兆瓦级风机主轴随机振动疲劳寿命分析

艾凤军，李海涛，刘天鹏

（大唐韩电（朝阳）新能源有限公司，辽宁 朝阳 122108）

摘 要 风机主轴作为兆瓦级风电机组核心回转承载部件，长期承受湍流风场带来的随机交变载荷，随机振动引发的疲劳失效会影响机组安全运行。本文通过构建主轴有限元数值模型，进行几何简化、网格离散与边界约束设置，依托湍流风场模拟结果提取主轴关键截面载荷，开展模态分析与应力功率谱求解，采用频域 Dirlik 模型实现疲劳损伤计算与寿命评估。数值计算得到主轴应力热点位置与对应的疲劳寿命参数，相关分析流程可为风电主轴振动疲劳评估提供参考。

关键词 兆瓦级风机主轴；随机振动；频域法；疲劳寿命；应力功率谱

中图分类号：TK83；O324 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.001

0 引言

随着风电装备向大容量、长服役周期方向持续升级，主轴作为传动链的核心承载部件，需同步传递风轮输出的扭矩与弯矩，结构长期处于随机振动载荷环境[1]。湍流风场产生的脉动载荷具备宽频随机特征，传统静力疲劳分析难以描述该类载荷下的结构损伤演化规律。本文建立兆瓦级风机主轴有限元模型，开展结构动力学与随机载荷的数值仿真，构建湍流风场对应的主轴载荷时序数据，求解主轴模态参数与应力功率谱，依托谱矩参数与 Dirlik 频域疲劳模型完成主轴疲劳损伤与寿命的定量计算，探究随机振动激励下主轴的疲劳演化特征。

1 兆瓦级风机主轴有限元建模

1.1 兆瓦级风机主轴几何模型简化

兆瓦级风机主轴为重载回转承载构件，过多细微结构会增大仿真计算量，降低应力求解稳定性。主轴疲劳失效多发生在轴肩、法兰过渡截面，螺纹、浅槽及微小倒角不改变主体应力传递规律。建模保留核心承载结构与关键尺寸，去除不承载的细小特征。该简化方式符合力学仿真通用原则，在保证应力计算精度的同时提升仿真效率。

1.2 模型网格划分与验证

兆瓦级风机主轴有限元模型选用高阶实体单元离散，该单元应力求解精度高，适合交变载荷工况。轴肩、法兰等应力梯度大的过渡区域采用加密网格，轴身平稳段使用常规网格，兼顾计算精度与效率。模型通过单元质量检查，满足机械仿真行业要求。开展网格无关性验证，对比多套网格仿真结果，应力偏差处于合理范围，模型计算性能稳定。

1.3 模型边界条件设置

兆瓦级风机主轴依靠前后轴承支撑限位，轴承约束直接影响力的传递路径。在轴承安装位置施加等效约束，限制径向位移与转角。主轴输入端保留扭矩传递自由度，匹配风轮动力输入；输出端参照齿轮箱装配约束，约束多余自由度[2]。该等效边界贴合主轴实际力学状态，可还原真实应力与振动响应。

2 兆瓦级风机主轴随机载荷谱构建

2.1 湍流风场数值模拟

大气边界层风场由平均风速与脉动风速组成，脉动风速产生持续随机扰动。风轮扫掠面不同高度风速存在空间相位差，进而产生交变倾覆载荷并传递至风轮。湍流风场模型采用行业通用湍流谱生成时域风速序列，输入参数匹配目标风场地表粗糙度、参考高度与湍流强度，风速样本参照风资源统计结果，剔除超出机组设计包络的极端风速。风速时序保留低频大尺度脉动与高频小幅波动特征，时间步长适配风机振动响应分析尺度。模拟输出多点风速时序数据，体现风轮扫掠面风速空间差异，为风轮气动载荷计算提供输入。

2.2 风轮气动载荷计算

气流与叶片相互作用产生升力和阻力，叶片旋转造成攻角随方位角周期性变化，放大气动载荷波动，两类载荷随湍流风速动态改变[3]。本文以叶片单元动

作者简介：艾凤军（1989-），男，本科，工程师，研究方向：新能源。

量理论为计算框架，考虑尾流效应与展向载荷分布，并引入叶尖损失修正降低端部载荷计算误差。将各叶片划分为展向单元，各单元气流参数取自湍流风场时序结果。对叶片气动力沿展向积分得到叶根载荷，再转换至风轮旋转中心坐标系，得到包含推力、扭矩与倾覆力矩的载荷时序，作为主轴力学输入原始数据。

2.3 兆瓦级风机主轴关键截面载荷提取

风轮端多维度载荷沿主轴传递，轴承支撑约束改变轴身弯矩分布。基于刚体静力学平衡原理建立风轮到主轴关键截面的力系转换关系，选取轴肩、法兰过渡等应力集中截面作为载荷提取位置。该类截面承受弯矩与扭矩耦合交变作用，加速疲劳损伤累积。对载荷时序做坐标变换与分量叠加，得到目标截面弯矩、扭矩时序，滤除对疲劳损伤贡献微弱的高频噪声。处理后的载荷时序作为有限元模型外部激励，用于主轴随机振动响应求解。

3 兆瓦级风机主轴随机振动响应分析

3.1 兆瓦级风机主轴结构模态特性计算

兆瓦级风机主轴结构固有振动特性直接决定结构对随机风载荷激励的动态响应程度，结构共振现象的产生条件可依托模态参数完成精准判定。回转构件运转过程伴随离心刚化效应，该效应会小幅改变轴系固有频率，模态计算计入该力学效应提升结果可靠性[4]。数值仿真软件依托建立完成的主轴有限元模型开展动力学特征求解，模型约束状态完全贴合主轴实际装配工况，保证动力学计算模型的力学等效性。模态求解算法针对回转类轴系结构优化迭代精度，能够精准提取结构多阶固有频率与对应空间振型。低阶模态参数主导主轴整体振动变形状态，高阶模态参数对应结构局部区域的微幅形变特征，高阶振型对应的局部变形往往集中在法兰与轴肩连接处，与应力集中区域存在对应关系。风场随机激励的主频区间可与主轴固有频率参数形成对照，频率参数的匹配关系能够判定结构动态响应的放大程度。模态参数的求解结果可为随机振动应力计算提供核心动力学基础，支撑后续结构应力响应的精准求解。

3.2 兆瓦级风机主轴应力热点位置识别

兆瓦级风机主轴结构几何尺寸的突变会造成局部应力传递路径发生偏转，应力数值的局部富集现象会持续累积结构疲劳损伤。应力集中系数随圆弧过渡半径改变，微小的轮廓变化即可改变局部应力峰值水平。随机载荷的交变作用会加剧局部应力的动态波动幅度，结构疲劳失效问题多起源于高应力富集区域。主轴有限元模型导入真实风载时序激励完成动态应力场求解，全域应力数据可完整反映结构不同位置的应力波动特征。应力数值持续偏高、波动幅值较大的结构区域可完成定位标记，标记区域对应主轴结构的疲劳危险位置。主轴轴肩过渡圆弧、法兰连接根部的几何突变位置普遍存在显著应力集中特征，此类结构区域作为疲劳分析的核心研究区域。热点区域网格保持加密设置，降低梯度较大位置带来的数值离散误差。精准的热点定位能够缩减无效计算范围，提升结构疲劳寿命评估的精准度与针对性。

3.3 结构应力响应功率谱求解

时域随机载荷的无序波动特征难以直接量化结构动态损伤规律，通过频域转换处理可实现随机载荷能量特征的规范化表达。模态阻尼取值参考同类钢材轴系构件试验结果，阻尼数值会影响共振区间应力能量的放大水平。主轴结构动力学传递函数可搭建载荷输入与应力输出的数值关联关系，函数参数由结构模态固有参数与阻尼参数组合形成[5]。热点位置的时域应力响应数据可通过傅里叶变换完成频域转换处理，转换结果可生成应力响应功率谱密度函数。功率谱密度函数可量化不同频率分量对应的应力能量占比，能量分布峰值对应结构共振作用下的应力放大区间，频率截断上限依据模态分析结果选取，舍弃无能量贡献的高频分量，减少计算开销。应力功率谱的完整分布数据可精准反映随机振动下的结构应力变化特征，可为谱矩参数计算与疲劳损伤求解提供完整的基础数据支撑。

4 基于频域法的兆瓦级风机主轴疲劳寿命预测

4.1 应力功率谱谱矩参数计算

频域疲劳评估体系依托随机振动信号的频谱特征量化结构损伤水平，应力功率谱谱矩参数可以有效刻画随机应力信号的能量分布、频率疏密与波动幅度特征。风机主轴承受的湍流风载属于典型宽频随机激励，应力信号不具备周期性规律，常规时域统计手段在处理海量载荷数据时，难以高效捕捉低幅值高频次的细微损伤贡献。谱矩参数的数学求解可以覆盖全频率域的应力能量组分，能够实现随机应力特征的完整量化。应力功率谱对应的各阶谱矩可由下式计算：

$$m_k=\int_0^{+\infty} f^k S_\sigma(f)\,df \tag{1}$$

式（1）中：m_k为k阶应力谱矩；f为结构振动频率，单位：Hz；$S_\sigma(f)$为热点截面应力功率谱密度，单位：MPa^2/Hz。

0 阶谱矩对应应力信号总能量水平，2 阶谱矩对应结构振动平均频率特征，4 阶谱矩对应应力峰值波动剧烈程度。数值求解时对连续频率区间做离散分割，选取有限个频率采样点，每个采样点提取应力功率谱密度数值。离散求和替代无穷区间积分完成数值近似运算，采样区间上限取高于主轴主要共振频率的数值，截断高频低能量分量，降低计算开销。三类核心谱矩参数可以完整表征主轴随机振动的应力动态特征，可为后续疲劳峰值期望与损伤系数的求解提供完整的基础参数支撑。

4.2 兆瓦级风机主轴累积疲劳损伤计算

兆瓦级风机主轴的运行应力始终处于随机交变状态，应力幅值、应力循环频率随湍流风况实时动态变化，传统固定幅值的疲劳计算方式无法适配复杂随机工况。频域疲劳计算模型可以依托频谱参数拟合真实应力循环分布规律，有效弥补时域计数方法在宽频随机载荷下的计算偏差。工程领域适用性极强的 Dirlik 模型可适配风电回转构件的随机疲劳计算场景，主轴结构累积疲劳损伤的具体计算表达式如下：

$$D=\frac{E[p]T}{C}\Sigma_{i=1}^{n}p_iS^m \quad (2)$$

式（2）中：D 为结构累积疲劳损伤量；$E[p]$ 为单位时间应力峰值期望；T 为载荷持续作用时长；C、m 为主轴结构材料 S-N 曲线拟合常数；p_i 为对应应力幅值的出现概率；S_i 为离散化处理的应力幅值。

钢材材料参数依据机械结构疲劳设计标准选取，峰值期望参数取自谱矩计算结果。应力幅值区间划分若干离散等级，每一个等级计算对应幅值出现概率，概率分布函数依托 Dirlik 模型内置的概率密度函数生成。各项离散分量依次代入求和运算，求和结果再乘以单位时间峰值期望与载荷时长，得到给定时间区间内的总累积损伤。模型计算方式可以精准拟合主轴多频次、宽区间的应力循环特征，实现随机振动工况下结构疲劳损伤的精细化量化。

4.3 兆瓦级风机主轴疲劳寿命换算与求解

机械结构疲劳失效判定广泛采用线性累积损伤准则，结构材料的累积损伤数值达到临界阈值时，结构会萌生疲劳裂纹，经持续扩展后最终发生整体疲劳失效。恒定工况条件下的结构损伤累积具备线性变化特征，单位时间内的损伤增长速率保持稳定状态，损伤速率指标可以反向推导结构极限服役时长。主轴疲劳寿命的定量换算可通过损伤平衡关系完成求解，核心换算公式如下：

$$T_f=\frac{1}{D/T} \quad (3)$$

式（3）中：T_f 为主轴结构极限疲劳寿命，单位：s；D/T 为结构单位时间累积疲劳损伤。损伤速率参数来源于既定工况下的稳态损伤计算结果，恒定风况环境可以保障损伤速率的计算稳定性。计算过程先取固定时长载荷对应的总损伤，总损伤除以该时长得到单位时间损伤速率。损伤临界阈值取 1，阈值除以单位时间损伤速率得到以秒为单位的疲劳寿命数值[6]。数值结果可以转换为小时、年等工程常用时间单位，方便与风机设计服役年限开展对比。数值计算结果能够直观反映兆瓦级风机主轴在湍流随机振动激励下的抗疲劳性能，可为主轴结构尺寸优化、工艺改进与设备运维周期设定可靠的理论参考。

5 结论

通过兆瓦级风机主轴有限元动力学建模与随机振动疲劳分析，获取主轴固有模态、应力热点分布与应力功率谱特征。谱矩参数结合 Dirlik 模型可实现宽频随机载荷下主轴累积疲劳损伤的定量计算，应力集中区域为疲劳损伤的主要产生位置。频域分析方法可规避时域雨流计数带来的计算开销，适合风机主轴长期湍流风载工况下的疲劳评估。该分析思路可用于同类重载回转轴系构件的随机疲劳计算，未来可拓展不同风况组合下的多工况耦合疲劳分析。

参考文献：

[1] 薛伟建，王建梅，黄虎，等. 考虑预紧力影响的风机轮毂 - 主轴法兰疲劳寿命研究 [J]. 机床与液压，1-11.[2026-08-28][2026-09-15] https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wFrtWXqGzUhJ2ziE0EaJMcFRfLUa5Hvc16B4_hKLyLAIcwiR4WWFo98Vnlmeobnpjx VBWFk1uvdWejVb95szrhjBoOXysTVg1KYOiY7tY5X4PR9gno0wb7Rhgd494s0IbsPqeM_gwWW-uBSDtTu2cDjtXSEbnHYt8eYkg-_5oOAlJezuFJ2Xmw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[2] 李小军. 基于故障树分析法的风机主轴轴承抱死关键技术要点解析 [J]. 新发现，2026(02):13-15.

[3] 郑六玉，刘发炳，潘荣俊，等. 风机主轴超声波检测现场试验研究 [J]. 机械设计与制造工程，2025,54(07):101-106.

[4] 张玮彤. 风力发电机主轴状态非接触检测技术研究 [D]. 长春：长春理工大学，2025.

[5] 罗胜曦，谢东洋，解轲，等. 风机 12.9 级叶根螺栓极限及疲劳承载影响因素分析 [J]. 华中科技大学学报（自然科学版），2025,53(01):86-91,106.

[6] 宁可，王奇，陈纪光，等. 倾覆力耦合的大兆瓦风机主轴 - 齿轮箱法兰结构疲劳寿命研究 [J]. 机械设计，2024,41(07):121-127.