

基于频域分析的风机结构疲劳累积损伤 与可靠性评估方法研究

张振浩, 杨国强, 邹 超, 徐 冲

(长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为解决时域疲劳分析计算过于复杂的问题,提出一种考虑平均应力与非高斯修正的、基于频域激励谱分析的结构疲劳累积损伤与可靠性评估方法。该方法适用于工作状态可近似为线弹性且以高周疲劳为主的金属结构,在随机脉动风或类似窄带、宽带激励作用下的情形。本文以某海上风机塔筒为工程算例,计算其塔筒最大应力区域的疲劳损伤值,并将时域基准解与 Rayleigh 频域解进行对比分析。结果表明:Dirlik 频域解与基准解的偏差为 7.80%,Rayleigh 频域解则高达 17.65%,所提方法在计算精度方面更具优势。可靠性分析结果表明,风机塔筒在服役 20 a 后的失效概率为 37.19%,据此可根据相关规范要求对塔筒进行合理更换或维修。本文研究成果可为工程结构疲劳累积损伤及可靠度评估提供参考。

关键词:海上风机; 随机过程; 谱分析; 疲劳累积损伤; 可靠度评估

中图分类号: O346.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)05-0044-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.05.053

Research on cumulative fatigue damage and reliability assessment method of wind turbines structure based on frequency-domain analysis

ZHANG Zhenhao, YANG Guoqiang, ZOU Chao, XU Chong

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the problem of overly complex calculation of time-domain fatigue analysis, a method for evaluating the cumulative fatigue damage and reliability of structural fatigue based on frequency-domain excitation spectral analysis considering average stress and non-Gaussian correction is proposed. This method is suitable for metal structures whose working state can be approximated as linear elastic and dominated by high-cycle fatigue, under the action of random pulsating wind or similar narrowband and broadband excitation. A certain offshore wind turbines tower is taken as an engineering example to calculate the fatigue damage value in the area of maximum stress of the tower, while to compare and analyze the time-domain reference solution with the Rayleigh frequency-domain solution. The results show that the deviation between the Dirlik frequency domain solution and the reference solution is 7.80%, and the Rayleigh frequency-domain solution is as high as 17.65%, and the proposed method has more advantages in terms of calculation accuracy. The results of the reliability analysis indicate that the failure probability of the wind turbines tower after 20 years of service is 37.19%. Based on this, the tower can be reasonably replaced or repaired in accordance with relevant regulatory requirements. The research results can provide a reference for the assessment of cumulative fatigue damage and reliability of engineering structures.

Key words: offshore wind turbines; random processes; spectral analysis; cumulative fatigue damage; reliability assessment

收稿日期: 2025-10-23

作者简介: 张振浩(1980—),男,教授,从事结构动力可靠度理论及其应用研究。

工程结构在长期服役过程中承受随机载荷, 存在较高疲劳破坏风险。采用疲劳概率分析模型并结合可靠度方法, 能更合理地评估工程结构的安全性。

时域与频域疲劳分析方法应用广泛。时域分析计算复杂、效率低, 且对舍入和截断误差敏感^[1]; 频域分析因能直观呈现信号的频率与能量分布, 兼具计算效率高, 精度满足要求的优势, 更受关注^[2]。霍涛等^[3]建立了风机塔筒结构风致疲劳的时频分析方法, 该方法计算简便, 建议在寿命预测中考虑叶片旋转与风向效应。申政等^[4]建立了包含焊缝细节的电机壳体有限元模型, 通过对比基于中值主 S-N 曲线的计算寿命与试验实测数据, 验证了频域结构应力法在复杂焊接结构疲劳寿命预测中的准确性。刘纲等^[5]通过概率密度演化理论解决了斜拉索多级变幅疲劳计算效率低的问题, 建立了随机损伤演化模型, 并验证了其在小概率失效场景下的高精度性能。丁亮^[6]针对大跨径悬索桥面临的显著腐蚀疲劳影响, 利用神经网络模型评估了钢箱梁关键部位的可靠度指标演变, 明确了材料参数对结构寿命的影响。

为解决时域疲劳分析计算复杂的问题, 本文提出一种基于频域分析的疲劳累积损伤与可靠性评估方法。通过在 Dirlik 宽带模型中引入 Goodman 平均应力修正和非高斯修正, 结合随机损伤指数分布与 JC 法构建频域疲劳可靠度分析流程, 从而在避免大量时域响应计算的同时, 提升风机塔筒等高耸焊接钢结构疲劳寿命与可靠度评估的效率与精度, 以期为大型风机塔筒结构的疲劳寿命预测与服役安全评估提供理论依据与工程参考。

1 随机过程谱分析方法

平稳随机过程的频域特性由 Wiener-Khinchin 定理描述。平稳过程 $X(t)$ 的功率谱密度 $S_x(\omega)$ 是其自相关函数 $R_x(\tau)$ 的傅里叶变换^[7], 即

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

式中: $S_x(\omega)$ 为随机过程 $X(t)$ 的功率谱密度, $\text{MPa}^2 \cdot \text{s}$; $R_x(\tau)$ 为自相关函数, MPa^2 ; τ 为时间间隔, s ; ω 为圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; j 为虚数单位。

其逆变换为

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

式中: $R_x(\tau)$ 为自相关函数, MPa^2 。

功率谱密度为平稳随机过程在频域中的统计表示提供了重要信息。谱矩 m_0 、 m_1 、 m_2 和 m_4 可由功率谱密度得到^[7], 即

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i G(f) df = \sum_{k=1}^M f_k^i G_k(f) \delta_f \quad (3)$$

式中: f 为频率, Hz ; i 为谱矩的阶数, 通常取 0、1、2、4 等整数; $G(f)$ 为单边功率谱密度函数, 对于应力随机过程, 其物理意义为单位频率内的应力能量分布, $\text{MPa}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$; M 为数值积分时的频率离散点总数; k 为离散求和时的频率点序号; f_k 为第 k 个离散频率点的值, Hz ; δ_f 为数值计算时的频率间隔, Hz 。

RICE 通过谱矩推导出均方根和峰值期望频率的计算公式, 分别如式(4)、(5)所示。

均方根:

$$\sigma_{\text{rms}} = \sqrt{m_0} \quad (4)$$

峰值期望频率:

$$v_p = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (5)$$

随机过程的谱宽度参数 a_i 可通过公式(6)计算:

$$a_i = \frac{m_i}{\sqrt{m_0 m_{2i}}} \quad (6)$$

取 $i=2$, 可得不规则因子 α_2 , 通常用 α_2 判断宽、窄带随机过程, 其取值范围为 $[0, 1]$; α_2 越大, 随机过程在频域中的能量分布越集中(频带越窄), 反之, α_2 越小, 频带越宽^[8]。

2 基于激励过程谱分析的结构疲劳可靠性分析方法

2.1 频域疲劳累积损伤分析方法

基于 Miner 线性累积损伤准则和 Basquin 方程, 可推导得到随机应力循环下的疲劳累积损伤指数^[7], 即

$$D = \frac{n(T)}{C} \int_0^{\infty} s^m p_s(s) ds = \frac{n(T)}{C} E(S^m) \quad (7)$$

式中: D 为随机变量, 服从对数正态分布或 Weibul 分布; $n(T)$ 为时长 T 内发生的应力循环总

次数; T 为分析时长, s; m 、 C 均为材料疲劳试验常数; s 为随机应力幅值, MPa; $p_s(s)$ 为应力幅值的概率密度函数, MPa^{-1} ; $E(S^m)$ 为应力幅值 m 次方的数学期望。

当应力时程为窄带特征时, 应力幅值的概率密度函数可近似为 Rayleigh 分布^[7], 即

$$p(S) = \frac{S}{4 m_0} e^{-\frac{S^2}{8 m_0}} \quad (8)$$

式中: m_0 为应力功率谱的 0 阶矩。

将式(8)代入式(7), 可得基于 Rayleigh 分布的疲劳损伤累积损伤分析方法, 即

$$D_{NB} = \frac{v_+ T}{C} (\sqrt{2m_0})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) \quad (9)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; v_+ 为正向期望跨越率, Hz。

对于宽带应力时程, 其幅值概率密度函数通常采用 Dirlik 分布^[9], 该模型由 Rayleigh 分布与指数分布叠加构成, 表达式为

$$P_{\text{Dirlik}}(S) = \frac{1}{\sqrt{m_0}} \left[\frac{D_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}} \right] \quad (10)$$

式中: $D_1 = \frac{2(x_m - \alpha_2^2)}{1 + \alpha_2^2}$; $D_2 = \frac{1 - \alpha_2 - D_1 + D_1^2}{1 - R}$;

$D_3 = 1 - D_1 - D_2$; $Z = \frac{S}{\sqrt{m_0}}$; $x_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$; $R =$

$\frac{\alpha_2 - x_m - D_1^2}{1 - \alpha_2 - D_1 + D_1^2}$; $Q = \frac{1.25(\alpha_2 - D_3 - D_2 R)}{D_1}$; Z 为

归一化幅值; Q 为质量因子; R 为 Dirlik 方法定义参数; D_i 为第 i 阶段累积损伤量; x_m 为平均频率; α_2 为不规则因子; m_i 为第 i 阶惯性矩; S 为应力范围。

将式(10)代入式(7), 可得基于 Dirlik 分布的疲劳累积损伤模型, 即

$$D_{\text{DK}} = \frac{v_p T}{C} m_0^{m/2} [D_1 Q^m \Gamma(1+m) + 2^{m/2} \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) (D_2 + R + D_3)] \quad (11)$$

式中: D_{DK} 为基于 Dirlik 模型计算的疲劳累积损伤值; v_p 为峰值期望频率, Hz; $D_1 \sim D_3$ 、 Q 、 R 均为由式(10)定义的 Dirlik 模型系数。

2.2 平均应力修正和非高斯修正方法

2.2.1 平均应力修正

现有频域疲劳分析方法未充分考虑平均应力影响, 易导致寿命预测偏差较大。NIESŁONY 提出一种平均应力修正方法^[10], 通过引入平均应力修正系数 K_{G0} 对功率谱密度进行修正, 修正系数表达式为

$$K_{G0} = \left(1 - \frac{S_0}{S_b}\right)^{-1} \quad (12)$$

式中: S_b 为材料的极限强度, MPa; S_0 为循环应力平均值, MPa。

修正后的应力功率谱密度为

$$G_{\sigma R}(f) = K_{G0}^2 G_{\sigma}(f) \quad (13)$$

式中: $G_{\sigma}(f)$ 为零均值应力时程 $X(t) - X_m$ 的功率谱密度, $\text{MPa}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

2.2.2 非高斯修正

频域疲劳分析通常基于高斯性假设, 而实际载荷常为非高斯信号, 因此需进行非高斯修正。非高斯修正系数的计算如式(14)、(15)所示^[11]。

$$\lambda_{\text{ng}} = \exp\left[\frac{m^{3/2}}{(0.156 + 0.416 k_u) \pi} \left(\frac{k_u - 3}{5}\right)\right] \quad (14)$$

$$k_u = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [X(t_i) - \mu]^4}{\sigma^4} \quad (15)$$

式中: λ_{ng} 为非高斯疲劳损伤修正系数; k_u 为随机过程的峰度值; n 为时间序列的数据点数; $X(t_i)$ 为第 i 个时间点的应力值, MPa; μ 为时间序列的均值, MPa; σ 为时间序列的标准差, MPa。

修正后的频域疲劳损伤可表示为

$$D_R = \lambda_{\text{ng}} D_{\text{DK}} \quad (16)$$

将式(14)、(15)代入式(16), 可得非高斯修正后的疲劳累积损伤模型:

$$D_R = \lambda_{\text{ng}} \frac{v_p T}{C} m_0^{m/2} [D_1 Q^m \Gamma(1+m) + 2^{m/2} \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) (D_2 + R + D_3)] \quad (17)$$

式中: D_R 为考虑非高斯特性修正后的结构疲劳累积损伤值; v_p 为峰值期望频率, Hz。

2.3 频域疲劳可靠性分析方法

基于可靠度理论, 根据式(17)得到结构在 $[0, T]$ 内的疲劳可靠度:

$$P\{D_0 - \lambda_{ng} D > 0\} = P\{D_0 - \exp$$
$$\left[\frac{m^{3/2}}{(0.156 + 0.416k_u)\pi\left(\frac{k_u - 3}{5}\right)}\right]\frac{v_p T}{C}m_0^{m/2}[D_1 Q^m \Gamma(1 +$$
$$m) + 2^{m/2} \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right)(D_2 + R + D_3)] > 0\}$$
$$(18)$$

式中： D_0 为实际工程结构能够承受的极限疲劳损伤值，通常视为一个随机变量；减号右侧项 $\lambda_{ng} D$ 为结构在服役时长 T 内考虑非高斯修正后的累积疲劳损伤值； $P(\cdot)$ 为事件发生的概率函数。

3 风机筒身受弯最大应力有限元分析

3.1 有限元模型

以一台轮毂高度为 80 m 的风机为工程算例。有限元模型中，塔筒采用三段变截面钢结构，底部固结于基础，各部件均采用 Tie 连接；叶片与轮毂采用 C3D10 单元划分，机舱与塔筒采用 C3D8R 单元划分。主要结构参数如表 1~3 所示，材料参

数如表 4 所示，整体网格划分如图 1 所示。



图 1 整体网格划分

3.2 模态分析及模型验证

忽略衰减较快的高阶模态后，风机前四阶振型分析结果如表 5 和图 2 所示。由表 5、图 2 可知：低阶振型主要表现为弯曲变形与摆动。

表 6 为风机前 4 阶固有频率与叶轮激励频率和的相对差值。由表 6 可知：各阶固有频率与叶轮旋转频率的差异均大于 10%，塔筒与叶轮不会发生共振，表明风机有限元模型合理。

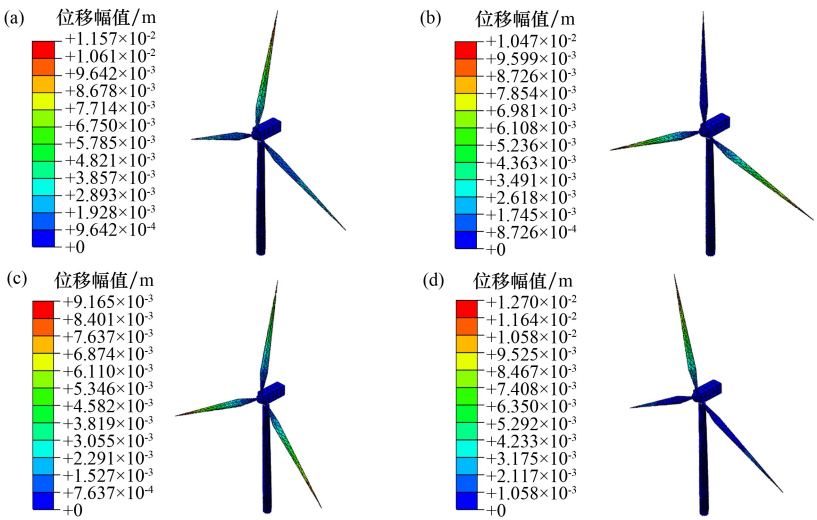
表 1 风机主要结构参数

叶片数/个	功率/MW	叶片长度/m	风轮直径/m	单个叶片重量/t	机舱尺寸/m	机舱重量/t	轮毂重量/t
3	5	55	115	13.5	13.0 × 5.0 × 5.6	131.427	27.783

表 2 风机各段塔筒几何参数

塔筒	高度	底部外直径	顶部外直径	壁厚
下段	14.860	4.5	4.50	0.05
中段	28.315	4.5	3.90	0.05
上段	32.102	3.9	3.07	0.02

m



不同阶数模态振型：(a) 一阶；(b) 二阶；(c) 三阶；(d) 四阶

图 2 前 4 阶模态振型

表 3 钢材 D2 硬化曲线

应力/MPa	应变/%
742	0
785	0.032 8
842	0.070 3
893	0.127 4
927	0.168 3
972	0.224 6
1 068	0.255 3

表 4 材料属性

材料名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	标准值/MPa	
				抗拉 强度	抗压 强度
C40 混凝土	2 500	32.5	0.2	2.39	26.8
D2 钢	7 850	200.0	0.3	730.00	768.0

表 5 前 4 阶固有频率

阶数	固有频率
1	0.789 1
2	0.852 3
3	0.862 3
4	1.255 3

表 6 前 4 阶相对差

阶数	f	$3f$
1	231.15	10.38
2	257.66	19.22
3	261.86	20.62
4	426.77	75.59

3.3 风荷载数值模拟

3.3.1 叶片所受风荷载

强风工况下,为保护系统安全,叶片处于停机状态,此时可假设叶片静止,采用简化公式计算风荷载^[12]:

$$F_n = \frac{1}{2} \rho V_{\max} C_l A_b B \quad (19)$$

式中: ρ 为空气密度,取 1.184 kg/m^3 ; $V_{\max}$ 为作用在叶轮中心处的最大风速, m/s ; C_l 为风轮推力系数,取 1.6; A_b 为叶片的投影面积, m^2 ; B 为叶片数目。

3.3.2 塔筒所受风荷载

塔筒风荷载可按《建筑结构荷载规范》

(GB 50009—2012)对该类构筑物的规定计算^[13],公式为

$$\omega_k = \beta \mu_s \mu_z \omega_0 \quad (20)$$

式中: ω_k 为高度 z 处的风荷载标准值, kN/m^2 ; μ_z 为风压高度变化系数; μ_s 为风荷载体型系数,对圆截面构筑物整体计算时取 1.0; β_z 为风振系数; ω_0 为基本风压, kN/m^2 ; $\omega_0 = V^2/1\ 600$, 其中 V 为风速, m/s 。

因工程为海上风力发电机(属 A 类地貌),风压高度变化系数 μ_z 计算公式:

$$\mu_z(z) = (0.1z)^{0.24} \quad (21)$$

风振系数计算公式:

$$\beta_z = 1 + \frac{\xi V \phi_z}{\mu_z} \quad (22)$$

式中: ξ 为脉动增大系数,取 3.0; ϕ_z 为振型系数,其计算公式:

$$\phi_z = \frac{6z^2 H^2 - 4z^3 H + z^4}{3H^4} \quad (23)$$

式中: H 为结构总高度, m 。

3.3.3 风荷载模拟

在塔筒高度为 11、22、33 m 处设置等效荷载点,如图 3 所示。基于指数风速剖面模型,以 10 m 高度处风速为 8 m/s 为基准^[14],计算各点风速分别为 8.09 、 8.79 、 9.23 m/s 。

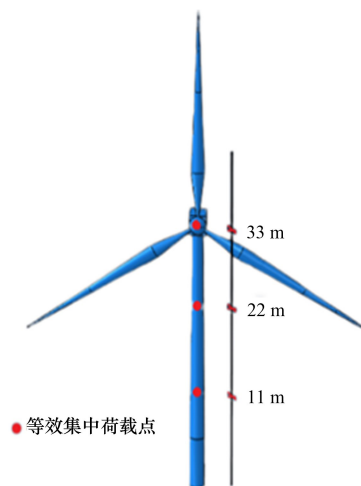


图 3 等效集中荷载点

基于文献 [14] 的方法与表 7 参数,在 22 m 高度处生成脉动风速时程,将其与平均风速叠加得到总风速时程,如图 4 所示,再根据式 (19) ~ (23) 计算得该位置的风荷载时程,如图 5 所示。

表 7 风速模拟参数取值

截断频率/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率离 散点数	频率间隔/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	持续时 间/s	时间步 长/s	10 m 处平均 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	地面粗糙 长度/m	湍流积分 尺度/m
4π	1 600	$4\pi/1\ 600$	600	0.1	15	0.03	15

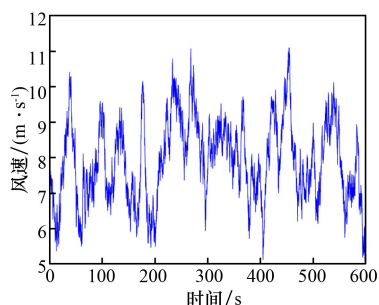


图 4 总风速时程曲线图 (Z 为 22 m 处)

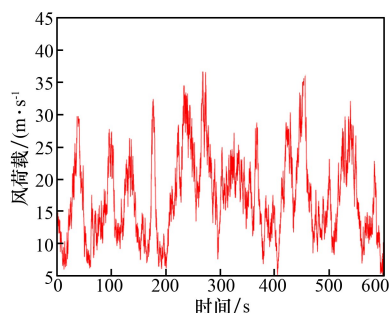


图 5 风荷载时程曲线图 (Z 为 22 m 处)

3.4 动力响应分析

瞬态模态动力学分析选取 Rayleigh 阻尼模型, 根据表 5 中风机的一阶和二阶固有频率, 计算相应的 Rayleigh 阻尼系数 α 和 β [14-15]:

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (24)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (25)$$

式中: ξ 为结构振动阻尼比, 根据《高耸结构设计规范》(GB 50135—2019)取 0.05; ω_1 、 ω_2 分别为一阶和二阶模态振型的圆频率, $\omega_i = 2\pi f_i$; f_i 为风机的第 i 阶固有频率。

将表 5 中风力发电机的一阶和二阶固有频率代入式 (24)、(25), 计算得到 α 、 β 分别为 0.250 511、0.009 938。

有限元分析结果显示, 塔筒最大等效应力 (von Mises 应力, 简称“最大应力”) 区域集中于塔筒下端 (图 6), 该区域与实际工程中常见的最大应力区域位置一致。基于此, 提取该区域的应力时程曲线 (图 7), 计算其应力均值和标准差,

结果分别为 71.7、4.33 MPa。

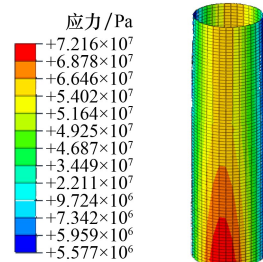


图 6 塔筒下端应力云图

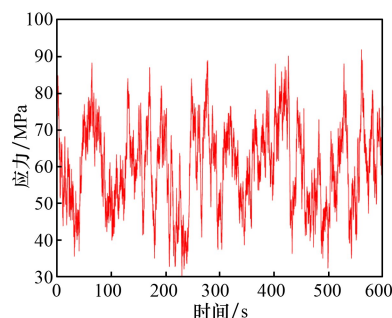


图 7 塔筒下端最大应力区域的应力时程

4 基于谱分析的风机疲劳累积损伤及可靠性评估

4.1 平均应力修正系数和非高斯修正系数计算

风机塔筒的极限拉伸强度为 730 MPa, 平均应力为 71.7 MPa, 将其代入式 (12) 计算, 得到平均应力修正系数为 1.109。此时, 式 (13) 表示为

$$G_{\sigma R}(f) = 1.23 G_{\sigma}(f) \quad (26)$$

基于应力时程计算功率谱密度, 经式 (26) 修正后得到修正功率谱密度曲线, 图 8 所示。通过式 (3) 和 (6) 计算谱参数, 结果如表 8 所示。

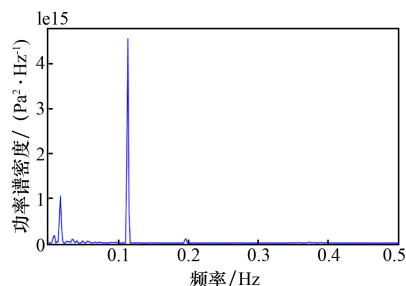


图 8 修正后的应力功率谱密度曲线

表 8 风机最大应力处对应的谱参数

m_0	m_1	m_2	m_4	α_1	α_2
2.98×10^5	7.38×10^3	2.33×10^4	2.06×10^7	0.09	0.01

$S-N$ 曲线参数及非高斯修正系数 m 和 K 取值如表 9 所示。通过式 (17) 求得 600 s 内修正疲劳损伤值为 1.31×10^{-6} 。

表 9 疲劳损伤值计算参数

m	K	v_p	k_u	λ_{ng}
3	1.036×10^{12}	29.731	3.445	1.097

4.2 疲劳累积损伤评估

当分析时长为 600 s 时, 修正后的疲劳损伤值为 1.31×10^{-6} 。基于此, 可以求得风机结构在随机风速作用下 1 d 内的疲劳累积损伤为 1.88×10^{-4} 。以时域疲劳累积损伤分析方法的计算结果为基准解, 根据式 (27) 计算其他方法的相对误差, 结果如表 10 所示。

$$\delta = \frac{|D_T - D_F|}{D_T} \quad (27)$$

式中: D_T 为时域疲劳累积损伤分析方法计算得到的疲劳损伤值; D_F 为两种频域疲劳累积损伤分析方法计算得到的损伤值。

表 10 不同方法计算的 1 d 的疲劳损伤

疲劳累积损伤分析方法	疲劳损伤	相对误差/%
时域方法	2.04×10^{-4}	0
Dirlik 频域方法(宽带)	1.88×10^{-4}	7.80
Rayleigh 频域方法(窄带)	1.68×10^{-4}	17.65

4.3 风机疲劳可靠性分析

4.3.1 频域疲劳可靠性分析方法

结构的随机损伤指数 D 通常服从 Weibull 分布或对数正态分布^[16]。假设疲劳损伤指数服从 Weibull 分布, 其概率密度函数^[17]为

$$f_D(d; \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{d}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-(d/\eta)^\beta}, d \geq 0 \quad (28)$$

式中: η 为尺度参数; β 为形状参数。Weibull 分布的均值和方差分别为

$$\mu = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (29)$$

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right)^2 \right] \quad (30)$$

采用基于 Dirlik 分布的疲劳累积损伤分析方法, 对海上风机结构最大应力区域在 1 d 内疲劳损

伤值 D_R 进行大量计算, 得到其均值为 1.89×10^{-4} , 方差为 1.44×10^{-4} 。将均值和方差代入式 (29)、(30), 计算得到 Weibull 分布尺度参数 η 为 1.77×10^{-4} , 形状参数 β 为 0.874。

将 η 和 β 代入式 (28), 得到结构随机损伤指数的概率密度函数:

$$f_{D_R}(d) = 4933 \left(\frac{d}{1.03 \times 10^{-4}} \right)^{-0.609} e^{-(d/1.03 \times 10^{-4})^{0.391}},$$

$$d \geq 0 \quad (31)$$

以 1 d 内的疲劳损伤所建极限状态方程, 如式 (32)。当 D_R 小于 D_0 时, 结构安全; 当 D_R 大于 D_0 时, 结构失效。 $Z(T) > 0$ 的概率即为结构在时刻 T 的疲劳可靠度。

$$Z(T) = D_0 - D_R(T) \quad (32)$$

式中: D_0 为极限疲劳损伤值, 服从均值为 1、方差为 0.3 的对数正态分布^[17]。

根据式 (32), 采用 JC 法计算风机塔筒下端最大应力区域的疲劳可靠度, 结果如图 9 所示。

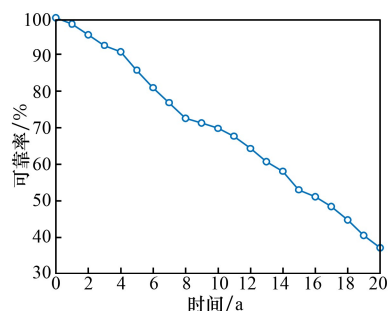


图 9 风机塔筒最大应力区域的疲劳可靠度

4.3.2 时域疲劳可靠性分析

为验证基于 Dirlik 分布的频域疲劳累积损伤分析的正确性, 基于文献 [14] 的时域疲劳累积损伤分析方法对风机结构进行疲劳可靠性分析, 其主要步骤如下。

(1) 在 ABAQUS 瞬态模态动力分析结果中, 提取风荷载作用下风机塔筒下端的应力时程。

(2) 运用 Goodman 修正公式将应力幅值转换为等效应力幅值。

$$S_e = K_{Go} \cdot S \quad (33)$$

式中: K_{Go} 为 Goodman 修正系数, 通过式 (12) 计算。

(3) 对等效应力幅值采用雨流计数法, 计算得到应力幅值谱。

(4) 在 MATLAB 中采用最小二乘法对应力幅值谱进行 Weibull 分布拟合, 得到其形状参数 a 与尺度参数 b 。该拟合将雨流法获得的离散应力谱转化为连续概率模型, 更准确描述载荷分布的整体趋势与统计规律。

(5) 根据式(34)、(35)计算 1 d 总损伤值的期望和方差。

$$\mu[D(n)] = E(\sum D_i) = n \cdot \frac{a^m}{K} \Gamma\left(1 + \frac{m}{b}\right) \quad (34)$$

$$\sigma^2[D(n)] = D(\sum D_i) = n^2 \cdot \frac{a^{2m}}{K^2} \Gamma\left(1 + \frac{2m}{b}\right) - n^2 \cdot \mu_{D_i}^2 \quad (35)$$

式中: $D(n)$ 为经过 n 次应力循环后的总累积损伤值; m 和 K 为 $S-N$ 曲线参数; μ_{D_i} 和 $\sigma_{D_i}^2$ 分别为应力幅 S_i 下损伤指数 D_i 的均值和方差; $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数, 表达式为

$$\Gamma(x) = 2 \int_0^{+\infty} t^{2x-1} e^{-t^2} dt \quad (36)$$

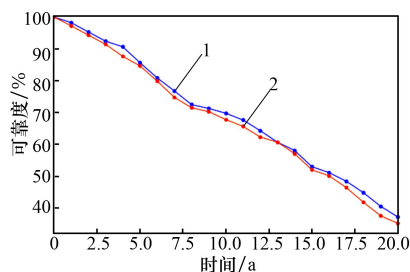
(6) 根据极限状态方程式(37), 在 MATLAB 中采用 JC 法计算得到风机塔筒结构最大应力区域的疲劳可靠度。

$$Z(T) = D_{cr} - D(T) \quad (37)$$

式中: D_{cr} 为临界损伤阈值, 服从均值为 1、方差为 0.3 的对数正态分布; $D(T)$ 为服役期内的累积疲劳损伤值, 服从均值为 $\mu(D(n))T$ 、方差为 $\sigma^2[D(n)]T^2$ 的正态分布; 当 $D_{cr} < D$ 时结构安全, 当 $D_{cr} > D$ 时结构失效; $Z(T) > 0$ 的概率即为结构在时刻 T 的疲劳可靠度。

4.3.3 疲劳可靠性频域分析方法与时域分析方法结果对比

频域方法与时域方法对比结果如图 10 所示。由图 10 可知: 基于 Dirlik 分布的频域疲劳可靠度



1—Dirlik 分布频率方法; 2—时域方法。

图 10 风机塔筒最大应力区域的疲劳可靠度

结果与时域疲劳可靠度结果吻合良好, 验证了该频域方法用于结构疲劳分析与可靠度评估的有效性。

5 结 论

(1) 将模拟得到的随机风速作为激励输入, 建立了从风荷载模拟到结构疲劳可靠度评估的一体化频域分析框架。

(2) 频域疲劳分析方法具有计算效率高、精度满足要求的优势。其中, 宽带 Dirlik 频域法与时域法疲劳损伤计算结果的相对误差为 7.80%, 而窄带 Rayleigh 频域法的相对误差达 17.65%, 这表明实际应力过程更符合宽带特征。

(3) 宽带 Dirlik 频域法与时域法的可靠度结果吻合良好, 且计算高效。分析结果表明, 随着服役年限增加, 塔筒疲劳可靠度呈逐渐下降趋势, 这提示在设计寿命后期需合理制定基于可靠度分析的检修与更换策略。

参考文献:

- [1] 赵达, 蒋永旭, 罗良宝, 等. 船用翼型风帆结构疲劳评估方法研究[J]. 中国设备工程, 2024(14): 257-261.
- [2] 詹惠琴, 古天祥, 习友宝, 等. 电子测量原理(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [3] 霍涛, 童乐为, 郭志鑫, 等. 风力机钢塔筒结构风致疲劳分析方法研究[J]. 工程力学, 2023, 40(8): 77-89.
- [4] 申政, 方吉, 汤黎明, 等. 基于频域结构应力法的牵引电机结构振动疲劳分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 814-821.
- [5] 刘纲, 唐伟, 高凯. 基于概率密度演化的斜拉索多级变幅时变疲劳可靠度分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 191-197.
- [6] 丁亮. 考虑材料腐蚀的大跨径钢箱梁悬索桥疲劳可靠度分析[J]. 交通科技, 2024(1): 76-80.
- [7] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [8] DIRLIK T, BENASCIUTTI D. Dirlik and tovo-benasciutti spectral methods in vibration fatigue: A review with a historical perspective[J]. Metals, 2021, 11(9): 1333.
- [9] 李永生, 陈子豪, 李丰润, 等. 非高斯随机振动疲劳寿命评估方法研究[J]. 机械, 2025, 52(3): 51-59.
- [10] 张建勇, 李志川, 齐磊, 等. 考虑 Goodman 修正的浮式

- 风力机系泊线疲劳损伤分析[J]. 太阳能学报,2025,46(9):116-121.
- [11] CIANETTI F, PALMIERI M, BRACCESI C, et al. Correction formula approach to evaluate fatigue damage induced by non-Gaussian stress state[J]. Procedia Structural Integrity, 2018,8:390-398.
- [12] 风力发电机组设计要求:GB/T 18451.1—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.
- [13] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [14] WANG J X, LIU Y, ZHANG Z H. Fatigue damage and reliability assessment of wind turbine structure during service utilizing real-time monitoring data[J]. Buildings, 2024,14(11):3453.
- [15] 高耸结构设计规范:GB 50135—2006[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [16] BLACHA L. Non-linear probabilistic modification of miner's rule for damage accumulation[J]. Materials, 2021,14(23):7335.
- [17] 王德莉,李晨莹,吴炳增,等. 联合噪声驱动下耦合记忆阻尼 Rayleigh 振子族的节律模式过渡分析[J]. 力学学报,2024,56(8):2381-2396.