

风电塔筒运输与大型吊装设备选型匹配性分析

朱晓轲

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

摘要：风电塔筒运输与大型吊装设备选型匹配性是风电项目建设的关键环节，随着风电产业大型化、高空化发展，塔筒高度与重量持续攀升，对运输与吊装设备提出更高要求。基于此，本文针对风电塔筒运输特性进行了分析，并涉及塔筒结构特征与参数、运输环境约束、运输方式选择、运输风险与成本构成等方面，并讨论了风电塔筒运输与大型吊装设备选型匹配性，以提升施工安全性与效率，降低全生命周期成本，为风电产业高质量发展提供技术支撑。

关键词：风电塔筒；运输；大型吊装设备；选型匹配性

引言

在全球能源转型背景下，风电产业迎来爆发式增长，这一趋势对运输与吊装设备提出严峻挑战。传统履带式起重机在超高塔筒场景下高空性能衰减严重，汽车起重机受限于起升高度与稳定性，而山地、丘陵等复杂地形进一步加剧设备选型难度。与此同时，风电项目对工期、成本及安全性的要求日益严苛，设备选型需兼顾技术可行性、经济性与环境适应性。因此，深入对风电塔筒运输与大型吊装设备选型匹配性的分析具有重要的现实意义。

1 风电塔筒运输特性分析

1.1 塔筒结构特征与参数

风电塔筒作为支撑风力发电机组的关键结构，其设计需兼顾强度、稳定性与经济性，结构特征与参数直接影响运输与吊装设备的选型及施工方案。①塔筒几何尺寸是核心参数之一，通常由多段圆柱形筒体拼接而成，整体高度随单机容量增大而显著提升，现代大型风电机组塔筒高度普遍超过百米，部分海上机型甚至突破一百五十米。塔筒直径设计需匹配叶片扫掠面积与机组载荷，底部直径通常达到五米至七米，顶部直径随高度增加逐渐收窄以优化风阻与结构受力，分段数量则根据运输限制与吊装能力确定，陆上项目多采用三段至五段设计，海上项目因运输条件复杂可能增加分段以降低单段重量。②材料特性方面，塔筒主体采用高强度低合金结构钢，通过热轧或冷弯工艺成型，材料需具备高屈服强度、良好韧性及抗疲劳性能，以应对交变载荷与极端环境。表面处理采用热镀锌或喷砂涂装工艺，提升防腐能力并延长使用寿命。③重量分布呈现明显的梯度特征，底部段因直径大、壁厚厚且需承受上部结构累积载荷，重量占比通常超过全塔总重的百分之四十，中部段重量次之，顶部段因直径小、壁厚薄且长度较短，重量

最轻。这种不均匀分布对运输与吊装提出差异化要求，底部段需重点考虑运输车辆的轴载分配与道路承载能力，吊装时则需确保起重设备在最小作业半径内满足起重量需求，顶部段虽重量较轻，但因高度优势需优先验证起重臂长与作业空间匹配性。

1.2 运输环境约束

①道路条件是运输的核心约束之一，坡度设计需满足重型车辆爬坡能力要求，过陡坡道可能导致牵引力不足或制动失效，尤其在下坡路段需考虑车辆惯性对刹车系统的冲击；弯道半径需与运输车辆轴距及转向性能匹配，塔筒超长超宽特性易在急弯处引发剐蹭或侧翻风险，部分山区道路需通过拓宽路基或临时改道满足通行需求；道路承载能力需覆盖运输车辆与塔筒总重，软土地基或老旧路面可能因压强过大导致沉降或开裂，需提前进行加固处理或选择承载力更高的替代路线。②运输距离与路线规划需统筹效率与成本，长距离运输需权衡燃油消耗、过路费及人工成本，优先选择路况良好、转弯少的直达路线，同时避开人口密集区以减少交通干扰^[1]。路线规划还需考虑桥梁、隧道及架空线路等障碍物，塔筒高度可能超出桥梁限高或触碰架空电缆，需通过实地勘测或三维建模验证净空尺寸，必要时申请临时拆除或采用绕行方案。③交通管制与政策限制是运输的合规性前提，塔筒超长超宽超重特性通常被归类为超限运输，需提前向交通管理部门申请超限运输许可，明确通行时间、路线及护送要求。部分区域对夜间运输、节假日通行或特定车型有限制，需结合施工进度调整运输计划。

1.3 运输方式选择

风电塔筒运输方式的选择需综合考量运输效率、成本、安全性及项目需求等多重因素。①公路运输是当前最主流的运输方式，凭借其灵活性与点对点直达优势，

成为陆上风电塔筒运输的首选。运输工具多采用平板车或液压轴线车,前者适用于常规尺寸塔筒,后者则通过多轴液压联动技术,可应对超长超重塔筒的运输需求,尤其适合山区、丘陵等复杂地形。液压轴线车的模块化设计可随运输需求增减轴数,提升车辆稳定性,同时通过液压转向系统降低转弯半径,适应狭窄道路。但公路运输的局限性在于超限问题,塔筒直径或长度超过规定时,需提前办理超限运输许可,并采取警示标志、护送车辆等安全措施。②铁路运输具有运量大、成本低、安全性高的特点,适合长距离、大批量塔筒运输。运输工具通常采用专用车厢,其内部结构根据塔筒尺寸定制,通过可调节支架固定设备,避免运输过程中晃动。装卸方案需结合塔筒重量与车站起重能力设计,部分车站配备门式起重机或轮胎式起重机,可实现塔筒的垂直装卸。铁路运输的挑战在于路线固定性,需提前协调列车时刻表与车站作业时间,且对塔筒尺寸限制严格,超限塔筒需拆解为多段运输,增加装卸复杂度。③水路运输适用于沿海或内河风电项目,尤其对超大型塔筒具有成本优势。运输工具以驳船为主,其甲板面积大、承载能力强,可一次性运输多节塔筒。港口设施匹配性是水路运输的关键,需确保起运港与目的港具备足够的码头水深、吊装能力及堆存空间。塔筒在驳船上的固定方式通常采用焊接或螺栓连接支架,并通过缆绳加固,防止航行中移位,水路运输的局限性在于受航道条件与天气影响显著,雨季或台风季节可能导致航道封闭或运输延误。

1.4 运输风险与成本构成

①运输振动与碰撞风险是首要安全挑战,塔筒作为高精度结构件,其表面防腐涂层与内部焊接质量对振动极为敏感。运输车辆在起步、制动或经过颠簸路段时产生的冲击力,可能通过支撑结构传递至塔筒,导致涂层剥落、焊缝开裂或局部变形,尤其在液压轴线车等重型运输工具中,多轴联动产生的微小振动叠加可能引发累积损伤。碰撞风险则源于道路障碍物、转弯半径不足或装卸操作失误,塔筒超长超宽特性使其在通过狭窄路段或交叉口时易与路边设施、其他车辆发生剐蹭,而装卸过程中起重设备与塔筒的接触点控制不当,也可能造成表面凹陷或结构损伤,此类风险需通过优化运输路线、加强固定装置刚性及提升操作人员技能来降低。②燃油消耗是运输成本的核心组成部分,其规模受运输距离、道路坡度、车辆载重及燃油效率共同影响^[2]。重型运输车辆在爬坡或复杂路况下需持续高功率输出,导致单位距离燃油消耗显著增加,而空载返程或绕行避障也会进一步推高成本。人工成本涵盖驾驶员、装卸工、护送人员

及现场协调人员的薪酬支出,超限运输需配备专职安全员与交通引导员,长距离运输还需考虑轮班制度以避免疲劳驾驶,这些因素均会扩大人力投入规模。③时间成本则体现为运输周期对项目进度的制约,恶劣天气、交通管制或事故导致的延误可能打乱吊装计划,迫使现场停工等待,进而引发设备闲置、工期索赔等连锁反应,尤其在海上风电项目中,窗口期受限使得时间成本更为敏感。此外,运输风险引发的隐性成本亦不可忽视,包括塔筒修复费用、保险赔付、企业信誉损失及潜在法律责任,这些成本虽难以量化,但可能对项目经济性产生颠覆性影响。

2 运输与吊装设备匹配性分析模型

2.1 匹配性评价指标体系构建

风电塔筒运输与吊装匹配性评价指标体系的构建需围绕运输能力、吊装能力、经济性及安全性四大核心维度展开,以实现全流程高效协同与风险可控。①运输能力指标是基础性要求,需重点评估运输工具的载重上限与尺寸适应性,前者需覆盖塔筒分段重量及附属结构总重,避免超载导致的结构损伤或交通事故,后者则需匹配塔筒最大直径与长度,确保在道路转弯、桥梁通过等场景下具备足够净空。②吊装能力指标直接决定施工可行性,起重量需满足塔筒最重分段及吊具的总重需求,并预留安全系数以应对动态载荷波动,作业半径覆盖则需确保起重机在最小站位距离下能完成塔筒各段的就位安装,避免因臂长不足需多次移位。③经济性指标是方案优化的关键导向,单位成本需综合运输距离、燃油消耗、人工投入及设备折旧等要素,通过多式联运或路线优化降低综合成本,效率则体现为运输与吊装的衔接流畅度,减少现场等待时间及设备闲置率,例如采用“运输-吊装”一体化作业模式可显著提升工效。④安全性指标贯穿全流程,风险概率需通过历史数据与仿真分析识别运输振动、碰撞、吊装失稳等潜在风险点,并评估其发生可能性与影响范围,应急能力则聚焦于预案完备性,包括运输事故中的快速封路、塔筒固定及设备转移方案,吊装事故中的防坠落装置、人员疏散路径及备用起重机调配机制,确保在突发情况下能最大限度控制损失^[3]。

2.2 多目标优化模型建立

风电塔筒运输与吊装的多目标优化模型需统筹成本、安全性与工期三大核心目标,通过构建目标函数与约束条件,并选择适宜的求解方法实现全局最优解。①目标函数设计需体现多维度平衡,最小化总成本涵盖运输费用、吊装设备租赁、人工投入及潜在风险损失,需通过优化运输路线、设备选型及作业流程降低直接与间

接成本。最大化安全性聚焦于风险概率控制与应急能力提升,需量化运输振动、碰撞及吊装失稳等风险的发生可能性,并评估应急预案的响应速度与有效性^[4]。缩短工期则通过减少运输等待时间、提升吊装效率及优化工序衔接实现,需考虑天气窗口、设备调度及多工种协同对时间的影响。②约束条件是模型可行性的边界,设备性能约束包括运输车辆载重、起重机起重量与作业半径、吊具承载能力等硬件参数,需确保所有操作在设备安全工作范围内。环境限制涵盖道路坡度、弯道半径、桥梁限高及水域潮汐等自然条件,需通过实地勘测与动态模拟排除不可行路径。③求解方法需兼顾精度与效率,层次分析法通过构建递阶结构将多目标分解为单目标子问题,逐层比较权重后综合得出最优方案,适用于目标间关联性较强的场景。模糊综合评价引入隶属度函数处理不确定性因素,如天气变化对工期的影响或风险概率的模糊性,通过多级评价实现定性指标的量化分析。

2.3 敏感性分析

风电塔筒运输与吊装的敏感性分析需聚焦关键参数波动对匹配性的影响机制,以及不确定性因素的动态应对策略,以提升方案鲁棒性。①关键参数中,塔筒重量直接影响运输载重需求与吊装设备选型,重量增加会压缩运输车辆载重余量,可能迫使选择更高规格车辆或拆分运输,并要求起重机提升起重量与结构稳定性,若超出设备极限需重新规划分段方案。②道路坡度变化会改变运输车辆动力需求,陡坡路段需降低载重或增配牵引设备,而弯道半径不足可能限制车辆通行,需通过加固路基或调整运输姿态应对^[5]。吊装高度与作业半径的敏感性体现在起重机站位选择,高度增加会放大风载荷对吊装稳定性的影响,半径扩大则降低起重效率,需通过优化站位或选用更高性能设备平衡。③天气变化对水陆运输与吊装作业的影响尤为突出,强风、暴雨或大雾可能导致港口封闭、航道停航或吊装暂停,需建立气象预警

机制,提前调整作业计划或启用备用方案。交通延误则源于道路事故、管制或拥堵,公路运输需预留缓冲时间并规划应急路线,铁路运输需协调列车时刻表避免长时间等待,多式联运中需强化各环节信息共享以减少衔接停滞。④应对策略需构建多层次响应体系,技术层面通过仿真模型预演参数波动场景,识别敏感区间并制定预控措施;管理层面建立动态调整机制,实时监测天气、交通等外部条件,触发阈值时自动启动应急预案;资源层面储备冗余设备与人力,确保在突发情况下能快速调配。通过敏感性分析,可明确方案薄弱环节并优化资源配置,最终形成适应复杂环境的弹性化运输与吊装体系。

结语

综上所述,风电塔筒运输与大型吊装设备选型需以“能力-安全-效率-经济”为核心目标,通过技术协同与全流程管控实现优化。未来,随着风电大型化、深远海化趋势深化,设备选型需向“技术多元化、产能区域化、供应链协同化”方向发展。企业应加强“设计-制造-吊装”全链条协同,推动设备标准化与通用化设计,降低隐性成本;同时,通过数字化工具提升供应链韧性,构建动态适配体系,以应对复杂工况下的技术挑战。

参考文献

- [1]华绪银.反向平衡法兰风电塔筒制作工法[J].中国新技术新品,2020,(09):60-62.
- [2]吴孝清,吴芳和.大容量超高塔筒风机基础设计及有限元分析[J].土工基础,2021,35(06):682-685.
- [3]贾小刚.全球首台16MW海上风电大容量机组吊装探索与创新[J].企业管理,2024,(S2):326-327.
- [4]张学森,吴刚,徐华利,等.大型风电塔筒结构施工过程数字孪生模型建立方法[J].建筑结构,2025,55(12):34-40.
- [5]邵利兵.关于风力发电机组与塔筒安全吊装的研究[J].工程建设和设计,2024,(22):100-102.