

模块化索道支架快速组装工艺效率提升与误差控制

李江峰 钟燕强 丁云翔

中国水利水电第七工程局有限公司机电安装分局，四川彭山，620860；

摘要：在高海拔山区输电线路建设中，索道支架组装是影响施工效率与安全的关键环节，传统钢制支架存在组装周期长、误差大及环境适应性差等问题。本文依托相关风储项目送出工程，从轻量化模块化结构设计、三步式组装流程优化、智能化装备集成三方面提升组装效率，同时通过多维度误差监测感知系统、自适应调平与主动补偿技术、组装精度验证与校准规范构建误差控制体系。旨在为高海拔山区同类输电线路索道支架组装提供技术支撑。

关键词：模块化索道支架；快速组装工艺；误差控制；高海拔施工

DOI：10.64216/3104-9664.25.01.009

引言

随着“西电东送”战略与新能源建设推进，高压输电线路日益向川藏、青藏等高海拔山区延伸。据统计，此类区域输电线路路径中，高山大岭与崎岖地形占比超65%，索道运输因不受地形限制，成为塔材、金具等物资运输的核心方式。而索道支架作为关键承载结构，其组装效率与精度直接决定索道架设周期与运行安全^[1]。传统索道支架多采用整体钢制结构，存在三大核心瓶颈。一是组装效率低下，单组支架重量≥200kg，依赖起重机吊装与8人协同作业，组装周期长达8~12h，高海拔地区因机械功率衰减，效率进一步降低；二是误差控制薄弱，依赖人工铅垂仪与水平尺测量，螺栓预紧凭经验操作，单节点安装耗时>15min，累积误差导致支架轴线偏斜常达0.2°以上，易引发索道振动加剧、承载能力下降；三是环境适应性差，固定支腿无法适配30°以上陡坡，冻土区沉降量>10mm，需反复调整，进一步延长工期。基于此，本文依托华能雅江南南乃东才朋8万千瓦风储项目送出工程，聚焦模块化索道支架快速组装工艺效率提升与误差控制，通过结构创新、工艺优化与智能监测，构建适配高海拔复杂环境的组装技术体系，为同类工程提供可推广的解决方案。

1 模块化索道支架快速组装工艺效率提升的核心路径

1.1 轻量化模块化结构设计

模块化设计是提升组装效率的基础，需兼顾“轻量化、通用化、易拆装”三大原则。传统钢制支架因重量大、部件集成度低，导致运输与人工组装难度剧增，而

本研究通过材料选型与结构优化，实现支架模块的高效部署^[2]。

在材料选型上，摒弃传统普通钢材，采用高强度铝合金，单模块重量控制在50kg以内，仅为传统钢制模块的1/4，2人即可完成人工搬运，无需依赖起重机，适配高海拔无路区运输需求。结构设计上，将支架拆解为“底座模块-立柱模块-横梁模块-可调支腿模块”四大标准化单元，各单元通过统一规格的快接接口连接，接口采用“定位销+液压自动锁紧”结构，无需复杂螺栓紧固，单接口对接时间≤2min，通用化设计使模块复用率≥85%，跨项目调配无需改造。

针对高海拔复杂地形，创新设计地形自适应可调支腿：支腿集成液压缸与倾角传感器，可通过液压驱动实现高度调节，适配30°以内陡坡；支腿底部采用防滑齿形结构，冻土区沉降量可控制在5mm以内，避免因地形不平导致的组装反复调整，减少无效工时。

1.2 三步式组装流程优化

传统组装流程“整体吊装-逐点对位-人工紧固”存在工序交叉、等待时间长的问题，本研究基于模块化拆分，设计“水平预制-伸缩竖立-高空紧固”三步式流程，大幅压缩组装周期。

第一步“水平预制”。在平整场地完成底座模块与可调支腿的预组装，过螺栓限位结构实现底座快速定位，同步完成倾角传感器与激光定位装置的校准。此阶段可平行作业，多组模块同时预制，避免现场高空作业等待，单组预制时间≤30min，较传统“现场逐件组装”节省40%时间。

第二步“伸缩竖立”。摒弃起重机吊装，采用伸缩式立柱模块与手动液压千斤顶配合，4人即可完成支架竖立。立柱模块内置 telescopic 结构，可从 3m 伸长至 8m，竖立过程中通过激光投线仪实时指引垂直度，配合可调支腿的微调功能，20min 内即可完成支架竖直定位，较传统起重机吊装效率提升 500%。

第三步“高空紧固”。采用多功能集成组装平台，作业人员站在平台上完成横梁模块与立柱的对接。平台集成数显扭矩扳手与自锁螺母，螺栓预紧力可实时反馈，单节点紧固时间≤5min，避免传统人工紧固“过紧断裂、过松松动”的问题；同时，平台配备防风护栏与防滑踏板，适配高海拔 15m/s 强风环境，保障作业安全。

1.3 降低人工依赖与技能要求

高海拔地区人工易疲劳、技能水平参差不齐，通过智能化装备集成，可减少人工干预，提升流程标准化程度。

在定位环节，采用“激光投影定位系统+定位芯片”双保险：激光投影系统可在地面投射网格定位线，指引模块对接；各模块内置 RFID 定位芯片，通过无线通信实现模块间的自动对位检测，偏差超 0.5mm 时发出声光报警，替代传统铅垂仪与水平尺，定位效率提升 3 倍。

在组装辅助环节，开发便携式智能组装工具箱，集成“数显扭矩扳手、液压锁紧装置、倾角检测仪”三大核心工具，工具间数据可实时同步至控制终端，终端自动生成组装步骤指引与误差预警，即使非专业人员也可按指引操作，降低对高技能工人的依赖，人力成本减少 30%。

针对高海拔作业风险，引入远程操控技术：在危险作业环节，可通过无线遥控完成液压锁紧与螺栓紧固，作业人员在 50m 外安全区域监控，减少高海拔缺氧与强风对人体的影响，同时避免人工高空作业的坠落风险。

2 模块化索道支架组装误差控制技术体系

2.1 多维度误差监测感知系统：实现全流程精度可控

误差控制需贯穿“预制-竖立-紧固-运行”全流程，传统人工测量存在“滞后、片面”的问题，本研究构建多维度实时监测系统，实现误差的动态感知与预警。

在监测参数选择上，聚焦“垂直度-水平度-接口间隙-结构形变”四大核心指标：垂直度通过立柱模块内

置的双轴倾角传感器实时监测，数据同步至控制终端，偏差超 0.05° 时自动触发微调指令；水平度由底座模块的激光水平仪监测，确保底座水平误差≤1mm；接口间隙通过快接接口处的位移传感器检测，避免因间隙过大导致的结构松动；结构形变则通过贴附于立柱与横梁的应变片监测，实时反馈组装过程中的应力分布，防止因组装力过大导致的模块变形^[3]。

监测数据传输采用“边缘计算+云端存储”模式：现场边缘节点实时处理传感器数据，延迟≤500ms，确保误差预警及时；同时数据上传至云端数据库，形成组装过程的精度档案，便于后续追溯与工艺优化。例如，某试验段组装中，监测系统发现立柱垂直度偏差达 0.08°，立即触发可调支腿微调，2min 内将偏差修正至 0.03°，避免误差累积。

2.2 自适应调平与主动补偿技术：消解地形与组装误差

高海拔山区地形崎岖、冻土区沉降不均，易引发组装误差，需通过自适应调平与主动补偿技术，实现误差的实时修正。

自适应调平技术主要针对底座模块：可调支腿内置压力传感器与液压控制系统，组装时支腿自动接触地面并检测接地压力，压力差超 5% 时，液压系统自动调整支腿高度，使底座均匀受力，水平度误差控制在 1mm 以内；针对陡坡地形，支腿可绕底座旋转±15°，配合防滑齿形结构，确保支架在 70° 陡坡仍能稳定站立，垂直度误差≤3mm。

主动补偿技术聚焦组装过程中的累积误差：在高空紧固阶段，通过激光测距仪测量横梁与立柱的对接间隙，若间隙超 0.5mm，控制终端自动计算补偿量，驱动立柱模块的微调机构进行位移补偿；同时，针对螺栓预紧力偏差，数显扭矩扳手可实时反馈预紧力值，若低于设计值，扳手自动补拧至标准值，避免因预紧力不足导致的接口松动。此外，针对冻土区季节性沉降，设计后期补偿机制：在支架底座设置沉降观测点，每季度测量沉降量，若沉降超 5mm，通过可调支腿的液压系统进行高度补偿，确保支架长期运行精度，避免因沉降导致的索道弧垂偏差。

2.3 组装精度验证与校准规范：保障工艺稳定性

误差控制需依托标准化的验证与校准流程，避免

“经验化”操作导致的精度波动，本研究制定全周期精度管控规范。

(1) 出厂前校准。所有模块化单元需在实验室完成精度校准，如底座模块的水平度校准、可调支腿的高度调节精度校准、接口的对接精度校准，校准合格后方可出厂，杜绝“先天精度不足”的模块流入现场^[4]。

(2) 现场组装验证。每完成一个组装步骤，需进行阶段性精度检测，如“水平预制”后检测底座水平度与支腿垂直度，“伸缩竖立”后检测立柱整体垂直度，“高空紧固”后检测横梁水平度与接口预紧力，所有检测数据需记录存档，不合格则返工。例如，某试验段组装中，横梁水平度检测发现偏差达2mm，经排查为立柱微调机构故障，更换机构后重新组装，最终偏差控制在0.5mm以内。

(3) 运行期复核。支架投入使用后，每月进行一次精度复核，重点检测垂直度、沉降量与接口间隙，复核数据与初始组装数据对比，分析精度变化趋势，若偏差超允许范围，及时启动补偿措施，确保索道运行安全^[5]。

3 结语

高海拔山区输电线路索道支架的组装效率与精度，直接制约工程建设质量与安全。本文通过“轻量化模块化设计-三步式流程优化-智能化装备集成”提升组装效率，结合“多维度监测-自适应补偿-标准化校准”控制

误差，构建了一套适配高海拔环境的模块化索道支架快速组装技术体系。试验验证表明，该工艺可将单组支架组装时间从8h缩短至2.5h以内，垂直度误差控制在0.05°以下，人力成本降低30%，模块复用率超85%，有效解决了传统工艺“效率低、误差大、环境适应性差”的问题。未来研究可进一步探索“AI+组装工艺”的深度融合，通过机器学习优化组装步骤与误差补偿策略；同时拓展模块化支架的应用场景，如适配更大跨度索道与重型载荷运输，为极端环境下的山地工程施工提供更高效的技术支撑。

参考文献

- [1]中国水利水电第七工程局有限公司.模块化货运索道在高海拔山区输电线路中的高效架设施工技术研究[R].2025.
- [2]王璐昕,王珂.变电站建设中BIM技术的有效运用分析[J].电工技术,2024(S2):592-594.
- [3]冯威,王雨露,王海威.智能电网建设与变电站运维管理的协同发展[J].农电管理,2024(12):78-79.
- [4]GB/T6892-2020,一般工业用铝及铝合金挤压型材[S].
- [5]郑晨亮.变电站土建施工与电气工程协调管理思考与实践[C]//2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集.2024:135-136.