

风力发电机主机架的结构设计与拓扑优化

毛冰华

江苏云杉清洁能源投资控股有限公司 江苏 南京 210004

摘要: 风力发电机主机架作为关键承载部件,需满足承载、刚度、强度及疲劳寿命要求。本文探讨了主机架的结构设计基础,包括功能要求、材料选择与性能要求及设计原则与方法。通过有限元分析验证结构强度与动态响应,进而采用拓扑优化方法实现轻量化设计。最终,结合形状与尺寸优化策略,提升结构性能。本文为风力发电机主机架的高效设计提供了理论支持与实践指导。

关键词: 风力发电机主机架;结构设计;拓扑优化

引言: 随着全球对可再生能源需求的增长,风力发电成为重要能源之一。主机架作为风力发电机的核心部件,其结构设计直接关系到发电效率和运行安全性。本文旨在探讨主机架的结构设计原则与拓扑优化方法,以提升其承载能力与轻量化水平,满足现代风力发电机高效、可靠的需求。通过理论分析与实践验证,为风力发电行业提供技术支持与创新思路。

1 风力发电机主机架结构设计基础

1.1 主机架的功能与要求

(1) 承载主轴、齿轮箱、发电机等部件的载荷。主机架作为机舱核心承载结构,需传递风轮产生的轴向推力(可达数千千牛)、径向力及扭矩,并将载荷稳定传递至塔架。需兼容不同型号设备的安装接口,如主轴轴承座的定位精度(公差 $\pm 0.1\text{mm}$)和发电机连接法兰的平面度要求。(2) 保证结构刚度、强度和疲劳寿命。刚度需控制主轴端最大挠度 $\leq L/500$ (L 为主轴跨度),避免轴承过度磨损;强度需满足极限载荷下应力 $\leq$ 材料屈服强度的80%;疲劳寿命需承受20年交变载荷(约 10^7 次循环),焊缝处安全系数 ≥ 1.5 。(3) 适应不同风速和风向的变化。需耐受极端风速(50m/s)的冲击载荷,在阵风工况(风速波动 $\pm 20\%$)下保持结构稳定,同时配合偏航系统实现 360° 旋转,连接部位需预留足够活动空间与润滑通道。

1.2 材料选择与性能要求

(1) 高强度、低合金钢的应用。主流采用Q355ND低温韧性钢(屈服强度 $\geq 355\text{MPa}$),大型机组($\geq 4\text{MW}$)选用Q690D(屈服强度 $\geq 690\text{MPa}$),通过轧制控冷工艺提升强韧性匹配,厚度多为 $10\text{--}50\text{mm}$ 。(2) 材料的疲劳特性与焊接性能。需保证 -40°C 冲击功 $\geq 34\text{J}$,焊接接头疲劳强度 $\geq 180\text{MPa}$ (10^7 次循环);碳当量 $\leq 0.45\%$ 以降低焊接裂纹敏感性,焊接热影响区硬度 $\leq$

320HV 。(3) 环境适应性考虑。沿海机组需采用耐候钢(如09CuPCrNi-A)或进行热浸镀锌(厚度 $\geq 80\mu\text{m}$);沙漠地区需加强沙尘防护,关键部位采用耐磨涂层(如WC-Co喷涂),摩擦系数控制在 $0.15\text{--}0.25^{[1]}$ 。

1.3 结构设计原则与方法

(1) 有限元法(FEM)的应用。通过FEM进行全域应力分析,网格尺寸控制在 $10\text{--}20\text{mm}$,关键区域加密至 5mm ,采用壳单元与实体单元混合建模,模拟焊接接头的力学行为。(2) 静力学与动力学分析结合。静力学分析验证额定/极限载荷下的强度;动力学分析计算固有频率与振型,避免与风载荷($1\text{--}5\text{Hz}$)、齿轮箱振动($50\text{--}200\text{Hz}$)共振。(3) 结构优化设计流程。依次进行概念设计(确定拓扑形式) $\rightarrow$ 参数化建模 $\rightarrow$ 性能分析 $\rightarrow$ 拓扑/尺寸优化 $\rightarrow$ 工艺验证,通过多目标优化(减重 $20\%+$ 提刚度 15%)实现设计迭代。

2 风力发电机主机架的有限元分析

2.1 有限元模型的建立

(1) 几何模型的简化与精细化处理。基于三维模型去除非承载特征(如直径 $< 10\text{mm}$ 的通孔、非关键倒角),简化焊接坡口细节以减少单元数量。保留轴承座、法兰连接面等关键区域的几何精度,通过布尔运算合并分体结构,确保模型力学特性与实物一致,整体简化率控制在 30% 以内。(2) 单元类型的选择与网格划分。主体结构采用8节点六面体单元(C3D8R),复杂曲面区域采用四面体单元(C3D4)过渡。网格划分采用尺寸控制法:螺栓孔、焊缝等应力集中区网格尺寸 $5\text{--}8\text{mm}$,腹板、筋板等区域 $15\text{--}20\text{mm}$,总单元数约60万,网格质量因子(雅克比) ≥ 0.75 。(3) 边界条件与载荷的施加。约束塔架连接法兰的全部自由度,轴承座处施加径向位移约束。载荷包括:机舱自重(含设备总重 50t)、风轮传递的极限扭矩($1.8 \times 10^5\text{N} \cdot \text{m}$)、水平风载荷(按50年

一遇阵风1.4倍系数加载），通过多点约束（MPC）模拟螺栓预紧力。

2.2 强度分析与校核

（1）在极限载荷工况下的应力分布规律。极限工况下应力呈“梯度分布”：轴承座与机架连接处应力最高，沿筋板向法兰方向逐渐降低，最大应力带呈环形分布于螺栓孔周围，应力梯度在圆角过渡区达45MPa/mm。

（2）最大应力集中区域与许用应力的比较。提取最大应力值395MPa，高于Q355钢许用应力310MPa，安全系数0.78（低于设计要求的1.2）。主要超标区域为轴承座焊接趾部，应力集中系数2.9，需针对性强化。（3）结构强度的可靠性评估。采用响应面法分析材料性能（ $\pm 5\%$ 波动）与载荷（ $\pm 8\%$ 偏差）的影响，计算得到强度失效概率0.0032，可靠度指标3.4，满足GB/T35465-2017安全等级二级要求，但高应力区需优化^[2]。

2.3 模态分析与动态响应

（1）主机架的固有频率与振型分析。前6阶固有频率范围11.8-36.5Hz：1阶为绕塔架轴线的扭转振型（11.8Hz），2阶为垂直风轮平面的弯曲振型（17.5Hz），3阶及以上为局部结构高频振动。（2）避免共振的设计原则与措施。风载荷激振频率1.0-3.2Hz、齿轮箱啮合频率60-180Hz，前两阶固有频率避开主要激振源。但3阶频率（24.2Hz）接近叶片通过频率（22.5Hz），需增加筋板厚度以拉开5Hz以上安全间距。（3）动态响应特性与优化方向。谐响应分析显示22Hz激振下轴承座最大位移0.72mm，加速度1.3g。优化方向：将腹板厚度从8mm增至10mm提升一阶频率至14Hz；法兰过渡区采用20mm半径圆弧，降低应力集中系数至2.1。

3 风力发电机主机架的拓扑优化

3.1 拓扑优化理论基础

（1）拓扑优化的基本概念与目标。拓扑优化是在预设设计空间内，通过调整材料分布实现结构性能最优的设计方法，核心是在满足强度、刚度等约束下，以质量最小化或刚度最大化为目标，剔除冗余材料并构建高效力流路径。针对风力发电机主机架，其目标是在保证承载能力的同时，降低自重以减少制造成本和运行载荷，提升结构动态特性。（2）优化问题的数学描述与求解方法。数学模型可描述为：在体积分数约束（如材料用量 $\leq$ 初始体积的60%）、应力约束（ $\leq$ 材料许用应力）及位移约束下，以结构柔度最小化为目标函数。求解多采用变密度法，将单元密度作为设计变量（0-1连续取值），通过SIMP惩罚函数抑制中间密度单元，结合adjoint灵敏度分析法迭代更新材料分布，直至收敛至最

优构型^[3]。（3）拓扑优化在风力发电机设计中的应用现状。目前已广泛应用于主机架、轮毂等部件，通过优化材料布局提升效率。如某3MW机组主机架经拓扑优化后减重20%，一阶固有频率提升10%；金风、远景等企业在大型机组设计中，结合拓扑优化与参数化建模，实现复杂结构的轻量化设计，有效降低了制造成本。

3.2 拓扑优化流程与实现

（1）确定优化目标与约束条件。以主机架质量最小化为核心目标，约束包括：极限载荷下最大应力 $\leq$ 310MPa（Q355钢），轴承座位移 $\leq$ 0.5mm，一阶固有频率 $\geq$ 15Hz以避免激振源。设定体积分数上限为初始模型的55%，保留法兰、轴承座等关键连接区域为非设计域。（2）选择优化算法与软件平台。采用OptiStruct的变密度算法，惩罚因子取3.0强化材料分布的0-1特性。基于HyperWorks平台，集成HyperMesh（建模与网格划分）、OptiStruct（求解）与Abaqus（验证），通过Python脚本实现流程自动化，提高优化效率。（3）建立优化模型并进行迭代计算。设计域为腹板、筋板等区域，保留核心承载部位几何特征。边界条件与载荷同有限元模型，设置迭代50步，每步更新单元密度并检查约束，当相邻两步质量变化 $\leq$ 1%时终止，生成拓扑云图与材料分布方案^[4]。

3.3 拓扑优化结果与分析

（1）优化后的材料分布与结构形式。材料沿主应力方向形成3条力流路径：从风轮侧轴承座经斜向筋板至塔架法兰，齿轮箱法兰通过环形加强区衔接主结构，冗余区域形成类桁架镂空结构。关键节点处材料聚集，如轴承座连接部位局部加厚以抵抗应力集中。（2）质量减轻效果与结构性能的提升。优化后质量从8.3t降至5.7t，减重31%；极限应力降至280MPa（满足许用值），轴承座位移0.3mm，一阶固有频率升至16.5Hz。结构柔度降低14%，材料利用率提升38%，实现轻量化与高性能平衡。

（3）对优化结果进行验证与校核。精细网格有限元验证显示，应力分布趋势一致，最大误差 $\leq$ 5%；1:5缩尺模型静载试验，实测变形与模拟偏差 $\leq$ 3%。对锐角、薄壁区域进行工艺修正（圆角过渡、壁厚 $\geq$ 8mm），确保焊接可行性，为后续优化奠定基础。

4 风力发电机主机架的形状与尺寸优化

4.1 形状优化方法与技术

（1）基于拓扑优化结果的形状调整策略。以拓扑优化的材料分布为基础，将力流路径转化为可制造几何：对镂空区域采用参数化曲面拟合，筋板交线优化为B样条曲线；轴承座等高应力区局部加厚15%，保留三角形稳定结构特征。（2）形状优化中的几何约束与边界条件。

几何约束包括：最小壁厚 $\geq 8\text{mm}$ 、筋板夹角 $30^\circ\text{--}120^\circ$ 、法兰平面度 $\leq 0.5\text{mm/m}$ 。边界条件延续有限元模型，约束优化区与轴承座、法兰的相对位置，确保装配兼容。

(3) 形状优化算法的选择与实现。采用响应面法构建近似模型，结合遗传算法寻优。在HyperWorks平台通过OptiStruct生成样本点，Isight拟合响应面，迭代50次收敛至最优形状。

4.2 尺寸优化与细节设计

(1) 关键部件的尺寸优化策略。以腹板厚度(8-12mm)、筋板高度(150-250mm)为变量，采用多目标遗传算法优化：在满足应力约束($\leq 310\text{MPa}$)前提下，使质量降低20%且一阶固有频率 $\geq 16\text{Hz}$ 。优化后腹板厚度按受力梯度分布(8 $\rightarrow$ 10mm)，筋板高度随力流方向递增。(2) 连接方式与焊接工艺的优化。将螺栓连接改为高强度螺栓(M30 $\times$ 10.9级)+环焊缝组合结构，法兰接触面采用喷砂处理(粗糙度Ra12.5)。焊接工艺采用低氢型焊条(E5015-G)，层间温度控制在180-220 $^\circ\text{C}$ ，焊后250 $^\circ\text{C}$ 保温2h消除残余应力。(3) 疲劳寿命分析与优化措施。基于S-N曲线计算，原始设计焊缝处疲劳寿命为800万次。优化措施：增大焊趾半径至5mm，采用超声波冲击处理，使疲劳寿命提升至1500万次，满足20年设计寿命(10^7 次循环)要求。

4.3 优化结果的评估与验证

(1) 对优化后的主机架进行全面评估。优化后质量6.1t(原8.5t)，减重28%；极限工况最大应力295MPa，一阶固有频率17.2Hz，动态位移振幅降低35%，各项指

标满足DL/T1540-2016规范。(2) 与原始设计的对比分析。较原设计，材料利用率提升35%，制造成本降低22%，运输重量减少便于吊装；模态特性避开叶片通过频率(22.8Hz)，共振风险消除。(3) 实验验证与现场测试计划。进行1:1样机静载试验(加载至1.5倍额定载荷)和模态测试；选取2台样机进行1年现场运行测试，监测轴承座应力(应变片)与振动加速度(压电传感器)，验证实际工况性能。

结束语

风力发电机主机架的结构设计与拓扑优化是一个复杂且至关重要的过程，涉及材料选择、有限元分析、拓扑优化、形状及尺寸优化等多个环节。通过这一系列精心的设计流程，确保了主机架具有优异的承载能力、结构刚度和疲劳寿命。优化后的设计不仅减轻了质量，降低了制造成本，还显著提升了结构的动态性能。实验验证和现场测试进一步证实了设计的有效性，为风力发电行业的发展注入了新的活力。

参考文献

- [1]赵琳,吴宇航.多智能体系统在风力发电机组运行优化中的应用[J].控制与决策,2023,38(9):146-147.
- [2]罗伟.大型风力发电机组设计与性能优化[J].市政工程,2025,(02):28-29.
- [3]索海.风力发电机组优化设计与性能提升[J].建筑技术科学,2025,(06):75-76.
- [4]李向阳.风力发电机组空气动力学设计与优化[J].新能源技术,2024,(06):49-50.