

山地风电场狭窄场地风机吊装设备选型研究

——以 QLY1760S 为例

王文强 赵长城

长江国际水利水电工程建设有限公司 湖北武汉 430050

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22161

[摘 要] 以贵州册亨恒定山 100 MW 风电场 5.56 MW 机组为对象，针对山脊机位狭窄、道路急弯陡坡和频繁转场等条件，从起升能力、站位空间、道路通过性、地基、转场效率和成本对主吊设备进行比选。结果表明，QLY1760S 可满足 120 m 轮毂高度、74 t 最大单件和 98 m 叶片吊装要求，高位构件最大负荷率为 67.9%，叶片负荷率为 43.4%。平台优化后平均土石方量由 12500 m<sup>3</sup>/机位降至 6750 m<sup>3</sup>/机位，11 台机组平均吊装及转场周期为 4.45 d，直接节约 186.875 万元。山地风电主吊选型应将场地与转场约束前置，并与平台设计和施工组织协同确定。

[关键词] 山地风电；狭窄场地；风机吊装；设备选型；QLY1760S；转场效率

引言

随着陆上风电机组向大容量、长叶片和高塔架发展，主吊设备的起升能力持续提高。山地风场的限制却往往来自机位面积、道路转弯半径和设备转场条件：大型设备即使载荷满足要求，也可能因站位、组臂或道路改造增加工期和土建投入。已有研究指出，丘陵山地项目应将道路、平台和转场条件纳入主吊选型<sup>[1]</sup>，并从高度、载荷、风况和作业空间等因素进行综合校核<sup>[3]</sup>。

针对高塔架风机，已有文献比较了 QLY1760S、履带吊和全地面吊的性能<sup>[2]</sup>，并总结了专用轮胎吊的工程应用特点<sup>[4]</sup>；平台模拟研究也表明，吊装设备参数与机位布置需要协同优化<sup>[5]</sup>。但对于轮毂高度并非极高、机位和道路约束更突出的山地项目，设备选型与平台优化、转场效率及实际费用之间

的联动分析仍较少。本文以恒定山风电场北线 11 台 5.56 MW 机组为例，结合吊装工况和施工记录，对狭窄山地场地的主吊选型及经济性进行分析。

1 工程条件及主要约束

1.1 工程与机组参数

恒定山 100 MW 风电场位于贵州省黔西南州册亨县，场区地势起伏明显，风机沿山脊和山梁布置。工程安装 18 台 5.56 MW 风电机组，总容量 100.08 MW，北线 11 台为本文统计对象。机组轮毂中心高度 120 m，六节塔筒总高 116.64 m，叶轮直径 200 m。部件重量和尺寸见表 1，其中塔筒 1 净重 74 t，为最重塔筒节；传动链 71 t；单片叶片 26 t、长度 98 m。与部件重量相比，98 m 叶片的运输包络、迎风面积和高空姿态控制更值得关注。

表 1 恒定山项目 5.56 MW 风电机组主要部件参数

| 部件   | 净重/t | 主要尺寸                     | 工程特征  |
|------|------|--------------------------|-------|
| 塔筒 1 | 74   | 高 13.88 m；直径 4.61~4.93 m | 最重塔筒节 |
| 塔筒 2 | 66   | 高 17.64 m；直径 4.60~4.61 m | —     |
| 塔筒 3 | 55   | 高 18.48 m；直径约 4.60 m     | —     |
| 塔筒 4 | 49   | 高 20.47 m；直径 4.59~4.60 m | —     |
| 塔筒 5 | 41   | 高 22.61 m；直径 4.22~4.59 m | —     |
| 塔筒 6 | 42   | 高 23.56 m；直径 3.91~4.22 m | 最长塔筒节 |

|       |      |                       |           |
|-------|------|-----------------------|-----------|
| 下机舱总成 | 47   | 11.93 m×4.79 m×4.15 m | 高位对接      |
| 传动链   | 71   | 项目成套部件                | 高位重件      |
| 轮毂总成  | 39   | 宽 5.41 m，高 4.51 m     | 高位对接      |
| 叶片    | 26/片 | 长 98 m，共 3 片          | 迎风面积大、柔性高 |

注：数据依据项目施工记录和 QC 成果资料整理。



图 1 山地机位及 QLY1760S 现场布置

1.2 狭窄机位与转场条件

场址海拔约 1000~1350 m。机位平均有效作业面积 1351.9 m<sup>2</sup>，最小 909 m<sup>2</sup>，最大 1749 m<sup>2</sup>；项目策划阶段按常规大型风机吊装考虑的平台面积约为 2000~2500 m<sup>2</sup>。平台原始坡度普遍为 8°~15°，部分机位单侧临崖，场内道路最小转弯半径仅 12 m。按照常规设备思路扩大平台，不仅增加土石方和临时用地，也会放大临崖侧边坡处理量。

QLY1760S 可采用贴塔站位，小平台需求约 30 m×30 m<sup>[4]</sup>。本项目最小机位 909 m<sup>2</sup>，与 900 m<sup>2</sup>的典型需求接近，而只有常规 2000 m<sup>2</sup>平台下限的 45.5%。因此，设备选型首先受站位空间和道路通过性约束，其次才是额定起重量与成本比较。

2 山地狭窄场地的设备选型方法

2.1 先筛刚性条件，再比较综合成本

山地风电主吊选型采用“刚性约束筛选—综合经济比较”两阶段方法。首先核起升高度、对应工况额定载荷、支展开空间、道路通过性和地基承载力，任一项不满足即不进入下一阶段；满足安全与空间条件后，再比较拆装转场时间、辅助设备数量、土石方、临时用地和施工周期。该方法可避免仅按额定吨位或租金选型而忽略山地场地改造成本。

2.2 起升高度与负荷率校核

起升高度按安装接口标高、吊点至接口的几何增量、吊

具及滑轮组高度和安全余量确定<sup>[3,8]</sup>：

$$H_{req} = H_0 + h_c + h_j + \Delta h \tag{1}$$

式中：H<sub>req</sub> 为所需主钩高度；H<sub>0</sub> 为安装接口标高；h<sub>c</sub> 为构件吊点几何增量；h<sub>j</sub> 为吊钩、滑轮组和吊具所占高度；Δh 为过钩、摆动及对接余量。项目吊装参数表中高位部件的主钩高度约为 127~130 m，因此主吊高位工况应提供不低于 130 m 的有效起升高度。

起重量校核同时计入构件、吊具和索具，负荷率按下式计算<sup>[6,8]</sup>：

$$\eta = (G + G_j) / Q_e \times 100\% \tag{2}$$

式中：G 为构件重量；G<sub>j</sub> 为吊具及索具重量；Q<sub>e</sub> 为对应工况的额定起重量。项目施工控制要求负荷率小于 90%。不同吊装高度应采用相应载荷工况。考虑到现有资料仅能核对两档风电工况，本文不对厂家载荷曲线作插值外推：低位采用 112 m/138 t 工况，高位采用本项目 140 m/106 t 工况；同时统一按 106 t 对全部部件进行保守复核。

2.3 地基承载与风况控制

山地平台多由挖填方形成，临崖侧与回填区的承载条件差异较大。地基承载复核按最不利支承反力折算有效承压面积<sup>[6]</sup>：

$$q_k = N_{max} / A_{eff}, \text{ 且 } f_a \geq \gamma \cdot q_k \tag{3}$$

式中：N<sub>max</sub> 为最不利吊装工况下的最大支承反力，A<sub>eff</sub> 为支腿垫板或处理区的有效承压面积，γ 为考虑偏载、地基不均匀和施工扰动的修正系数，f<sub>a</sub> 为现场地基承载力控制值。恒定山项目专项施工方案按吊装最大重量工况对平台承载力进行了复核：QLY1760S 整备质量 435.1 t，计入最重单件 74 t、吊具 1.5 t、吊钩及钢丝绳 11.0 t 和 4 块路基板 14.0 t 后合计 535.6 t；支腿下铺设 4 块 2.4 m×4.5 m 路基板，有效承压面积 43.2 m<sup>2</sup>，取不均匀系数 1.6，计算最大支承载力约 194.5 kPa。同口径复核的 650 t 级履带吊和

1800 t 级全地面吊最大支承应力分别为 235.1 kPa 和 223.4 kPa。专项方案据此将填方区压实填土地基承载力特征值控制为 250 kPa，并要求逐机位检测合格后方可站位<sup>[6]</sup>。

机舱和传动链安装风速不大于 10 m/s，叶片安装风速不大于 8 m/s。现场以 8.0 m/s 作为停止叶片起吊和继续提升的控制界限，并由主吊风速仪连续监测；若设备厂家或机组吊装工艺要求更严，则执行更严格限值。

风况对叶片吊装影响显著。GB/T 37898—2019 规定吊装作业应满足机组厂家及吊装工艺规定的风速条件<sup>[7]</sup>。本项目叶片长 98 m，采用单叶片高空对接；专项施工方案规定塔筒、

表 2 三类候选主吊主要参数与施工特征

3 候选主吊比较与选型结果

3.1 三类设备的工程适用性

| 指标      | QLY1760S 专用轮胎吊                | 650 t 级加强履带吊           | 1800 t 级全地面吊           |
|---------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| 典型高位工况  | 项目 140 m/106 t；文献 142 m/116 t | 132 m 主臂+12 m 副臂/124 t | 90 m 主臂+55 m 桁架臂/130 t |
| 典型站位半径  | 15 m                          | 22 m                   | 20 m                   |
| 支承/接地尺度 | 支腿跨距 14.28 m×14.28 m          | 履带接地 10.10 m×11.60 m   | 支腿 13 m×13 m           |
| 整机自重    | 约 500 t                       | 约 935 t                | 约 510 t                |
| 爬坡能力    | 整机约 25%                       | 需结合路基处理                | 基本臂约 30%               |
| 转弯特性    | 可中心回转，转弯半径可为 0                | 履带转向，受道路宽度影响           | 典型转弯半径约 15 m           |
| 转机位自拆装  | 约 3 h+3 h                     | 约 24 h+24 h            | 约 6 h+6 h              |
| 大转场板车   | 约 14 台                        | 约 33 台                 | 约 12 台                 |
| 典型作业效率  | 3~4 d/台                       | 7~10 d/台               | 5~6 d/台                |
| 主要短板    | 高位额定吨位有限                      | 场地、组臂及转场占用大            | 租赁成本高，对站位硬化要求高         |

注：定量指标主要据文献[2,4]整理，不同厂家和臂架组合的载荷表存在差异，施工前应以实际设备资料复核。

650 t 级履带吊和 1800 t 级全地面吊均具备较大的起重能力储备，但本项目最重单件仅 74 t，选型的主要矛盾在场地与转场。履带吊组臂及转场占用空间大，整机质量高；全地面吊虽机动性较好，但典型转弯半径和支腿展开对 12 m 急弯及 909 m<sup>2</sup>最小机位形成约束。QLY1760S 高位额定起重重量低于前两类设备，但能够覆盖本项目构件重量，并在站位与转场方面更适配。

转特性也降低了 12 m 急弯对转场的限制。

3.2 QLY1760S 与山地狭窄场地的匹配

QLY1760S 采用直立塔身、桁架伸缩臂和多模式转向底盘，主臂可贴近塔筒布置，从而减小高位作业幅度；相关工程应用资料表明，该机型可进行直行、横行、斜行和中心回转<sup>[4]</sup>。项目道路整治后纵坡为 10°~12°，折算约 17.6%~21.3%，低于资料给出的约 25%整机爬坡能力；中心回

综合高位起重能力、站位空间与转场条件，QLY1760S 能够满足本项目需求，并可减少机位扩挖和主吊拆装时间。该选择的核心是在满足安全裕度的前提下，降低山地施工的附加场地与转场成本。

4 关键工况校核

4.1 不同吊装高度的负荷率

六节塔筒累计高度分别约为 13.88、31.52、50.00、70.47、93.08 和 116.64 m。按塔筒吊具及过钩空间约 8 m 估算，前五节塔筒所需主钩高度不超过 112 m，可用 112 m/138 t 工况作分段校核；塔筒 6 及下机舱、传动链、轮毂、叶片均进入 120 m 以上的高位区间，按本项目 140 m/106 t 工况校核。表 3 同时列出统一按 106 t 计算的保守值。

表 3 主要部件分段工况及保守负荷率校核

| 部件   | 吊装总重/t | 估算主钩高度/m | 采用 Qe/t | 分段负荷率/% | 106 t 保守负荷率/% |
|------|--------|----------|---------|---------|---------------|
| 塔筒 1 | 75.5   | 21.9     | 138     | 54.7    | 71.2          |
| 塔筒 2 | 67.5   | 39.5     | 138     | 48.9    | 63.7          |
| 塔筒 3 | 56.5   | 58.0     | 138     | 40.9    | 53.3          |
| 塔筒 4 | 50.5   | 78.5     | 138     | 36.6    | 47.6          |
| 塔筒 5 | 42.5   | 101.1    | 138     | 30.8    | 40.1          |
| 塔筒 6 | 43.5   | 124.6    | 106     | 41.0    | 41.0          |
| 下机舱  | 50.0   | 128.0    | 106     | 47.2    | 47.2          |
| 传动链  | 72.0   | 128.0    | 106     | 67.9    | 67.9          |
| 轮毂   | 41.0   | 127.0    | 106     | 38.7    | 38.7          |
| 叶片   | 46.0   | 130.0    | 106     | 43.4    | 43.4          |

注：塔筒吊具按 1.5 t；下机舱 3 t；传动链 1 t；轮毂 2 t；叶片专用吊具 20 t。低位 138 t 为同机型公开 112 m 工况，高位 106 t 为项目采用的 140 m 工况。

分段校核后，前五节塔筒负荷率为 30.8%~54.7%；高位构件中传动链最高，为 67.9%，其余均低于 50%。各工况均低于 90%的项目控制线；统一按 106 t 计算的结果保留为保守复核。

4.2 叶片单吊工艺及风速控制

叶片是本项目风险较高的吊装工序。单片叶片净重 26 t、长 98 m，专用夹持吊具重 20 t，起吊总重 46 t。叶片采用 QLY1760S 单机从运输车直接起吊，不设置辅吊抬吊和翻身工序。运输车到达预定卸车位置后，主吊挂接专用吊具起吊，离车后通过牵引绳控制叶尖摆动，再完成提升、回转和高空对接；80 t 起重机仅参与塔筒相关配合作业。

按 140 m/106 t 高位工况计算，叶片负荷率为  $46/106 \times 100\% = 43.4\%$ 。专项施工方案另按 19 m 就位半径、126.5 t 额定荷载，计入 11 t 吊钩及钢丝绳重量并取 1.3 动载系数校核，叶片负荷率为 58.6%<sup>[6]</sup>。两种口径均低于 90%的项目控制线，说明起重能力具有余量。施工控制重点转为风载和姿态：起吊前选择低风窗口并复核吊具重心和防滑状态，提升过程中保持叶根、叶尖牵引绳受控；现场风速达到 8.0 m/s，或阵风、风向变化导致叶片摆动难以稳定控制时停止作业。

4.3 地基与站位复核

主吊站位采用“计算控制值+现场检测”的双重控制。专项施工方案按最不利支反力确定 250 kPa 地基承载力要求，

现场逐机位对站位区进行夯实和承载力检测<sup>[6]</sup>。临崖侧、填方区及雨后软化区域同时检查沉降差和垫板接触状态，并根据原状土、填筑厚度和排水条件实施局部加固，避免对整个平台进行无差别高标准硬化。

5 场地反向优化与施工组织

5.1 平台按选定设备反向优化

设备确定后，平台不再按传统大面积近圆形布置，而是顺山脊线调整为矩形或不规则有效作业区，优先保证 QLY1760S 站位、运输车辆通行和构件临时摆放，减少临崖侧无效扩挖。上平台道路通过局部降坡和弯道修整，将纵坡控制在 10°~12°。

初始平台平均土石方量为 12500 m<sup>3</sup>/机位，优化后为 6750 m<sup>3</sup>/机位，单机位减少 5750 m<sup>3</sup>，降幅 46.0%。11 个机位按 15 元/m<sup>3</sup>的项目核算单价计算，场地费用由 206.25 万元降至 111.375 万元，节约 94.875 万元。

5.2 主辅吊分工与流水组织

本项目没有让 QLY1760S 承担所有工序。项目策划阶段的初始方案为“QLY1760S+150 t”两机组合，设备占用时间较长。优化后增加 350 t 和 80 t 设备，将下平台支架、变流柜及部分低位、塔筒配合作业提前完成；150 t 设备主要承担 QLY1760S 组装、拆解和必要配合。QLY1760S 进入机位后集中完成 3~6 节塔筒以及下机舱、传动链、轮毂和叶片的主吊作

业，其中 80 t 设备的配合限于塔筒相关工序，叶片由 QLY1760S 单机起吊。

优化后的主辅吊分工缩短了 QLY1760S 在单个机位的占用时间。对连续 11 台机组而言，专用主吊租赁天数减少所节约的费用高于新增 350 t 和 80 t 设备的投入，同时有利于形成连续流水作业。

5.3 实际吊装与转场节拍

首台机组完成设备站位、3~6 节塔筒、下机舱、传动链、轮毂、叶片和主吊转场共用 5 d。后续机位随着道路交接、构件到货和人员配合逐步稳定，多数机位吊装 3.5 d、转场 1 d。北线 11 台的实测数据见表 4。7#机位因平台条件过于受限，继续建设的施工代价较大，在项目布置调整中废弃，因此统计编号从 6#直接到 8#，并非漏项。

表 4 北线 11 台机组吊装及设备转场实测

| 机位  | 吊装/d | 转场/d | 合计/d |
|-----|------|------|------|
| 1#  | 4.0  | 1.0  | 5.0  |
| 2#  | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 3#  | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 4#  | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 5#  | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 6#  | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 8#  | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 9#  | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 10# | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 11# | 3.5  | 1.0  | 4.5  |
| 12# | 3.5  | 0.0  | 3.5  |
| 平均  | 3.55 | 0.90 | 4.45 |

注：7#机位因平台过于狭小、继续施工代价较大而废弃；12#为北线末台机组，不再计向下一机位的转场时间。

6 经济性验证

6.1 对比基准和费用口径

经济性分析以项目策划阶段的初始施工组织方案为基准。初始设备组合为“QLY1760S+150 t”，11 台机组按 66 d 考虑；优化后采用“QLY1760S+350 t+150 t+80 t”分工组合，按 50 d 组织。项目比选资料采用的租赁单价分别为：QLY1760S 240 万元/30 d、350 t 起重机 75 万元/30 d、150 t 起重机 40 万元/30 d、80 t 起重机 25 万元/30 d。

按相同口径计算，初始方案设备租赁费为 QLY1760S 528 万元（240/30×66）和 150 t 起重机 88 万元（40/30×66），

合计 616 万元。优化方案为 QLY1760S 400 万元（240/30×50）、350 t 起重机 55 万元（75/30×22）、150 t 起重机 66.67 万元（40/30×50）、80 t 起重机 18.33 万元（25/30×22），合计 540 万元，设备租赁费节约 76 万元。

工期性费用采用项目方案比选表的综合日成本 1 万元/d。项目资料未进一步拆分人工、管理和临时保障等子项，为避免与设备租赁费重复计取，本文沿用原核算口径。初始方案 66 d 计 66 万元，优化方案 50 d 计 50 万元，节约 16 万元。

6.2 直接经济效益

表 5 11 台机组直接经济效益核算

| 费用项目 | 初始方案/万元 | 优化方案/万元 | 节约/万元 | 计算说明 |
|------|---------|---------|-------|------|
|------|---------|---------|-------|------|

|       |         |         |         |                                                         |
|-------|---------|---------|---------|---------------------------------------------------------|
| 设备租赁费 | 616.000 | 540.000 | 76.000  | 方案二（QLY+150 t）与优化组合对比                                   |
| 工期性费用 | 66.000  | 50.000  | 16.000  | 按 1 万元/d 统一口径                                           |
| 场地土石方 | 206.250 | 111.375 | 94.875  | 12500→6750 m <sup>3</sup> /机位，11 机位，15 元/m <sup>3</sup> |
| 合计    | 888.250 | 701.375 | 186.875 | 约 16.99 万元/台                                            |

注：经济性基准为项目初始施工组织及初始平台方案，不以 650 t 履带吊或 1800 t 全地面吊作为成本基准。

总费用由 888.25 万元降至 701.375 万元，直接节约 186.875 万元。其中场地土石方节约 94.875 万元，占 50.8%；设备租赁费节约 76 万元，占 40.7%；工期性费用节约 16 万元，占 8.6%。场地土石方和专用主吊占用时间是本项目经济性改善的主要来源。

7 讨论

恒定山项目表明，山地风电主吊选型宜前置到道路和机位设计阶段。若先按大型设备确定平台，容易形成额外挖填方和边坡处理；在部件参数明确后，先比较候选主吊的站位半径、转向方式和拆装需求，再确定平台边界，可减少无效扩挖。三维吊装模拟优化平台布置的研究也支持设备参数与场地设计协同的思路，本项目进一步用转场节拍和实际费用对选型结果进行了验证。

负荷率仅反映起重能力裕度，不能替代对风载和姿态风险的控制。本文按不同吊装高度分档校核，106 t 高位工况同时作为保守复核；对 98 m 叶片而言，即使静态负荷率仅 43.4%，仍需通过风速窗口、牵引绳控制和统一指挥降低摆动与对接风险。

本研究结论受项目条件约束。QLY1760S 的适用性建立在 120 m 轮毂高度、74 t 最大单件和多机位连续施工条件上；当高位构件重量进一步增加，或场地开阔、道路转场条件较好时，履带吊、全地面吊或其他起重方案可能更合适。因此，本文更强调选型方法，而非将某一机型作为普遍最优方案。

8 结论

(1)山地风电主吊选型应先核对站位空间和道路转场条件，再校核起升高度、负荷率和地基承载力。本项目 909 m<sup>2</sup>最小机位和 12 m 最小道路转弯半径是主吊类型筛选的关键约束。

(2)分段工况校核表明，前五节塔筒负荷率为 30.8%~54.7%，高位构件最大负荷率为 67.9%；98 m 叶片计入

20 t 专用吊具后总吊重 46 t，负荷率 43.4%，采用 QLY1760S 单机从运输车直接起吊。

(3)设备选型与平台设计同步优化后，平均土石方量由 12500 m<sup>3</sup>/机位降至 6750 m<sup>3</sup>/机位，降幅 46.0%；主吊站位地基承载力按 250 kPa 控制，并逐机位检测。

(4)以项目初始“QLY1760S+150 t”施工组织和初始平台为基准，优化组合共减少设备租赁、工期性费用和场地费用 186.875 万元，11 台机组平均吊装及转场周期为 4.45 d。结果表明，狭窄山地风场的经济性取决于设备能力、转场效率和土建投入的综合匹配。

(5)QLY1760S 在本项目中体现了专用轮胎吊对狭窄机位的适应性，但可推广的是“场地与道路约束前置一起重能力校核—平台与施工组织联动”的选型流程。

[参考文献]

[1]焦战增，孟素玉. 丘陵山地风电场风机吊装设备选型研究[J]. 云南水力发电，2022，38(7)：192-195.

[2]彭国祥，朱坤奇. 高塔架风电机组吊装设备对比分析[J]. 现代制造技术与装备，2024(4)：136-138.

[3]边旭峰，刘强，魏永旭. 超高塔架风机吊装与起重设备选型策略研究[J]. 建筑机械化，2025(7)：6-12.

[4]孙永胜. 高塔架风电机组吊装设备应用及对比分析[J]. 工程机械，2022，53(8).

[5]柴亮，许海楠，王雅雯，廖心言. 风电场吊装模拟系统在采乃风电场中的应用[J]. 水电与新能源，2022(7)：16-18，40.

[6]长江国际水利水电工程建设有限公司. 册亨县恒定山风电场风电机组吊装工程专项施工方案[Z]. 2026.

[7]GB/T 37898—2019，风力发电机组 吊装安全技术规程[S].

[8]GB/T 3811—2008，起重机设计规范[S].