

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.006

海上风机灾害分析及健康监测技术综述

朱松晔¹, 朱子默¹, 柯世堂²

(1. 香港理工大学 土木及环境工程学系, 九龙 红磡, 香港; 2. 南京航空航天大学 土木工程系, 南京 210016)

摘要: [目的]风能是近年来飞速发展的可再生新能源。在过去的20年中, 风机总装机量在全球范围内有了大幅度地增长。由于暴露在恶劣的自然环境中, 海上风机尤其容易受到多种灾害的共同干扰。针对常见灾害对风机结构的影响进行了系统性地总结分析。[方法]首先介绍了强台风和中度台风引起的风机叶片破坏和塔架整体倒塌的事故, 对事故现象及分析方法做了初步探讨。除此之外, 考虑中国作为地震多发带以及特殊的海上环境, 对海上风机在波浪和地震荷载作用下的动力响应及灾害预测也进行了系统阐述。针对台风、地震和波浪的不同荷载模拟方法, 包括考虑线性和非线性特征的不同数学模型, 在相关研究领域被相继提出; 相应的风机结构损伤分析也包括了动力学常见的时域分析和频谱分析。[结果]通过采取不同灾害指标, 对于不同荷载及工况下的分析表明, 极端风速是影响风机结构安全性的最关键因素。随着结构健康监测技术在土木基础设施中的成功运用, 其重要性实用性日益受到关注。[结论]系统阐述了土木结构健康监测的原理, 成功实例, 以及相应的传感技术。并进而介绍了健康监测技术在风电领域的发展与应用。有些局部损伤探测已经被工业领域成功实施并取得了良好的效果。值得注意的是, 过往的研究主要集中于对风机局部构件的健康检测方法。针对风机结构稳定性安全性的整体检测将会是未来研究工作的重点。

关键词: 海上风机; 灾害分析; 结构健康监测

中图分类号: TM614; TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0047-13

A Review of Failure Analyses and Structural Health Monitoring Techniques for Offshore Wind Turbines

ZHU Songye¹, ZHU Zimo¹, KE Shitang²

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hongkong, China; 2. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: [Introduction] Wind energy is one type of rapidly-developing renewable clean energy. The number of installed wind turbines (WTs) has increased significantly over the past 20 years. The offshore WTs are typically exposed to a harsh sea environment and prone to natural hazards. Failure analyses for WTs are systematically reviewed in this paper. [Method] The actual damage incidents during historical typhoons are summarized. Waves and earthquakes are another two types of potential hazards for offshore WTs that require serious consideration, although a limited number of WT structure failure induced by earthquakes was reported. A variety of load modeling and simulation methods, which are the prerequisite for WT structural failure analysis, have been developed for different types of loads. [Result] Accordingly, different finite element methods, dynamic simulation methods, and failure criteria have been studied and adopted in the failure analysis. The past results obtained show that extreme wind load governs structural failure of WTs. Meanwhile, structural health monitoring (SHM) techniques have seen increasing applications in civil and mechanical structures. The state-of-the-practice for SHM in civil infrastructure is introduced. Similar SHM concept has recently been applied in WT industry. [Conclusion] This review presents the principles and applications of SHM in WT. The valuable information derived from SHM systems can not only help to prevent potential structural failure, but also improve and optimize the current WT design. However, only a narrow range of WT SHM is covered in this paper. In-service long term monitoring for WT is a critical research area that needs significant research effort in future.

Key words: offshore wind turbine; failure analysis; structural health monitoring

收稿日期: 2018-06-01 返回日期: 2018-06-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会及香港研究资助局联合科研发
助基金项目(51761165022, N_ PolyU533/17)

过去的几十年见证了全球经济的繁荣增长。作为工业革命以来最重要的能源, 化石能源不仅造成了严重的环境污染, 而且面临日益枯竭的严峻问

题。可再生能源因为自身零排放的特征而备受关注。其中,风能凭借全球范围内迅速增长的装机量而成为可再生能源中重要的一部分。截至2017年底,全球共有超过90个国家和地区开始利用风机并网发电。如图1所示,全球风能累计总装机容量达到了539 GW,其中有52 GW是2017新增装机量^[1]。海上风电的发展同样引人关注。因海上风电场相比陆上风电场拥有更高的平均风速,海上风机往往拥有更高能量产出效率。截至2017年底,海上风电的总装机容量达到了18.8 GW^[1]。

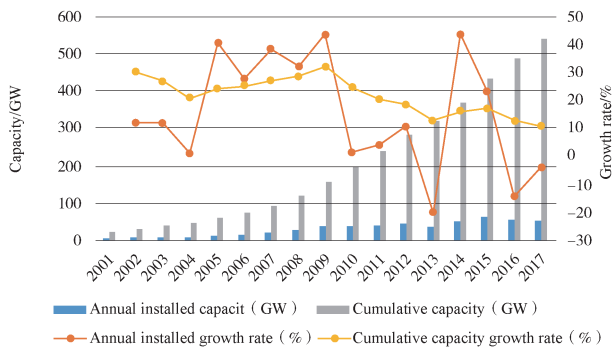


图1 2001—2017年度全球风能统计数据^[1]

Fig. 1 Global wind energy statistics for 2001—2017^[1]

中国在全球风能市场中处于领先地位,到2017年底全国风电装机容量新增加19 GW。目前中国风力发电可满足全国4.8%的能源消耗需求^[2]。随着国家对风电事业的大力扶持,这一比例在可预见的将来仍会继续上升。由于欧美等国家大批海上风电项目的实施,欧盟市场依然占据绝对主导地位。目前英国和德国占有超过60%海上风电市场份额^[1]。

为了实现最大能量产出效率,海上风场需要设立在离岸区域,并且实现无人化管理。因此,风机的结构直接暴露于多变甚至极端气候环境条件中,极易受到台风,热带气旋,地震,波浪,雷击和暴风雪的影响。这些共同因素使得风机在工作中受到的荷载情况多变且不确定,在不同工况组合下产生了较高的机械应力^[3]。如研究报告^[4]中所展示,截至目前风机叶片破坏,火灾,结构失稳破坏是最常见的风机故障。风机的灾害分析对于风电机组的优化设计和灾害预防都有着至关重要的意义。

经历几十年的发展,结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 技术已被成功应用于大型土木结构 (如桥梁和高层建筑) 和机械结构^[5]。结构健康监测通常包括对结构的荷载、结构的响应、以

及结构的状态监测。SHM也可对于结构使用情况和剩余使用寿命做出评估。近年来,许多研究集中在结构健康检测技术在风电领域的应用。针对风机的结构特性和不同的灾害场景,多种损伤识别技术已被成功验证。

这篇综述具体介绍了由台风、地震和波浪引起的结构损伤,并系统阐述了结构健康监测理论和具体应用实例。

1 灾害分析

1.1 风机结构故障的潜在诱因

大部分风机都直接暴露于高平均风速的自然环境中。尤其对于海上风机,强台风和波浪共同作用带来的影响是风机结构监测中不可忽视的因素。中国很多地区处于地震多发带,对于陆上和海上风电场,地震荷载同样值得关注,以确保风电场的稳定运转。

1.1.1 台风

为了实现更高的能量产出效率,越来越多的风电场选择建在沿岸地区甚至海面之上,以充分利用更高的平均稳定风速。与此同时,台风 (又称之为飓风) 因为其极高的瞬时风速,对风机结构的稳定性造成了很大威胁。海上风机尤其容易受到台风影响。近年来,由台风引起的风机结构损伤甚至塔架整体倒塌引起了广泛的社会关注。台风在极端风速、风速梯度、粗糙长度和阵风因子等方面与常态风有着显著不同,因此造成的结构响应也有所不同^[6]。过去几十年中台风已经频繁造成风机不同程度的结构损伤甚至塔架倒塌。台风鸣蝉在2003年正面袭击了日本冲绳地区宫古岛的风电场^[7]。灾害调查报告采用了风洞实验和数值模拟估计现场风速。该报告显示风电场处最大平均风速和最大阵风风速分别为60 m/s和90 m/s。台风过境后,在总共六台风机中,有三台因为基础破坏和塔架入口附近处屈曲而倒塌。其余三台的叶片和机舱外壳都遭到了不同程度的破坏^[7]。

与台风鸣蝉同年,第13号强烈台风杜鹃袭击了中国东南沿海地区。报告显示,红海湾风电场25台风机中有13台受到台风的影响^[8]。风机风速仪测得最大阵风风速达到57 m/s。经计算,十分钟平均风速达到41 m/s^[9]。如图2所示,风机主要的结构损伤出现在叶片部分,包括不同方向的破裂和裂

缝。红海湾风电场在 2013 年经历了台风天兔的袭击。17 个风机塔架在强风中倾倒, 九个机组叶片受到了破坏。根据文献[10]中的计算, 轮毂风速如果达到 71.5 m/s, 风轮叶片将出现结构损伤; 而塔架在 59.8 m/s 的风速中极有可能出现倒塌的情景。

超级台风桑美正面袭击了中国东南沿海地区。浙江温州苍南县鹤顶山风电场在台风桑美中受到了严重破坏。其中 33 个风机叶片发现损伤, 五个塔架由于出现在不同位置的屈曲而倒塌^[11]。记录显示, 最大平均风速已经超过 60 m/s, 极端风速甚至超过了 80 m/s。

中国台湾台中彰化滨海工业区在 2008 年台风蔷薇中遭受了严重损失。在超过 53.4 m/s 的平均风速下, 五台风机的发电机组和七个叶片展现出不同程度的破坏^[12]。

上述五场台风的总结如表 1 所示。

1.1.2 地震

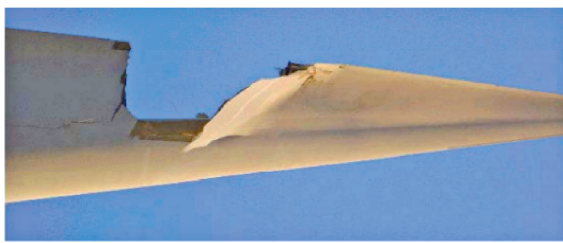
根据文献[13]中的全球数据分析, 截至 2018 年 3 月 31 日, 超过半数的风机结构故障都是由于台风或者风暴引起的。地震造成的结构损伤只占其中极少数。但是, 由于风机是端部有集中荷载的高柔结构体系, 总体抗震能力有限, 因此地震带来的

潜在威胁也是风机结构失效分析中不可忽视的一部分。越来越多的风机在地震频发带投入使用, 包括中国、日本、菲律宾、印度、美国以及南欧部分地区。因此针对风机地震响应的研究分析在 2000 年之后日益增多^[14]。

报告显示, 美国境内曾经有两次地震发生在风电场附近: 1986 年 North Palm Spring 里氏 6.2 级地震和 1992 年发生在 Northridge 的 6.7 级地震^[15]。两场地震的在风电场附近测得的最大地震动加速度分别为 0.33 g 和 0.06 g。震后并未见对于风机损伤的报道。然而, 根据文献[16]中的模拟结果, 0.33 g 的最大地震动加速度将会产生接近设计极限值的结构响应, 因此很大机会包括风机在内的大型结构将会出现结构损伤。

日本第一个外海海上风电场(Kamisui 风电场第一期)在 2011 年 3 月 11 日发生的东日本大地震及海啸中并未出现风机结构破坏^[17]。Matsunobu 的研究分析表明, 在地震和海啸荷载引起的单桩水平面内力远小于处极端风速产生的相应内力^[18]。虽然风机结构并未出现损伤, 风机基础筏板部分却遭到了破坏^[19]。

虽然目前只有很有限的风机故障是由于地震引



(a) 红海湾风电场叶片受损照片一



(b) 红海湾风电场叶片受损照片二

图 2 台风杜鹃过境后红海湾风电场叶片受损情况^[9]

Fig. 2 WT blade damage in Honghai Bay Wind Farm after Typhoon Dujuan^[9]

表 1 近期五次台风中风机结构损伤情况汇总(鸣蝉、杜鹃、天兔、桑美、蔷薇)

Tab. 1 Summary of the structural damage of the wind turbines in the recent five typhoons (Maemi, Dujuan, Usagi, Saomei, Jiangmi)

台风	最大平均风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大阵风风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风电场	国家和地区	风机损伤
鸣蝉	60	90	Nanamata 风电场 & Karimata 风电场	日本	风机塔架倒塌, 叶片损伤, 机舱损伤
杜鹃	41	57	红海湾风电场	中国大陆	叶片损伤
天兔	59.8	71.5	红海湾风电场	中国大陆	风机塔架倒塌, 叶片损伤
桑美	60	80	鹤顶山风电场	中国大陆	风机塔架倒塌
蔷薇	53.4	无记录	彰化滨海工业区风电场	中国台湾	风机塔架倒塌, 叶片损伤

起,然而完全忽略风机结构地震响应无疑是不可取的。因此后文中也详细阐述了关于地震环境下风机结构响应的研究现状。

1.1.3 波浪

海上风机,尤其是漂浮式风机,易于受到波浪和冰荷载的侵蚀^[20]。然而,由于波浪等其他荷载长期影响风机基础,将风机结构损伤简单归因于单一特定波浪的影响是很困难的。因此,流体动力荷载可被视为影响海上风机基础稳定性安全性的潜在因素之一。

1.1.4 其他

由于裂缝的出现,荷兰 Nordzee 风电场的三个墩基础需要重新更换^[21]。2012年8月16日,Canterbury 时报报道了英格兰 Kentish Flats 海上风电场的结构事故^[22]。报道指出 Whistable 和 Herne 离岸的海上风机基础泥浆接合部分产生了破坏和轻微偏移。2015年12月1日,哥本哈根邮报报道丹麦 Paluden Flak 海上风电场一个高度为 100 m 的风机叶片和顶端所有结构跌入海中^[23]。此前风机已经安全工作超过十年,风机厂商西门子公司也未能对此事故原因做出合理解释。

1.2 灾害分析

1.2.1 荷载模拟

1.2.1.1 台风

台风与普通风主要区别在于台风拥有更高的平均风速和频繁的强度震荡。对风速分布的分析是风机灾害分析的前提条件。如文献^[24]中呈现的图3所示,风机机舱中设有风速表以便记录风机工作状态下的现场实际风速。中国台湾彰化滨海工业园区风电场的风机风速表成功记录了台风蔷薇过境全程现场风速变化,如图4所示^[12]。

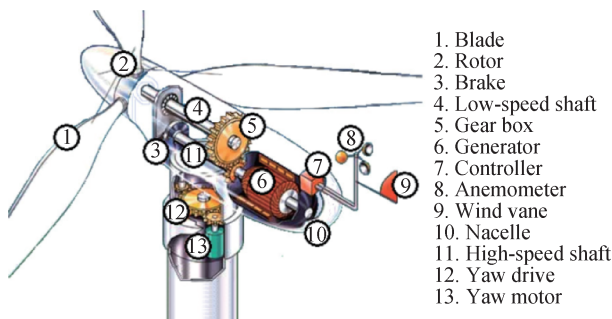


图3 风机机舱内部部件示意图^[24]

Fig. 3 Components inside a wind turbine nacelle^[24]

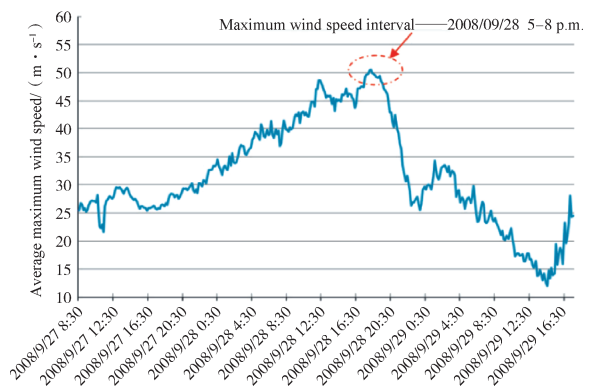


图4 风机风速仪记录台风蔷薇平均最大风速历史^[12]

Fig. 4 The average maximum wind speed recorded by wind turbine anemometer during Typhoon Jangmi^[12]

然而,由于台风中风机极有可能和电网失去连接,风速表因此将不能记录风速历史。类似的案例在文献^[7, 9]中已经有所报道。为了获取台风过境时现场风速,常采取风洞实验或者数值模拟的手段进行估计。非定常流空气动力学实验是研究风机空气动力学特性的常用方法^[25]。在对台风鸣蝉的风速模拟中,日本 Ishihara 研究团队采用膜裂纤维进行风洞实验,很好地模拟了风电场周边地形对风速的影响^[7, 26]。当风洞实验实施有难度时,也常会采用数值模拟的方法。Xu 和 Mu 采用了 TAPM 模式系统中的气象模式部分模拟离岸风速的高度分布^[27]。速度波动也是流体力学研究中需要重点考虑的部分, Xu 和 Chen 运用经验模态分解来描述台风中的不稳定气流^[28]。用随时间变化的平均风速加上符合高斯分布的速度分量,大多数不稳定风速数据都可以得以表示。风频谱的选择是模拟台风速度波动的关键,不同的风频谱被相继提出,例如文献^[29-30]。根据风速信息,风荷载可随之推导。

1.2.1.2 地震

为了评估地震对风机结构完整性的影响,不同的规范被相继提出。国际电工委员会(IEC: The International Electrotechnical Commission)建立了风电行业的国际标准^[31]。标准中提出三种地震响应模拟方法:(1)简化方法;(2)时域分析方法;(3)结构响应谱分析方法。在单自由度体系的简化分析中,因不需要地震波的时域分析,分析过程具有较高的计算效率^[31-32]。风机叶片和机舱在模拟中被简化为模型塔架上方的集中荷载。此简化方法并未将同样影响风机地震荷载响应的高阶模态考虑在

内, 因此模拟精确度相对较低^[33]。相比简化方法, 时域分析拥有更高模拟精度。Bazeos 等人在文献[34]中详细阐述了对风机模型钢结构塔架的地震响应时域分析。研究首先搭建了完整的风机有限元模型, 以分析静力和屈曲效应。随之建立了有 18 个集中质量的多自由度简化模型, 然后根据希腊地震规范, 六条人工地震波输入风机有限元模型进行时域分析。研究发现, 输入的地震波并不能引起风机设计极限状态的结构响应, 极端风速对风机设计起更为关键的作用。Ritschel 等人在文献[16]中同样阐述了空气动力学荷载对风机设计的控制作用。Lavassas 等人^[35]通过对风机模型的频谱分析得到了同样结论。在频谱分析中某些特定的参数需要事先确定, 如: 土壤放大系数, 阻尼修正系数, 模态组合和可靠度等^[19]。不同规范建议了不同的参数组合。Witcher 在文献[36]中详细对比了地震荷载作用下时域分析和频域分析方法。两种方法的主要区别在于系统阻尼的计算。在时域分析中, 通过有限元模型中的实际结构, 空气动力学和土壤阻尼、系统阻尼可被更准确的推导并用于后续计算。在频域分析中, 系统阻尼常采用假定值, 目前研究中通常采用 5%。除此之外, 由于时域分析中建立了完整的有限元风机模型, 结构体系的空间分布和材料非线性特征对风机极限设计值的影响将同样被考虑在内^[37]。然而, 完整的有限元模型分析需要大量的计算资源, 因此时域分析的应用受到了一定的局限。

在 IEC 建议的简化方法中, 模型基底节点处需要全约束。此简化方法在中等强度或者柔性土的应用中精准度较低^[38]。土壤结构交互作用 (SSI: Soil structure interaction) 对风机结构地震响应的影响因此同样需要考虑。Bazeos 等人首先在风机研究中引入了 SSI 的概念^[34]。通过在模型中采用多个弹簧, 结构基本圆频率相比全约束模型有了显著降低。

1.2.1.3 波浪

海上风机和陆上风机最大的不同就是海上风机的基础部分长期处于海平面以下, 因此更易受到水流、波浪和其他环境荷载的影响^[39]。

为了简化流体动力学问题, 常采用线性化分析方法。Jonkman 和 Sclavounos 在文献^[40]中将线性化的前提假设列举如下: (1) 波浪幅值远小于波长; (2) 支撑平台的横向位移远小于平台尺寸; (3) 分析中将采取叠加的方法; (4) 为了简化波浪的辐射,

洋流在此方法中不做考虑; (5) 海面漂浮物和冰可能产生的荷载也不做考虑。时域分析和频域分析都可用于线性化问题中。在时域分析中, 问题进一步被简化为三个主要问题: 辐射, 散射和流体静力学问题^[41]。对于辐射的研究目的在于找到风机在不同模式下震动所需的外力。这一过程中暂时忽略入射波的影响。在散射问题中, 风机基础平均位置在入射波存在情况下的受力得以求解。荷载来源于 Froude-Kriloff 自由场以及散射效应。流体静力学分析是整体结构响应分析的基础和关键环节。Cummins 在 1962 年最先引入公式模拟船只的震荡^[42]。频域分析和时域分析基本采用了相似的前提假设。频域分析的独特之处在于要求风机基础和入射波的震动频率相同。和地震荷载频域分析相同, 对波浪的频域分析可以减少计算负荷。Wang 和 Yang 在文献[43]中分别应用时域和频域分析方法模拟波浪。结果显示, 风机结构疲劳损伤可以通过 Dirlik 概率模型的频谱分析来反映, 相比时域分析的误差也在允许范围内。频域分析方法的主要缺陷是忽略了流体的非线性特征和暂态流的影响。

由于多数海上风机设立于水深小于 30 m 的近海^[44], 模拟中忽略波浪的非线性特征是不合理的。在固定式基础海上风机的研究中, 常采用 Morison 方程。此公式常应用于 $D/\lambda < 0.2$ 的结构中, 如风机塔架, 其中 D 为结构直径, λ 为波长^[45]。结合切片理论, Morison 方程可求解波浪线性荷载和非线性粘性阻力。破碎波是浅水中重要的流体动力荷载来源, Chella 等人在文献[46]中阐述了 Morison 方程在破碎波仿真中的应用实例。文章证实了动力荷载和极端荷载中大量的不确定因素是由破碎波造成。除了在破碎波仿真中的应用, Morison 方程同样可以运用于描述波的反射、传播、浅化等其他非线性特征。除了 Morison 方程, 其他不同的流函数波理论也在研究中被广泛应用, 包括 Dean's 理论, Fenton's 理论和 Boussinesq 理论^[40]。

1.2.2 建模

有限元模型常用于分析外力施加下的风机结构响应。过度变形、疲劳、屈曲和塑性失稳是风机塔架常见的失效模式^[47]。不同的研究背景和目的常采用不同的破坏判据。Ishihara 建立风机有限元模型研究台风鸣蝉中受到破坏的基础和塔架^[7]。通过对风机模型分析最大弯矩和极限设计值的比较, 可

对基础和塔架的破坏做出合理解释。Chou 和 Tu 建立了忽略叶片的风机三维有限元模型^[48]。塔架的基底应力被选作破坏凭据。不同风速下基底应力的变化可在一定程度上反映风机结构健康状况。台风常带来强降雨,对风机结构也是潜在的隐患。Wang 等人研究了强台风和强降雨对风机结构响应的协同作用。风机弹性-塑性模型在传统有限元分析软件 ABAQUS 中搭建^[49]。当风机基础底部实际应力超过材料屈服应力时,塔架整体失稳便可能发生。因此,范氏等效应力(The von Mises stress)也常作为风机破坏的判据。除了风机塔架倒塌,叶片的破坏也是研究热点之一。通过在三维风机叶片有限元模型中应用 Tsai-Wu 失效准则,Chou 等人判断了损伤类型和严重程度^[12]。运用类似方法,Chen 等人评估了风机叶片复合纤维分层损伤状况^[50]。其他失效准则同样可用于风机复合材料的探伤,如文献[50-51]。

前文提到的 SSI 效应,在有限元建模中常用弹簧来模拟。在对 2011 年东日本大地震中受损风机的研究中,Butt 和 Ishihara 引入了摆动模型模拟风机基础的 SSI 效应^[19]。如图 5 所示,有限元模型中引入了多个弹簧。研究表明 SSI 效应对风机整体结构响应有一定的影响。

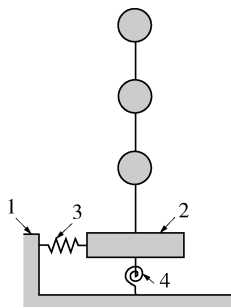


图5 风机摆动模型^[19]

Fig. 5 Sway rocking model^[19]

近期, Mardfekri 和 Gardoni 建立完整的三维有限元模型以分析土壤-基础-风机整体结构响应^[52,53]。土壤介质的非线性特性可用 Mohr-Coulomb 塑性模型和 Coulomb 弹塑性模型表示。加载极端风力和地震荷载之后,风机整体结构风险可由对比工业规范做出评估。

2 结构健康监测技术

经过数十载的发展,结构健康监测技术已成为

评估大型结构功能性安全性完整性的常用方法。通过处理传感器和采集系统收集的数据,用户可对结构的运行状态(甚至包括结构的损伤位置和严重性)做出判断和评估。由于可提供结构损伤信息,整体结构健康监测技术也是最近的研究热点。文献[54-56]中非常系统地展示了现阶段不同的健康监测技术。结构健康监测现已在中国、美国、加拿大、欧洲、日本、韩国等其他国家和地区成功应用。

2.1 结构健康监测在超大型结构中的应用

结构健康监测技术已经成功应用于桥梁^[57-60],高层建筑^[61-63]和其他超大规模结构中^[5,64]。中国内地和香港地区都是结构健康监测技术发展较快、应用较多的地区。香港青马大桥上传感器和信息收集系统的成功实例如图 6 所示^[65]。如图所示,共有 286 个不同种类的传感器在青马大桥成功运用。同样在香港,昂船洲大桥是世界上跨度第二长的斜拉桥。Zhu 等人在文献[66]中总结,昂船洲大桥共安装 14 种共计 1 505 个传感器,其中动态应变计占 678 个。不同的传感器共同组成了桥梁的健康监测系统,为结构健康评估提供多样化的信息。

围绕青马大桥的健康检测技术,香港路政署和香港理工大学发表了大量文献。Wang 的研究团队建立精细化的有限元模型来测试模型对损伤的敏感度^[67]。通过模拟十种不同的灾害场景,Wang 验证了相比频谱分析,模态柔度法拥有更高敏感度。Ko 等人在文献[68]中阐述了健康监测中运用振动分析的可行性,结论证实低噪声数据是定位桥面板损伤的前提条件。利用青马大桥上已安装的 110 个应变计,Ni 的研究团队通过分析应变数据对青马大桥的实时健康状况做出及时评估^[69]。研究证明了青马大桥强度利用因子处于设计范围之内,整体健康状况良好。Li 等人对青马大桥上包括铁路和公路在内的交通荷载做出了评估^[70]。通过应用过滤泊松过程,随机轴向力可以得到确定。随后推导出的可靠度指标可为青马大桥的维护提供信息和指导。

2.2 结构健康监测技术原理

2.2.1 结构健康监测动机

正如前文所述,结构健康监测技术对于评估现役结构完整性安全性具有极其重要的意义。Bala-gas 等人在文献[71]中列举了实施结构健康监测的动机:

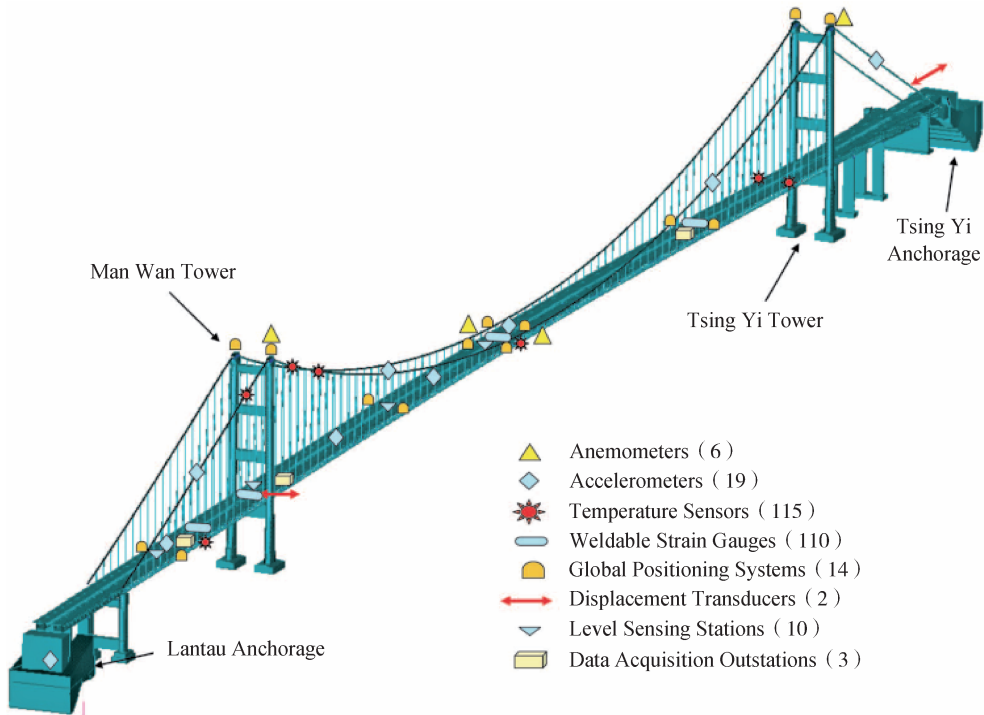


图6 青马大桥感应和信息收集系统^[65]

Fig. 6 The sensory and data acquisition system on Tsing Ma Bridge in Hong Kong^[65]

1) 优化结构使用状况, 减少故障时间, 以及避免灾难性事故的发生。

2) 为建设者优化结构设计提供相关信息。

3) 优化维修服务流程。

2.2.2 损伤探测方法

而损伤探测是结构健康监测系统的一个重要目的。针对不同检测目标, 多样化的损伤探测技术逐渐在市场中投入使用。Rytter 将这些方法系统归类为下列四个等级^[72]:

第一级: 识别早期损伤的产生。

第二级: 定位损伤。

第三级: 评估损伤程度。

第四级: 预测结构剩余服务寿命。

损伤根据结构特性可以划分为线性损伤和非线性损伤。当结构的线弹性在损伤后仍然维持时, 该损伤可被分类为线性损伤。模态分析方法是检测此类损伤的常用工具。众多文献针对损伤出现后模态参数的变化做出了研究, 包括共振频率、阻尼、振型、频响函数、柔度矩阵、以及与模态振型指标相关的其它复杂指标等。Salawu 对基于自振频率变化的结构健康技术进行了系统地总结^[73]。综述就频

率变化和结构损伤之间的关系展开了讨论。文章同样阐述了该方法的不足: 因为频率是结构的整体特征, 此方法目前仅适用于损伤的粗略识别, 单独根据频率的变化很难确定损伤的位置和严重程度。结构损伤后振型的变化同样可作为损伤判据。West 首次在结构健康监测中引进振型变化的研究^[74]。模态置信准则被用于航天飞机轨道器体瓣未损伤和加载后振型变化的比较。和频率分析不同的是, 通过对振型变化的分析, 结构损伤位置可被确定。在青马大桥的研究实例中可见, 应变模态同样是有有效的损伤指标。Doebbling 在文献[55, 75]中详细总结了基于模态分析的结构健康监测方法。而当线弹性结构损伤后开始呈现非线性特征时, 此损伤则为非线性损伤。裂隙延伸和松动连接都是非线性损伤的例子。和极限荷载下的模拟方法类似, 时域分析和频谱分析同样适用于结构健康监测技术。二者已经广泛应用于工程领域对转动机械的研究。时域分析可探测非平稳性故障。通过傅里叶变换, 频域分析刻画了特定时间窗口结构的振动情况^[76]。

2.2.3 荷载和传感器布设

在实际运转中, 结构体暴露在多荷载共同作用

环境下。Qin 将桥梁中具体出现的荷载在文献[77]中详细分类。在桥梁上施加的可控荷载包括静力荷载、动力荷载和冲击荷载。荷载的大小、方向和时程可被记录。交通荷载、地震负载和风荷载属于人力不可控外力。对于这些荷载的分析处理，需要注意噪声的影响。环境荷载在桥梁结构健康监测中同样是重要的一部分。在数据收集过程中，激励和结构响应需要被同步记录。

传感器布设是结构健康监测成功与否的前提。众多研究根据有限元模型分析结果，提出了不同的损伤关键位置。对于不同采样参数需要采用对应的传感器。Wong 在文献[65]中总结了桥梁健康监测系统中常见的传感器和对应监测参数。研究结果展示如表 2 所示。

2.3 风机结构健康监测技术

风机的设计使用年限通常为 10 ~ 30 年。由于长期暴露在强风、地震、波浪等极端环境中，风机的叶片和塔架在日常运转中积累了大量的荷载循环。Chakoua 等人在文献[78]中阐述了常见风机机械故障的发展历程，结论展示如图 7 所示。

结构健康监测系统可探测结构早期损伤，预防联合损伤甚至塔架整体倒塌的发生，因此在风电场应用结构健康检测技术是具有现实意义的。与此同时，通过分析反馈数据，可优化维护安排，节约维护时间。海上风电场维护较陆地风电场更为困难，因此结构健康监测技术的实施对海上风电场具有关

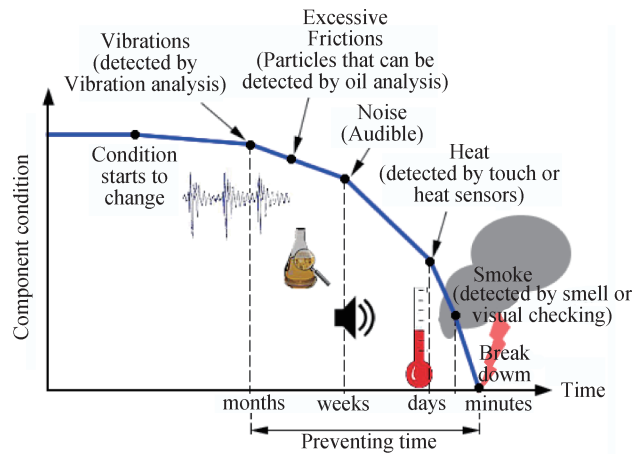


图 7 典型风机机械失效发展历程^[78]
Fig. 7 Typical development of wind turbine mechanical failure^[78]

键意义。此外，结构健康监测也为日后风机优化设计提供了有用信息。

大量文献对风机健康检测技术进行了研究^[24,79-81]。然而，风机长期实时监测技术的研究仍在起步阶段。过往的研究主要集中于对风机局部构建的健康检测方法。针对风机结构稳定性安全性的整体检测将会是未来研究工作的重点。本文进而对局部损伤探测技术做出总结。

2.3.1 振动分析

振动分析是运用最广泛的结构健康监测技术，尤其适用于如风机叶片等转动机械构件。如图 8 所示，振动分析可用于结构损伤的早期探测。位置传感器、速度传感器、加速度计和光能量传感器可分

表 2 传感器及其主要检测参数^[65]

Tab. 2 Sensors and major monitoring parameters^[65]

监测类别	监测项目	传感器	主要检测参数
荷载和环境	风荷载	风速计, 气压计, 雨量计	玫瑰图/平均风速和阵风风速廓线, 风的发生/湍流强度, 湍流流的时间 and 长度, 风湍流谱
	温度荷载	白金 RTD, 拉索热耦合器	塔架甲板和拉索有效温度, 塔架和甲板温度差
	公路、铁路荷载	动态称重, 弯板式传感器, 动态应变仪, 数码摄像机	汽车/火车总重量, 轴重分布, 交通模式和载荷谱, 交通拥堵下的桥梁挠度, 桁架/梁的应变/应力分布
	地震荷载	伺服式加速度计	塔锚附近的加速度谱和反应谱
桥梁响应	拉索张力	加速度计	单索拉力
	几何构型	全球定位系统, 位移传感器, 伺服式加速度计	热/风/地震/公路/铁路运动
桥梁特征	应变、应力分布	温度传感器, 应变仪	混凝土塔的收缩徐变效应, 应力/力分布
	疲劳应力估算	动态应变仪	不同应力水平下的循环雨流量计算
桥梁特征	液位传感器, 全球定位系统, 动态应变仪, 加速度计		列车荷载影响线, 公路荷载影响线, 甲板板影响面, 频率/振型/模态阻尼比/质量参与因子

别应用于低频到高频的检测^[78], 加速度计已经在大型结构监测系统中广泛使用^[82], 而结构的速度和位移响应可由测得的加速度积分得到, 频率响应谱也可由傅里叶变换分析。国际标准化组织(ISO)在文献[83]中规范了振动分析的使用, 同时对传感器的布设提出了建议。

由于其简便性和易操作性, 振动分析已在高层建筑和桥梁结构监测中获得广泛应用。然而, 由于振动分析需要额外的硬件和软件, 使用成本将会有所提高。根据 Hameed 等人的研究^[79], 振动分析对低频分量具有较低的敏感度, 这在特定程度上限制了其应用。目前, 长期实时振动分析在风电领域的应用仍然比较有限。

2.3.2 应变测量

通过安装应变计, 应变测量是一种广泛使用的技术。应变测量目前通常用于保障应力安全水平和预测疲劳寿命。该技术在风机叶片损伤探测中已得到具体应用^[84]。光纤光栅(FBG)传感器具有很强的抗电磁干扰特性和广泛适用性, 在风机应变测量中具有广阔的运用前景^[85]。由于风机长期直接暴露在多灾害的自然环境中, 易于受到雷电影响, FBG 传感器使得风机长期应变监测成为可能。为了处理应变数据, 常构建有限元模型进行分析。Bang 等建立了基于模态法的位移-应变变换矩阵的有限元模型^[86]。通过在风机塔中应用阵列 FBG 传感器, 可获得结构整体挠度信息。

Ciang 等人提出了将形状记忆合金嵌入到风机叶片中的可能性^[24]。未来仍需要更多的研究来证实对于风机叶片承载能力的影响。

2.3.3 目视检查

目视检查无疑是最古老的检测技术之一。它还可作为其他损伤探测方法的辅助补充。目视检查通常用于观察转子叶片、吊舱、偏航驱动器、轴承、发电机和变压器的损坏。然而, 它的应用局限于表面缺陷, 并且高度依赖于检验员的经验。

最近, McGugan 在文献[87]中陈述了专门为海上风电场研制的远程目视检查技术。Auto Copter Corporation^[88]生产了特殊的飞行目视检查装置, 使得海上风电场的降低维护成本成为可能。

2.3.4 声发射(AE)

声发射是复合材料损伤监测的有力手段。它是基于理论, 即在一个介质中的动态变形以瞬态弹性

波的形式释放能量^[71]。多种过程均可发射弹性波, 包括裂纹的萌生和扩展, 纤维的断裂, 以及在脱粘或脱层的表面之间的基体开裂和微动。压电和光纤传感器是常用的传感器。如 Mba 和 Rao 在文献[89]中讨论, 振幅和均方根速度是有效的测量指标。和振动分析不同的是, AE 通常是监测到从 50 kHz 到 1 MHz 的高频信号。声发射检测仪如图 8 所示。

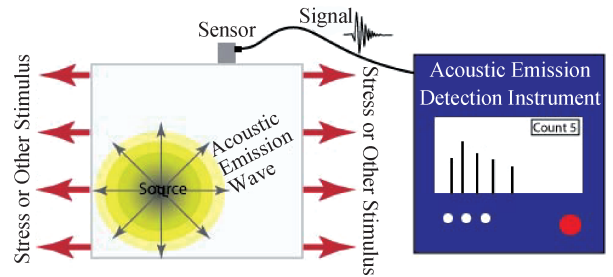


图8 声发射检测仪^[90]

Fig. 8 Acoustic emission detection instrument^[90]

AE 可以结合振动分析来监测损伤。Soua 等^[91]将该组合方法在风机上应用五年, 以探测风机齿轮箱和发电机轴的损伤。

AE 凭借较大的频率探测范围和较低的信号噪声, 相比其他 SHM 技术有很大优势。然而, AE 传感器通常需要位于潜在损伤附近, 这在一定程度上限制了声发射在整体结构健康监测中的应用。

2.3.5 超声波检测

超声波检测是探测固体内部缺陷的常用方法。这一技术是基于超声波在遇到缺陷时的反射散射现象。该方法采用的技术有脉冲回波、螺距捕获和穿透传输。空气耦合超声换能器、激光干涉传感器和电磁超声换能器是超声检测中常用的传感器。超声波从发射器发射到材料中, 并由放置在另一侧或同一侧的接收器拾取。所获得的信号可以通过 Hilbert-Huang 变换、Wigner-Ville 分布和小波变换等多种算法进行处理。

超声波检测能够在不考虑空气湿度和环境温度的情况下预测结构内部缺陷的位置和性质。该方法的主要缺点是只能探测局部缺陷, 通过超声波检测难以确定整个结构的健康状况。

2.3.6 热成像分析

热成像分析是基于观察结构表面上的温度差以预测潜在损伤。前提假设是当机械系统存在故障时, 所有工作部件发出的热量和温度都将超过正常

值。在测试过程中通常会使用红外传感器或照相机。通过红外扫描仪可探测层压材料和粘接接头的内部情况。

热成像分析常用于定期人工手动检查。它能够检测元件或系统级的损伤,因此,热成像分析也被用作整体 SHM 技术评估结构整体稳定性和安全性。该技术的另一个优点是可以验证有限元模型中的应力和应变分布。因此预测可能的失效模式,并提供预防措施来防止进一步的风机损伤。然而,其测试精度受到温度随空间和时间变化的显著影响。而且如 Anjar 等在文献[92]中提到,热成像分析需要在离线状态下执行,使得该技术很难在实时监测系统中应用。

3 结论

本文综述了海上风力发电机组的故障分析和相关的结构健康监测技术。风电产业在全球范围内飞速发展。由于风电场常坐落于多灾害共存的偏远地区,尤其对于中国的近海风电场,极易受到台风和海浪的影响。同时,中国处于地震多发带,地震对风机结构安全的影响也是不容忽视的一部分。

文章首先回顾了有记录以来的风机破坏的实例。针对台风、地震和波浪引起的风机故障进行了总结。台风瞬时最大风速下的计算是台风破坏分析中的关键之一。在地震破坏分析中,介绍了地震响应模拟的时域法和频域法。为了模拟水动力荷载的线性和非线性特性,已经提出了不同的数字模拟方法。对于风机失效模式的研究,通常引入有限元模型,并需要模拟风机基础的 SSI 效应。通过施加多种荷载,并定义特定的损伤指标,可初步确定多灾害环境下的风机失效模式。

在对风机失效模式有足够了解的情况下,应采用合适的 SHM 技术来监测可能的损伤缺陷或安全隐患。多种损伤探测技术在过去的几年中已经成功应用于风电领域中。长期实时监测系统对结构整体功能性、稳定性和安全性的检测将会是未来研究工作的重点。通过本综述可得出结论,基于合理灾害分析的结构健康监测技术在风电领域的应用具有重要意义。该技术不仅可以预测和防止潜在的结构失效,而且可以通过 SHM 的反馈来优化日后风机结构设计。

参考文献:

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind statistics[EB/OL]. (2017-06-10) [2018-02-14]. http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf.
- [2] Global Wind Energy Council. Global wind report —annual market update 2017 [EB/OL]. (2018-04-25) [2018-04-28]. http://files.gwec.net/files/GWR_2017.pdf.
- [3] RIBRANT J, BERTLING L. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005 [C]//IEEE. Power Engineering Society General Meeting, U. S. A., 2007. U. S. A.: IEEE, 2007.
- [4] FORUM C W I. Summary of wind turbine accident data to 31 March 2013 [EB/OL]. (2013-03-31) [2018-04-28]. <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/accidents.pdf>.
- [5] CHANG P C, FLATAU A, LIU S. Health monitoring of civil infrastructure [J]. Structural Health Monitoring, 2003, 2(3): 257-267.
- [6] CHOI E. Gradient height and velocity profile during typhoons [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1984, 13(1): 31-41.
- [7] ISHIHARA T. An analysis of damaged wind turbines by typhoon maemi in 2003 [C]//Anon. Proceedings of the sixth Asia-Pacific conference on wind engineering, Korea, 2005. [S. l.]: Techno-Press, 2005.
- [8] ZHANG L, REN L, MAO J, et al. The analysis on influence of wind turbine generating units in atrocious weather conditions [C]//Anon. Proceedings of ISES World Congress 2007, Heidelberg, 2007. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [9] 于午铭. 台风“杜鹃”的危害与思考 [C]//中国电机工程学会. 中国科协2004年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会2004年学术年会, 海南, 2004. 北京: 中国电机工程学会, 2004.
- [10] CHEN X, XU J Z. Structural failure analysis of wind turbines impacted by super Typhoon Usagi [J]. Engineering Failure Analysis, 2016(60): 391-404.
- [11] LI Z Q, CHEN S J, MA H, et al, Design defect of wind turbine operating in typhoon activity zone [J]. Engineering Failure Analysis, 2013(27): 165-172.
- [12] CHOU J S, CHIU C K, HUANG I K, et al. Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 27(6): 99-118.
- [13] Caithness Windfarm Information Forum. Global data of wind turbine accident data to 31 March 2018 [EB/OL] (2018-03-31) [2018-05-10] <http://www.caithnesswindfarmscouk/fullaccidentspdf>.
- [14] KATSANOS E I, THÖNS S, GEORGAKIS C T. Wind turbines and seismic hazard: a state-of-the-art review [J]. Wind Energy, 2016, 19(11): 2113-2133.

- [15] PROWELL I, VEERS P. Assessment of wind turbine seismic risk: Existing literature and simple study of tower moment demand [R]. U. S. A. : Sandia report, 2009.
- [16] RITSCHEL U, WARNKE I, KIRCHNER J, et al. Wind turbines and earthquakes [EB/OL]. [2018-04-28]. In 2nd World Wind Energy Conference, 2003, Citeseer.
- [17] JFS. Offshore wind farm withstands great east Japan earthquake and Tsunami [EB/OL]. (2011-07-10) https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id031055.html.
- [18] TAKASHI, MATSUNOBU, SHINZO, et al. Seismic design of offshore wind turbine withstands great east Japan earthquake and Tsunami [J]. 能源与动力工程: 英文版, 2014, 8(12): 2039-2044.
- [19] BUTT U A, ISHIHARA T. Seismic load evaluation of wind turbine support structures considering low structural damping and soil structure interaction [J]. European Wind Energy Association Annual Event, 2012(4): 16-19.
- [20] 贾文强, 金鑫, 李浪, 等. 复杂海况下风力发电机建模与动态特性仿真分析 [J]. 重庆大学学报, 2017, 40(8): 37-44.
- [21] Anon. Operations report 2009 [EB/OL]. (2010-11) [2018-05-10] http://www.noordzeewind.nl/wp-content/uploads/2012/02/OWEZ_R_000_20101112_Operations_2009.pdf.
- [22] Wind Action. Wobbly wind turbines off the Whitstable coast need repairing [EB/OL]. (2012-08-16). [2018-05-10]. <http://www.windaction.org/posts/34647-wobbly-wind-turbines-off-the-whitstable-coast-need-repairing#WvRLwqSFNhE>.
- [23] INCIDENT M. Wind turbine on Samsø crumbled into the sea [EB/OL]. (2015-12-01). [2018-04-25]. <https://www.wind-watch.org/news/2015/12/01/wind-turbine-on-samso-crumbled-into-the-sea/>.
- [24] CIANG C C, LEE J R, Bang H J. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(12): 310-314.
- [25] HAND M, SIMMS D, FINGERSH L, et al. Unsteady aerodynamics experiment phase V: test configurations and available data campaigns [M]. [S. l.]: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2001.
- [26] YAMAGUCHI A, ISHIHARA T, FUJINO Y. Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1-2): 247-264.
- [27] XU J I. Numerical simulation and analysis of offshore wind field features in Shanghai under the influence of typhoon [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, 25(3): 281-286.
- [28] XU Y, CHEN J. Characterizing nonstationary wind speed using empirical mode decomposition [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6): 912-920.
- [29] HØJSTRUP J. Velocity spectra in the unstable planetary boundary layer [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1982, 39(10): 2239-2248.
- [30] SHARMA R N, RICHARDS P J. A re-examination of the characteristics of tropical cyclone winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/3): 21-33.
- [31] IEC. Wind turbines-part 1, design requirements; IEC 61400-1 [S]. Swiss; IEC, 2005.
- [32] DNV. Guidelines for design of wind turbines [S]. Norseland: Campus Risø, 2002.
- [33] ISHIHARA T, SARWAR M. Numerical and theoretical study on seismic response of wind turbines [C]// European Wind Energy Association. European Wind Energy Conference and Exhibition, Brussel, 2008. Belgium: WindEurope, 2009.
- [34] 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.
- [35] LAVASSAS I, NIKOLAIDIS G, ZERVAS P, et al. Analysis and design of the prototype of a steel 1 MW wind turbine tower [J]. Engineering Structures, 2003, 25(8): 1097-1106.
- [36] WITCHER D. Seismic analysis of wind turbines in the time domain [J]. Wind Energy, 2005, 8(1): 81-91.
- [37] THÅKNS S, FABER M H, RÄŽCKER W. Ultimate limit state model basis for assessment of offshore wind energy converters [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2012, 134(3): 031904.
- [38] LUCO J E. Soil-structure interaction effects on the seismic response of tall chimneys [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, 5(3): 170-177.
- [39] 刘正浩, 万德成. 波流作用下海上固定式风机基础的水动力性能数值模拟 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(5): 555-560.
- [40] JONKMAN J, SCLAVOUNOS P. Development of fully coupled aeroelastic and hydrodynamic models for offshore wind turbines [J]. Journal of Hygiene, 2006, 46(3): 331-344.
- [41] NEWMAN J N. Marine hydrodynamics [J]. MIT Press, 1977, 45(2): 457.
- [42] CUMMINS W. The impulse response function and ship motions [M]. Washington D C: David Taylor Model Basin, 1962.
- [43] 王德如, 杨和振. 海上风机支撑结构的时域和频域疲劳对比研究 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(4): 74-78.
- [44] 阮胜福. 海上风电浮式基础动力响应研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [45] 王磊. 海上风电机组系统动力学建模及仿真分析研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [46] CHELLA M A, TØRUM A, MYRHAUG D. An overview of wave impact forces on offshore wind turbine substructures [J].

- Energy Procedia, 2012, 20(5): 217-226.
- [47] ALBERMANI F, KITIPORNCHAI S, CHAN R W K. Failure analysis of transmission towers [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(6): 1922-1928.
- [48] CHOU J S, TU W T. Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(1): 295-313.
- [49] WANG Z, ZHAO Y, LI F, et al. Extreme dynamic responses of MW-level wind turbine tower in the strong typhoon considering wind-rain loads [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013(3): 133-174.
- [50] CHEN X, ZHAO W, ZHAO X L, et al. Failure test and finite element simulation of a large wind turbine composite blade under static loading [J]. *Energies*, 2014, 7(4): 2274-2297.
- [51] YE L. Role of matrix resin in delamination onset and growth in composite laminates [J]. *Composites Science and Technology*, 1988, 33(4): 257-277.
- [52] MARDFEKRI M, GARDONI P. Multi-hazard reliability assessment of offshore wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2015, 18(8): 1433-1450.
- [53] MARDFEKRI M, GARDONI P. Probabilistic demand models and fragility estimates for offshore wind turbine support structures [J]. *Engineering Structures*, 2013(52): 478-487.
- [54] DOEBLING S. *Damage detection and model refinement using elemental stiffness perturbations with constrained connectivity* [R]. [S.l.]: Office of Scientific & Technical Information, 1996.
- [55] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. *Shock and Vibration Digest*, 1998, 30(2): 91-105.
- [56] HEMEZ F M, DOEBLING S W. Review and assessment of model updating for non-linear, transient dynamics [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001, 15(1): 45-74.
- [57] KO J, NI Y. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges [J]. *Steel Construction*, 2005, 27(12): 1715-1725.
- [58] MEHRJOO M, KHAJI N, MOHARRAMI H, et al. Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35(3): 1122-1131.
- [59] CRUZ P J, SALGADO R. Performance of vibration - based damage detection methods in bridges [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2009, 24(1): 62-79.
- [60] TENNYSON R, MUFTI A A, Rizkalla S, et al. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10(3): 560.
- [61] LIN S, YANG J N, ZHOU L. Damage identification of a benchmark building for structural health monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(3): S162.
- [62] NI Y Q, XIA Y, LIAO W Y, et al. Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 16(1): 73-98.
- [63] KIJEWski-CORREA T, KWON D K, KAREEM A, et al. Smartsync: an integrated real-time structural health monitoring and structural identification system for tall buildings [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 139(10): 1675-1687.
- [64] BROWNJOHN J M. Structural health monitoring of civil infrastructure [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1851): 589-622.
- [65] WONG K Y. Design of a structural health monitoring system for long-span bridges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2007, 3(2): 169-185.
- [66] ZHU S, XU Y L, ZHEN Y, et al. Structural health monitoring-based finite element model of Stonecutters Bridge [C]//Anon. 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2012, Stresa, Lake Maggiore, 8-12 July 2012. Stresa: Polyu Institutional Research Archive, 2012; 844-851.
- [67] WANG J Y, KO J M, NI Y Q. Modal sensitivity analysis of Tsing Ma Bridge for structural damage detection [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2000, 19(6): 300-311.
- [68] KO J M, NI Y Q. Feasibility of damage detection of Tsing Ma Bridge using vibration measurements [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2000, 249(1): 356-361.
- [69] NI Y Q, XIA H W, KO J M. Structural performance evaluation of Tsing Ma Bridge deck using long-term monitoring data [J]. *Modern Physics Letters B*, 2008, 22(11): 875-880.
- [70] LI S, ZHU S, XU Y L, et al. Long - term condition assessment of suspenders under traffic loads based on structural monitoring system: Application to the Tsing Ma Bridge [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2012, 19(1): 82-101.
- [71] BALAGEAS D, FRITZEN C P, GüEMES A. Structural health monitoring [J]. *Structural Engineering Mechanics & Computation*, 2001, 6531(8): 1185-1193.
- [72] RYTTER A. *Vibrational based inspection of civil engineering structures* [D]. Denmark: Aalborg University, 1993.
- [73] SALAWU O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review [J]. *Engineering structures*, 1997, 19(9): 718-723.
- [74] WEST W M. Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen [C]//NASA. 4th Proceedings of International Modal Analysis Conference, Los Angeles, CA, Feb. 3-6, 1986. Schenectady, NY: Union College, 1986; 1-6.

- [75] DOEBLING S W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review [J]. *Shock and Vibration Digest*, 1996, 30(11): 2043-2049.
- [76] FARRAR C R, DUFFEY T A, DOEBLING S W, et al. A statistical pattern recognition paradigm for vibration-based structural health monitoring [J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*, 1999, 41(1): 57-64.
- [77] 秦权, 桥梁结构的健康监测 [J]. *中国公路学报*, 2000, 13(2): 37-42.
- [78] TCHAKOUA P, et al. Wind turbine condition monitoring: state-of-the-art review, new trends, and future challenges [J]. *Energies*, 2014, 7(4): 2595-2630.
- [79] HAMEED Z, HONG Y S, CHO Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(1): 1-39.
- [80] SCHUBEL P J, CROSSLEY R J, BOATENG E K G, et al. Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades [J]. *Renewable Energy*, 2013, 51(2): 113-123.
- [81] LIU W, TANG B, JIANG Y. Status and problems of wind turbine structural health monitoring techniques in China [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(7): 1414-1418.
- [82] XIA Y X, NI Y Q. Extrapolation of extreme traffic load effects on bridges based on long-term SHM data [J]. *Smart Structures and Systems*, 2016, 17(6): 995-1015.
- [83] International Organization for Standardization. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts: ISO-10816 [S]. Geneva: ISO, 2001.
- [84] ANDRAWUS J A. Maintenance optimisation for wind turbines [D]. Aberdeen: Robert Gordon University, 2008.
- [85] KREUZER M. Strain measurement with fiber Bragg grating sensors [M]. Darmstadt, Germany: HBM, 2006.
- [86] 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.
- [87] MCGUGAN M, SØRENSEN B F. Fundamentals for remote condition monitoring of offshore wind turbine blades [M]. Roskilde: Danmarks Tekniske Universitet, 2008: 48.
- [88] EFFREN D. Automated turbine inspection [EB/OL]. (2011-10-01). [2018-05-10] http://www.staging.gearsolutions.com/media/pdfs/Articles/2011_Oct/1011_AutoCopter.pdf.
- [89] MBA D. Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines, bearings, pumps, gearboxes, engines and rotating structures [J]. *Shock and Vibration Digest*, 2006, 38(1): 3-16.
- [90] CENTER N R. Introduction to acoustic emission testing [EB/OL]. [2018-05-10]. https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.php.
- [91] SOUA S, LIESHOUT P V, PERERA A, et al. Determination of the combined vibrational and acoustic emission signature of a wind turbine gearbox and generator shaft in service as a pre-requisite for effective condition monitoring [J]. *Renewable Energy*, 2013, 51(2): 175-181.
- [92] ANJAR B, DALBERG M, UPPSÄLL M. Feasibility study of thermal condition monitoring and condition based maintenance in wind turbines [J]. *Elforsk Electricity and Power Production*, 2011, 11(19): 1-26.

作者简介:



ZHU S Y

朱松晔(通信作者)

1960-, 男, 香港理工大学土木与环境工程学系副教授(终身职), 美国里海大学(Lehigh University)博士。现任 SCI 期刊《结构工程进展(Advances in Structural Engineering)》副主编, 美国土木工程学会香港分会会长, 中国振动工程学会结构抗振控制与健康监测青年委员会副主任委员。

主要的研究领域: 智能结构、结构振动控制与健康监测、智能材料与结构防灾减灾。在 SCI 收录的著名学术期刊发表学术论文 67 篇, 并发表国际会议论文 80 余篇。在 2013 年获得 Elsevier 举办的工程类视频报告全球竞赛第一名, 在 2015 年获得国际结构控制与监测协会颁发的 Takuji Kobori 奖, 在 2016 年获得英国建造师协会的数字创新奖, 在 2017 年获得亚太地区结构工程与建设 Nishino Prize, 并在多个国际和国内学术会议上获得最佳论文奖(e-mail) songye.zhu@polyu.edu.hk。

朱子默

1992-, 女, 香港理工大学土木与环境工程学系学士。现任香港理工大学土木与环境工程学系研究助理。主要的研究领域包括: 多灾害环境下风机结构分析, 风机结构健康监测。

柯世堂

1982-, 男, 安徽池州人。博士, 教授, 南京航空航天大学土木工程系副主任。主要从事结构风工程与风能利用研究。发表学术论文 150 余篇, 并发表国际会议论文 30 余篇。江苏省优秀青年基金获得者, 江苏省青蓝工程入选者, 江苏省六大大人才高峰计划入选者, 国家一级注册结构工程师。主持国家自然科学基金 3 项、省部级基金 7 项、重大工程咨询课题 20 余项。研究成果获得行业和省部级科技进步奖 3 项。

(责任编辑 随卿毅)