

大型风电机组塔筒动力学特性与寿命损耗研究进展

樊昂¹, 李录平^{1*}, 张世海², 欧阳敏南¹, 文贤馑², 陈尚年¹

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南省长沙市 410114;

2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州省贵阳市 550002)

A Review on Dynamic Characteristics and Life Loss of Large Wind Turbine Towers

FAN Ang¹, LI Luping^{1*}, ZHANG Shihai², OUYANG Minnan¹, WEN Xiankui², CHEN Shangnian¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114,

Hunan Province, China; 2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd.,

Guiyang 550002, Guizhou Province, China)

摘要: 作为风电机组的重要组成部分, 塔筒工作环境恶劣、受力复杂, 所承受的载荷具有高度的随机性与多变性, 其动态特性直接影响着风电机组的安全运行, 这对塔筒的动力学特性、寿命损耗特性以及稳定性都提出了更高的要求。阐述了大型风力机塔筒动力学特性和结构寿命损耗研究的工程背景, 介绍了大型风电机组塔筒结构与主要承受载荷的特点, 整理了目前较为常见的塔筒结构模型的建立方法和工况模拟方法, 综述了塔筒结构模态分析、动态响应特性分析、屈曲稳定性分析、疲劳损伤分析等研究进展, 总结了国内外数值模拟技术与研究成果, 并对未来塔筒动态特性研究方向进行了展望, 旨在为推进本研究领域的发展提供参考。

关键词: 风力机; 塔筒; 动态特性; 寿命损耗; 模态分析; 动态响应; 屈曲; 疲劳

ABSTRACT: As an important component of the wind turbine, the tower has a harsh working environment and complex stress, and the load it bears is highly random and variable. Its dynamic characteristics directly affect the safe operation of the wind turbine. Higher requirements are placed on the dynamic characteristics, life loss characteristics and stability of tower. The engineering background of wind turbine tower dynamic characteristics and structural loss research were described, the tower structure and main load characteristics of large-scale wind turbines were introduced, the more common tower structure model establishment methods and working condition simulation methods were sorted out, and the research progress of tower structure modal

analysis, dynamic response analysis, buckling stability analysis, and fatigue damage analysis were summarized. Additionally, the domestic and foreign numerical values of simulation technology and the research results were reviewed. A preliminary prospect for the future research direction of tower dynamic characteristics was also made, aiming to provide some references for the further development of this research field.

KEY WORDS: wind turbine; tower; dynamic characteristics; life loss; modal analysis; dynamic response; buckling; fatigue

0 引言

塔筒是大型水平轴风力发电机组的重要部件。风力发电机组工作环境复杂, 塔筒所承受的载荷具有高度的随机性与多变性, 这对其结构性能产生很大影响。随着塔筒高度的增加, 其结构的刚度、强度和稳定性的要求也会随之提高。由于薄壁锥形塔筒分段安装的特性, 其自身存在大量结构缺陷, 特别是连接处, 在交变载荷与极端载荷的作用下, 更易遭受破坏。

塔筒的主要失效形式为刚度不足、强度不足、失稳和连接处失效。目前, 针对塔筒的研究主要围绕模态分析、动态响应特性分析、结构损伤分析与状态监测等方面展开。

风力发电机组塔筒性能直接关系到风力机能否安全稳定地运行, 一旦塔筒出现故障, 轻则停机检修, 影响风电机组的效率, 重则会出现倒塔等严重事故, 造成巨大经济损失。据统计, 仅

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903604)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFB0903604).

2020年就发生了数起风力机塔筒事故：2020年1月2日，黑龙江某风电场29号机组发生倒塔事故；2020年7月17日，河北某风电场11号风机由于第1节与第2节塔筒连接螺栓断裂而发生一起倒塔事故等，因此有必要对塔筒结构动力学特性与寿命损耗进行研究。

1 塔筒结构特点与载荷特性

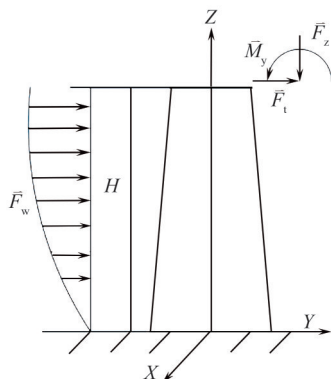
1.1 风力机塔筒结构特点

目前流行的塔筒结构形式有锥筒型钢制塔筒、混凝土塔筒和钢-混复合型塔筒。较为常见的钢制塔筒为薄壁型变直径高耸结构，由多段筒节经法兰螺栓连接而成，与基础相连的底部筒节设有门洞，塔筒内部设有爬梯、平台等装置。由于其安装特性，钢制塔筒具有大量结构缺陷，在复杂载荷作用下极易发生损坏。因此众多学者开展了塔筒结构优化设计的研究，并提出多种优化设计方案^[1-2]。

相比钢制塔筒，混凝土塔筒、钢-混复合型塔筒具有更好的抗压能力，研究表明，超过100 m的塔筒采用混凝土塔筒性能更好^[3-4]。但这2种塔筒安装过程复杂，目前众多学者已对其进行结构设计优化^[5]。

1.2 风力机塔筒载荷特性

塔筒载荷模型如图1所示。塔筒承受载荷主要有：叶轮与机舱重力、顶部质量引起的偏心弯矩、塔筒风压载荷、水平轴向推力。



H —塔筒高度； M_y —偏心弯矩(kN·m)
 F_t —水平轴向推力(kN)； F_z —叶轮与机舱重力(kN)；
 F_w —塔筒风压载荷(kN)。

图1 塔筒载荷模型图

Fig. 1 Model diagram of tower load

叶轮与机舱重力^[6]：

$$F_z = (m_r + m_z)g \quad (1)$$

式中： m_r 、 m_z 分别是叶轮与机舱质量，kg； g 为重力加速度。

偏心弯矩^[6]：

$$M_y = F_z e \quad (2)$$

式中 e 为叶轮与机舱重力偏心距，m。

塔筒风压载荷^[7]：

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_t v^2 C_c \quad (3)$$

式中： ρ 为空气密度，kg/m³； A_t 为塔筒受风面积，m²； v 为平均风速，m/s； C_c 为阻力系数。

水平轴向推力^[7]：

$$F_t = \frac{1}{2} \rho A_b v^2 C_t \quad (4)$$

式中： A_b 为掠叶面积，m²； C_t 为推力系数。

式(3)、(4)中风速 v 具有时间上的随机性与空间上的不均匀性，当塔筒高于100 m时影响更为显著^[8]。目前常用威布尔分布函数来描述风速随时间的变化^[9]；用垂直风廓线来表示风速随塔筒高度的变化^[10]，分别有学者将其考虑为沿塔筒高度均匀分布^[11]、分段分布^[12]和曲线分布^[13]。Enjun等^[14]根据IEC和JG2010标准，评估了风机塔筒风荷载的必要参数。

此外作用于塔筒的还有控制系统载荷、海浪载荷、冰载荷、地震载荷等。不同工况下塔筒承受载荷也会有变化^[15]。

2 塔筒结构动力学特性分析

2.1 塔筒结构模态特性分析

风机运行频率要避开塔筒固有频率 $f_0 \pm 10\%$ 区域。通过模态分析可以避免因固有频率与激振力频率相同而发生共振，为结构设计提供技术指导。

2.1.1 塔筒模型的建立

目前常用GH Bladed或ANSYS有限元软件建立塔筒模型。常见的塔筒简化模型有2种：一种是一端固定的自由振动悬臂梁模型；另一种是底端固定、顶端自由的变截面薄壁圆筒模型。

2020年Chen等^[16]提出基于叶素理论和气动载荷线性化的塔筒-转子耦合建模方法。塔筒顶部设备刚度比塔筒刚度大很多，因此可以简化为质量

单元节点。2021年Bozdogan等^[17]将塔筒建模为等效变截面连续弯曲梁,以塔顶集中质量点代替叶片质量。

在建模时基础的质量和刚度也应充分考虑。陈法波^[18]建立了风机基础结构体系模型,对基础结构进行模态分析。Adhikari等^[19]将地基考虑为弹性支撑,建立弹性基础模型;Bazeos等^[20]在塔基底端和地基接触面设置弹簧-阻尼系统来模拟塔筒基础。Filho等^[21]建立了八自由度连续梁模型,将叶片作为两自由度系统连接在质量弹簧表示的机舱,并在底部加双向旋转刚度的弹簧来模拟土壤-结构耦合。

2.1.2 塔筒模态分析

塔筒的 n 个自由度振动微分方程^[22]为

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (5)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为塔筒的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 \mathbf{x} 分别为加速度向量、速度向量、位移向量; \mathbf{F} 为外载荷向量。若塔筒处于自由振动,忽略系统阻尼与外力,得到固有频率方程式^[22]:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (6)$$

式中 ω 为自振频率。

2021年Bozdogan等^[17]提出微分变换方法将自由振动微分方程转换为代数方程,并借助微分变换方法获得频率和振型。

塔筒是对称结构,每相邻两阶固有频率和模态振型基本对称^[23]。2011年马人乐等^[24]发现机头载荷作用会使塔筒产生预应力和预变形,导致塔筒刚度变化,进而影响塔筒模态频率与振型。2019年黄中华等^[25]在获得预应力的基础上对风机进行模态分析。

土壤对塔筒的动态特性影响较大。2012年Harte等^[26]建立了弹簧-阻尼模型来模拟土壤-基础动态交互作用,发现塔筒自振频率受土壤影响较大。2020年Abdullahi等^[27]提出将最大横向土壤阻力和土壤深度使用多项式方程关联,从而取代了弹簧模型。2021年Filho等^[21]研究了运行条件、土壤-结构耦合与转子速度3种条件对塔筒性能的影响。

2012年潘萍萍等^[28]计算了考虑流固耦合作用

下风力机塔筒的固有频率。2014年谭季秋等^[29]发现流固耦合场对塔筒模态振型的影响较小,对固有频率影响较大。2021年Karin等^[30]研究了风载荷、波浪载荷与动态弯矩对塔筒一阶固有频率的影响程度。

2.2 塔筒结构动态响应特性分析

风载荷与地震载荷的作用会对塔筒动态性能造成很大的影响,甚至会造成结构永久性破坏,因此进行塔筒结构动态响应特性分析是十分重要的。

2.2.1 塔筒风振响应特性

塔筒是风敏感型结构,非线性较为显著,风振响应计算应采用时域分析。风绕塔筒流动可以近似视为圆柱绕流脱体,涡系脱落是引起塔筒振动的原因^[22],应分析横风向脱涡频率,避免共振。一旦脱涡频率达到自振频率,便会出现锁定现象。

风振频率状态由雷诺数分为3种^[31]:

$$Re = \begin{cases} 3 \times 10^2 \leq Re < 3 \times 10^5, & \text{亚临界} \\ 3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6, & \text{超临界} \\ Re \geq 3.5 \times 10^6, & \text{极超临界} \end{cases}$$

考虑到塔筒尺寸与风场数据,研究风振特性主要在超临界区和极超临界区。脱涡频率^[22]可由式(7)计算得到:

$$S = \varrho d / (2\pi v) \quad (7)$$

式中: S 为Strouhal数,圆柱体取0.2; ϱ 为脱涡频率,Hz; d 是塔筒直径,m。

为综合考虑风速和风向对塔筒的影响,研究者们^[32-33]基于气象观测数据,确定风机位置附近的风速、风向联合分布函数。

2019年苏捷等^[34]研究发现塔筒产生的脱涡会影响下风区的流场特性,且塔影效应受塔筒直径影响。2020年Ghandour等^[35]通过实验进行塔影效应研究,使用风速计和流量可视化技术来探索塔对周围流场的影响。2021年Guo等^[36]研究了风电机组多结构耦合下的随机风荷载响应特性,发现各柔性结构耦合作用使得塔顶响应多15%。

2021年Naung等^[37]提出应用非线性频域求解方法,进行考虑流固耦合的空气动力学分析,相比常规时域分析可以大幅降低计算量。

2.2.2 塔筒地震动力学响应分析

塔筒属于高耸柔性结构，在地震波的影响下反应剧烈，会产生巨大的剪力和弯矩。研究者们常采用地震反应谱来表示塔筒结构与地震特性之间的关系^[38]。宋波等^[39]通过研究3种不同地震动对结构动力响应的影响，绘制了地震动加速度反应谱。

研究者们发现地震与气动载荷的耦合作用会使动力学响应更加剧烈，2011年Smith等^[40]将风轮上的非定常气动载荷简化为时程变化推力，研究了塔筒在风力和地震耦合作用下的等效应力分布情况。2016年Asareh等^[41]计算了叶片气动力并施加在有限元模型中，分析了塔筒结构的地震响应与损坏。

2014年季亮等^[42]基于5 MW风电机组的数据进行了有限元反应谱分析，研究了多种塔筒剪力和弯矩计算公式适用性。2021年Huang等^[43]提出了地震载荷作用下水、海冰和塔筒动态相互作用的简化计算模型，研究了海冰与海水对塔筒抗震性能的影响。

近年来有研究者^[44-45]基于FAST预留数据接口自编译程序开发地震载荷计算模块，即NREL Seismic，使FAST具备了地震分析能力，逐渐成为一种常用的分析方法。2021年Ren等^[46]通过设计比例模型与振动台实验，研究了塔筒脉冲型近场地震响应特性。

塔筒结构阻尼较小，对地震响应振动有很高的敏感性，2020年Li等^[47]提出了一种双向调谐质量阻尼器来降低塔筒地震响应振动，并用集中质量有限元模型与塔筒-叶片耦合有限元模型验证其性能。

2.3 塔筒结构屈曲稳定性分析

塔筒的结构特性决定了整体或局部屈曲失稳是其破坏形式之一。塔筒稳定性校核的常用工程计算标准有德国DIN 18800和英国Eurocode3 1-6。线性屈曲特征值方程^[48]：

$$K + \lambda S \psi = 0 \quad (8)$$

式中： λ 为屈曲特征值； S 为应力刚度矩阵； ψ 为屈曲特征向量。

塔筒适用于非线性屈曲分析，可以将线性屈曲分析结果作为初始缺陷条件^[49]。2014年杜静

等^[50]基于线性屈曲模态，考虑几何、材料非线性等因素，得到屈曲临界载荷。2017年潘方树等^[51]将线性屈曲模态作为初始缺陷，获得实际屈曲临界载荷。2021年Campione^[52]给出了在弯曲与剪切作用下的塔筒强度解析表达式。

塔筒结构缺陷是影响屈曲稳定性的重要因素。研究表明门洞为高敏感缺陷结构，对塔筒屈曲强度影响非常大^[31]。

塔筒屈曲主要是由机舱与叶轮质量引起的偏心载荷造成的。2010年赵世林等^[53]研究了塔筒在叶轮和机舱重力、偏心距、自身重力等载荷作用下的屈曲特性。2012年刘贻雄^[54]发现轴向载荷及风轮传递的横向载荷对塔筒屈曲失稳起主要作用。2020年Ma等^[55]研究了复杂载荷下塔筒屈曲性能，获得塔筒表面的能量与位移关系。

3 塔筒结构疲劳损伤分析

在塔筒事故中，疲劳失效损坏占大多数，塔筒的疲劳强度直接影响其承载能力、安全性能与使用寿命，进行疲劳损伤分析对于保证塔筒安全具有十分重要的意义。

3.1 塔筒结构疲劳损伤计算方法

塔筒疲劳属于高周疲劳，常用的疲劳寿命工程算法有Schmidt-Neuper法、Petersen法与VDI2230规范等。疲劳计算过程主要包括获取疲劳载荷谱、获取材料疲劳特性、选择合理的分析方法，疲劳计算基本流程如图2所示。

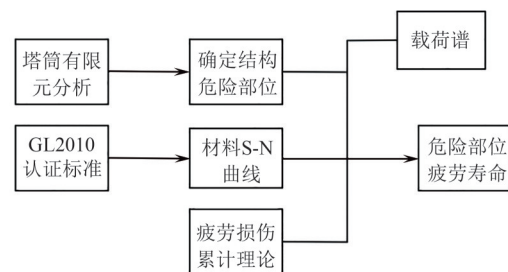


图2 塔筒疲劳损伤计算方法流程

Fig. 2 Computational flow of tower fatigue damage

Miner线性疲劳累积损伤理论^[31]：

$$D = \sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} \quad (9)$$

式中： D 为累计疲劳损伤，是不大于1的常数； n_i

为某应力幅下循环次数； N_i 为某应力幅下损伤时疲劳寿命。

塔筒的疲劳失效问题集中在连接螺栓与焊缝等应力集中部位。螺栓的疲劳寿命受材料性质、几何尺寸、预紧力与外部载荷等多种因素影响。2018年李毅鹏等^[56]通过参数化建模，对不同预紧力、不同外载荷、不同法兰厚度下螺栓内应力进行计算，全面分析了影响螺栓应力的因素及变化规律。

2014年杜静等^[50]通过3种不同的模型，分别建立了法兰外载荷与螺栓内应力的非线性关系，进行螺栓疲劳寿命分析。2015年彭文春等^[57]发现考虑脉动风流固耦合时，塔筒最大应力出现在第三段法兰处，并提出应着重对此处螺栓进行疲劳寿命分析。2019年谭冬梅等^[58]分析了风-冰联合作用下的螺栓疲劳强度，在有限元模型上施加风载荷与动冰载荷，得到考虑冰载荷时的螺栓疲劳可靠度，具有一定的创新意义。2020年Ajaci等^[59]提出一种基于空气动力载荷数值模拟与有限元分析的螺栓疲劳计算方法。

焊缝截面上共作用有压缩、弯曲正应力和扭转、弯曲切应力。2020年Guo等^[60]结合雨流计数法和Miner理论进行了纵向焊缝疲劳寿命预测。

2020年Fu等^[61]提出将计算得到的疲劳损伤 D 代入概率密度演化方程，以得到塔筒疲劳损伤概率密度，并在考虑风速、风向分布下分析了法兰和螺栓的疲劳损伤。2021年Chen等^[62]对塔筒嵌入式环形基础进行疲劳分析，并提出加固方法来显著降低基础与周围混凝土的疲劳应力。2021年Luan等^[63]着重分析启动与停机引起的瞬态负载过程对塔筒疲劳损伤的影响，通过对照分析发现影响较大。

3.2 塔筒结构疲劳损伤监测方法

在塔筒状态监测系统中，主要内容有数据获取、数据处理、数据传输以及数据分析等。塔筒状态监测流程如图3所示。

结构疲劳损伤是从应力应变较高处开始，目前常通过对塔筒应力监测的方式来进行疲劳损伤监测。通过有限元等方法对塔筒进行受力分析，确定应力分布与最优应力监测点^[64-65]。亦可结合塔

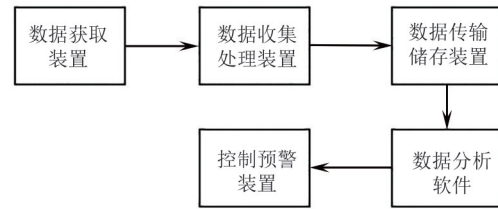


图3 塔筒状态监测流程图

Fig. 3 Flow chart of tower condition monitoring

筒倾斜角点堆积图来得知塔筒偏移最频繁的方向，即结构受力最频繁、最易疲劳损伤的方向，在结构危险点合理布置应力传感器。

海上风机塔筒有些疲劳监测关键位置位于海床之下，无法安装应变传感器。对此，2017年Iliopoulos等^[66]提出多频带模态扩展方法，基于有限数量传感器与有限元模型来重构塔筒整体响应，以此克服监测限制。

声发射技术可以无损检测在役塔筒的动态缺陷，及时发现早期损伤，因此受到广泛关注。2016年Tang等^[67]对风机叶片进行了声发射疲劳损伤监测试验，成功确定损伤位置，证明声发射疲劳监测具有良好前景。传感器的分布和声发射信号衰减特性会影响到结果的准确性。2016年姜宜成^[68]通过断铅试验研究了塔筒上声发射信号的传播衰减特性，对监测时传感器的布置有指导意义。

声发射信号具有随机性与瞬态性，应采用频域分析。2017年Zhang等^[69]提出了应用主成分分析、人工神经网络、信息熵、信息融合技术的综合处理方法来分析声发射信号，并通过塔筒制造材料Q345钢的四点弯曲疲劳试验验证，结果表明该方法具有较高识别精度。

声发射技术常与其他传统监测技术结合使用。2020年Ahmed等^[70]提出使用碳纳米管传感器监测金属疲劳，或可成为塔筒疲劳监测新方法。

3.3 塔筒结构疲劳损伤诊断方法

故障诊断内容主要包括信号获取、特征提取、故障识别三大方面。目前塔筒故障诊断中：多传感器数据融合技术^[71]已成为信号获取的热点方向；常用的特征提取技术有小波分析、经验模态分解法、希尔伯特-黄变换法^[72]；常用神经网络与灰色理论等进行故障识别。塔筒故障诊断技术路线如图4所示。

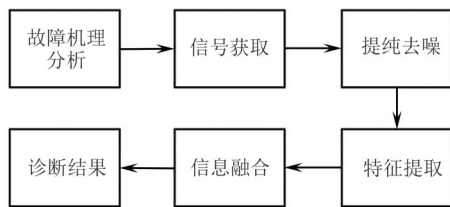


图4 塔筒故障诊断技术路线

Fig. 4 Technical route of tower fault diagnosis

振动加速度信号是塔筒疲劳损伤诊断中较为常用的一个特征参数。2020年Xie等^[73]收集了叶片4种故障状态的振动信号，提出一种新的故障特征提取方法。也可基于应力信号进行诊断：当塔筒出现疲劳损伤时，系统刚度矩阵变化显著，会产生应力波动分量信号，通过结合典型故障频域特征可以实现诊断。

2016年戴煜林^[74]将故障树方法应用于风电机组的故障诊断，并证明其直观有效。2017年杨茜芝^[75]提出深度挖掘数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)数据可用性，基于运行数据进行风电机组的状态监测与故障诊断。

4 结论

根据行业设计规范和标准，对大型水平轴风力机塔筒动态特性和结构寿命损耗研究进行了全面综述。围绕塔筒结构动力学特性和疲劳损伤分析，综述了近年来国内外学者所取得的研究进展，得出以下结论：

1) 在对风电机组塔筒做模拟分析时，应充分考虑到塔筒结构所受载荷复杂多样，不仅包含脉动风载荷，还有控制系统载荷、海浪载荷、冰载荷、地震载荷等；在建立塔筒结构模型时，塔筒顶部结构与塔筒底部基础也应充分考虑，这些结构的质量与刚度对塔筒动力学特性影响较大；塔筒属于高耸柔性敏感型结构，风载荷与地震波会对塔筒产生巨大的剪力和弯矩，甚至造成整体或局部屈曲失稳，对其结构动态响应特性影响较大；塔筒结构疲劳失效损坏占塔筒事故中的大多数，塔筒疲劳损伤状态监测与故障诊断主要集中在连接螺栓与焊缝等应力集中部位。

2) 目前考虑波浪载荷、地震载荷与海冰作用下的海上风电机组塔筒性能研究与地震响应特性研究已成为热点；为了满足塔筒刚度与承载能力等综合性能，塔筒材料已不仅仅是钢制，多种柔性塔筒与钢-混凝土混合型塔架应用越来越广泛，混合型塔筒的性能分析成为热点方向；风电机组结构复杂，在运行时有多系统相互影响、相互作用，有关塔筒的多部件耦合建模与故障诊断研究仍然是领域内的难点；塔筒状态监测与故障诊断技术还不够精准与全面，在一定程度上仍然依赖人工检测，如何有效提高监测与诊断的精确度成为难点。

3) 关于塔筒的建模正在逐渐优化，未来针对变壁厚、变直径、连接法兰、焊缝等精细化建模和考虑多部件耦合的整体化建模会受到越来越多的重视；载荷对塔筒结构性能与寿命有较大影响，目前针对风电机组的减负荷控制系统受到广泛关注，以减轻机组部件负荷，延长疲劳寿命；风电机组中叶片与传动系统的故障诊断专家系统已相对成熟，但塔筒故障诊断方面仍有待优化。

参考文献

- [1] YADAW K K, GERASIMIDIS S. Imperfection insensitive thin cylindrical shells for next generation wind turbine towers[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106228.
- [2] SHAIKHA A S, WANG L, PAROL J, et al. Reliability-based design optimisation framework for wind turbine towers[J]. *Renewable Energy*, 2021, 167: 942-953.
- [3] REBELO C, MOURA A, GERVASIO H, et al. Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations: part 1: structural design[J]. *Engineering Structures*, 2014, 74: 283-291.
- [4] GERVASIO H, REBELO C, MOURA A, et al. Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations: part 2: life cycle analysis[J]. *Engineering Structures*, 2014, 74: 292-299.
- [5] JENNIFER A D L, JUNIOR P A A M, MAGALHAES C A, et al. Behavior study of prestressed concrete wind-turbine tower in circular cross-section[J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111403.
- [6] 张璐. 风力机塔架结构分析及优化研究[D]. 兰州:

- 兰州理工大学, 2020.
- ZHANG L. Wind turbine tower structure analysis and optimization research[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [7] EDWIN H E, LASTRES D O, ROBLES O J B, et al. Considerations for the structural analysis and design of wind turbine towers: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110447.
- [8] ROBERT F, HENNEKE B, KEMPER F, et al. Aerodynamic properties of wind turbine towers based on wind tunnel experiments[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 199: 3121-3126.
- [9] 李晓松. 大型风力发电机组塔筒载荷特性分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- LI X S. Load characteristics analysis of large wind turbine tower[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [10] FEYZOLLAHZADEH M, MAHMOODI M J, YADAVAR N S M, et al. Wind load response of offshore wind turbine towers with fixed monopile platform[J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2016, 158: 122-138.
- [11] FELICIANO J, CORTINA G, SPEAR A, et al. Generalized analytical displacement model for wind turbine towers under aerodynamic loading[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 176: 120-130.
- [12] LIAO Y D, GUO M Y, WANG N, et al. Dynamic responses of K-type and inverted-K-type jacket support structures for offshore wind-turbines[J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(4): 947-956.
- [13] DAGLI B Y, TUSKAN Y, GOKKUS U. Evaluation of offshore wind turbine tower dynamics with numerical analysis[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 20: 181-211.
- [14] WU E J, CHEN H J, QU W F, et al. Wind load evaluation of wind turbine tower design[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1622(1): 12071.
- [15] 高俊云, 姜宏伟, 李超峰, 等. 风电机组塔筒载荷的测试与分析[J]. *机械设计*, 2018, 35(11): 53-56.
- GAO J Y, JIANG H W, LI C F, et al. Test and analysis of wind turbine tower load[J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(11): 53-56.
- [16] CHEN C, DUFFOUR P, FROMME P. Modelling wind turbine tower-rotor interaction through an aerodynamic damping matrix[J]. *Journal of sound and vibration*, 2020, 489: 115667.
- [17] BOZDOGAN K B, MALEKI F K. Application of differential transformation method for free vibration analysis of wind turbine[J]. *Wind and Structures*, 2021, 32(1): 11-17.
- [18] 陈法波. 海上风机结构动力反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- CHEN F B. Dynamic response analysis of offshore wind turbine structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [19] ADHIKARI S, BHATTACHARYA S. Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations [J]. *Shock and Vibration*, 2009, 19(1): 37-56.
- [20] BAZEOS N, HATZIGEORGIOU G D, HONDROS I D, et al. Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(8): 1015-1025.
- [21] FILHO H A N C, AVILA S M, BRITO G L V D. Dynamic analysis of onshore wind turbines including soil-structure interaction[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(3).
- [22] 潘萍萍. 大型风力机塔架动响应特性及失效机理研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- PAN P P. Research on dynamic response characteristics and failure mechanism of large wind turbine tower[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [23] 金映丽, 谷继孟, 马礼鹏. 大型风力发电机组塔架的静强度及模态分析[J]. *机械工程与自动化*, 2017(1): 63-65.
- JIN Y L, GU J M, MA L P. Static strength and modal analysis of large wind turbine tower[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017(1): 63-65.
- [24] 马人乐, 马跃强, 刘慧群, 等. 风电机组塔筒模态的环境脉动实测与数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(5): 152-155.
- MA R L, MA Y Q, LIU H Q, et al. Field measurement and numerical simulation of environmental pulsation of wind turbine tower mode[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(5): 152-155.
- [25] 黄中华, 许欣, 田湘龙, 等. 8 MW 风机塔筒振动响应分析[J]. *湖南工业大学学报*, 2019, 33(4): 36-41.
- HUANG Z H, XU X, TIAN X L, et al. Vibration response analysis of 8 MW wind turbine tower[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2019, 33(4): 36-41.
- [26] HRTE M, BASU B, S. NIELSEN R K. Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction[J]. *Engineering Structures*, 2012, 45: 509-518.

- [27] ABDULLAHI A, WANG Y, BHATTACHARYA S. Comparative modal analysis of monopile and jacket supported offshore wind turbines including soil-structure interaction[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(10): 2042016.
- [28] 潘萍萍, 陈长征, 孟强. 基于流固耦合的风力机塔筒动态特性分析[J]. *可再生能源*, 2012, 30(8): 46-49.
PAN P P, CHEN C Z, MENG Q. Analysis of dynamic characteristics of wind turbine tower based on fluid-structure coupling[J]. *Renewable Energy*, 2012, 30(8): 46-49.
- [29] 谭季秋, 卿上乐. 兆瓦级风力发电机组塔架模态分析研究[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 2014, 36(3): 35-40.
TAN J Q, QING S L. Study on modal analysis of megawatt wind turbine tower[J]. *Journal of Natural Science of Xiangtan University*, 2014, 36(3): 35-40.
- [30] KARIN N C, KAYNIA A M. Estimation of natural frequencies and damping using dynamic field data from an offshore wind turbine[J]. *Marine Structures*, 2021, 76: 102915.
- [31] 陈朝富. MW级风力机塔筒强度分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
CHEN C F. Strength analysis of MW-class wind turbine tower[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [32] 霍涛. 风速风向对风机塔筒结构动力响应和疲劳寿命的影响[J]. *建筑结构*, 2020, 50(18): 26-33.
HUO T. Influence of wind speed and direction on dynamic response and fatigue life of fan tower structure[J]. *Building Structure*, 2020, 50(18): 26-33.
- [33] 张广隶. 考虑风速风向联合概率分布的风电塔筒风致疲劳寿命评估[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
ZHANG G L. Wind induced fatigue life assessment of wind turbine tubing considering joint wind speed and wind direction probability distribution[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [34] 苏捷, 周岱, 雷航, 等. 大型垂直轴风力机的塔影效应分析[J]. *可再生能源*, 2019, 37(9): 1373-1380.
SU J, ZHOU D, LEI H, et al. Analysis of tower shadow effect of large vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 2019, 37(9): 1373-1380.
- [35] GHANDOUR A, DE T T, RUNACRES M C. Microtabs for the mitigation of the tower shadow effect[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(11): 2027-2034.
- [36] GUO S X, LI Y L, CHEN W M. Analysis on dynamic interaction between flexible bodies of large-sized wind turbine and its response to random wind loads[J]. *Renewable Energy*, 2021, 163: 123-137.
- [37] NAUNG S W, RAHMATI M, FAROKHI H. Aeromechanical analysis of a complete wind turbine using nonlinear frequency domain solution method[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143(1): 011018.
- [38] 季亮, 祝磊, 叶桢翔. 风力发电机组塔架底部地震剪力、弯矩计算方法研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(S1): 298-303.
JI L, ZHU L, YE Z X. Research on calculation method of seismic shear force and bending moment for tower bottom of wind turbine[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(S1): 298-303.
- [39] 宋波, 曾洁. 风电塔非线性地震动力响应规律与极限值评价[J]. *北京科技大学学报*, 2013, 35(10): 1382-1389.
SONG B, ZENG J. Nonlinear seismic dynamic response law and limit value evaluation of wind power tower[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(10): 1382-1389.
- [40] SMITH V, MAHMOUD H. Multihazard assessment of wind turbine towers under simultaneous application of wind, operation, and seismic loads[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(6): 4016043.
- [41] ASAREH M A, WILLIAM S, JEFFERY V. Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method[J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2016, 120: 57-67.
- [42] 季亮, 祝磊, 姚小芹, 等. 现有风力发电机组地震作用计算方法对5MW风力发电机组的适用性研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(11): 2300-2305.
JI L, ZHU L, YAO X Q, et al. Research on the applicability of the existing computational methods of seismic action of wind turbine to 5MW wind turbine[J]. *Acta Energica Sinica*, 2014, 35(11): 2300-2305.
- [43] HUANG S, HUANG M M, LYU Y J, et al. Effect of sea ice on seismic collapse-resistance performance of wind turbine tower based on a simplified calculation model[J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111426.
- [44] 刘中胜, 杨阳, 李春, 等. 大型风力机地震动力学响应及稳定性控制研究[J]. *热能动力工程*, 2019, 34(9): 107-114.
LIU Z S, YANG Y, LI C, et al. Seismic dynamic response and stability control of large wind turbine[J]. *Journal of Thermal Energy and Power Engineering*, 2019, 34(9): 107-114.

- [45] 邹锦华, 杨阳, 李春, 等. 湍流风与地震联合作用下风力机塔架振动非线性特征研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(7): 57-64.
ZOU J H, YANG Y, LI C, et al. Research on the nonlinear characteristics of wind turbine tower vibration under the combined action of turbulent wind and earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(7): 57-64.
- [46] REN Q Q, XU Y Z, ZHANG H, et al. Shaking table test on seismic responses of a wind turbine tower subjected to pulse-type near-field ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 142: 106557.
- [47] LI W R, ZHANG Q, YANG Z, et al. Seismic vibration mitigation of wind turbine tower using bi-directional tuned mass dampers[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(6): 1-22.
- [48] 吕鹏. 时变载荷作用下大型风力机塔筒动态特性分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
LU P. Analysis of dynamic characteristics of large wind turbine tower under time-varying load[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [49] 唐瑞宏. 大型风力发电机组塔架的稳定性与疲劳强度分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
TANG R H. Analysis of stability and fatigue strength of large wind turbine tower[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [50] 杜静, 丁帅铭, 王秀文, 等. MW级风力发电机塔筒环形法兰连接高强度螺栓疲劳评估[J]. 机械设计, 2014, 31(1): 75-79.
DU J, DING S M, WANG X W, et al. Fatigue assessment of high-strength bolts for ring flange connection of MW-class wind turbine tower[J]. Mechanical Design, 2014, 31(1): 75-79.
- [51] 潘方树, 王法武, 柯世堂, 等. 考虑缺陷的大型风力机塔筒屈曲分析与稳定性设计[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2659-2664.
PAN F S, WANG F W, KE S T, et al. Buckling analysis and stability design of large wind turbine tower considering defects[J]. Acta Solar Energy, 2017, 38(10): 2659-2664.
- [52] GIUSEPPE C. Simple equations for strength and deformability verification of tubular steel wind turbine towers[J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111566.
- [53] 赵世林, 李德源, 黄小华. 风力机塔架在偏心载荷作用下的屈曲分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 901-906.
ZHAO S L, LI D Y, HUANG X H. Buckling analysis of wind turbine tower under eccentric load[J]. Acta Solar Energy, 2010, 31(7): 901-906.
- [54] 刘贻雄. 大型风力机塔筒结构动力学与稳定性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
LIU Y X. Dynamics and stability analysis of large wind turbine tower structure[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [55] MA Y, MARTINEZ V P, BANIOPOULOS C. Buckling analysis for wind turbine tower design: thrust load versus compression load based on energy method[J]. Energies, 2020, 13(20): 5302.
- [56] 李毅鹏, 高俊云, 姜宏伟. 基于参数化建模的风电机组塔筒法兰联接螺栓应力计算分析[J]. 可再生能源, 2018, 36(7): 1098-1101.
LI Y P, GAO J Y, JIANG H W. Calculation and analysis of the stress of the connecting bolts of the wind turbine tower flange based on parametric modeling[J]. Renewable Energy, 2018, 36(7): 1098-1101.
- [57] 彭文春, 邓宗伟, 高乾丰, 等. 风机塔筒流固耦合分析与受力监测研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 136-142.
PENG W C, DENG Z W, GAO Q F, et al. Research on fluid-solid coupling analysis and force monitoring of wind turbine tower[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 136-142.
- [58] 谭冬梅, 金超, 瞿伟廉, 等. 风-冰联合作用下风电塔筒高强度螺栓疲劳可靠度分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 92-100.
TAN D M, JIN C, ZHAI W L, et al. Fatigue reliability analysis of wind power tower high-strength bolts under combined action of wind and ice[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2019, 36(2): 92-100.
- [59] AJAEI B B, SOYOZ S. Analytical and experimental fatigue analysis of wind turbine tower connection bolts[J]. Wind and Structures, 2020, 31(1): 1-14.
- [60] GUO W Q, SUN P W, NIU L, et al. Fatigue life analysis of longitudinal welding seam for wind turbine tower[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2020, 25(2): 261-265.
- [61] FU B, ZHAO J B, LI B Q, et al. Fatigue reliability analysis of wind turbine tower under random wind load[J]. Structural Safety, 2020, 87: 101982.
- [62] CHEN J L, LI J W, LI Q Z, et al. Strengthening mechanism of studs for embedded-ring foundation of wind turbine tower[J]. Energies, 2021, 14(3): 710.
- [63] LUAN C Y, MOAN T. On Short-term fatigue analysis

- for wind turbine tower of two semi-submersible wind turbines including effect of startup and shutdown processes[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2021, 143(1): 1-15.
- [64] REBELO C, VELJKOVIC M, DA S L S, et al. Structural monitoring of a wind turbine steel tower: part I : system description and calibration[J]. *Wind and Structures*, 2012, 15(4): 285-299.
- [65] LI M Y, KEFAL A, OTERKUS E, et al. Structural health monitoring of an offshore wind turbine tower using iFEM methodology[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 204: 107291.
- [66] IIIIOPOULOS A, WOUT W, DANNY V H, et al. Fatigue assessment of offshore wind turbines on monopile foundations using multi-band modal expansion[J]. *Wind Energy*, 2017, 20(8): 1463-1479.
- [67] TANG J L, SLIM S, CRISTINEL M, et al. An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades[J]. *Renewable Energy*, 2016, 99: 170-179.
- [68] 姜宜成. 风电塔筒检测中声发射技术的应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- JIANG Y C. Application research of acoustic emission technology in wind turbine tower detection[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [69] ZHANG Y B, LUO H Y, LI J R, et al. An integrated processing method for fatigue damage identification in a steel structure based on acoustic emission signals[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(4): 1784-1791.
- [70] AHMED S, SCHUMACHER T, THOSTENSON E T, et al. Performance evaluation of a carbon nanotube sensor for fatigue crack monitoring of metal structures[J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4383.
- [71] 李婷婷. 多传感器节点数据融合在风电塔筒监测预警中的应用[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.
- LI T T. Application of multi-sensor node data fusion in wind turbine tower monitoring and early warning[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2016.
- [72] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [73] XIE X P, CHEN W D, CHEN B A, et al. Comprehensive fatigue estimation and fault diagnosis based on refined generalized multi-scale entropy method of centrifugal fan blades[J]. *Measurement*, 2020, 166: 108224.
- [74] 戴煜林. 故障树及振动包络分析在风电机组故障诊断中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- DAI Y L. Application of fault Tree and vibration envelope analysis in fault diagnosis of wind turbines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [75] 杨茜芝. 基于运行监控数据分析的风电机组状态监测[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- YANG X Z. Wind turbine condition monitoring based on operation monitoring data analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

收稿日期: 2021-03-24。

作者简介:



樊昂

樊昂(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电机组状态监测与故障诊断, fanang010033@163.com;



李录平

李录平(1963), 男, 教授, 研究方向为动力机械状态检测与故障诊断, 本文通信作者, cs_liluping@163.com。

(责任编辑 杨阳)