

陆上风力发电机塔架振动监测研究进展

张鸿泰¹ 杨书仪¹ 何先龙² 李志鹏¹

(1. 湖南科技大学机电工程学院 湘潭 411201; 2. 河北振创电子科技有限公司 廊坊 065201)

摘要: 塔架作为陆上风力发电机的支撑结构关键部件,其服役质量直接影响到风力发电机的运行安全性。开展塔架振动监测,对其进行服役质量评估和损伤早期预警,是提高风力发电机运行安全性的重要手段。首先,简要介绍陆上风力发电机塔架类型,塔架载荷及动力学理论研究。其次,归纳总结塔架接触式与非接触式振动监测的方法及特点,对不同监测方法进行了对比,提出现有塔架振动监测方案的局限性。最后,分析塔架振动监测数据在状态识别、故障诊断及故障预警等方面研究现状与目前存在的难点,展望塔架振动监测的未来发展趋势。

关键词: 风力发电机;塔架;振动监测;非接触测量;数据处理

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.15

Research progress of tower vibration monitoring for onshore wind turbine

Zhang Hongtai¹ Yang Shuyi¹ He Xianlong² Li Zhipeng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hebei Zhenchuang Electronic Technology Co., Ltd., Langfang 065201, China)

Abstract: As the key component of the support structure of the onshore wind turbine, the service quality of the tower directly affects the operation safety of the wind turbine. Monitoring tower vibration, evaluating service quality and early warning of damage are important means to improve the operation safety of wind turbine. Firstly, the type of tower, the load and dynamics of tower are briefly introduced. Secondly, the methods and characteristics of tower contact and non-contact vibration monitoring are summarized, different monitoring methods were compared, and the limitations of existing tower vibration monitoring schemes are put forward. Finally, the research status and existing difficulties of tower vibration monitoring data in state identification, fault diagnosis and fault warning are analyzed, and the future development trend of tower vibration monitoring is forecasted.

Keywords: wind turbine; tower; vibration monitoring; contactless measurement; the data processing

0 引言

为了实现“碳达峰”、“碳中和”国家战略目标,我国正大力发展可再生能源。风能作为最广泛和发展最快的可再生能源之一,具有大规模开发利用价值^[1]。到2021年我国风力发电装机容量已超过三亿千瓦,规模庞大,具有较大的市场需求。

总体容量上,陆上风力发电依然占据主体地位,陆上风力发电机塔架监测工作具有应用价值同时可为海上风力发电机塔架监测工作提供参考。风力发电机捕获风能转换为电能,主要由叶片、机舱、塔架、地基组成。塔架是支撑结构,支撑起叶片与机舱,连接地基,保证风轮稳定并提供高度,同时具有足够的强度与刚度以保证不会发生整机倾倒、局部断裂事故^[2]。风力发电机属于高耸结构,结构细长,长径比大,塔架承受机舱与叶片的重量,一旦塔架失稳则会导致重大安

全事故。随着风力发电机功率增大,塔架高度不断攀升,塔架安全显得更为重要。2015年1月,北爱尔兰发生一起2.5 MW风力发电机倒塌事故;2019年5月,美国某风场一台2.4 MW风力发电机倒塌;2021年4月,扬州高邮一塔架超过130 m的风力发电机倒塌,造成了较大经济损失。依据GB/T 19960.1-2005的要求,风力发电机设计寿命应大于或等于20年。我国于20世纪80年代引进首台风力发电机,2005年风力发电正式进入大规模开发应用。到目前为止,我国大批现役风力发电机的关键零部件正面临老化,开展风力发电机塔架振动监测可以有效避免事故发生。

1 陆上风力发电机塔架分类

图1为塔架分类,根据风力发电机塔架结构的不同,可分为锥台式塔架和格构式塔架;根据塔架固有频率可分为

传统塔架和柔软型塔架。

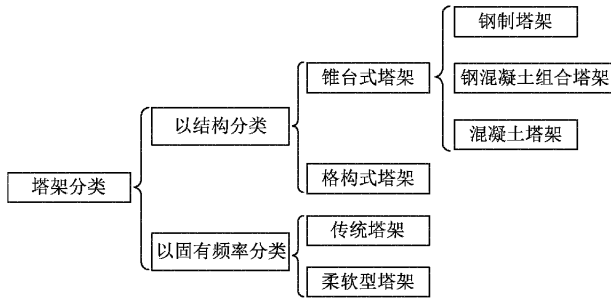


图1 塔架分类

锥台式塔架是现役机组应用最多的类型,主要有钢制塔架、钢混凝土组合塔架和混凝土塔架,如图2所示。



(a) 钢制塔架 (b) 混凝土组合塔架 (c) 混凝土塔架

图2 锥台式塔架

钢制塔架是目前应用最广泛的塔架^[3];钢-混凝土组合塔架由钢制塔架与混凝土塔架组合而成,可用于建设100 m以上高塔架^[4];混凝土塔架由于施工周期长等原因导致实际应用较少^[5-7]。如图3所示,格构式塔架由钢材连接制成,拥有多种几何结构,由于不利于维护人员攀爬等原因使用较少。

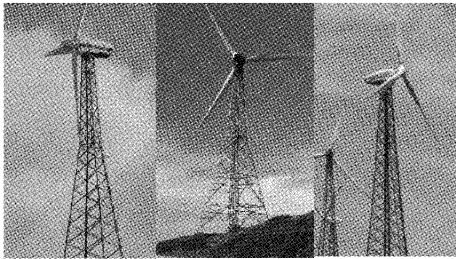


图3 格构式塔架

相对于传统塔架,柔软型塔架的一阶固有频率较低,当叶片旋转频率接近塔架固有频率时将发生共振现象危害塔架安全^[8-10],因此柔软型塔架需要特殊的控制策略减少共振对塔架造成的伤害。

2 陆上风力发电机塔架振动力学分析

风力发电机运行过程中,塔架会产生多个方向的振动,

振动幅值超过安全限制将会影响风力发电机的安全运行。开展风力发电机塔架载荷分析、动力学分析是进行塔架振动传感布点、实时监测的前提。

2.1 载荷分析

风力发电机运行的安全性、可靠性依赖于各关键零部件须有足够的强度,而零部件强度设计与风力发电机的载荷变化息息相关。陆上风力发电机塔架作为关键零部件主要承受风载荷、惯性载荷、重力载荷等。

塔架承受外部载荷主要来源于风载荷,而风载荷可通过功率谱来描述,不考虑湍流尺度随高度变化可参考Davenport等风速谱,考虑湍流积分尺度随高度变化可参考Kaimal等风速谱。

研究塔架承受载荷需要考虑极限风载荷情况,Aboshosha等^[11]改进一致离散随机流生成方法模拟强风载荷进行风致响应分析。高春彦等^[12]计算了不同工况下塔架所承受的极限风载荷,如图4所示为塔架承受载荷简图。邓英等^[13]选取不同风湍流模型计算塔架承受载荷。塔架载荷分析为动力学分析提供支持,董霄峰等^[14]分析了风载荷作用下的塔架振动响应,归纳了不同工况下的塔架振动特性。塔架振动响应分析可为风力发电机的振动监测数据分析提供参考,而目前考虑极限风载荷的塔架振动响应研究较少。

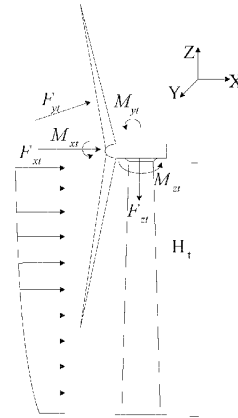


图4 塔架承受载荷

F_x, F_y, F_z 为坐标系中 X、Y、Z 方向的力分量, M_x, M_y, M_z 为坐标系中 X、Y、Z 方向的力矩分量, H_t 为塔架高度。

2.2 动力学分析

准确地分析塔架受力来源与其所造成的影响对塔架研究工作具有指导意义,为塔架设计提供思路,为塔架维护提供方向。

为了计算叶片承受载荷对塔架的影响,Hansen等^[15]综合多方面建立16自由度风力发电机模型,但理论模型过于复杂。为简化计算,Fitzgerald等^[16]建立了简化的8自由度风力发电机模型,整机欧拉-拉格朗日方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

式中： T 是系统动能； V 是系统势能； q_i 是自由度 i 的广义坐标； Q_i 是自由度 i 的广义载荷。

姚兴佳以机舱与塔架连接面的中点为原点建立塔架坐标系，建立动力学方程：

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = F_i + F_A \quad (2)$$

式中： M_i 是塔架单元质量矩阵； C_i 是塔架单元阻尼矩阵； K_i 是塔架单元刚度矩阵； q_i 是塔架位移向量； F_A 是机舱作用在与塔架相连处的力； F_i 是作用在塔架上的其他外力。随着风力发电机容量提升，外部载荷影响将更加明显，需要依靠动力学分析指导设计。

有限元分析可进行更具体、更细致的动力学研究，为实验提供理论指导，为假设提供理论依据。Gentils 等^[17] 结合有限元方法与遗传算法建立模型对风力发电机塔架结构进行了轻量化优化。Asareh 等^[18] 评估了不同风速下风力发电机的非线性动态性能，图 5 所示为塔架发生屈曲破坏的形式。

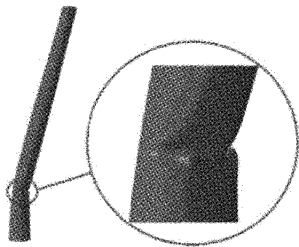


图 5 塔架屈曲^[18]

刘海锋等^[19] 分析对比了格构式塔架和锥台式塔架的风载荷、尾流扰动特性等参数。曾梦伟等^[20] 分析了塔顶质量与地基土刚度对塔架固有频率的影响。有限元分析为塔架动力学特性研究提供了重要的帮助，但风-叶片-塔架-地基-岩土的整体耦合关系等复杂的因素尚未能进行考虑与分析。

塔架振动力学分析提供塔架振动监测的理论支撑，包括测点、监测参数的选择以及安全阈值的确定等方面。

3 陆上风力发电机塔架振动监测

风力发电机塔架振动监测可以获取塔架结构的振动状态，评估塔架结构的服役质量，为风力发电机塔架的维修、养护以及更换提供决策依据。常见的塔架振动监测参量为振动加速度、振动速度、振动位移，按照传感器是否安装在塔架上，其测量方法可分为接触式测量法、非接触式测量法。

3.1 接触式测量法

接触式测量法将仪器安装在塔架上采集数据，通过多个分布于塔架上的测点监测塔架振动状态。主要有测点式传感器测量、实时定位系统测量、光纤传感测量等方法。

1) 测点式振动传感器测量

测点式振动传感器包含振动加速度、振动速度、振动位移等传感器。由于低频振动是影响风力发电机塔架服役质

量的主要频段，所以塔架振动监测宜选用低频敏感仪器，表 1 列出了部分振动传感器频率范围。

表 1 常见振动传感器使用频率范围^[21]

传感器	频率下限/Hz	频率上限
电阻片加速度计	0	100
伺服式加速度计	0	300
压阻式加速度计	0	10 000
电容加速度计	0	1 000
电涡流位移计	0	2 000
压电加速度计	0.1	20 000
摆式速度传感器	0.5	50
压电式力传感器	1	12 000

风力发电机塔架前四阶固有频率集中在 0~10 Hz 之间，其中占主要地位的一阶固有频率处于 0~1 Hz 之间。因此塔架振动监测宜选用电阻片式加速度计或伺服式加速度计等频率范围满足要求的传感器。

如图 6 所示，Kilic 等^[22] 采用无线装置与加速度传感器进行塔架振动监测。沈润杰等^[23] 采用无线倾角传感器进行塔架振动监测。除了直接采集数据外，利用已有数据计算其他数据也是可行的方法。王华等^[24] 利用振动位移数据结合挠度计算整个塔架的位移时程曲线。邓敏强等^[25] 构建塔架振动状态计算模型，利用振动位移计算振动状态及应力。卓沛骏等^[26] 利用塔顶转角换算得到塔顶位移。

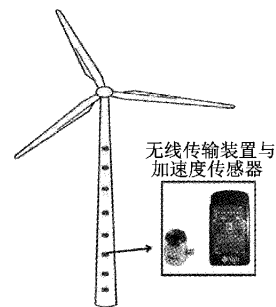


图 6 加速度传感器与无线装置^[22]

测点式振动传感器精度高，可靠性强，但利用振动传感器获取更多可靠的数据依然值得研究，如优化测点位置及数量、改进数据预处理方法，强化传感器性能等。

2) GNSS-RTK 位移测量

GNSS(global navigation satellite systems)全球导航卫星系统的进步，使 GNSS-RTK (real-time kinematic) 实时动态定位可用于测量风力发电机塔架顶部振动位移。

Rossi 等^[27] 利用卡尔曼滤波融合 GNSS 信号与加速度信号，减弱旋转自由度带来的位移测量误差。王潇等^[28] 应用 GNSS-RTK 测量塔顶振动位移，所得测量结果优于振动加速度二次积分所得位移。

GNSS-RTK 测量基于定位技术，适合监测低频振动，

但测量精度不够高,同时卫星信号限制了测点位置,多用于测量塔顶位移。

3) 光纤传感测量

随着基于光信号的监测技术逐步发展,分布式光纤声波传感(distributed acoustic sensing, DAS)系统与光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器等光纤测量技术开始应用于工程监测。

DAS系统利用振动引起的散射光相位变化监测光导纤维各处振动,无需选择测点,Hubbard等^[29]使用DAS系统检测了风力发电机模型的法兰盘螺栓松动及塔架结构损伤。FBG传感器将测点处的应变转换为反射光波长变化,如图7所示,Bang等^[30]利用FBG传感器对塔架进行了应变监测,其中,气象监测用于减小环境因素带来的误差。DAS与FBG两种方法各有优缺点,DAS测量覆盖范围更大但精度稍低,FBG精度相对高但测点数有限。两者的共同点在于在塔架上铺设光纤的难度较高,生产塔架时预装光纤是性价比较高的方法。

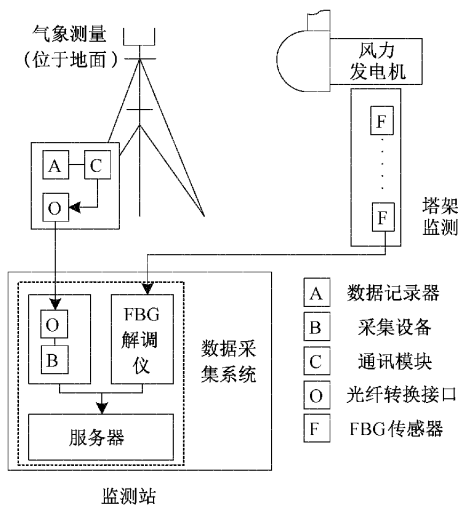


图7 FBG监测系统示意图^[30]

光纤传感使用光信号传递信息因此不受电磁干扰,但光纤本身受温度影响大^[31],需克服温度带来的误差。

3.2 非接触测量法

风力发电机塔架振动监测可采取非接触测量法,无需在塔架上安装设备,必要时需增加塔架表面反射率或设置标记。主要有激光振动测量、视觉摄影测量和地面干涉雷达测量等方法。

1) 激光振动测量

激光振动测量通过检测反射激光束获取测点处数据,有单点以及线扫描等测量模式,激光源分为可见光与不可见光。如图8所示,利用可见激光源测量需要通过贴纸或涂料提高测点反射率。

如图9所示,Schill等^[33]使用两台轮廓扫描仪获取塔架二维振动相关数据。由于红外激光束不便通过光学方法引导,Dilek等^[34]通过机械移动引导激光源测量风力发电

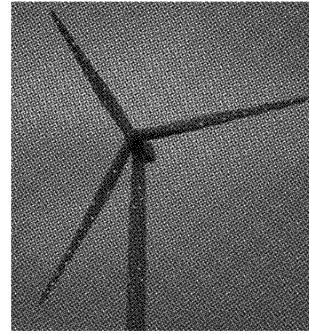


图8 风力发电机表面加装反光装置^[32]

机模型的振动特性。Helming等^[35]采用线扫描的地面激光扫描方法测量塔架轴向以及横向的变形如图10所示。石家祥等^[36]应用多普勒激光雷达遥测风力发电机,验证了激光测量适用于监测0~2.5 Hz,0.1~3 m/s的低频振动。激光振动测量塔架振动简单有效但数据量较少,研究人员致力于通过增加激光扫描范围、增加设备联测等方法获取更多数据。

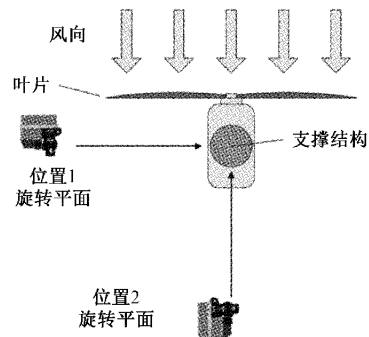


图9 测量示意图^[33]

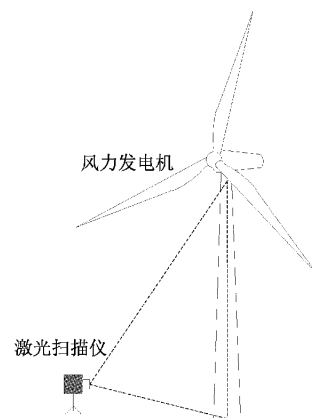


图10 地面激光扫描^[35]

激光测振是较成熟的非接触测量方法,缺点是在测量多个测点时依次扫描各测点,因此不同测点数据之间可能不具有 consistency。

2) 视觉摄影测量

视觉摄影测量通过采集连续的数字图像获取大型结构位

移、变形数据^[37],包括高速相机摄影,双目视觉系统等方法。

Poozesh 等^[38]利用空间点云数据拼接的多摄像机系统识别风力机叶片动态特性。Liu 等^[39]设计了两台高速相机结合的系统,测量结构三维振动位移数据。Kadi 等^[40]使用高速工业相机进行塔架应变监测,实现高精度测量。亚库普等^[41]利用双目视觉系统进行了叶片振动位移测试实验。点云数据分析等方法适合用于监测细节部分,而边缘检测等图像处理方法更加贴合塔架振动监测对于经济成本以及计算速度的要求^[42-43]。

视觉摄影测量获取信息量大,非常适合测量大型复杂结构的振动位移,但测量精度受距离与光照条件影响,限制了视觉摄影测量在实际中的应用。

3)地面干涉雷达测量

地面干涉雷达(ground-based interferometric radar, GBIR)利用微波测量,获得雷达图像以计算振动位移。

GBIR 常用于监测大型结构的位移,应用于塔架振动位移监测较少见。Ma 等^[44]利用地面干涉雷达对多台风力发电机塔架进行了振动位移监测,并验证了该方法的有效性。

如图 11 所示为使用 GBIR 测量塔架振动位移。GBIR 测量范围大,但仅能获取沿雷达视线方向的振动位移数据,且大气介质不均匀会干扰微波传播带来测量误差。地面干

涉雷达作为塔架监测新方法,需要更多实际案例证明其用于塔架监测工作的可靠性。

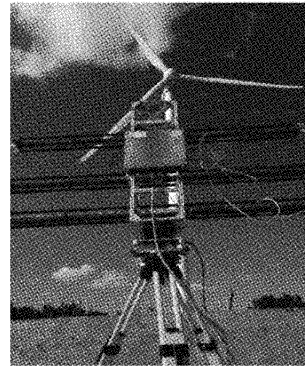


图 11 地面干涉雷达测量塔架^[44]

表 2 列出了部分监测方法的特点,风力发电机处于野外,服役环境恶劣且各有不同,选择符合实际情况的监测方案有利于塔架状态监测工作进行。接触式测量法需要在塔架壁上安装设备,工作量大,施工周期长,但接触式测量可靠性高,成本低,适合长期在线监测工作;非接触式测量法的精度会受到光照、雨雾、测量距离等因素干扰,而且普遍成本较高,获得数据量大,比较适合短期离线监测工作。

表 2 部分监测方法

类型	监测方法	优缺点	测量仪器	参数
接触式	测点式振动传感器	优点:成本低、精度高、性能可靠 缺点:需优选测点、选用低频敏感设备	QZ2013 加速度传感器 QZ2014 位移传感器 QYG01-I 倾角传感器	分辨率 $2 \times 10^{-6} \text{ g}$ 分辨率 $1 \times 10^{-4} \text{ m}$ 分辨率 $1 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
	GNSS 传感器	优点:监测低频振动效果好 缺点:精度不高,测点受卫星信号限制	T5 GNSS-RTK 接收机	精度 $\pm(10 + 1 \times 10^{-6} D) \text{ mm}$ D 为测点间距离
	DAS 系统	优点:无需选择测点,数据量大,不受电磁干扰 缺点:温度影响大,精度相对较低,需要布置光纤	ODiSI 6000 DAS 系统	精度 $\pm 30 \text{ } \mu\text{e}$
	FBG 传感器	优点:测点数量上限高,不受电磁干扰 缺点:温度影响大,需要布置光纤	JH-FBG-A3 光纤光栅系统	精度 $\pm 2 \text{ } \mu\text{e}$ 分辨率 $0.1 \text{ } \mu\text{e}$
非接触式	激光振动测量	优点:响应频带宽,测量速度快 缺点:必要时需增加测点反射率,测点数据可能不同步	Wind 3D 6000 测振仪	精度 $< 0.1 \text{ m/s}$
	视觉摄影测量	优点:无需选择测点,信息量丰富 缺点:精度受光照条件与距离影响大,必要时需设置参考标记	Coolpix P1000 高速相机	距离 100 m 下 精度 $\pm 0.248 \text{ mm}$
	地面干涉雷达测量	优点:监测范围大,无需选择测点 缺点:精度受大气介质不均匀干扰	GPRI-II 地面干涉雷达	信噪比水平 30 dB 下精度 $\pm 0.03 \text{ mm}$

4 陆上风力发电机塔架振动监测数据处理

振动监测数据记录了塔架振动情况,提取数据的信号特征可为研究塔架振动特性提供数据支持,实现塔架状态

监测、故障识别、故障预警,达到预防事故的目的。

4.1 状态识别

塔架状态识别是指通过振动监测数据确定塔架振动状态,其中,对塔架模态参数的识别需要克服工况及外部

载荷的影响。

Cui等^[45]研究了基于神经网络的状态监测框架,用于识别操作风险,减少错误报告。Panda等^[46]用误差自适应特征摄动方法处理数据,但仍未完全解决实时模态识别问题。柳絮等^[47]改进信号分析方法,获得较完整和精确的振动信号特征。胡嘉苗等^[48]研究了基于响应信号的塔架结构模态识别方法,增强了周期激励条件下识别模态参数的能力。万熹等^[49]研究了环境激励下的模态参数识别方法,加强模态参数识别,但对高阶模态参数的识别效果稍差。塔架状态识别工作主要内容集中在模态识别,风力发电机塔架不便进行人工激励,可采用运行中的结构响应数据进行模态识别。为了克服外部载荷的干扰,研究人员进行了区分工况、改进数据处理算法等研究,在实验室或算例验证中取得了成果,而在工程中的应用效果仍有待验证。

环境激励属于非平稳随机过程,信号处理困难,加上环境难以对结构充分激励、激励未知等原因,模态识别难度较高^[50]。

4.2 故障诊断

塔架故障使得塔架振动信号出现变化,不同故障造成的影响各不相同,准确识别振动信号特征可辅助判断塔架故障。

何先龙等^[51]研究了6种工况下的塔架法兰盘螺栓松动故障,如图12所示,法兰盘螺栓松动导致法兰盘上下一相位差发生突变,而其他振动特性变化并不明显。

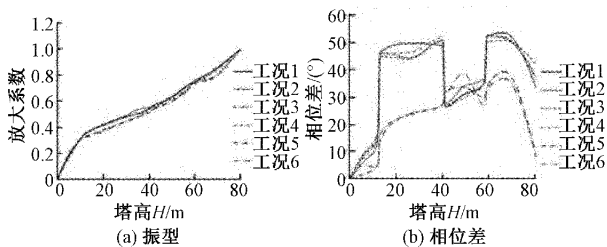


图12 塔架振型与相位差^[48]

猴百勇等^[52]利用塔架固有频率异常值分析法评估螺栓拧紧力,将塔架故障与模态识别结果联系起来。欧阳儒贤等^[53]研究了法兰螺栓断裂对法兰盘应力、塔架顶部位移以及模态频率影响,提出模态频率降低和顶部位移增大可作为辅助判断螺栓断裂故障的信号特征。李学平等^[54]发现尾流效应以及地形引起的湍流会引发塔架振动异常。

塔架故障识别难点在于准确判断故障需要具备信号特征的先验知识,风力发电机监测数据的特点是故障数据少,可用数据少,大多数数据是正常运行时的数据,参考意义较小,因此建立收录全部故障特征的可靠数据集难度较大,塔架故障识别存在困难。

4.3 故障预警

相比出现故障再维修的反应性维护和定期进行的预防性维护,运用监测数据提前预测故障并维护的预防性维

护具有最佳的安全性与经济性^[55-56]。

Su等^[57]建立塔架振动监测模型,识别工况同时短期预测振动趋势,残差超过预设限制时进行故障预警。Wang等^[58]基于多元状态估计技术结合实时残差及长期历史残差实现故障预警。目前的振动参量预测方法在面对剧烈振动时准确率有所下降。姚文凡等^[59]通过自回归滑动平均模型预测塔顶位移时间序列数据,但预测步长增加会导致准确程度降低。对于振动参量的预测由于外载荷的不确定性而充满困难,相比之下运用历史载荷数据预测构件的疲劳寿命更加可行。陶涛等^[60]提出一种塔架螺栓疲劳寿命预测方法,考虑限功率工况的预测方法更符合实际进程,然而从振动监测数据中提取出具体螺栓的载荷则需要更详细的研究。故障预警的问题在于预测时间跨度过短,长时间跨度或较强振动的预测准确率较低,而且各种振动安全阈值也尚未形成统一的标准,预测性维护尚待推广。

数据运用是塔架振动监测中最重要的一环,其目的在于通过振动监测数据指导风力发电机的运行维护,以减少塔架损伤或故障带来的损失。塔架振动监测数据运用存在状态识别准确度不足,故障诊断收录的故障类型少、故障预警可信程度低等问题,这些问题使得塔架振动监测的工程应用受到阻碍;而实践少导致可用于研究的塔架振动监测数据少,陷入了不利于发展的循环。

5 结 论

现阶段锥台式塔架是主流,格构式塔架由于维护难度等问题应用较少。在建设高塔架的趋势下,钢制塔架受到刚度问题限制,钢混凝土组合塔架成为最佳的方案,混凝土塔架依然在发展。

塔架振动监测的接触式测量中,测点式传感器的应用较广,GNSS与光纤传感测量尚未大面积应用于塔架监测;非接触式测量中,激光振动测量应用较多,视觉摄影测量尚处于实验室阶段,基于微波的塔架位移测量正在起步。

状态监测数据中工况与外部载荷对状态识别的干扰较大,故障诊断由于故障先验知识的积累不足使得进展受阻,故障预警的可靠性不足,仍需投入研究。

随着数字孪生技术的出现,未来风力发电机塔架振动监测也将向数字孪生平台方向发展。伴随振动监测数据类型、数量的大幅度增长,振动监测方案、振动监测数据分析方法必将是风力发电机塔架振动监测的关键技术。

参考文献

- [1] 刘德顺,戴巨川,胡燕平,等.现代大型风电机组现状与发展趋势[J].中国机械工程,2013,24(1):125-135.
- [2] 阎石,牛健,于君元,等.风力发电机塔架结构减振控制研究综述[J].防灾减灾工程学报,2016,36(1):75-83.
- [3] 马赫男.风电机组柔性塔筒降载控制技术研究及应用[D].保定:华北电力大学,2018:1-3.

- [4] 兰涌森,李杨,任为,等. 风电机组钢混塔筒设计方法研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 254-259,272.
- [5] LANA J A D, JÚNIOR P A A M, MAGALHÃES C A, et al. Behavior study of prestressed concrete wind-turbine tower in circular cross-section[J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111403.
- [6] 高耸结构设计规范: GB 50135—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019:65-73.
- [7] 毕继红,任洪鹏,尹元彪. 预应力钢筋混凝土风力发电塔架的地震响应分析[J]. 天津大学学报, 2011, 44(2): 126-133.
- [8] 姚兴佳,刘颖明,刘光德,等. 大型风电机组振动分析和在线状态监测技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2007(6): 627-632.
- [9] ZHAO Y, PAN J, HUANG Z, et al. Analysis of vibration monitoring data of an onshore wind turbine under different operational conditions[J]. Engineering Structures, 2020, 205: 110071.
- [10] 刘一帆. 风力机塔筒动力学特性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018:41-46.
- [11] ABOSHOSHA H, ELSHAER A, BITSUAMLAK G T, et al. Consistent inflow turbulence generator for LES evaluation of wind-induced responses for tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 142: 198-216.
- [12] 高春彦,刘泽,史治宇. 风电机组塔架极限风载荷计算及对比研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1373-1380.
- [13] 邓英,周峰,田德,等. 不同风湍流模型的风电机组载荷计算研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2395-2400.
- [14] 董霄峰,练继建,王海军. 海上风机结构振动监测试验与特性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(2): 191-199.
- [15] HANSEN M H. Vibrations of a three-bladed wind turbine rotor due to classical flutter[C]. Wind Energy Symposium, 2002, 7476: 256-266.
- [16] FITZGERALD B, BASU B. Cable connected active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(23): 5980-6004.
- [17] GENTILS T, WANG L, KOLIOS A. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm [J]. Applied energy, 2017, 199: 187-204.
- [18] ASAREH M A, SCHONBERG W, VOLZ J. Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2016, 120: 57-67.
- [19] 刘海锋,朱彬荣,张宏杰,等. 钢管格构式和圆筒式塔架对风力机尾流扰动特性对比研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 2036-2044.
- [20] 曾梦伟,魏克湘,李颖峰,等. 大型风力机塔架固有频率分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(4): 30-33.
- [21] 陆秋海,李德葆. 工程振动试验分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 21-22.
- [22] KILIC G, UNLUTURK M S. Testing of wind turbine towers using wireless sensor network and accelerometer [J]. Renewable Energy, 2015, 75: 318-325.
- [23] 沈润杰,任涛,王青华. 风力发电机塔筒振动监测系统研究[J]. 系统仿真技术, 2014, 10(4): 309-312.
- [24] 王华,孟欢,李萍. 风力发电机塔筒晃动位移监测新方法[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(1): 250-254.
- [25] 邓敏强,邓艾东,朱静,等. 基于模态叠加法的风电机组塔架实时状态研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 63-70.
- [26] 卓沛骏,罗勇水,曹梦楠,等. 基于卡尔曼滤波算法的风电机组塔顶位移监测方法[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(4): 120-124.
- [27] ROSSI Y, TATSIS K, AWADALJEED M, et al. Kalman filter-based fusion of collocated acceleration, GNSS and rotation data for 6C motion tracking [J]. Sensors, 2021, 21(4): 1543.
- [28] 王潇,俞佳男,唐波,等. 基于 GNSS 的风电机组低频振动位移计算方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(8): 996-1002, 1057.
- [29] HUBBARD P G, XU J, ZHANG S, et al. Dynamic structural health monitoring of a model wind turbine tower using distributed acoustic sensing (DAS) [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(3): 833-849.
- [30] BANG H J, KIM H I, LEE K S. Measurement of strain and bending deflection of a wind turbine tower using arrayed FBG sensors [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(12): 2121-2126.
- [31] 王泽润,叶志浩,夏益辉,等. 分布式光纤测温系统分辨率影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 65-73.
- [32] OZBEK M, MENG F, RIXEN D J. Challenges in testing and monitoring the in-operation vibration characteristics of wind turbines [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41(1-2): 649-666.
- [33] SCHILL F, EICHHORN A. Investigations of low- and high-frequency movements of wind power plants using a profile laser scanner [C]. Proc. of 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 2016.

- [34] DILEK A U, OGUZ A D, SATIS F, et al. Condition monitoring of wind turbine blades and tower via an automated laser scanning system [J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 25-34.
- [35] HELMING P, FREYBERG A V, SORG M, et al. Wind turbine tower deformation measurement using terrestrial laser scanning on a 3.4 MW wind turbine[J]. *Energies*, 2021, 14(11): 3255.
- [36] 石家祥, 宋小全, 吴松华, 等. 风力发电机振动的多普勒激光雷达遥测技术[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2180-2191.
- [37] BAQERSAD J, POOZESH P, NIEZRECKI C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics-A review [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 86: 17-34.
- [38] POOZESH P, BAQERSAD J, NIEZRECKI C, et al. Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 86: 98-115.
- [39] LIU X L, TONG X H, LU W S, et al. High-speed videogrammetric measurement of the deformation of shaking table multi-layer structures [J]. *Measurement*, 2020, 154: 107486.
- [40] EL-KADI O, EL-SHAZLY A, NASSAR K. Robust in-plane structures oscillation monitoring by terrestrial photogrammetry[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2223.
- [41] 亚库普, 王文楹, 孙志. 基于双目摄影测量的风力机叶片振动测量方法[J]. *机械强度*, 2020, 42(3): 573-579.
- [42] 李忠虎, 薛婉婷, 吕鑫, 等. 基于图像融合的风电塔筒边缘检测及提取方法[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(3): 90-95.
- [43] 肖苏华, 乔明娟, 赖南英, 等. 基于3D视觉的风电塔筒焊缝检测系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(2): 122-130.
- [44] MA D M, LI Y S, LIU Y X, et al. Vibration deformation monitoring of offshore wind turbines based on GBIR[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, 20(3): 501-511.
- [45] CUI Y, BANGALORE P, TJERNBERG B L. A fault detection framework using recurrent neural networks for condition monitoring of wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2021, 24(11): 1249-1262.
- [46] PANDA S, TRIPURA T, HAZRA B. First-order error-adapted eigen perturbation for real-time modal identification of vibrating structures [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2021, 143(5): 051001.
- [47] 柳絮, 王坚, 李文. 集成变分模态分解和希尔伯特-黄变换的结构振动时频提取模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(11): 1686-1692.
- [48] 胡嘉苗, 杭晓晨, 朱锐, 等. 周期激励下的风机塔架模态识别方法[J]. *噪声与振动控制*, 2021, 41(4): 239-246.
- [49] 万熹, 黄天立, 陈华鹏. 环境激励下基于改进经验小波变换的土木工程结构模态参数识别[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(2): 219-230.
- [50] 刘宇飞, 辛克贵, 樊健生, 等. 环境激励下结构模态参数识别方法综述[J]. *工程力学*, 2014(4): 46-53.
- [51] 何先龙, 余天莉, 徐兵, 等. 基于塔筒振动特性识别风机塔筒螺栓松动研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(14): 112-118.
- [52] 缙百勇, 陆秋海, 王波, 等. 利用固有频率异常值分析法检测螺栓拧紧力[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(23): 77-82.
- [53] 欧阳儒贤, 胡良明, 向凯, 等. 风力发电机组塔筒螺栓断裂对结构的影响分析[J]. *可再生能源*, 2021, 39(11): 1489-1494.
- [54] 李学平, 刘伟江, 周民强, 等. 风力发电机组塔架振动异常分析与优化[J]. *噪声与振动控制*, 2020, 40(1): 69-73.
- [55] TCHAKOUA P, WAMKEUE R, OUHROUCHE M, et al. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges[J]. *Energies*, 2014, 7(4): 2595-2630.
- [56] MÁRQUEZ F P G, TOBIAS A M, PÉREZ J M P, et al. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods [J]. *Renewable Energy*, 2012, 46: 169-178.
- [57] SU L C, GUO G X, LI Y W. Vibration monitoring of wind turbine tower based on XGBoost[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021, 1948(1): 012075.
- [58] WANG Z Q, LIU C L. Wind turbine condition monitoring based on a novel multivariate state estimation technique [J]. *Measurement*, 2021, 168: 108388.
- [59] 姚文凡. 风力发电机结构振动监测与预警方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 53-60.
- [60] 陶涛, 龙凯, 刘永前, 等. 计及限功率工况的风电塔筒螺栓疲劳寿命预测方法[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(11): 359-366.

作者简介

张鸿泰, 硕士研究生, 主要研究方向为设备状态监控及过程控制。

杨书仪(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为机械系统动力学、机械工程测试与控制。

何先龙, 博士, 主要研究方向为结构安全监测技术与系统研发。

李志鹏, 硕士研究生, 主要研究方向为机电液系统动力学与控制。