输变电工程重载无人机高原峻岭区段物料运输研究

雷京津　关先龙　罗天兵
中国安能集团第二工程局有限公司 江西 南昌 330095

【摘　要】：对于新疆若羌高原峻岭区段海拔 2500～3800m、山地和高山地形占 100%的施工条件，对 74.245km 输电线路工程物料运输问题进行重载无人机动力适配、精准导航、承载投放、安全管控技术的研究。根据环境参数实测以及影响机理分析来创建动力、导航、承载等多参数协同优化的方法，从而创建出模块化的高原适配改造方案以及全流程标准化的作业体系。示范应用结果表明，重载无人机在海拔 3800m、6 级风条件下可以完成 100kg 级稳定运输，满载续航时间为 34min，定点投放的平均偏差为 2.8m，运输效率比传统的运输方式提高了 120%，综合成本降低了 36.0%，施工周期缩短了 17.4%，可以为同类高原输电工程提供技术参考。

【关键词】：输变电工程；重载无人机；高原峻岭；物料运输；动力适配

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.045

1 引言

近些年来，重载无人机运输技术在工程领域中的应用越来越受到重视，主要依靠载重结构的设计、动力系统以及导航控制的改进来达成在复杂地形中进行物料高效运输的目的。国外对于极端环境适应性方面的研究较多，对低温电池性能、抗风机身设计以及精准导航系统等展开研究，在一些高海拔输电线路工程中，日均运输物料次数达到 50 多次，比传统方式快 3 倍。国内的研究和应用大多集中在平原和低海拔地区，对于高原低气压、低温、强风等条件下动力匹配和续航改善的研究较少，标准化作业流程和安全管控体系也尚未建立。本文以实际工程为依托，从环境参数采集、动力和结构匹配、精准导航和定点投放、多种物料承载以及全过程安全控制等五个方面展开研究，形成可以复制的高原重载无人机运输技术方案，给同类工程提供借鉴。

2 工程概况与环境影响机理

2.1 工程概况

本工程标段在新疆若羌高原峻岭区段，线路总长 74.245km，沿线海拔由 2500m 升至 3800m，山地占 55.47%，高山占 44.53%，山脊、陡坡和冲沟两侧塔位较多。部分塔位和已有的道路之间没有成型的通道，物资要经过二次搬运才能到达作业面。施工材料主要是基础钢筋、水泥砂石、塔材、金具、绝缘子、工器具和周转材料，单件重量大多在 20 到 120kg 之间，配送点分散、种类繁多、批次密集，对载重能力、运输频次和到达精度有较高要求。

2.2 环境参数采集

在沿线设置 3 个固定气象观测点以及 2 套机载环境传感器，对 1 个完整的施工年度内气压、温度、湿度、风速风向、能见度等气象要素进行连续观测，并记录起降点高程、地形坡度、卫星可见情况。测试结果表明，在海拔 2500m 处平均气压约为 746hPa，在海拔 3800m 处约为 639hPa，分别是海平面的 74%和 63%；空气密度由约 0.96kg/m³降到约 0.84kg/m³，旋翼可用拉力下降约 22%和 32%。冬季最低气温在-25℃左右，昼夜温差大于 20℃。午后到傍晚风速明显增大，山脊、垭口、冲沟出口等处 6 级以上阵风经常出现，风向受地形走向控制，局地涡流明显。

2.3 环境影响机理

低气压使空气密度减小，旋翼在同样的转速下产生的拉力按照密度比例衰减，载重和爬升裕度同时被压缩，悬停功率增大，电池放电倍率变大。低温使锂电池内阻增大、可用容量减少，静置时容量衰减约 30%，起飞时电压下降更加明显。强风和地形涡流的叠加使姿态扰动加大，航向保持和定点悬停精度下降，投放偏差也随之增大。陡坡和深切沟谷会遮挡卫星信号，因此可以看到的卫星数量变少，实时动态定位的固定率也随之降低，当航线越障余量不够时容易触发高度保护。

从影响权重上看，按示范段实测和仿真计算得出，密度下降对运输功效的影响占到 45%，低温占 25%，强风占 20%，地形遮蔽占 10%。把 4 个因素折算成综合效能系数，海拔 2500m 区段约为 0.82，3200m 区段约为 0.70，3800m 区段约为 0.62，该系数直接决定单架次有效载重和日有效作业时长的取值。各个因素的作用方式是不一样的。密度、温度都是持续性因素，在全程中压低载重和航程上限，用动力配置和能源管理来补偿；强风属于间歇性因素，主要减少可用作业时段，用气象窗口安排和抗风控制来应对；地形遮蔽属于局部性因素，在某一段航程造成定位降级，用航线越障设计和惯导递推来规避。以上因素一起压缩了有效的作业时间，成了运输功效提高的主要障碍，也决定了技术方案要按照因素属性来分类应对。

3 重载无人机高原运输关键技术

3.1 动力系统与结构适配

对于低气压下拉力衰减的情况，采用六轴多旋翼布局来增加桨盘面积，桨叶使用大弦长、低雷诺数优化翼型，配以高压

无刷电机和宽范围电调，提高设计桨距和恒功率控制补偿密度损失。仿真和悬停试验结果表明，在海拔 3800m、起飞质量为 140kg 的情况下，功率裕度大于 15%，满载 100kg 悬停稳定。

能源上使用耐低温电芯和保温电池仓，起飞前将电池预热到 15℃以上，双电池并联供电降低单体放电倍率，仓内温度保持在 10 到 25℃之间，满载续航由平原状态的 42 分钟改为 34 分钟，可以满足单架次 30 分钟以内的作业要求。

结构上使用碳纤维复合机身和加强起落架，吊挂点按照 120kg 级载荷设计，并且留有 1.2 倍的安全系数，载重 100kg 时结构质量占起飞质量的比例小于 28%。高原适配使用模块化套件，只需要更换桨叶、电池保温仓、散热风道这三部分，2 个小时内就可以完成单机换装，不会改变飞控以及核心部件，从而降低了改造门槛和备件成本。

3.2 复杂地形精准导航与定点投放

导航使用北斗和 GPS 双模接收、惯性测量单元和激光测距融合的方式，用联邦滤波来实现多源数据融合，卫星信号被遮挡的时候用惯导递推来保证短时定位的连续。在沿线建立航线走廊数字高程模型，按照离地高度保持的方式规划三维航线，对山脊、垭口和跨越点留出不小于 30m 的越障余量，塔位坐标、投放点、迫降点提前装订。

定位精度依靠实时动态差分改正来提高，双频天线和地平面抑制板可以减少多路径的影响，实测水平定位误差小于 0.3m。投放时采用定点悬停配合吊挂自动脱钩的方式，长件物料使用双点吊挂并配以摆动抑制，投放前由视觉辅助对准投放区，实测平均偏差为 2.8m，最大偏差为 4.6m，可以满足 5m 以内的控制要求。用 900MHz 数据链和公网双链路备份的方式进行通信，超视距作业依靠地面中继站来进行接续，链路中断就会出现自动返航的现象。

3.3 多类型物料承载装置

根据物料形态来设计 3 种承载装置。标准货箱用来装金具、工器具和散装小件，额定载重量为 100kg，配有快挂接口和可调重心滑轨，重心调节范围为±50mm，保证不同配载情况下悬停平衡。专用吊架用来吊装塔材、线盘和长件，用双点吊挂和限位夹持来防止飞行中出现的摆动和旋转。散料料斗用来装水泥和砂石，下开式卸料口可以定点定量卸料。

易损物料增加缓降投放附件，绝缘子等采用绳索缓降，触地速度不大于 1m/s。所有的承载装置都和物料清单进行绑定，使用一箱一码的方式，对品名、数量以及去向进行扫码核对，运输台账和物料台账一一对应，从而减少错运和丢失的情况。

3.4 全流程安全管控

环境侧设置地面气象站并接入机载风速估计，实时输出起降点和航线走廊的风速、阵风和能见度，当风力达到 6 级以上、能见度低于 1000 米或者遇到低温结冰的情况时，停止作业。设备侧对电机温度、电流、电压、桨叶状态以及剩余电量进行监测，并且设置分级告警阈值，在出现异常情况时可以自动降低负载或者进行就近迫降。

作业侧设置电子围栏和航线隔离区，与在建杆塔、带电体、既有索道保持一定的安全距离，同一空域内只有一台无人机进行作业并提前报备。应急侧在每一个作业区都事先安排了两个以上的迫降地点，设置失控返航、开伞缓降以及地面消防医疗联动，机组配有持证飞手和专职安全员，按照作业票和班前交底的规定进行操作。

4 标准化作业流程与组织

4.1 设备选型与配置

根据海拔、载重、续航、低温适应性这四个方面的条件来选择，优先满足 3800m 满载 100kg、6 级风稳定作业的边界条件。在选型之前对三种 100kg 级的机型进行比较，用 3800m 满载悬停功率裕度、6 级风航向保持能力、25km 往返航程余量、-20℃低温启动成功率这四个指标来打分，然后按照实测结果来确定机型。本标段配置 100kg 级六旋翼运输机 4 架，另外再备 1 架整机，配地面站 2 套、中继站 1 套，每机配备 6 组电池并设置机巢式充电保障，形成每天两个作业波次的连续能力。根据日高峰物料需求 16t 来计算配置数量，单机日运量为 4.4t，需要 4 架同时作业，另外还要准备 1 架以应对故障停机。桨叶、电机、电调按照 10%的比例进行储备，机巢快充 25 分钟可以充到 80%，可以满足两个波次的电池周转。起降点按照塔位分布分为四个作业片区，每个片区设置主备起降点各一个，单程距离控制在 8km 以内，兼顾载重和续航的关系。每架运输机都配有 1 名飞手、2 名装卸挂钩人员，机组随着作业面一起移动，从而降低空驶距离。

4.2 标准化运输流程

流程分为计划、勘察、装载、报备、飞行、投放、回收 7 个步骤。计划环节由施工队按周提出物料需求，按塔位、品类、到达时间排序；勘察环节确定起降点、航线走廊和投放区，复核障碍物和地形变化；装载环节进行双人核对、称重和重心检查；飞行环节按照预定航线自主飞行，飞手全程监控；投放环节在悬停稳定后脱钩并回传影像；回收环节完成设备检查、电池更换和数据归档。各个环节设置时限以及交接要求。计划环节提前 3d 下达，并且按照周滚动修正，勘察环节在首飞之前完成，起降点、投放区、避障点留存影像资料；装载环节称重偏差大于 5%时重新配载，超重或者超尺寸的物料改用索道或者分段运输；飞行环节按照 15min 间隔回传位置、电量、姿态数据；投放环节取得现场影像确认后方可返航；回收环节当日完成数据归档和故障登记。遇 6 级以上阵风、能见度小于作业标准或者设备告警时，流程转入待机分支，由作业队重新安排

次序，优先保证塔材、金具等重要物料。夜间作业以及超视距航线需要单独报批，作业前需要进行空域协调并发布航线公告，作业结束后需要提交飞行小结。

4.3 组织与安全体系

项目部、作业队、机组三级管理，飞手和安全员双人双岗，日计划和气象窗口同时下达。编制重载无人机高原运输作业规程，确定设备检查、作业条件、操作步骤、应急处理、验收标准等内容，建立飞行日志、装载清单、故障台账等记录，保证全过程可追溯。三级职责按照层次来划分，项目部负责方案审定、资源配置、对外协调，作业队负责日计划编排、气象研判、现场组织，机组负责飞行实施、设备维护、异常报告。飞手需要有有效的执照并且完成高原机型的改装培训，安全员要通过应急处置考核，每季度组织一次失控返航和迫降演练，演练结果纳入班组考评。考核以架次完成率、投放合格率、告警处置及时率、无事故天数这四个指标为主，按月统计并和班组绩效挂钩。作业规程配套有 12 项记录表单，飞行日志、装载清单、电池台账、故障台账按照架次归档，使物料流向和飞行过程可以双向追溯，为以后同类工程积累基础数据。

5 工程应用与效果

5.1 应用概况

选择地形最复杂、传统运输最困难的三个区段先行进行示范应用，山脊塔位、陡坡塔位，运输的物料有塔材、金具、绝缘子、水泥砂石、工器具等。统计期内共完成 1360 架次，运输物料 142t，单机日均有效作业 4.6h。

5.2 关键指标验证

表 2 中示范段关键技术指标和经济指标的实际结果见表 2，各项都达到了或者超过了立项的要求。

表 2 关键技术指标与经济指标达成情况

类别	指标项	目标值	实际值
技术	海拔适应	2500～3800m 稳定作业	3800m 满载悬停稳定
技术	抗风能力	6 级风稳定作业	6 级风航向偏差不大于 1.5m
技术	额定载重 kg	不小于 100	105
技术	满载续航 min	不小于 30	34
技术	投放偏差 m	不大于 5	平均 2.8，最大 4.6
经济	成本降幅%	不小于 30	36.0
经济	效率提升%	不小于 50	120
应用	施工周期缩短%	不小于 15	17.4

5.3 综合效益

运输环节人工投入减少约 70%，临时索道和施工便道的数量也相应减少，沿线植被扰动和边坡开挖量减少，高陡坡面的人工搬运风险大大降低。物料等待时间减少使作业面交接加快，高海拔区段作业窗口短的问题得到缓解，冬季和雨季的连续施工能力有所提高。根据本标段的测算，物料运输费用在施工成本中所占的比例明显减少，进度和安全的配合效果较好。

6 结论

环境参数实测得到气压、空气密度、低温、强风等对运输性能的影响量级，海拔 3800m 处空气密度约为海平面的 68%，为动力适配提供量化的依据。动力和结构匹配采用扩大桨盘、优化桨距、低温电池保温和模块化套件相结合的方法，在不重新设计核心部件的情况下，可以实现 3800m 满载 100kg 稳定运输，满载续航 34min。组合导航、三维航线规划使得定点投放的平均偏差控制在 2.8m 之内，双链路通信、预设迫降点提高了超视距作业的可靠性，符合高原峻岭区段的精度和安全要求。之后可以继续采用集群协同的方式，并且可以考虑使用氢动力或者混合动力的方式，从而扩大载重和续航的范围，完善高原环境下适航和作业的标准。

参考文献：

[1] 苟毓俊,庞帅统.偏远山区卡车-无人机协同物流配送路径规划[J/OL].计算机应用研究,1-10[2026-11-04].

[2] 林雯,高鹏飞,刘世华,等.高压输电线路抢修塔无人机快速组装施工技术探讨[J].江西电力职业技术学院学报,2026,39(3):17-20+27.

[3] 石华,李莉.双无人机协同运输的规划与控制研究[J].机电信息,2026,(19):49-51+55.

[4] 周紫微,夏倩雯.基于无人机的应急物资配送模型与算法研究[J].现代信息科技,2026,10(19):19-22+29.

[5] 杨静.无人机吊装的山地光伏工程施工技术与效率研究[J].建筑电气,2026,45(9):59-62.