

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.004

离岸风机导管架式基座的动态响应研究^{*}

蔡捷发¹, 钟舜聪^{1,2*}, 钟剑锋¹, 伏喜斌³

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院 光学/太赫兹及无损检测实验室, 福建 福州 350108;

2. 福建省医疗器械和生物技术重点实验室, 福建 福州 350000; 3. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000)

摘要: 为了保证风力发电机组的安全运行, 针对离岸风机导管架式基座在服役过程中受到恶劣海洋环境的影响易产生损伤的问题, 提出了一种通过单点响应测量以监测离岸风机导管架式基座健康状态的方法。基于线性莫里森方程和随机波浪理论, 建立了随机波浪载荷模型, 并通过耿贝尔(Gumbel) 概率分布来预测极值波浪载荷的波高。以 5 MW 离岸风力发电机基座为算例, 建立了完好的和损伤的离岸风力发电机基座的有限元模型, 计算了离岸风机基座在极值随机波浪载荷作用下的动态响应。通过对动态响应信号的频域分析, 获得了风机基座前 3 阶的固有频率, 对完好和损伤两种状态下的离岸风机基座的动态响应的频率变化作了对比分析, 得出了损伤对动态响应的影响规律。研究结果表明, 通过该方法可以对基座健康状况进行分析, 为离岸风机基座健康监测提供了一种可行的参考方案。

关键词: 离岸风机基座; 随机波浪力; 动态响应; 固有频率

中图分类号: TH122; TP113.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)06-0573-05

Dynamic response of jacket-type offshore wind turbine foundation

CAI Jie-fa¹, ZHONG Shun-cong^{1,2}, ZHONG Jian-feng¹, FU Xi-bin³

(1. Laboratory of Optics, Terahertz and Non-destructive Testing, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Key Laboratory of Medical Instrument and Pharmaceutical Technology, Fuzhou 350000, China; 3. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China)

Abstract: In order to ensure the safety of wind turbine, aiming at the problem that jacket-type offshore wind turbine foundation was easy to generate damage because of the harsh marine environment when it was in the process of service, a technique for monitoring the health status of jacket-type offshore wind turbine foundation by single point measurement was proposed. Based on the linear Morison equation and random wave theory, the random wave load model was built. By using the Gumbel probability distribution, the wave height of the extreme wave load was predicted. A finite element model for the foundation of 5 MW offshore wind turbine was established. The dynamic responses of the damaged and intact offshore wind turbine foundation excited by the random wave load were computed. The first three order natural frequencies of the turbine foundation could be obtained by applying the fast fourier transform to the dynamic response data. The difference of natural frequencies of intact and damaged offshore wind turbine foundations were compared; also, the effects of damage on dynamic response was achieved. The results indicate that this method can analyze the health condition of the foundation and provides a feasible reference plan to monitor the health status of offshore wind turbine foundation.

Key words: offshore wind turbine foundation; random wave load; dynamic response; natural frequency

收稿日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675103); 教育部高等学校博士学科点科研基金(博导类:20133514110008); 国家卫生和计划生育委员会科研基金(WKJ-FJ-27); 国家质检总局科技计划项目(2011QK216); 福建省杰出青年基金滚动项目(2014J07007); 福建省质检技术监督局科技计划项目(FJQI2014008, FJQI2013024); 福建省高等学校学科带头人培养计划(闽教人(2013)71号); 福建省自然科学基金项目(2015J01234)

作者简介: 蔡捷发(1991-), 男, 福建漳州人, 硕士研究生, 主要从事无损检测及缺陷分析等方面的研究. E-mail: 244624154@qq.com

通信联系人: 钟舜聪, 男, 研究员, 博士生导师. E-mail: zhongshuncong@hotmail.com

0 引 言

目前,海上风电场建设有两个发展趋势:①建设水深由浅海向深海发展;②风力机的单机容量不断增大^[1]。这必然对海上风力机组的基础性能提出新的要求与挑战。目前已投入使用的基础形式主要有重力式、单桩式、三脚架式,还有近几年开始投入使用的导管架式。其中导管架式来源于海洋油气工业的导管架平台,导管架平台在海洋油气工业中是各种水深(600 m 以内)的最佳选择之一,该技术比较成熟且可以满足未来大型风场建设的需要,因此有很好的应用前景^[2]。

导管架式基座常年服役在恶劣的海洋环境中,时常受到风、波浪、海流等载荷交互作用,其中基座所承受的环境载荷主要为波浪载荷。随着工作水深的增加,基座结构的增大,反而使基座抗弯刚度下降。在极值波浪载荷作用下基座结构运动响应幅度加大,会严重影响到基座疲劳强度和极限强度^[3,4],威胁基座的安全性与可靠性。现有的波浪载荷计算方法主要有莫里森方程和绕射理论。导管架式基座构件的直径与波长比小于 0.2,不必考虑绕射效应,故计算导管架式基座所受的波载荷采用莫里森方程^[5]。离岸风机基座服役在恶劣的海洋环境中,非常容易出现损伤,对具有不同损伤导管架式基座的动态响应分析显得尤为重要^[6]。

本研究提出一种通过单点响应测量以监测离岸风机导管架式基座健康状态的方法。

1 离岸 5 MW 导管架式风机基座模型

1.1 导管架式风机建模

由挪威船级社(DNV)标准可知,导管架式平台在海上风电开发的经济水深为 50 m 以内。本研究采用这一标准对海上风力发电的导管架式基座进行结构选型和设计,结合目前世界上已投入商业运行的 5 MW 风力机组,采用 Solidworks 软件对导管架式离岸风机基座进行建模,将轮毂、叶片、机舱的质量简化成质量点加载到模型中,对导管架式基座进行建模,导管架基座由桩柱、导管、横撑、斜撑组成,基座及塔架整体高度为 135 m,平均工作水深为 45 m,导管直径随水深在 0.6 m ~ 1.8 m 之间变化,导管厚度由 25 mm ~ 80 mm 变化。将模型导入 ABAQUS 软件做动态响应分析,在此基础上得到有限元模型的响应并对其进行分析。为了避免由于风机自转产生的共振,风机基座的共振频率应该避开风机旋转频率(1P)和 3P ± 10% 的范围内(这里,3P 为风机旋转频率的 3 倍)^[7],本研究采用的风机叶轮转速范围 6.9 r/min ~ 12.1 r/min,因此,结构的自振频率应该避开 0.115 Hz ~ 0.221 Hz 和 0.345 Hz ~ 0.606 Hz。

1.2 导管架式基座的动力学方程

本研究采用有限元方法将导管架式基座离散为 n 个自由度的有限元模型,则其运动方程表示为:

$$[M]\{\dot{\mathbf{a}}(t) + [C]\{\mathbf{a}(t)\} + [K]\{\mathbf{a}(t)\} = \{Q(t)\} \quad (1)$$

式中: $\ddot{\mathbf{a}}(t)$ —系统节点 $n \times 1$ 维加速度向量, $\ddot{\mathbf{a}}(t) = (\ddot{a}_1 \ \ddot{a}_2 \ \cdots \ \ddot{a}_n)^T$; $\dot{\mathbf{a}}$ —系统节点 $n \times 1$ 维速度向量, $\dot{\mathbf{a}}(t) = (\dot{a}_1 \ \dot{a}_2 \ \cdots \ \dot{a}_n)^T$; $\mathbf{a}(t)$ —系统节点 $n \times 1$ 维位移向量, $\mathbf{a}(t) = (a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_n)^T$; $[M]$, $[C]$, $[K]$ —总体坐标系下导管架式基座系统的质量矩阵、阻尼矩阵以及刚度矩阵; $Q(t)$ — n 维的广义随机波浪载荷。

2 随机波浪载荷

2.1 随机波浪载荷计算方法

按照莫里森方程来计算随机波浪载荷,方程如下:

$$F = \int_0^d (C_M \rho A \frac{\varphi u}{\varphi t} + C_D \rho D u |u|) dz \quad (2)$$

式中: u —水质点轨道运动的水平速度; $\varphi u / \varphi t$ —水平加速度; A —单位桩高垂直于波向的投影面积, m^2 ; C_D —拖曳力系数; C_M —惯性力系数; D —桩体直径; ρ —海水密度; d —导管架工作水深。

海浪的波高、波长都是变化的,并且同时在相当广的范围内传播,这些特性可用海浪谱对其进行较好的描述。因此采用谱分析法,由已知的海浪谱推求作用于导管架式基座上的波浪力谱,然后通过反傅里叶变换求得时域下的波浪力,波浪力谱表示为:

$$S_{pp}(w) = [|T_{pd}(w)|^2 + |T_{pd}(w)|^2] S_{\eta\eta}(w) \quad (3)$$

式中: $S_{\eta\eta}(w)$ —不规则海浪波的谱, $S_{pp}(w)$ —波浪力的谱。

2.2 极端海况下极值波浪载荷预测

为了得到极端海况下的波浪载荷,首先要对极值波浪载荷的波高进行预测,本研究采用耿贝尔(Gumbel) 概率分布来预测极值波浪载荷的波高,其公式为:

$$P_r(H \gg x) = 1 - \exp\{-\exp[-a_n(x - u_n)]\} \quad (4)$$

式中: $P_r(H \gg x)$ —极值波高小于给定值 x 的概率; a_n , u_n —Gumbel 分布的尺度参数和位置参数,这些参数由具体的统计数据确定。

当 a_n 和 u_n 的值确定以后,Gumbel 分布函数可以外推得到重现期为 T 年的设计波高值 x 。本研究中 a_n 和 u_n 分别取 0.79 和 5.3^[8-9],波高概率分布函数 x :

$$x = -a_n \times \ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right] + u_n \quad (5)$$

本研究通过计算得到 1 ~ 100 年重现期内的极值波高,波高曲线如图 1 所示。

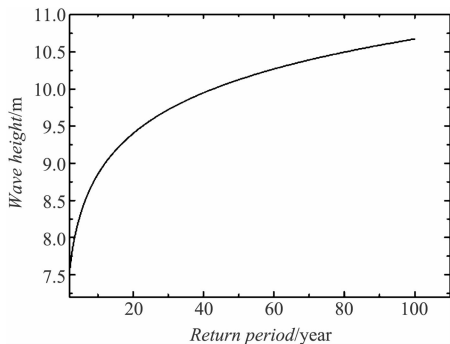


图1 重现期极值波高

2.3 极值波浪载荷计算

本研究选取 JONSWAP 海浪谱,基于 MATLAB 程序编写随机波浪载荷的计算程序,通过图 1 的预测波高计算得到作用在单个桩柱上的不同重现期的随机波浪载荷,如图 2 所示。

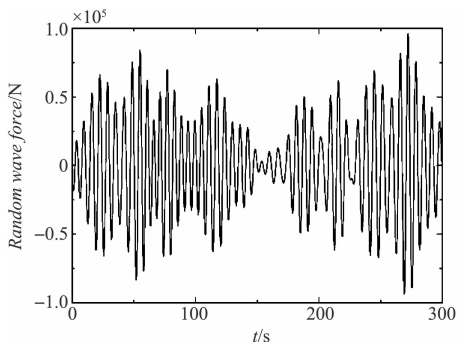


图2 基座 10 年重现期内的随机波浪载荷

3 仿真及结果分析

基于 ABAQUS 软件,模型采用四面体单元划分网格,采用点质量代替风机机舱、轮毂和叶片的重量,将其耦合到基座有限元模型的塔筒顶端。基座底部采用固端约束^[10],如图 3 所示。

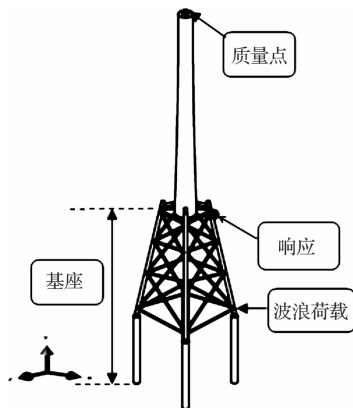


图3 导管式基座有限元模型

本研究将随机波浪载荷施加到基座的 X 轴方向的节点上进行动力学模态分析^[11],得到基座响应测点

在随机波浪载荷作用下的动态响应。

3.1 完好状态下导管架式基座的动态响应分析

将不同重现期内的波浪载荷导入 ABAQUS 软件中进行响应计算,本研究给出平台在 10 年重现期和 50 年重现期内的响应曲线,测点 X 轴方向的位移、速度及加速度的对比曲线如图(4~6)所示。

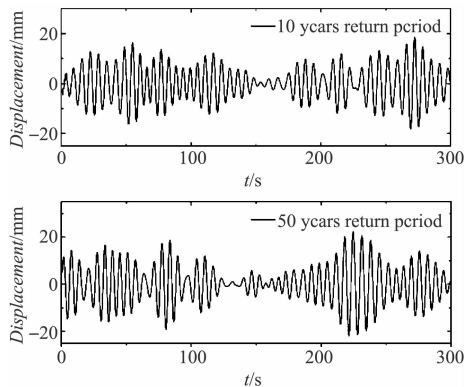


图4 不同重现期内测点的 X 轴向位移

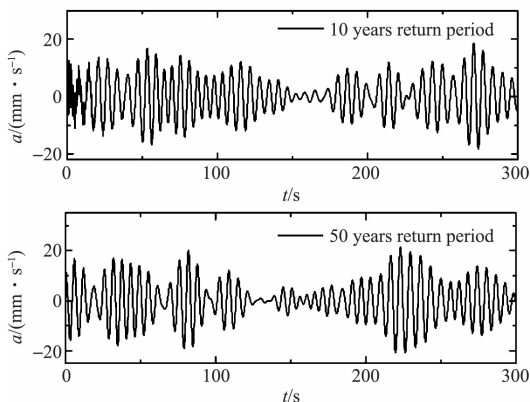


图5 不同重现期内测点的 X 轴向速度

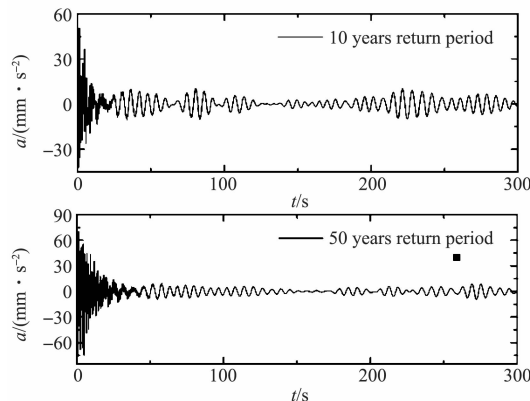


图6 不同重现期内测点的 X 轴向加速度

由图可知,10 年重现期内动态响应小于 50 年重现期内的动态响应。在随机波浪载荷作用下导管架式基座的动态响应较为明显,50 年重现期内与 10 年重现期内相比,平台测点 X 轴向最大位移增加 21.3%,最大速度增加 17.6%,最大加速度增加 33.2%,随机

波浪载荷越大,平台动态响应越明显,尤其加速度响应较速度和位移响应更明显。

3.2 损伤状态下导管架式基座的动态响应分析

在该模拟中,缺陷位于基座上连接斜撑和横撑的大直径导管上,将 10 年重现期内的随机波浪载荷作为环境载荷对基座模型进行模拟计算^[12],本研究给出完好和损伤两种状态下的动态响应对比。

X 轴加速度对比曲线如图 7 所示。

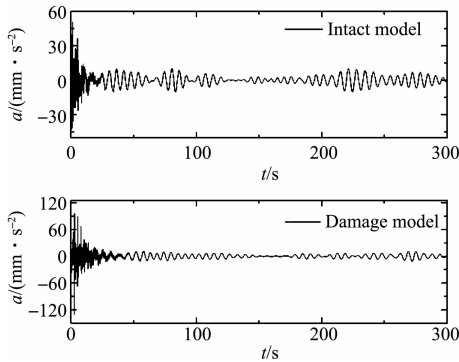


图 7 完好与损伤模型测点的 X 轴向加速度

由图 7 可以看出,在完好和损伤的状态下,加速度曲线有明显不同。但是直接根据时域曲线很难判断损伤的存在,所以需要时对域信号进行频谱分析。

3.3 动态响应的频谱分析

频谱分析的目的是把复杂的时间历程波形,经过傅里叶变换分解为若干单一的谐波分量来研究,以获得信号的频率结构以及各谐波和相位信息,提取结构在随机动态载荷激励下结构响应的结果^[13-14]。

本研究以 10 年重现期内和 50 年重现期内的随机波浪载荷激励完好的风机基座模型得到的频谱曲线如图 8 所示。

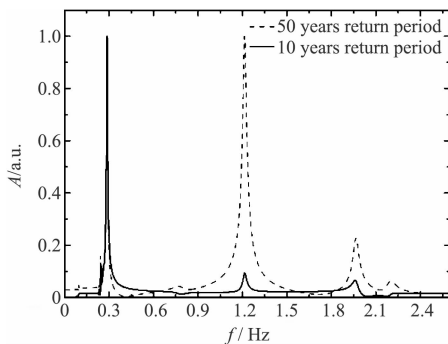


图 8 不同重现期测点的 X 轴向位移频谱对比(完好模型)

从图 8 可以看到不同重现期内的随机波浪载荷作用下的基座位移频谱有 3 个峰,其中 50 年重现期的频谱峰值明显大于 10 年重现期的峰值,而且两者 3 个峰值所对应的横坐标频率相同,并与有限元分析得到的完好基座模型的前 3 阶的固有频率相吻合。在通常情况下,往往可以根据结构的固有频率变化来进行损伤检测^[15-16]。

本研究以 10 年重现期内的随机波浪载荷分别激励完好与损伤的基座模型得到的频谱曲线如图 9 所示。

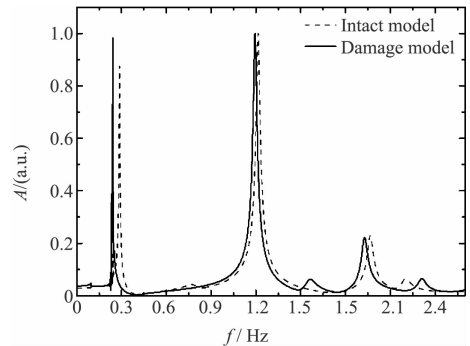


图 9 相同重现期内完好与损伤模型测点的 X 轴向位移频谱

两者的曲线除了 3 个峰所对应峰值有所不同以外,其峰值对应的横坐标也出现了明显的变化。导致这些变化的原因:在损伤状态下,基座结构壁厚减少,其刚度和质量下降,导致基座结构固有频率的下降。

完好与损伤模型的固有频率的变化如表 1 所示。

表 1 基座固有频率对比

模型	分析类别	1 阶	2 阶	3 阶
完好模型	模态分析/Hz	0.287	1.215	1.966
	频谱分析/Hz	0.286	1.217	1.967
	误差率/(%)	-0.34	0.16	0.05
损伤模型	模态分析/Hz	0.234	1.195	1.927
	频谱分析/Hz	0.243	1.199	1.929
	误差率/(%)	0.9	0.21	0.11

从表 1 中的数据对比可以看出,损伤模型的前 3 阶固有频率出现了变化,而且第一阶的模态固有频率已经很接近风机结构的 1P 范围 0.115 Hz~0.221 Hz,若损伤继续扩展,其固有频率可能进入 1P 的范围,进而产生共振对整个风机机组损害很大,这种分析结果可以为判断基座的健康状况提供一个很好的参考。从而及时采取措施,保证风机机组能持续平稳地运行。

(下转第 595 页)

本文引用格式:

蔡捷发,钟舜聪,钟剑锋,等. 离岸风机导管架式基座的动态响应研究[J]. 机电工程,2017,34(6):573-576,595.

CAI Jie-fa, ZHONG Shun-cong, ZHONG Jian-feng, et al. Dynamic response of jacket-type offshore wind turbine foundation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(6):573-576,595.