

基于实测速度与应力风机的基础动力响应分析

赵俭斌¹, 祝军², 席义博¹, 赵中华³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310000; 3. 沈阳城市建设学院土木工程系, 辽宁 沈阳 110167)

摘要 目的 探究黏性阻尼以及材料阻尼对风机基础动力响应计算的影响. 方法 采用风机塔筒-基础整体模型, 区别考虑风机气动黏性阻尼、风机塔筒材料阻尼以及基础的材料阻尼, 用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对风机整体进行模态计算, 对在不同阻尼下的风机基础上法兰的受力情况进行计算分析, 并与现场实测应力进行对比. 讨论阻尼对风机动力响应计算的影响. 结果 风机模态、相应位置应力实测与模拟值吻合良好. 考虑气动阻尼和各材料阻尼时, 动力响应幅值比不考虑阻尼时的幅值要减小 10 MPa, 幅值减小 31.25%. 当空气黏性阻尼比缩小 2.5 倍时, 幅值增大 21.4%. 钢结构阻尼比缩小 2.5 倍时, 幅值增大 8.33%. 基础材料阻尼比缩小 2.5 倍时, 幅值增大 12%. 结论 阻尼在动力计算中对计算结果起着较大的作用; 风机的阻尼比越大时, 动力响应越小. 黏性阻尼对风机的动力响应影响比材料阻尼更大, 基础的材料阻尼要比钢结构的材料阻尼对动力响应的影响要大.

关键词 风机基础; 阻尼; 有限元; 动力响应计算

中图分类号 TU470 文献标志码 A

Dynamic Response Analysis of Wind Turbine Foundation Based on Measured Vibration Velocity and Stress Data

ZHAO Jianbin¹, ZHU Jun², XI Yibo¹, ZHAO Zhonghua³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-electric Power, Hangzhou, China, 310000; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

Abstract: The accurate wind turbine tower-foundation finite element calculation model was established to study the influence of viscous damping and material damping on the calculation of the dynamic response of the wind turbine foundation. Based on the measured data, an accurate finite element model was provided for the follow-up study and the influence of damping on the calculation of the dynamic response of the wind turbine foundation was studied. The wind turbine tower-foun-

收稿日期: 2017-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779224); 辽宁省自然科学基金项目(2015020644)

作者简介: 赵俭斌(1960—), 男, 教授, 主要从事岩土工程等方面研究.

dation model was established, and the difference between the aerodynamic viscous damping of the wind turbine and the material damping of the tower and the foundation were considered. The stress of the upper flange on the foundation of the wind turbine with different damping was calculated by COMSOL Multiphysics finite element software, and compared with the field measured stress. The influence of damping on the calculation of wind turbine dynamic response is discussed. The measured values of wind turbine modes and the corresponding positions are in good agreement with the simulated values. When considering aerodynamic damping and material damping, the stress amplitude of dynamic response is reduced by 10 MPa, which the reduction is 31.25%. When the viscous damping was reduced by 2.5 times, the stress amplitude was increased by 21.4%. When the material damping of steel was reduced by 2.5 times, the stress amplitude increased by 8.33%. If the material damping of the foundation was reduced by 2.5 times, the stress amplitude increased by 12%. Damping plays a greater role in the calculation of dynamic response; the greater the damping of wind turbine, the smaller the dynamic response. Viscous damping has a greater influence on dynamic response of wind turbine than material damping. The effect of material damping of foundation on dynamic response is greater than the influence of steel.

Key words: wind turbine foundation; damping; finite element; dynamic response calculation

风能是一种不需要开采、运输、不产生任何污染的清洁可再生新能源,全球具有丰富的风能资源,地球上1%的风能从理论上说就可以满足所有国家对能源的需求^[1-4].所以风能对改善能源结构和保护环境有重要意义.风力发电机在寿命期内,实际工作环境很复杂,要受到台风、雨、雪、冰雹等恶劣气候的影响.风机基础承受着由于复杂荷载所引起的上部塔架的振动以及风轮运转过程中所产生的振动,承载机理很复杂.在循环荷载作用下,基础环的钢筒以及附近的混凝土容易发生疲劳破坏,从而导致工程故障.因此对风机基础结构进行动力分析和疲劳分析对于保证结构的安全性和设计的优化性有着很重要的意义. BISOI S^[5-6]等采用考虑风浪荷载下时域控制的有限元方法来研究动力响应.结构用基于非线性 Winkler 基础模型的梁单元进行模拟,地基土的刚度的模拟使用 API 所推荐使用的 $p-y, t-z$ 曲线. JUNG S^[7-8]等提出动力分析时风和浪荷载应该考虑,传统的 $p-y$ 曲线并不适用,需要进行有限元分析元分析,并且研究比较了不同的建模方法,关注其对结构的影响.文献[9-11]应用 ANSYS 建立了三脚架式近海风机基础有限元模型,模型采用 PIPE59 单元模拟基础在泥面以上的钢管,采用 BEAM188 单元模拟泥面以下的桩柱,钢管桩与土层作用采用弹簧

单元 COMBIN14,通过该模型分析了三脚架基础在海洋环境荷载作用下的动力反应和可靠度. BAZEOS N 等^[12]用顶端加上附加质量的塔筒模型来模拟风机塔架和机舱体系,以其为基础研究了结构在静载和地震荷载作用下结构的特性以及承载力. 阎石等^[13]采用达文波特风速谱并根据 Shinozuka 理论,应用简谐波叠加法分别模拟了脉动风速、脉动风压和脉动风荷载时程曲线. 章子华等^[14]使用达文波特脉动风谱,分别计算了风机基础完全固接和考虑塔筒与桩基础共同作用的两种有限元模型的自振特性以及在模拟风荷载下的动力响应. 何叶等^[15]用有限元软件 ANSYS 建立了海上风机基础-结构模型,采用 Block Lanczos 法进行了模态分析,并对风机结构进行了动力计算. 杨峰等^[16-17]对结构模型进行了瞬态动力分析,计算了不同工况下风机的动力响应,为风机设计提供了参考. 建立准确的有限元模型进行动力分析是疲劳分析的基础,阻尼在动力分析中起着很大的作用,因此建立准确的有限元模型以及探究阻尼对风机基础动力响应计算影响就十分必要. 以往研究中由于缺少实测数据的支持,无法验证所建立的有限元模型是否准确,所计算的结果是否和真实的工况相吻合. 笔者采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件,建立了塔筒-基础整体模型,通过模拟值与

实测值的对比,验证了有限元模型以及动力计算的准确性.对黏性阻尼以及材料阻尼对动力响应的影响进行了探究.

1 基于实测数据下有限元模型的建立与验证

1.1 风机概况以及长期监测方案

对某风电场 1.5 MW 风力发电机进行了长期的监测,并对其振动数据以及基础附近上法兰的应力进行采集(见图 1),传感器安放在风机塔筒高 70 m 处,分别采集两个相互垂直的方向 x 、 y 向的振动数据.

风机轮毂高度 70 m,塔筒为变截面钢筒,风机基础采用圆盘形混凝土浅基础.基础底板半径 8 m,基础底板外缘高度 1.2 m,基础底板圆台部分高度为 0.8 m,基础上部圆柱体半径为 3 m,圆柱体高度为 1.3 m.基础环半径为 2.1 m,基础环的高度为 1.65 m,在混凝土基础中基础环的埋深为 1.25 m,基础环厚度为 28 mm.混凝土强度等级为 C35.

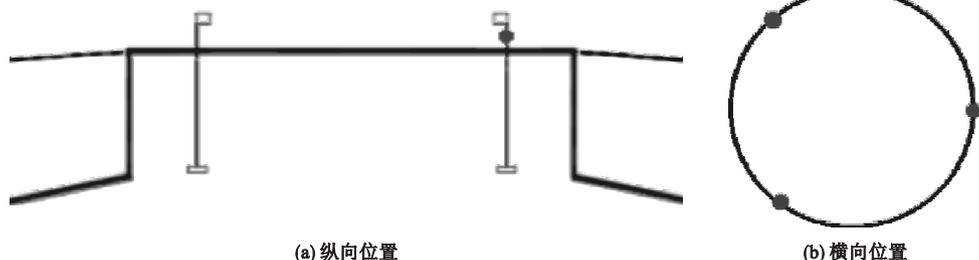
图 2 为应变片位置示意图,圆形实心标记处是在距上法兰 20 cm 处在 3 个方向安装



图 1 传感器安置示意图

Fig. 1 Sensor placement diagram

有应变片的地方以此来监测风机塔筒相应位置应变的变化以此推出应力的变化,由于在实际工程中,风向也随时间的变化而变化(见图 3),把风向分为 N、NNE、ENE、E、ESE、SSE、S、SSW、WSW、W、WNW、NNW 12 个风向区间.将正北 N 风向点定义为 0° 风向点,顺时针旋转为正,应变片分别安装在 90° 、 210° 、 330° 位置处.



(a) 纵向位置

(b) 横向位置

图 2 应变片位置示意图

Fig. 2 Strain gauge position diagram

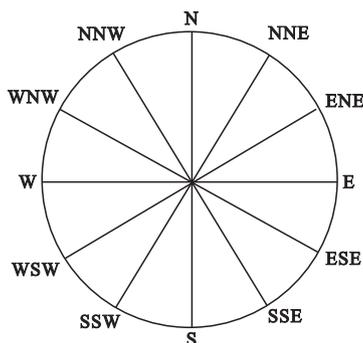


图 3 风向示意图

Fig. 3 Wind direction diagram

拟建风机基础处地层分布.①素填土:黄灰色,松散,稍湿,主要由风积中砂及粉土组成,34 号孔为碎石素填土,含植物根系.②强风化花岗岩:黄褐色,中粒结构,块状构造,主要矿物构造为长石、石英.③中风化花岗岩:肉红色,中粗粒结构,块状构造,主要矿物成分为长石、石英.裂隙较发育,岩芯破碎呈短柱状、柱状,局部呈碎块状,岩芯采取率 40% ~ 70%,属较硬岩,较破碎,岩体基本质量等级属 IV 类.最大揭露厚度 9.5 m.

1.2 基于实测振动数据的模型验证

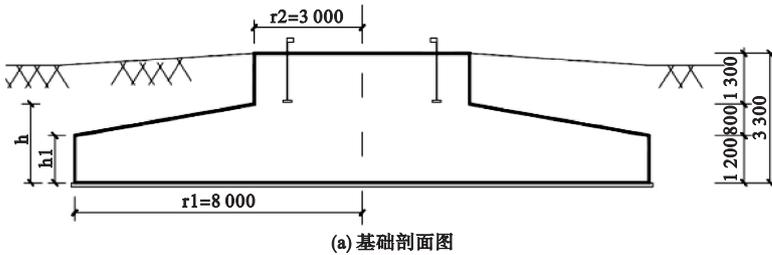
1.2.1 有限元模型建立以及模态计算

根据风机参数用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对风机进行建模,由于风机机舱以及叶片结构复杂故将风机上部叶片、轮毂、机舱等简化成一集中质量的刚体进行简化.风机塔架钢筒所采用是杨氏模量为 210 GPa,泊松比为 0.31,密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$ 的钢材.风机整体模型如图 4 所示,风机基础示意图如图 5 所示.

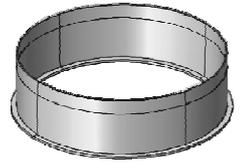


图 4 风机整体模型示意图

Fig. 4 Wind turbine model diagram



(a) 基础剖面图



(b) 基础环模型示意图

图 5 风机基础示意图

Fig. 5 Wind turbine foundation diagram

系统的自振频率通过 COMSOL Multiphysics“基频求解器”求解,该计算过程无需荷载.经过计算得其第一阶自振频率为 0.422 15 Hz,第二阶自振频率为 0.422 17 Hz,第三阶自振频率为 3.563 5 Hz,第四阶自振频率为 3.565 9 Hz.前四阶

阵型如图 6 所示,同时可以看出结构的前两阶振型为摆动形态,第三、四阶是弯曲形态,由于风机结构的振动形式主要由低阶模态所决定,所以风机支撑结构的振动形式主要有摆动和弯曲两种.

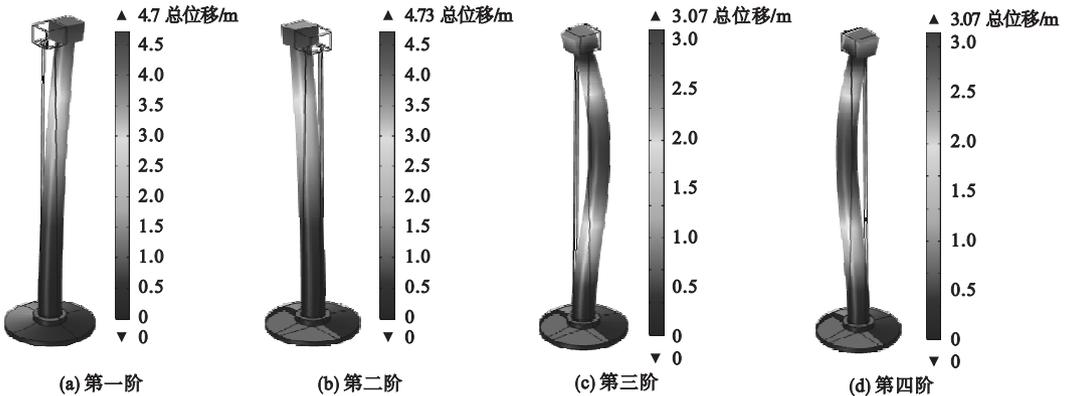


图 6 风机前四阶阵型图

Fig. 6 First four order formation of wind turbine

1.2.2 基于环境激励下振动数据模态识别

图 7 为某一时段内现场所采集的实测振动速度数据时程曲线,对这一时段内现场所

获得的实测数据分别使用快速傅里叶变换法 (Fast Fourier Transform)、随机子空间法 (Stochastic subspace identification, SSI) 对风

机模态进行了识别,识别结果如图8所示。

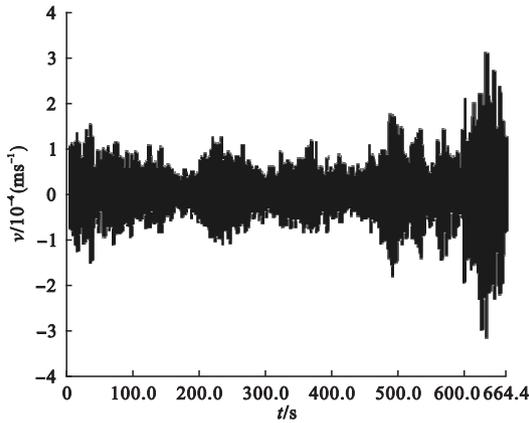


图7 速度传感器时程信号

Fig. 7 Time history signal of speed sensor

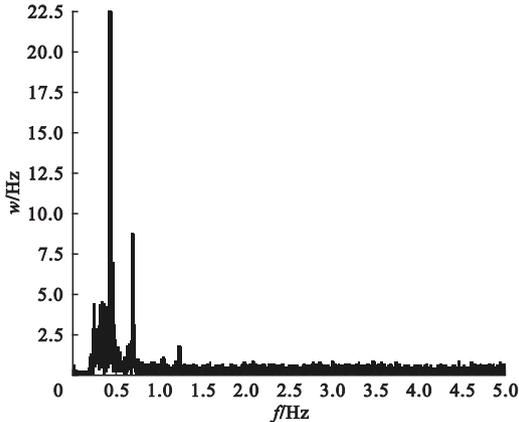


图8 快速傅里叶变换法识别结果

Fig. 8 The result of Fast Fourier Transform

通过图8可以看出功率谱峰值在0.43 Hz处,功率谱峰值所对应处即风机第一自振频率,与数值计算结果0.422 15 Hz基本一致。由随机子空间方法计算出风机第一自振频率为0.427Hz,与有限元数值计算结果0.422 15 Hz十分接近。通过对比基于实测振动数据分析所得的模态与数值计算所获得

的模态,两者十分接近,证明了本模型的准确性和可靠性。在模态识别过程中,可以发现快速傅里叶变换法(Fast Fourier Transform)有着计算速度快、操作简单的优点,缺点是模态识别具有人的主观性,识别精度不足。随机子空间法(Stochastic subspace identification, SSI)模态识别准确,可以识别出FFT法遗漏的频率。缺点是容易受到噪声干扰,在高阶模态定阶上存在定阶有虚假模态的情况^[18]。

1.3 基于实测应力数据的模型验证

1.3.1 随机风速模拟以及风荷载计算

通常认为瞬时风速由周期大于10 min的长周期风速和周期在几秒至几十秒以内的短周期风速两部分组成。在进行各种工程结构风荷载计算时,通常将作用在结构物上的风荷载分为两部分:平均风荷载和脉动风荷载;作用在结构上任意高度的随机风速是平均风速和脉动风速的叠加。

$$v(z) = v_a(z) + v_f(z, t). \quad (3)$$

式中: $v(z)$ 为高度 z 处的随机风速; $v_a(z)$ 为高度 z 处的平均风速; $v_f(z, t)$ 为高度 z 处的脉动风速。

风机叶片和塔架上的平均风速需要由风剪效应确定,用指数模型来描述风剪效应。

指数模型为

$$\frac{v_a(z)}{v_a(z_{10})} = \left(\frac{z}{10}\right)^a. \quad (4)$$

式中: $v_a(z_{10})$ 为结构10 m高度处的平均风速; a 为地面粗糙度系数。

根据地面情况确定,依据现行规范, a 取值如表1所示。

表1 地表粗糙度系数

Table 1 Surface roughness coefficient

地表类型	a
近岸海面、海岛、海岸及沙漠地区	0.12
田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区	0.16
有密集建筑群的城市市区	0.22
有密集建筑群的且房屋较高的城市市区	0.30

采用 Davenport 风速谱来进行顺风向的脉动风速模拟,风谱采用谐波叠加法,由 MATLAB 编程进行实现,时间增量取 0.25 s,时长为 300 s.

作用在塔架、机舱、轮毂上的风荷载为

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 \cdot A. \quad (5)$$

式中: ρ 为空气的密度, $\rho = 1.277 \text{ kg/m}^3$; C_D 为阻力系数,塔架的阻力系数取 1.2,机舱和轮毂的体形系数均取 1.3; v 为风速; A 是机舱、轮毂、塔架在与风向垂直平面上投影的面积.

将风机塔架平均分为 7 段,每段 10 m,计算风作用在塔架上的荷载时,每 10 m 钢筒的风速取高度 5 m,15 m,25 m,35 m,45 m,55 m,65 m 处的风速值为代表.作用于叶轮上的风荷载用推力系数法进行计算,计算式为

$$F_b = 0.5 \rho_a \pi r^2 v^2 c_T. \quad (6)$$

式中: ρ_a 为空气密度, $\rho_a = 1.277 \text{ kg/m}^3$; r 为叶轮半径, $R = 42 \text{ m}$; v 为风速; c_T 为推力系数,由风机厂家提供.

风机为高耸结构,长期受到风动力荷载的作用,根据上面荷载计算方法,在塔架顶部

集中质量处施加叶轮风荷载时程,同时在塔架迎风面施加各自的风荷载时程,用 COMSOL Multiphysics 瞬态求解器分别对风机基础环上法兰应力进行计算.

1.3.2 实测应力数据的分析与模型的验证

钢的材料阻尼比取 2%. 空气动力学阻尼和风速有关,KUHN M J^[19] 认为在低风速下海上风机空气阻尼比近似为 3.5%,因此风机为陆上风机,所以空气阻尼比取小些,取 2.5%. 基础混凝土材料阻尼比通常在 0.9% 到 2%^[20],取 1.5%.

由于风速直接影响到作用于风机荷载的大小,所以在对比实测应力与模拟应力前要保证实测风速与模拟风速基本一致. 风速与提取数据的应力计相对位置和模拟风速与计算点的相对位置基本一致.

分析 2016-01-14T1:00:52 至 2016-01-14T1:06:38 的数据,图 9(a) 为实测风速图,每 7 s 测得一个现场实际平均风速,经计算此时实测平均风速为 5.95 m/s. 图 9(b) 为用于有限元计算平均风速为 6 m/s 的模拟随机风速.

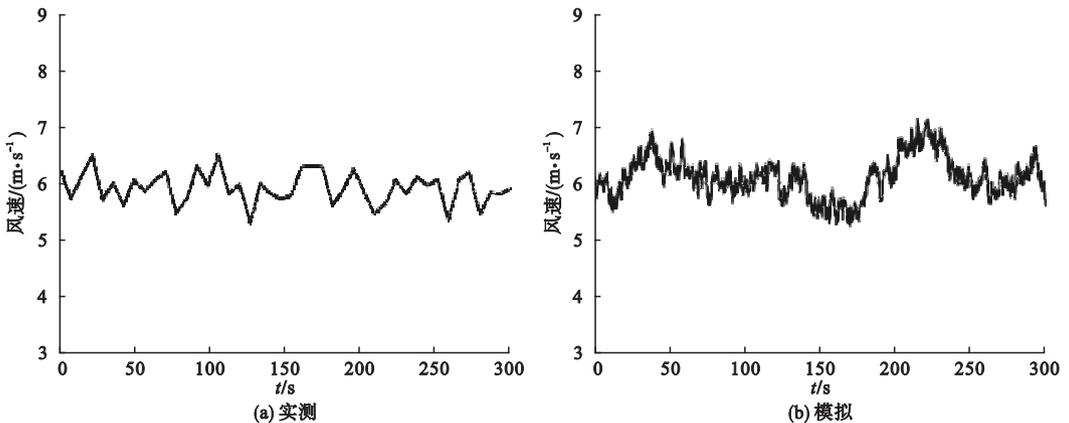


图 9 实测风速与模拟风速

Fig. 9 Measured wind speed and simulation of random wind speed

对现场获取的数据进行处理,获得实测应力时程曲线如图 9(a) 所示,经计算这段时间内实测平均应力值为 2.78 MPa,应力分布在 3.6 MPa 与 2.13 MPa,应力最大相差 1.47 MPa. 采用平均风速为 6 m/s 的模拟风加载到有限元模型上,得到相应位置模拟时

程曲线如图 9(b) 所示,经计算这段时间内的平均应力值为 2.26 MPa,应力分布在 3.25 MPa 与 1.69 MPa,应力最大相差 1.56 MPa. 由图 10 可以看出,实测结果与模拟结果吻合良好,数值计算准确.

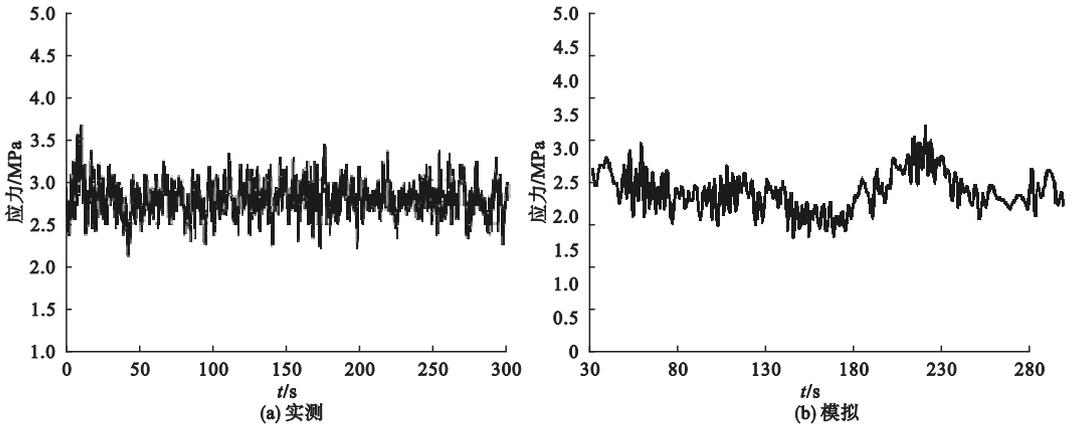


图 10 实测应力与模拟应力

Fig. 10 Measured stress and simulated stress

2 阻尼对风机基础动力响应计算的影响

钢的材料阻尼比取 2%、空气黏性阻尼比取 2.5%、基础材料阻尼比取 1.5% 时,利用 COMSOL Multiphysics 对在平均值为 8 m/s 的模拟风速下上法兰相应点的应力进行动力计算,计算结果如图 11 所示,经计算模拟应力为 22 MPa 左右.把此模型视为初始计算工况.当不考虑阻尼时,利用 COMSOL Multiphysics 对在相同平均值为 8 m/s 的模拟风速下相应点的应力进行动力计算,计算结果如图 12 所示,经计算模拟应力分布范围为 32 MPa,是初始计算工况的 1.454 倍.

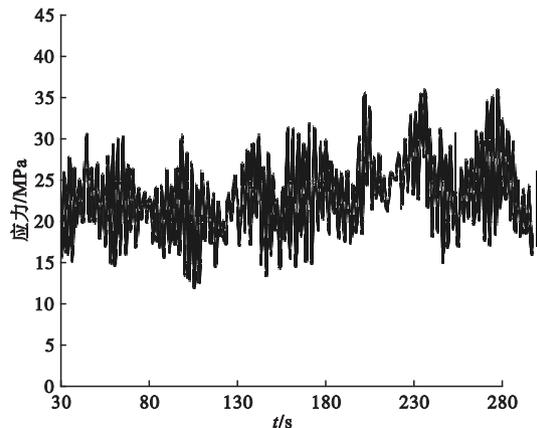


图 11 考虑全部阻尼时模拟应力时程

Fig. 11 The time-history of simulated stress with all damping

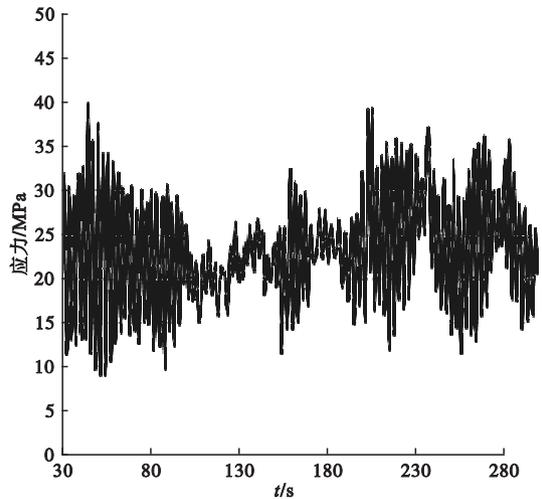


图 12 无阻尼时模拟应力时程

Fig. 12 The time-history of simulated stress with no damping

当空气黏性阻尼比按初试计算工况缩小 2.5 倍取 1%,钢结构材料阻尼比取 2%,基础材料阻尼比取 1.5% 时,利用 COMSOL Multiphysics 对在同一平均值为 8 m/s 的模拟风速下相应点的应力进行动力计算,计算结果如图 13 所示,模拟应力分布在 28 MPa 左右,是第一种工况的 1.273 倍.

当空气黏性阻尼比取 2.5%,钢结构材料阻尼比按初试计算工况缩小 2.5 倍取 0.8%,地基基础材料阻尼比取 1.5%,利用 COMSOL Multiphysics 对在同一平均值为 8 m/s 的模拟风速下相应点的应力进行动力计算,计算结果

如图 14 所示,经计算模拟应力分布在 24 MPa 左右,是第一种工况的 1.09 倍.

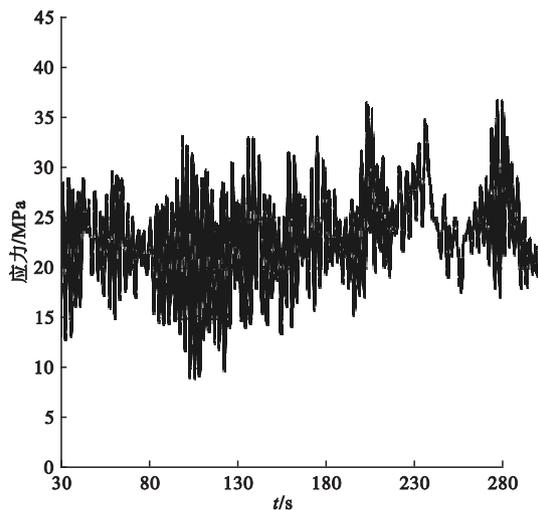


图 13 空气阻尼比 1% 时模拟应力时程

Fig. 13 Simulated stress time-history curve with 1% damping ratio of air

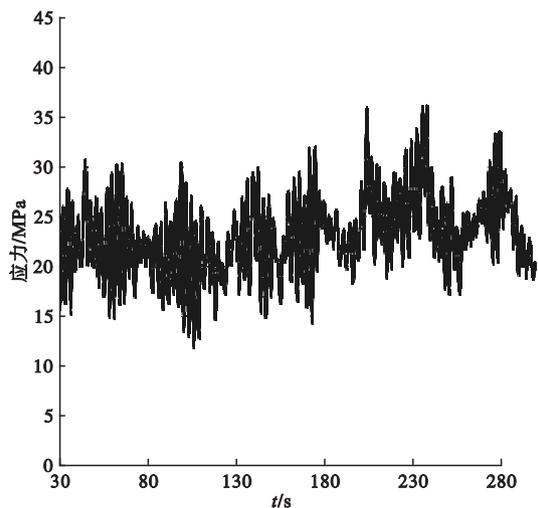


图 14 钢材料阻尼比 0.8% 时模拟应力时程

Fig. 14 Simulated stress time-history curve with 0.8% damping ratio of steel

当空气黏性阻尼比取 2.5%, 钢结构材料阻尼比取 2%, 基础材料阻尼比按初试计算工况缩小 2.5 倍取 0.6%, 利用 COMSOL Multiphysics 对在平均值为 8 m/s 的模拟风速下相应点的应力进行动力计算, 计算结果如图 15 所示, 经计算模拟应力分布在 25 MPa 左右, 是初试计算工况的 1.136 倍.

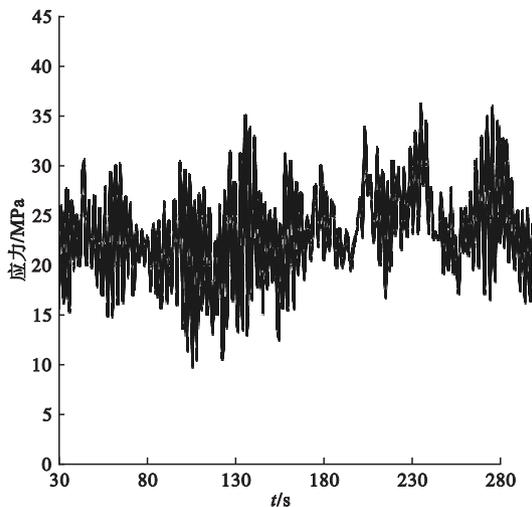


图 15 基础阻尼比 0.6% 时模拟应力时程

Fig. 15 Simulated stress time-history curve with 0.6% damping ratio of foundation

3 结 论

(1) 基于塔筒 - 基础有限元模型所计算出的模态与现场基于实测振动速度数据识别所获得的模态吻合良好. 相同平均风速下, 应变片安置处基于有限元模型计算出的应力时程与相应位置分析现场实测应变数据所获得的应力时程吻合良好. 基于 COMSOL Multiphysics 三维实体单元构建的塔筒 - 基础有限元模型可以很好地模拟风机结构的实际情况.

(2) 阻尼在动力响应计算中起着很大的作用, 考虑气动阻尼和各材料阻尼时, 动力响应幅值比不考虑阻尼时的幅值要减小 10 MPa, 幅值减小 31.25%. 当空气黏性阻尼比缩小 2.5 倍时, 幅值增大 21.4%. 钢结构阻尼比缩小 2.5 倍时, 幅值增大 8.33%. 基础材料阻尼比缩小 2.5 倍时, 幅值增大 12%. 阻尼越大, 瞬态动力响应越小. 和材料阻尼相比, 空气黏性阻尼对结构的动力响应影响更大. 基础阻尼对动力响应的影响比钢材料阻尼要大.

参考文献

[1] 周鹤良. 我国风力发电产业发展前景与策略

- [J]. 变流技术与电力牵引,2006(2):2-8.
(ZHOU Heliang. The prospect and strategy of China wind industry[J]. High power converter technology,2006(2):2-8.)
- [2] 李俊峰,高虎,施鹏飞,等. 中国风电发展报告[M]. 北京:中国环境出版社,2007.
(LI Junfeng, GAO Hu, SHI Pengfei, et, al. China wind power development report[M]. Peking:China Environment Press,2007.)
- [3] 姚兴佳,王士荣,董丽萍. 风力发电技术的发展与现状[J]. 可再生能源,2006(1):86-88.
(YAO Xingjia, WANG Shirong, DONG Liping. Wind power technology development and status quo[J]. Renewable energy,2006(1):86-88.)
- [4] ZAAIJER M B, HENDERSON A R. Review of current activities in offshore wind energy [J]. Isope,2004,36:20-28.
- [5] BISOI S, HALDAR S. Dynamic analysis of offshore wind turbine in clay considering soil-monopile - tower interaction[J]. Soil dynamics and earthquake engineering,2014,63(1):19-35.
- [6] BISOI S, HALDAR S. Design of monopile supported offshore wind turbine in clay considering dynamic soil - structure-interaction[J]. Soil dynamics & earthquake engineering,2015,73:103-117.
- [7] JUNG S, KIM S R, PATIL A, et al. Effect of monopile foundation modeling on the structural response of a 5-MW offshore wind turbine tower [J]. Ocean engineering,2015,109:479-488.
- [8] JUNG S, KWON S D. Weighted error functions in artificial neural networks for improved wind energy potential estimation [J]. Applied energy,2013,111(4):778-790.
- [9] 康海贵,李玉刚,郇彩云. 基于可靠度的海上风机基础结构优化设计方法研究[J]. 太阳能学报,2009(12):1602-1607.
(KANG Haigui, LI Yugang, XUN Caiyun. Rbdo method research of offshore wind turbine foundation structure [J]. Acta energiae solaris sinica,2009(12):1602-1607.)
- [10] 夏露. 海上风机基础在风浪作用下的动力分析与疲劳分析[D]. 大连:大连理工大学,2012.
(XIA Lu. Dynamical analysis and fatigue analysis on foundation of offshore wind turbine under wind and wave loads [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2012.)
- [11] 郇彩云. 海上桩式风机基础结构设计与研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
(XUN Caiyun. Design and research of pile-style foundation structures for offshore wind turbine [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2009.)
- [12] BAZEOS N, HATZIGEORGIOU G D, HONDROS I D, et al. Seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower [J]. Engineering structures,2002,24(8):1015-1025.
- [13] 阎石,郑伟. 简谐波叠加法模拟风谱[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005,21(1):1-4.
(YAN Shi, ZHENG Wei. Wind load simulation by superposition of harmonic [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2005,21(1):1-4.)
- [14] 章子华,王振宇,刘国华. 风电场脉动风模拟及风机塔架动力响应研究[J]. 太阳能学报,2011,32(7):992-998.
(ZHANG Zihua, WANG Zhenyu, LIU Guohua. Simulation of fluctuating wind in wind farm and dynamic response of wind turbine tower [J]. Acta energiae solaris sinica,2011,32(7):992-998.)
- [15] 何叶,赵明阶,胡丹妮. 海上风机三桩基础与上部结构动力响应分析[J]. 水利水运工程学报,2016(2):17-23.
(HE Ye, ZHAO Mingjie, HU Danni. Dynamic response analysis of tripod pile foundation and superstructure of offshore wind turbine [J]. Hydroscience and engineering,2016(2):17-23.)
- [16] 杨锋,高季章,张金接,等. 近海风机基础-塔架结构体系振动监测与动力响应分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2013,11(2):87-93.
(YANG Feng, GAO Jizhang, ZHANG Jinjie, et al. Vibration monitoring and dynamic response analysis of the base-tower about offshore wind turbine [J]. Journal of China institute of water resources and hydropower research,2013,11(2):87-93.)
- [17] 杨锋. 近海桩式风机基础-塔架动载特性与响应及桩基优化研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2012.
(YANG Feng. Base-tower dynamic response analysis for offshore wind turbine pile foundation and structural optimization research [D]. Peking:China Institute of Water Resources & Hydropower Research,2012.)
- [18] 董霄峰. 海上风机结构振动特性分析与动态参数识别研究[D]. 天津:天津大学,2014.
(DONG Xiaofeng. Vibration behavior analysis and dynamic parameter identification of offshore wind turbine structure [D]. Tianjin: Tianjin University,2014.)
- [19] KUHN M J. Dynamics and design optimization of offshore wind energy conversion systems [M]. Duwind Delft University Wind Energy Research Institute,2001.
- [20] CARSWELL W, JOHANSSON J, LÖVHOLT F, et al. Foundation damping and the dynamics of offshore wind turbine monopoles [J]. Renewable energy,2015,80:724-736.