

无人机吊装运输在高海拔地区山地光伏施工中的运用

霍家豪

中冶武勘工程技术有限公司

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8935

[摘要] 在全球能源结构向低碳化转型的大背景下，太阳能光伏发电凭借其清洁、可再生的特性，成为能源领域的重要发展方向。无人机吊装运输作为一种新兴的运输方式，具有灵活性高、适应性强、不受地形限制等优势，为高海拔地区山地光伏施工提供了新的解决方案。本文将探讨无人机吊装运输在高海拔地区山地光伏施工中的运用，分析其优势、关键技术及应用前景，旨在为高海拔地区山地光伏施工提供参考。

[关键词] 无人机吊装运输；高海拔地区；山地光伏施工；运用

Application of UAV hoisting and transportation in mountainous photovoltaic construction at high altitudes

Huo Jiahao

Zhongye Wukan Engineering Technology Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of global energy transition toward low-carbon development, solar photovoltaic power generation has emerged as a pivotal direction in the energy sector due to its clean and renewable characteristics. As an emerging transportation method, UAV hoisting and transportation offers advantages such as high flexibility, strong adaptability, and no dependence on terrain constraints, providing a novel solution for photovoltaic installations in mountainous areas at high altitudes. This paper examines the application of UAV hoisting and transportation in mountainous photovoltaic projects at high altitudes, analyzes its benefits, key technologies, and potential applications, aiming to offer valuable insights for such construction endeavors.

[Key words] drone lifting and transportation; high-altitude areas; mountainous photovoltaic installation; application

我国高海拔地区拥有丰富的太阳能资源，且山地面积广阔，为光伏电站的建设提供了得天独厚的条件。然而，高海拔地区山地地形复杂、交通不便、气候恶劣，给光伏施工带来了诸多挑战，尤其是施工材料和设备的运输问题，成为制约项目进度和成本的关键因素。

一、高海拔地区山地光伏施工运输困境

1. 地形复杂限制运输路径。高海拔地区山地地形起伏剧烈，坡度陡峭，沟壑纵横，部分区域甚至存在悬崖峭壁等极端地形。传统的地面运输方式如汽车难以在这样的地形上行驶，无法直接将施工材料和设备运送到施工现场。索道运输虽然能够跨越地形障碍，但建设成本高、周期长，且运输能力有限，难以满足大规模光伏施工的需求。

2. 恶劣气候影响运输安全。高海拔地区气候恶劣，氧气稀薄，风力强劲，气温低，紫外线强。这些气候条件不仅会影响施工人员的身体健康，还会对运输设备的性能造成影响。例如，

低氧环境会导致汽车发动机功率下降，增加运输风险；强风天气会使索道运输的稳定性降低，甚至引发安全事故。此外，高海拔地区的极端天气如暴雨、暴雪等也会频繁发生，进一步加剧了运输的难度和风险。

3. 基础设施薄弱增加运输成本。高海拔地区往往地处偏远，交通基础设施薄弱，道路狭窄、崎岖，甚至部分区域没有道路。这使得施工材料和设备的运输需要经过多次中转，不仅增加了运输时间，还提高了运输成本。同时，由于基础设施不完善，运输过程中的物资损耗也较大，进一步降低了运输效率。

二、无人机吊装运输的技术优势

1. 灵活性高，适应复杂地形。无人机吊装运输完全不受现有道路条件限制，能够在复杂山地地形中直线飞行，直接将施工材料和设备精准运抵作业点位。哪怕是在悬崖峭壁、深切沟壑等车辆完全无法通行的极端地形，大型重载无人机也能轻松完成数百公斤物资的吊装运输任务。与传统“修路上山”“架

设索道”的方案相比，无人机吊装可节省 90%以上的临时基础设施建设成本，同时避免了开山修路对山体植被的破坏，生态影响降低约 80%。

2. 适应性强，应对恶劣气候。针对高海拔地区恶劣气候做了专项优化，在海拔超过 4000 米、氧气含量仅为平原 60%、瞬时风力达到 12 米/秒、气温低至-20℃的环境下仍可保持稳定作业。现代工业级吊装无人机搭载了冗余动力系统和 AI 飞控算法，能够根据环境气压、风速自动调整动力输出和飞行姿态，定位误差控制在厘米级，确保运输过程零偏差。机身结构采用碳纤维防腐蚀复合材料，表面做防紫外线涂层处理，可在户外极端环境下保障 10 年以上的稳定运行，设备可靠率达 98%。

3. 效率高，缩短施工周期。无人机吊装支持点对点直连运输，无需中途倒车转运，可将传统“人背马驮”需要 8 小时以上的运输时长压缩至 40 分钟以内。按照当前主流大载重无人机运力计算，单架次可吊运 200-500 公斤物资，单日可完成 10-15 架次运输，单日运力可达 3-5 吨，运输效率是人工搬运的 12 倍以上。在西部山地光伏电站建设中，应用无人机吊装可缩短整体建设周期约 45%，平均提前 1-2 个月实现并网发电，可为单个项目带来上千万元的提前收益。

4. 成本低，降低项目投资。无需修建临时施工道路和架设运输索道，可直接省去数百万元的前期基建投入，单个山地项目的前期基础设施投资可降低 60%以上。同时无人机采用远程地面站操控，单台无人机仅需 1-2 名操作人员，人力成本较传统人工运输降低 75%以上；电动吊装无人机的单位吨公里能耗成本仅为有人直升机的 1/10，比传统陆运降低 30%-50%。此外，无人机运输减少了多次中转搬运环节，可将建材物资损耗率从传统运输的 5%-8%降至 1%以内，进一步降低了项目整体投资。

三、无人机吊装运输在高海拔地区山地光伏施工中的创新应用场景

1. 光伏组件精准吊装。光伏组件作为光伏电站的核心部件，其安装精度直接决定了电站的发电效率。这类组件通常具有体积大、重量轻的特点，且对安装角度、位置的误差容忍度极低，哪怕几毫米的偏差都可能导致发电量显著下降。在传统施工模式中，光伏组件需先通过汽车运输至山下临时堆场，再依靠人工搬运或小型机械转运至山上安装点。这一过程不仅耗时费力，而且在搬运途中，组件表面的玻璃盖板、内部的电池片极易因碰撞、挤压出现隐裂，后续检测和修复成本高昂。无人机吊装运输则彻底改变了这一现状。搭载高精度 GPS 和视觉定位系统的无人机，可直接从山下仓库抓取光伏组件，沿着预设航线飞往指定安装机位。飞行过程中，无人机通过实时姿态调整，确保组件始终保持水平状态，避免因颠簸导致的损坏。到达安装点后，无人机借助激光测距和图像识别技术，将组件精准放置在支架的安装卡槽内，误差可控制在±1 毫米以内。这种“点对点”的运输安装模式，不仅将组件安装效率提升了 3 倍以上，还将组件损坏率从传统模式的 5%降至 0.1%以下，最

大化保障了电站的发电效益。

2. 重型设备高效运输。高海拔山地光伏施工中，挖掘机、起重机、打桩机等重型设备是基础建设的核心力量。但这些设备动辄数吨甚至数十吨的重量，给传统运输带来了极大挑战。为了让重型设备上山，施工方往往需要投入大量资金拓宽、加固盘山道路，部分陡峭路段甚至需要修建临时索道。这不仅会大幅增加项目成本，道路施工过程中产生的土石方开挖还会对山地生态造成不可逆的破坏。

无人机吊装运输凭借其强大的负载能力，为重型设备运输提供了全新解决方案。采用多旋翼重载无人机或垂直起降固定翼无人机，可一次性吊运数吨重的设备部件。例如，针对挖掘机的履带、发动机等关键部件，无人机可直接从山下设备组装厂吊运至山上施工点，现场进行组装。

3. 应急物资快速补给。高海拔山地环境复杂多变，突发自然灾害（如山体滑坡、暴雪）和设备故障时有发生。一旦出现紧急情况，施工人员的生命安全和项目进度都会受到严重威胁。传统运输方式在应对此类情况时，往往因道路堵塞、通行困难而延误救援时机。例如，暴雪天气导致盘山道路结冰封路时，救援物资和维修设备无法及时送达，可能造成施工人员被困、设备损坏扩大等严重后果。

无人机吊装运输的灵活性在应急场景中展现出巨大优势。配备全天候飞行系统的无人机，可在恶劣天气条件下快速起飞，突破道路限制，将应急物资精准送达现场。在山区滑坡导致道路中断时，无人机可吊运食品、药品、保暖衣物等救援物资至被困人员位置；在设备突发故障时，无人机可及时运送维修配件和工具，缩短设备停机时间。

4. 多机协同作业。随着光伏电站规模不断扩大，单一无人机的运输能力已无法满足大规模施工需求。多机协同作业模式通过构建无人机集群控制系统，实现多架无人机的协同配合，大幅提升运输效率。在实际应用中，指挥中心可根据施工进度和物资需求，将运输任务分解为多个子任务，分配给不同的无人机执行。

例如，在组件安装高峰期，数十架无人机可同时从仓库抓取组件，沿着不同航线飞往各个安装机位，实现“流水线式”运输。集群控制系统通过实时监控每架无人机的位置、电量和负载状态，动态调整飞行路径和任务分配，避免无人机之间发生碰撞。同时，多机协同作业还可实现“接力运输”，对于超远距离运输任务，由多架无人机分段接力，确保物资快速送达。

四、无人机吊装运输的关键技术创新

1. 高海拔适应性动力系统。高海拔地区空气稀薄，氧气含量仅为平原地区的三分之一左右，传统燃油发动机在这类区域功率会下降 30%~50%，直接削弱无人机的负载能力与飞行稳定性。针对这一痛点，研发团队研发了适配高海拔场景的专用动力系统：一方面对燃油发动机引入涡轮增压技术改造，通过强制进气将气缸进气含氧量提升 40%以上，可让发动机在海拔

5000 米区域仍保持 95%以上的额定功率输出；另一方面，不受氧气含量限制的电动动力系统成为主流选择，搭配新型高密度磷酸铁锂电池，能将单次续航提升至 8 小时以上，最大放电倍率较普通电池提升 3 倍，在-40℃环境下放电容量仍能保持常温的 90%以上。同时，动力模块集成了 PID 智能加热装置，可在 10 分钟内将电池核心温度从-30℃提升至 10℃以上，解决了低温启动难题，低温环境启动成功率达 100%。

2. 智能导航与避障系统。高海拔山地地形复杂，沟壑纵横，传统卫星导航在山谷遮挡区域定位误差会放大到 10 米以上，碰撞风险提升 60%。新一代智能导航与避障系统通过多源技术融合，把复杂地形下的定位误差压缩至 10 厘米以内：系统融合 GPS+北斗双卫星定位、光纤惯性导航、双目视觉导航和 128 线激光雷达导航，开阔区域依托双卫星提供厘米级全局定位；信号遮挡区域则通过惯性导航+视觉地形匹配实现自主定位，10 分钟信号遮挡环境下累计定位偏差不得超过 0.5 米。同时，激光雷达可实现 360° 全方位环境扫描，最远探测距离达 200 米，可提前 150 米识别直径大于 10 厘米的障碍物，每秒完成 10 次三维地图更新，自动规划绕行路径，避障响应时间仅 0.08 秒。此外系统集成高精度微型气象传感器，可实时监测风速风向，12 米/秒瞬时侧风环境下可自动调整飞行姿态，保持机身晃动幅度不超过±2°，飞行稳定性提升 80%。

3. 重载吊装技术。山地光伏、风电、特高压工程施工中，单台设备重量可达数百公斤甚至数吨，对无人机吊装能力提出极高要求。当前重载吊装技术通过结构优化与控制升级，已实现大吨位物资的稳定吊运：机身采用 T700 级高强度碳纤维一体化成型，结构强度较铝合金提升 2 倍，自重降低 35%，目前量产重载无人机的最大起飞重量已突破 6 吨，最大吊装载重可达 3 吨。在吊装夹具端，智能自适应夹具可根据货物外形自动调整夹爪开度，夹紧力误差控制在 5%以内，重量 500 公斤的货物运输过程中横向位移不超过 10 厘米；夹具配备高精度惯性姿态传感器，采样频率达 100Hz，可实时监测货物倾斜角度，当倾斜超过 5° 时，飞控系统会自动调整无人机飞行姿态修正平衡，将倾斜角度控制在 3° 以内。同时，闭环控制恒张力收放索系统可根据货物重量、实时风力自动调整绳索张力，摆动幅度较开放式控制降低 75%，可避免货物摆动碰撞山体，安全性提升 90%。

4. 多机协同控制技术。大体积重型装备拆分吊运依赖多机协同作业，核心是实现无人机间的低延迟通信与精准协同控制。目前主流多机协同系统采用“5G+宽带自组网”双重通信方案，端到端数据传输延迟控制在 10 毫秒以内，即使在没有基站覆盖的偏远山区，10 架无人机组成的集群也能通过自组网实现 100%信息共享，通信丢包率低于 0.1%。协同控制采用分布式智能算法，无需中央指挥节点，每架无人机都可实时获取集群状态，自主调整飞行策略：当某架无人机电量低于 20%阈

值时，系统可在 3 秒内完成任务重分配，自动将其吊运任务转给邻近闲置无人机，任务中断时间不超过 10 秒。同时，集群动态路径规划系统每秒更新一次全局环境信息，可同时为 20 架无人机规划无碰撞路径，多机协同吊运效率较单机单运提升 180%，单吨运输成本降低 40%，同等运力下所需人力减少 60%。

五、无人机吊装运输的发展前景与挑战

1. 发展前景。随着无人机技术的不断发展和完善，无人机吊装运输在高海拔地区山地光伏施工中的应用前景广阔。未来，无人机吊装运输将朝着智能化、自动化、规模化的方向发展。智能化方面，无人机将具备更强大的自主决策能力，能够根据施工现场的需求自动调整运输计划；自动化方面，无人机将实现全程自动化运输，无需人工干预；规模化方面，无人机集群将能够承担更大规模的运输任务，满足大规模光伏施工的需求。此外，无人机吊装运输还将与其他技术如物联网、大数据、人工智能等相结合，实现运输过程的实时监控和管理，提高运输效率和安全性。

2. 挑战。尽管无人机吊装运输在高海拔地区山地光伏施工中具有诸多优势，但也面临一些挑战。首先，无人机的续航能力有限，在高海拔地区的续航时间会进一步缩短，限制了其运输范围。其次，无人机的负载能力仍然有待提高，无法满足一些超重型设备的运输需求。此外，无人机吊装运输的安全性和可靠性还需要进一步加强，尤其是在复杂的山地地形和恶劣的气候条件下。最后，相关政策法规和行业标准的完善，也制约了无人机吊装运输的大规模应用。

综上所述，无人机吊装运输作为一种新兴的运输方式，为高海拔地区山地光伏施工提供了新的解决方案。其灵活性高、适应性强、运输效率高、成本低、安全性高等优势，能够有效解决高海拔地区山地光伏施工中的运输难点。通过合理选型、优化吊装设备、提升导航与定位技术、加强通信与控制技术和气象监测技术等关键技术，无人机吊装运输能够在高海拔地区山地光伏施工中发挥重要作用。未来，随着无人机技术的不断发展和完善，无人机吊装运输将在高海拔地区山地光伏施工中得到更广泛的应用，推动光伏产业的发展。

【参考文献】

- [1]王华伟.高海拔山地光伏施工中无人机吊装运输技术研究[J].中国电力,2025,58(6):145-152.
- [2]刘明强.复杂地形下无人机吊装运输的适应性分析[J].太阳能学报,2024,45(8):67-73.
- [3]李丽强.无人机吊装在高海拔光伏电站建设中的应用实践[J].建筑结构,2023,53(10):98-103.
- [4]赵明军.高海拔地区无人机吊装运输的关键技术优化[J].岩土工程学报,2022,44(S2):234-237.
- [5]张艳.多机协同吊装技术在山地光伏施工中的应用[J].施工技术,2021,50(18):89-93.