

文章编号: 1006-1355(2014)04-0205-04

风力机塔架在风—地震作用下的动力响应

曹必锋¹, 衣传宝²

(1. 辽宁工业大学, 辽宁 锦州 121001; 2. 国网新源控股有限公司, 北京 100761)

摘要: 为了获得水平轴风力机塔架在风—地震联合作用下的动力响应, 首先推导了风力机塔架在风—地震联合作用下的动力学运动方程, 并对塔架所受外部激励进行了详细的分析。通过对某3.0 MW风力机塔架动力响应进行计算, 获得了风力机塔架在风—地震联合作用下的塔架顶部振动位移和塔架底部的载荷, 分析了地震对塔架的影响程度, 这些计算和分析对处于地震区域的风力机设计具有参考意义。

关键词: 振动与波; 风力机; 塔架; 地震; 动力响应

中图分类号: TB53; TK83

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.04.045

Dynamic Response Analysis of Wind Turbine Towers under Wind and Earthquake Combined Loadings

CAO Bi-feng¹, YI Chuan-bao²

(1. Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning China;

2. State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100191, China)

Abstract: Dynamic response of horizontal-axis wind-turbine towers under wind and earthquake combined loadings is analyzed. The dynamic equation of the towers under the loads is established. The external excitation of the towers is analyzed in detail. Then, the dynamic response of a 3.0 MW wind turbine tower is calculated, and the top vibration deflections and bottom loads of the tower are obtained. The simulation results indicate that the earthquake has a significant affect on the dynamic response of the wind turbine tower.

Key words: vibration and wave; wind turbine; tower; earthquake; dynamic response

当今越来越多的风力机被安装在地震活跃地区。地震往往具有很强的不可预见性和突发性, 由于缺乏足够的预测手段, 结合国内外风力发电结构的理论研究和工程背景, 开展系统的结构动力响应特性研究已成为当前需要解决的课题^[1]。现代大型风电机组普遍采用圆筒形塔架作为支撑结构, 塔架的振动和变形不仅会影响其自身的结构强度, 而且会影响到塔顶风轮的气动特性, 进而影响整机运行稳定性。对风力机塔架在风—地震联合作用下的动力响应进行预测, 对于提高风力机精细化设计和整机运行可靠性具有重要意义。

对于风力机塔架在地震作用下的动力特性方面

国内外已进行了若干分析^[2,3], 但对风—地震联合作用下的风力机塔架动力响应分析并不多见。本文对风力机塔架在风—地震联合作用下的动力学运动方程进行了推导, 详细阐述了基于《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》的地震加速度谱的生成方法^[4], 结合塔架所受外部气动载荷, 以某3.0 MW风力机塔架为算例, 对风力机塔架的动力响应进行了计算并着重分析了地震对于塔架振动特性的影响。

1 塔架动力学运动方程

采用梁单元对水平轴风力机塔架进行有限元建模^[5], 假设地基为刚性, 侧重分析地震对风力机塔架动力响应的影响, 因此可忽略SSI效应。根据结构动力学基本原理, 可将风力机塔架看成是具有刚性地基平动的多自由度系统, 塔架动力学运动方程可以表示为^[6]

收稿日期: 2012-09-11

作者简介: 曹必锋(1958-), 男, 辽宁锦州人, 高工, 目前从事机械设计及制造技术研究。

Email: yuhuilucky@126.com

$$m\ddot{x}' + c\dot{x}' + kx' = 0 \quad (1)$$

式中 m 为塔架质量矩阵; c 为塔架阻尼矩阵; k 为塔架刚度矩阵; \ddot{x}' 、 \dot{x}' 、 x' 分别代表塔架平动加速度、速度和位移,其中右上标 t 表示塔架平动总位移,表示塔架变形和地基运动引起的位移之和。引起该系统动力响应的有效地震力是公式(1)中依赖于系统总运动的惯性力,而阻尼力和弹性力只依赖于相对运动。

若阻尼力和弹性力用塔架总运动与地面运动的差来表示,则公式(1)写成用塔架平动总位移表示的形式为^[6]

$$m\ddot{x}' + c\dot{x}' + kx' = c\dot{x}_g + kx_g \quad (2)$$

式中 x_g 、 \dot{x}_g 分别为地基运动位移和速度。公式右边是以阻尼矩阵和刚度矩阵表示的有效力,原则上地震响应问题可以用公式(1)或(2)来求解,由于公式(2)的有效力表达式很复杂,且地震运动通常是以地面加速度表示,所以公式(2)很少采用。由于采用有限元法对风力机塔架建模,塔架系统质量矩阵采用一致质量矩阵而不是对角阵,将导致地基位移和响应自由度间耦合的质量矩阵的非对角线部分记作 m_g ,则塔架运动方程式(1)变为

$$m\ddot{x}' + m_g\ddot{x}_g + c\dot{x}' + kx' = 0 \quad (3)$$

式中 \ddot{x}_g 为地基运动加速度。

塔架平动总位移 x' 可以表示为与地基的相对位移 x 与由静力地基位移引起的拟静力位移 x^s 之和

$$x' = x + x^s \quad (4)$$

拟静力位移 x^s 可方便的用一个影响系数矩阵 r 来表示,影响系数矩阵 r 表示由单位地基位移所产生的塔架位移^[6],于是 $x^s = rx_g$,则塔架平动总位移 x' 可以表示为

$$x' = x + rx_g \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中的惯性力项,则式(3)变为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -(mr + m_g)\ddot{x}_g \quad (6)$$

记 $P_{eff} = -(mr + m_g)\ddot{x}_g$,称为有效地震力,式中负号表示载荷的方向和地面加速度方向相反,因为须假定基座输入的作用方向不定;因此,这一符号在实际中是不重要的。

塔架所受气动载荷的主要来源是风作用在风轮和塔架上的水平推力,记为 F ,在塔架运动方程右侧叠加塔架所受外部风载,则式(6)变为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_{eff} + F \quad (7)$$

利用模态叠加原理^[7],塔架位移可以用各振型分量的和来表示,即 $x = \Phi Y$,其中 Φ 为模态振型矩阵, $\Phi = [\phi_1 \phi_2 \cdots \phi_n]$, Y 为模态位移矩阵,

$Y = [Y_1 Y_2 \cdots Y_n]^T$ 。将式(7)转换为模态坐标下的动力学运动方程为

$$\ddot{Y}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{Y}_n(t) + \omega_n^2 Y_n(t) = l_i \ddot{x}_s + \frac{F_n}{M_n} \quad (8)$$

式中 $l_i = \phi_n^T m r + \phi_n^T m_g$ 表示模态有效地震力, Φ_n 为各阶模态振型, Y_n 为各阶模态位移, ξ_n 为模态阻尼比, F_n 代表模态气动载荷, $F_n = \phi_n^T F$; M_n 为模态质量, ω_n 为固有频率。对于塔架运动方程(8)可以利用 Newmark 积分等方法即可获得较稳定的计算结果^[8]。

2 塔架外部激励

2.1 地震加速度谱

地震对风力机塔架的影响分为水平向和竖向两个方向,且目前大型风力机塔架高度一般在 60 m~100 m 之间,属于高耸结构,水平向和竖向的地震影响都不能忽略。地震载荷以加速度时程的形式作用于风力机塔架基底,而加速度则可依据结构抗震设计规范中设计加速度反应谱生成。本文依据国内抗震设计标准 GB 50011-2010 获取地震加速度时程,并以水平向加速度时程为例进行阐述风—地震联合作用下的动力响应。地震水平向影响系数曲线如图 1 所示。

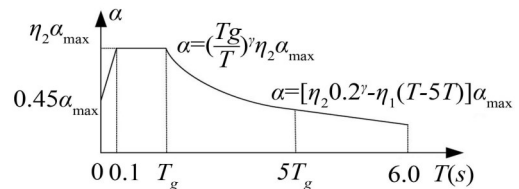


图1 地震影响系数曲线

地震水平向设计加速度反应谱可表示为

$$\alpha(t) = \begin{cases} (0.45 + \eta_2 T) \alpha_{\max} & 0 \leq T \leq 0.1 \\ \eta_2 \alpha_{\max} & 0.1 < T \leq T_g \\ \eta_2 \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma \alpha_{\max} & T_g < T \leq 5T_g \\ [\eta_2 \cdot 0.2^\gamma - \eta_1 (T - 5T_g)] \alpha_{\max} & 5T_g < T \leq 6.0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\alpha(t)$ 为地震影响系数, α_{\max} 为地震影响系数最大值, γ 为衰减系数, η_1 为直线下降段的斜率调整系数, T_g 为特征周期, η_2 为阻尼调整系数, T 为结构自振周期。

当结构阻尼比不等于 0.05 时,地震影响系数曲线的阻尼调整系数和形状参数应符合标准规定。

曲线下降段的衰减指数 γ 应按式确定

$$\gamma = 0.9 + (0.05 - \zeta) / (0.3 + 6\zeta) \quad (10)$$

式中 ζ 为阻尼比。

直线下降段的下降斜率调整系数 η_1 (当 η_1 小于 0 时取 0) 应按下式确定

$$\eta_1 = 0.02 + (0.05 - \zeta) / (4 + 32\zeta) \quad (11)$$

阻尼调整系数 η_2 (当 η_2 小于 0.55 时, 应取 0.55) 应按下式确定

$$\eta_2 = 1 + (0.05 - \zeta) / (0.08 + 1.6\zeta) \quad (12)$$

对于特定风电场, 需要根据当地地震条件, 选择合适的地震影响系数最大值 α_{\max} 和特征周期 T_g , 然后对上述加速度反应谱进行模拟, 即可得到人工合成的地震加速度时程。

2.2 空气动力载荷

空气动力载荷是风力机塔架载荷的主要来源。在风力机塔架本身载荷分析中, 比较关心超临界区 (雷诺数 $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$), 此时气动载荷是随机性质的, 通常属于小阻尼系统在随机力作用下的响应问题。塔架某一高度 h 处风作用在塔架上产生的气动载荷可表示为^[9]

$$F_w(h) = \frac{1}{2} \rho \int_h^H V(h)^2 \delta D(h) C(h) dh \quad (13)$$

式中 H 为塔架高度, $V(h)$ 为高度 h 处的风速, $D(h)$ 为高度 h 处塔架外径, $C(h)$ 为阻力系数, δ 为阵风因数。

塔架除其本身所受气动载荷外, 还有由安装于其顶部风轮产生的气动载荷。根据叶素—动量理论, 可将风力机叶片看作是由有限个叶素叠加而成。在风轮半径 r 处的单个叶素上的风速分量如图 2 所示。

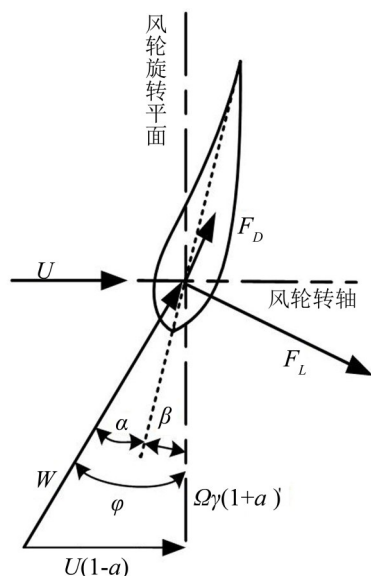


图2 叶片叶素分析

通过叶片单个叶素的气流轴向速度为

$U(1-a)$, 在风轮旋转平面内, 气流相对于叶片的角速度为 $\Omega r(1+a)$, 气流轴向速度和切向速度合成相对风速 W 。考虑三个叶片, 作用在风轮上的法向力和切向力分别为

$$F_x = \frac{1}{2} B \rho \int_0^R W^2 c (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) dr \quad (14)$$

$$F_{yB} = \frac{1}{2} B \rho \int_0^R W^2 c (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) dr \quad (15)$$

式中 C_L , C_D 为翼型升力系数和阻力系数, φ 为入流角, B 为风轮叶片数, ρ 为空气密度, R 为风轮旋转平面半径, c 为截面弦长。

计算出风轮所受气动载荷后, 通过载荷坐标转换^[10], 可推导出塔架顶端在前后方向 (即水平方向) 上的气动载荷为

$$F_{XT} = F_{XB} \sin \chi \sin \varepsilon + F_{yB} (\cos \eta \cos \chi - \sin \chi \sin \eta \cos \varepsilon) \quad (16)$$

式中 ε 为风轮旋转方位角, η 为风轮锥角, χ 为主轴倾角。

3 算例

以某 3.0 MW 变速变桨型风力机塔架为算例, 该风力机塔架高度 88 m, 风轮直径 105 m, 塔底和塔顶直径分别为 4.2 m 和 3.6 m。对该风力机塔架在风—地震联合作用时的动力响应进行分析。该风力机所处风电场抗震设防烈度为 9 度, 地震影响系数最大值为 0.4 g (g 为重力加速度), 特征周期为 0.45 s, 取阻尼比为 0.02。本文在依据规范生成目标地震影响系数曲线 (如图 3 所示) 的基础上, 借助商业软件 GH Bladed 软件对地震影响系数曲线进行模拟^[11], 生成了地震水平方向加速度时程, 如图 4 所示, 并对水平方向加速度时程进行谱分析, 获得拟合地震影响系数曲线, 拟合地震影响系数曲线和目标地震影响系数曲线的对比结果如图 3 所示。

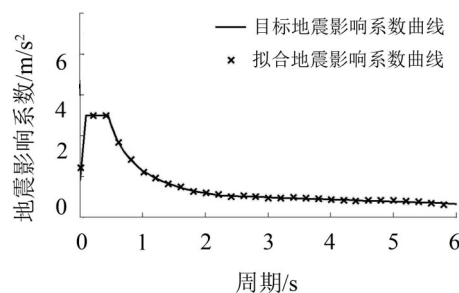


图3 地震影响系数曲线

从图3中可以看出, 拟合地震影响系数曲线和目标地震影响系数曲线吻合较好, 因此生成的水平向地震加速度时程可以用于塔架动力响应计算。

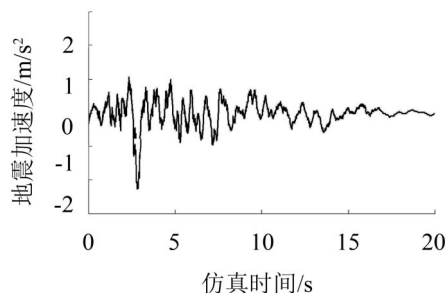


图4 水平向地震加速度时程

在平均风速为12 m/s的湍流风场下,风的来流方向正对风轮,叠加以上生成的水平向地震加速度时程,水平向地震加速度发生的时间为仿真时间的第10 s,地震持续时间20 s,总的仿真时间为60 s。获得该风力机在发电工况时塔架顶端前后方向(即水平方向)振动位移响应如图5所示。从图中可以看出,地震对塔架顶端前后方向上的振动位移具有明显影响,考虑地震影响后塔架前后方向顶端位移最大值为0.658 m,发生在第18.8 s,而未发生地震时同时刻的塔架前后方向顶端位移为0.447 m,地震影响增幅为47.20 %。图6为发生地震前后沿塔架高度方向上同时刻塔架最大载荷(参考GL坐标系^[9],塔架各截面弯矩 M_y)对比,从图中可以看出,从塔架顶端到塔架底部,地震影响对塔架各截面的载荷影响程度越来越大。塔架底部最大载荷发生在第18.7 s,未发生地震时塔架底部最大载荷为33 178.0 kNm,发生地震后塔架底部载荷为50 105.0 kNm,地震影响增幅为51.02 %。由以上对比分析可知,地震发生时,明显增加了塔架前后方向振动位移和载荷的大小和幅值,对风力机塔架设计可靠性具有较大影响,因此在地震活动较频繁的地区安装风力机,需要充分考虑地震对风力机塔架的影响。

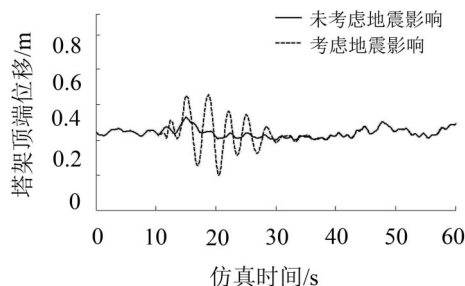


图5 塔架顶端前后方向振动位移

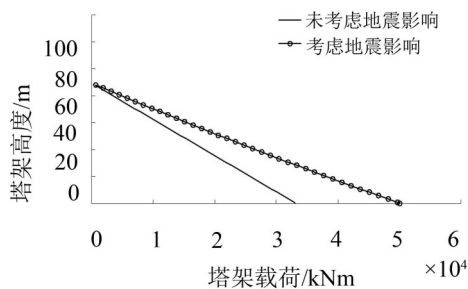


图6 塔架高度方向上载荷(My)对比

4 结语

(1) 本文利用梁单元建立了风力机塔架有限元模型,并推导了塔架在风—地震联合作用下的动力学运动方程,对风载和地震加速度谱进行了详细的分析。利用该分析模型实现了某3.0 MW风力机塔架动力响应计算,并对比分析了地震对塔架动力响应的的影响;

(2) 地震对风力机塔架顶部前后方向振动位移响应和各截面载荷影响较大,因此对于安装于地震区域的风力机,除在设计过程中需要对其进行抗震设计外,在运行时还需要密切监控风力机塔架振动情况,紧急情况下可做停机处理以保护风力机。

参考文献:

- [1] 吴春艳,金鑫,何玉林,等. 风力发电机在地震—风作用下的载荷计算[J]. 中国机械工程, 2011, 22(18): 2236-2240.
- [2] Witcher D. Seismic analysis of wind turbines in the time domain[J]. Wind Energy, 2005, 8: 81-91.
- [3] 贺广零. 考虑土—结构相互作用的风力发电高塔系统地震动力响应分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 87-94.
- [4] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- [5] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] Clough Ray W, Joseph Penzien. Dynamics of Structures [M]. New York: McGraw Hill, 1993.
- [7] 王伟,廖明夫,等. 风力机叶片三维模型颤振问题[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(5): 90-96.
- [8] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, et al. Wind energy handbook[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [9] Germanischer Lloyd. Guideline for the certification of wind turbines[M]. Hamburg: Germanischer Lloyd, 2010.
- [10] 郭洪澈,李钢强,刘雄,等. 气动阻尼对海上风力机筒形塔架的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(8): 1451-1457.
- [11] Bossanyi E A. GH Bladed: theory manual[R]. Bristol: Garrad Hassan & Partners Ltd, 2006.