.
- TANG Huagui, ZHU Dongming. Practice and exploration of professionalized “dismantling, moving and installing” of drilling rigs in Changqing region[J]. Plant Maintenance Engineering, 2020(17):13-14.
- [4] 花志远.钻井工程中钻井队搬迁安装成本分析[J].经贸实践,2016(17):60.
- HUA Zhiyuan. Cost analysis of relocation and installation of drilling teams in drilling engineering[J]. Economic & Trade Practice, 2016(17):60.
- [5] 何忠宝.陆上钻机搬迁HSE管理[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(5):35-36.
- HE Zhongbao. HSE management of onshore drilling rig relocation[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(5):35-36.
- [6] 李洁莹.高海拔地区钻机搬迁安全管理措施[J].现代矿业,2017,33(4):239-241.
- LI Jieying. Safety management measures for drilling rig relocation in high altitude areas[J]. Modern Mining, 2017, 33(4):239-241.
- [7] 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.
- [8] 陈谋,刘伟,张鹏.性能约束下的四旋翼无人机协同吊挂系统分布式避碰跟踪控制[J].自动化学报,2024,50(12):2392-2406.
- CHEN Mou, LIU Wei, ZHANG Peng. Distributed collision avoidance tracking control for quadrotor cooperative suspension system under performance constraints[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(12):2392-2406.
- [9] 谷天培.多旋翼无人机在城市消防灭火救援中的应用[J].消防界(电子版),2022,8(22):52-54.
- GU Tianpei. Application of multirotor UAVs in urban fire fighting and rescue[J]. Fire Protection World (Electronic Edition), 2022, 8(22):52-54.
- [10] 徐超.多旋翼无人机在山区应急救援中的应用分析[J].南方农机,2023,54(3):4-6,14.
- XU Chao. Application analysis of multirotor UAVs in mountainous area emergency rescue[J]. South Agricultural Machinery, 2023, 54(3):4-6,14.
- [11] 陈光伟,王华.自转旋翼无人机在海军物资投送中的应用研究[J].中国机械,2024(12):49-52.
- CHEN Guangwei, WANG Hua. Research on the application of autogyro UAVs in navy material delivery[J]. China Machinery, 2024(12):49-52.
- [12] 程海涛,孔令宇,王泽昭,等.电力行业无人机典型应用的服务模式和创新研究[J].应用科技,2024,51(5):197-205.
- CHENG Haitao, KONG Lingyu, WANG Zezhao, et al. Re-

- search on service mode and innovation of a typical application of UAVs in power industry[J]. Applied Science and Technology, 2024, 51(5):197-205.
- [13] 王涛. 高层建筑灭火救援中多旋翼无人机的应用研究[J]. 中国新技术新产品, 2024(20):141-143.
- WANG Tao. Research on the application of multirotor UAVs in high-rise building fire fighting and rescue[J]. New Technologies and New Products of China, 2024(20):141-143.
- [14] 郑任科, 马铭洋. 多旋翼无人机在灭火救援中的飞行安全隐患及防范策略[C]//2021年度灭火与应急救援技术学术研讨会. 北京, 2021:42-44.
- ZHENG Renke, MA Mingyang. Flight safety hazards and prevention strategies of multirotor UAVs in fire fighting and rescue [C]//Proceedings of the 2021 Academic Symposium on Fire Fighting and Emergency Rescue Technology. Beijing, 2021: 42-44.
- [15] 刘岩, 孙军盈, 吕祥利, 等. XD 800型便携式全液压钻机在小兴安岭矿区的试验与应用[J]. 地质装备, 2018, 19(2):3-5.
- LIU Yan, SUN Junying, LÜ Xiangli, et al. Test and application of XD 800 portable hydraulic drill in Xiaoxing'anling mining area[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2018, 19(2):3-5.
- [16] 程文彬, 陆瑞强, 杨振鸿, 等. 小型多旋翼无人机安全性性能检验方法探讨[J]. 轻工标准与质量, 2020(5):108-109.
- CHENG Wenbin, LU Ruiqiang, YANG Zhenhong, et al. Discussion on safety performance testing methods of small multirotor UAVs[J]. Standard & Quality of Light Industry, 2020(5): 108-109.
- [17] 尚伟, 杨宏伟, 王湛. 民用无人机安全风险识别及其关键指标分析[J]. 质量与认证, 2023(5):66-68.
- SHANG Wei, YANG Hongwei, WANG Zhan. Analysis of civil UAV safety risk identification and its key indicators [J]. China Quality Certification, 2023(5):66-68.
- [18] 李学龙. 无人机续航能力[J]. 中国科学(信息科学), 2023, 53(7):1233-1261.
- LI Xuelong. Endurance of unmanned aerial vehicles [J]. Science in China (Information Sciences), 2023, 53(7): 1233-1261.
- [19] 麦智鹏, 曹怿男, 洪郭彬, 等. 一种长航时航拍多旋翼无人机总体方案的设计[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(2): 96-99.
- MAI Zhipeng, CAO Yinan, HONG Guobin, et al. A long-endurance aerial photography multi-rotor UAV overall scheme design [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(2):96-99.
- [20] 吴庭斌, 谢润心. 四旋翼无人机结构设计[J]. 电子产品世界, 2024, 31(8):5-8.
- WU Tingbin, XIE Runxin. Structural design of quadcopter drones [J]. Outlook of Electronic Technology, 2024, 31(8): 5-8.
- [21] 李晓龙. 多旋翼无人机飞行特性分析及控制刚体模型建模[J]. 中国科技信息, 2024(20):96-98.
- LI Xiaolong. Analysis of flight characteristics and modeling of control rigid body model of multirotor UAVs [J]. China Science and Technology Information, 2024(20):96-98.
- [22] 陈岸, 聂文翔. 基于自组网通信技术的RTK无人机航迹远程控制方法[J]. 自动化技术与应用. (2024-12-24) [2024-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1474.TP.20241223.1512.131.html>.
- CHEN An, NIE Wenxiang. Remote control method of RTK UAV trajectory based on self-organizing network communication technology [J]. Techniques of Automation and Applications. (2024-12-24) [2024-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1474.TP.20241223.1512.131.html>.
- [23] 李军, 施超平, 张远义. 便携式全液压钻机在贵州某矿山勘察中的应用和分析[J]. 四川地质学报, 2024, 44(S1):79-84, 91.
- LI Jun, SHI Chaoping, ZHANG Yuanyi. Application and analysis of portable hydraulic drills in mine exploration in Guizhou [J]. Acta Geologica Sichuan, 2024, 44(S1):79-84, 91.
- [24] 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.
- LIU Bei, KOU Shaolei, ZHU Zhitong, et al. Practical application of the portable modular drill in green geological exploration work [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):30-39.
- [25] 薛倩冰, 王晓赛, 樊广月, 等. 钻井利器故事之“全液压岩心钻机”[J]. 钻探工程, 2024, 51(4):172-176.
- XUE Qianbing, WANG Xiaosai, FAN Guangyue, et al. The story of a drilling weapon: Full hydraulic core drill [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):172-176.
- [26] 黄静雯, 王逸昆, 倪玲霖. 双无人机协同吊运与减摆控制设计[J]. 计算机集成制造系统. (2024-03-15) [2024-12-26]. <https://link.cnki.net/doi/10.13196/j.cims.2023.0583>.
- HUANG Jingwen, WANG Yikun, NI Linglin. Design of double UAV cooperative lifting and swing reduction control [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, (2024-03-15) [2024-12-26]. <https://link.cnki.net/doi/10.13196/j.cims.2023.0583>.
- [27] 段洁利, 李伟希, 李伟钦, 等. 山地蕉无人机自主吊运装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(15):1-10.
- DUAN Jieli, LI Weixi, LI Weiqin, et al. Development of UAV autonomous lifting and transportation equipment for mountain bananas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(15):1-10.

(编辑 王文)