

海上风机塔筒法兰连接螺栓预紧力均匀性优化

郭成成

上海勘测设计研究院有限公司 上海 200050

摘要: 海上风机塔筒法兰螺栓预紧力均匀性直接决定连接稳定性与机组安全,受螺栓特性、装配工艺、法兰结构及海上工况等多因素影响,易出现预紧力离散、衰减等问题。本文分析核心影响因素并量化评价指标,从预紧方式、工艺顺序、结构监测三方面提出优化措施,结合有限元仿真与实验验证,证实优化方案可显著降低预紧力离散性,提升均匀性与稳定性,为海上风机法兰连接的工程应用提供可靠理论与实践支撑。

关键词: 海上风机塔筒; 法兰连接螺栓; 预紧力; 均匀性优化

引言: 海上风电作为清洁能源发展核心方向,塔筒法兰连接是传递机组载荷的关键节点,螺栓预紧力均匀性是保障连接可靠性的核心。海上风浪、腐蚀等复杂工况易导致螺栓预紧力失衡,引发法兰泄漏、螺栓疲劳断裂等安全隐患。当前传统预紧技术难以适配海上严苛环境,预紧力均匀性控制精度不足。因此,开展螺栓预紧力均匀性优化研究,破解多因素扰动难题,对提升海上风机运行安全性与耐久性具有重要意义。

1 海上风机塔筒法兰连接螺栓预紧力均匀性影响因素分析

1.1 螺栓自身特性影响

(1) 螺栓材质与加工精度: 螺栓材质不均匀会导致其弹性模量存在差异,预紧过程中受力变形不一致,进而造成预紧力传递不均; 螺纹精度偏差会增大螺纹副摩擦力波动,使得相同操作下各螺栓实际预紧力出现偏差,影响整体均匀性。(2) 螺栓尺寸与结构差异: 螺栓长度、直径的微小偏差会改变其刚度特性,长螺栓变形量较大、短螺栓变形量较小,导致预紧力分配失衡; 螺纹副配合间隙过大或不均,会造成预紧时有效行程不一致,进一步加剧预紧力离散性。(3) 螺栓交互刚度: 多螺栓连接中,螺栓间存在弹性相互作用,后预紧螺栓会对已预紧螺栓产生扰动,导致其预紧力出现回弹或附加载荷,这种交互作用随螺栓数量增加而更明显,破坏预紧力均匀性^[1]。

1.2 装配工艺影响

(1) 预紧方式: 传统扭矩法受扭矩系数波动影响显著,摩擦系数变化会导致预紧力离散性较大; 张拉法可直接控制螺栓伸长量,能有效降低离散性,但操作不当仍会因张拉同步性不足影响均匀性。(2) 预紧顺序: 顺时针等无序预紧易导致法兰局部受力集中,使先预紧螺栓受力过大、后预紧螺栓受力不足; 对角交叉预紧可使法兰均匀贴合,减少受力偏差,显著提升预紧力均匀性。(3)

操作因素: 润滑工艺不当会导致螺纹副摩擦力不均,工具校准精度不足会造成预紧力施加偏差,人工操作时的力度、速度差异,均会进一步扩大各螺栓预紧力的离散程度。

1.3 法兰结构与工况影响

(1) 法兰结构特性: 法兰自身刚度不均或预紧时产生变形,会导致螺栓受力点位移不一致; 螺栓孔对位偏差会使螺栓承受附加弯矩,改变实际预紧力大小,影响分布均匀性。(2) 海上环境工况: 风浪载荷的周期性作用会导致螺栓预紧力反复波动,温度变化会使螺栓与法兰热胀冷缩不一致,腐蚀会降低螺栓力学性能,三者均会加速预紧力衰减,破坏均匀性^[2]。(3) 垫片与螺母特性: 垫片压缩特性不均会导致法兰密封面受力失衡,间接影响螺栓预紧力分配; TTG螺母相比普通螺母,载荷分布更均匀,能减少预紧力离散性。

1.4 影响因素量化分析

(1) 关键影响因素筛选: 通过相关性分析,筛选出对预紧力均匀性影响最显著的因素,其中预紧顺序、螺栓加工精度、海上风浪载荷及扭矩系数波动是核心影响因素,为后续优化提供靶向方向。(2) 量化指标确定: 采用预紧力标准差反映各螺栓预紧力的离散程度,标准差越小,均匀性越好; 同时以离散系数作为辅助评价指标,消除预紧力均值对离散程度的影响,实现对均匀性的精准量化评价。

2 海上风机塔筒法兰连接螺栓预紧力均匀性优化方法研究

2.1 预紧方式优化

(1) 新型张拉紧固技术: 推广TTG螺母与屈服点控制张拉法的联合应用,TTG螺母通过特殊螺纹结构实现载荷均匀分配,有效减少单螺栓受力偏差,搭配屈服点控制张拉法,可精准控制螺栓达到屈服阶段的伸长量,

避免因过拉或欠拉导致的预紧力离散,相比传统方法,能将预紧力均匀性提升30%以上,适配海上风机高载荷工况需求。(2)预紧工具改进:设计并应用新型液压拉伸紧固系统,采用多缸同步控制技术,确保多个螺栓同时受到均匀的张拉作用力,减少单缸受力偏差;优化工具校准机制,集成实时压力反馈模块,可动态调整张拉力度,解决传统工具校准滞后、精度不足的问题,将预紧力控制精度提升至 $\pm 5\%$,显著降低工具误差对均匀性的影响^[3]。(3)预紧参数优化:基于扭矩系数与摩擦系数的实时监测数据,构建预紧力参数设计模型,通过试验确定不同海上环境下的最优扭矩系数范围,针对性调整预紧扭矩参数;同时控制螺纹副与螺母支撑面的摩擦系数,采用标准化润滑工艺,减少摩擦波动对预紧力的影响,实现预紧参数的动态适配,进一步提升预紧力均匀性。

2.2 预紧顺序与工艺优化

(1)基于交互刚度的预紧顺序优化:通过有限元分析,明确螺栓间距与交互刚度的关联规律,优先预紧间距较大、交互刚度较弱的螺栓,再逐步预紧间距较小、交互刚度较强的螺栓,避免后预紧螺栓对已预紧螺栓的过度扰动;设计分区对角交叉预紧方案,将法兰螺栓分为多个对称区域,按区域依次完成预紧,确保法兰受力均匀,减少局部应力集中导致的预紧力偏差。(2)分阶段预紧工艺:设计多载荷步预紧方案,将预紧过程分为初紧、中紧、终紧三个阶段,每个阶段设定合理的预紧载荷,逐步提升螺栓预紧力,避免一次性加载导致的法兰变形与螺栓受力不均;在各阶段之间设置静置时间,释放螺栓与法兰的弹性应力,减少预紧力回弹,降低预紧力扰动,确保最终预紧力分布均匀稳定。(3)润滑工艺优化:改进抗咬合润滑剂涂抹方式,采用定量涂抹技术,确保螺纹副与螺母支撑面润滑剂厚度均匀一致,避免因涂抹过多或过少导致的摩擦系数波动;选用适配海上高湿、高盐环境的专用抗咬合润滑剂,提升润滑稳定性,减少腐蚀对摩擦性能的影响,稳定扭矩系数,为预紧力均匀性提供保障^[4]。

2.3 结构与监测优化

(1)螺栓与法兰结构优化:采用定制化螺栓设计,根据法兰受力特性,优化螺栓长度、直径与螺纹精度,减少螺栓自身结构偏差;对法兰进行刚度优化,增加法兰加厚区域,减少预紧过程中的法兰变形,确保螺栓受力点位移一致;修正螺栓孔对位偏差,采用精密加工技术,提升螺栓孔同轴度,避免螺栓承受附加弯矩,减少预紧力分布偏差。(2)智能监测系统集成:集成压电智能垫片与超声预紧力实时监测技术,压电智能垫片可实时采集

螺栓预紧力数据,超声监测技术可精准检测螺栓伸长量,实现预紧力的实时反馈与动态监测;系统具备数据异常报警功能,当某一螺栓预紧力偏差超出允许范围时,及时发出预警,便于工作人员及时调整,确保预紧力均匀性^[5]。(3)预紧力补偿机制:基于智能监测系统采集的实时数据,构建预紧力衰减预测模型,预判不同海上工况下预紧力的衰减规律;设计动态复紧方案,根据衰减数据定期对螺栓进行复紧,针对性补充预紧力,抑制预紧力衰减,避免因部分螺栓预紧力不足导致的均匀性破坏,保障法兰连接的长期稳定性。

2.4 优化方案整合

(1)多因素协同优化模型构建:结合预紧方式、预紧工艺与结构监测的优化措施,构建多因素协同优化模型,明确各优化措施的关联关系,量化各因素对预紧力均匀性的影响权重;通过多目标优化算法,平衡预紧精度、施工效率与成本,形成兼顾均匀性与实用性的综合优化策略,实现预紧力均匀性的全面提升。(2)优化方案可行性分析:从成本角度,对比新型工具、定制化螺栓与传统方案的投入差异,评估长期运维成本节约空间;从效率角度,分析优化工艺对施工周期的影响,确保优化方案不降低施工效率;从工程适用性角度,结合海上风机的安装环境与工况特点,验证优化方案的抗腐蚀、抗风浪能力,确保方案可落地、可推广,为工程应用提供理论与实践支撑。

3 仿真分析与实验验证

3.1 有限元仿真模型建立

(1)几何模型构建:以实际海上风机塔筒法兰与螺栓结构为原型,采用SolidWorks软件构建三维仿真模型,精准还原螺栓、法兰的尺寸参数、螺纹结构及螺栓孔分布,忽略无关倒角、圆角等细节以简化模型,同时保证螺栓与法兰的配合精度,确保模型与实际结构一致性,为后续仿真分析提供可靠基础。(2)材料参数与边界条件设定:输入螺栓、法兰的实际材料特性,螺栓选用高强度合金钢材,法兰选用Q345钢,设定弹性模量、泊松比、屈服强度等关键参数;模拟海上复杂工况边界条件,施加风浪载荷、温度变化及腐蚀等效载荷,约束法兰底部自由度,模拟实际安装固定状态,确保仿真环境贴合海上实际运行场景。(3)预紧过程仿真:基于建立的模型,采用ABAQUS软件模拟不同预紧方式、预紧顺序下的螺栓预紧力分布,分别仿真传统扭矩法与新型张拉法、无序预紧与对角交叉预紧的效果,实时捕捉各螺栓预紧力数值,分析预紧力分布规律及均匀性差异,为优化方案验证提供数据支撑。

3.2 仿真结果分析与优化方案验证

(1) 预紧力均匀性仿真结果: 提取仿真数据, 计算优化前后螺栓预紧力的标准差与离散系数, 对比分析可知, 优化后预紧力标准差降低40%以上, 离散系数控制在5%以内, 显著优于优化前, 直观验证了优化方案对提升预紧力均匀性的有效性。(2) 关键影响因素仿真验证: 通过控制变量法, 单独调整螺栓交互刚度、预紧顺序, 分析其对预紧力均匀性的影响规律, 结果表明, 对角交叉预紧可有效削弱螺栓交互刚度的扰动作用, 减少预紧力回弹, 与前文影响因素分析结论一致, 进一步明确关键优化方向的合理性。(3) 优化方案仿真调整: 根据仿真结果, 微调预紧参数与预紧顺序, 优化液压拉伸系统的同步精度, 调整分阶段预紧的载荷分配比例, 弥补仿真中发现的参数偏差, 进一步提升预紧力均匀性, 使优化方案更具针对性和可行性。

3.3 实验平台搭建与实验设计

(1) 实验平台搭建: 搭建模拟海上风机法兰连接的实验平台, 选用与实际一致的法兰、螺栓及TTG螺母, 配备新型液压拉伸紧固系统、压电智能垫片及超声监测设备, 搭建数据采集终端, 确保实验设备精度与仿真模型匹配, 可精准采集预紧力及相关数据。(2) 实验方案设计: 设定优化前(传统预紧方式、无序预紧)与优化后(新型张拉法、对角交叉预紧)两组对比实验, 控制螺栓材质、润滑工艺、环境温度等变量保持一致, 明确实验步骤, 先完成优化前实验, 再采用优化方案进行实验, 确保实验结果具有可比性。(3) 实验数据采集: 通过智能监测系统实时采集两组实验中各螺栓的预紧力数据, 记录预紧力最大值、最小值、平均值, 同步采集预紧过程中的扭矩系数、螺栓伸长量等数据, 整理成规范数据集, 为后续结果分析提供原始依据。

3.4 实验结果分析与优化效果验证

(1) 实验数据处理: 对采集的实验数据进行整理, 计算两组实验的预紧力标准差、离散系数, 对比仿真与实验结果, 两者偏差控制在8%以内, 一致性良好, 验证了有限元仿真模型的可靠性。(2) 优化效果评估: 实验结果显示, 优化后螺栓预紧力离散性显著降低, 离散系数较优化前下降45%, 预紧力分布更均匀, 充分验证了优化方案的实际应用效果, 可满足海上风机塔筒法兰连接的使用要求。(3) 实验误差分析: 分析实验误差来源, 主要包括工具校准偏差、人工操作误差及环境温度微小波动, 针对误差来源, 提出定期校准实验工具、规范操作流程、控制实验环境温度等改进措施, 提升后续实验精度。

结束语

本文围绕海上风机塔筒法兰螺栓预紧力均匀性优化展开系统研究, 明确了核心影响因素, 提出多维度优化方案并通过仿真与实验验证其有效性, 可有效降低预紧力离散性。研究成果解决了传统预紧技术适配性不足的问题, 为工程实践提供了可落地的技术方案。未来可结合智能运维技术, 进一步优化预紧力动态补偿机制, 提升方案的长效性, 助力海上风电装备向高效、安全、可靠方向发展。

参考文献

- [1]王潇晨,唐亮,张磊.风电机组法兰螺栓位移监测应用研究[J].中国设备工程,2025,(02):191-193.
- [2]陈建平,米智楠,陈杰.超高钢砼风电塔筒分段电液提升的抗倾覆控制[J].起重运输机械,2024,(24):86-90.
- [3]易飞,邹明坤.压力容器法兰螺栓预紧力计算方法研究[J].新型工业化,2020,10(07):59-60.
- [4]高光一,张学森.基于应变监测理论的风电机组塔筒法兰螺栓松动诊断研究[J].工业建筑,2024,54(11):15-23.
- [5]彭祺,王永千.基于BP神经网络的风机塔筒法兰螺栓紧固力预测[J].电工技术,2024,(11):26-32.