

基于时域法的不同塔架风力机抗台风分析*

刘新喜¹, 邓宗伟^{2†}, 高乾丰³

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000;
3. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:为探讨不同塔架形式风力机的抗台风性能, 基于 Abaqus 有限元软件建立 4 种不同塔架形式的风力机一体化模型, 用自回归(AR)法对脉动风时程进行模拟, 分别进行了模态分析和台风时程分析. 结果表明, 风轮和机舱对风力机自振频率的影响较大; 钢筋混凝土锥筒塔架的最大顺风向位移随台风风速的增加呈平缓线性增加趋势, 而其他 3 种塔架的位移随风速的增加表现为非线性增加. 钢管格构式塔架为轻型柔性结构, 其风载响应最为显著, 钢锥筒塔架次之, 而钢筋混凝土塔架因具有较大的自重和刚度, 其位移响应最小, 抗风性能较好.

关键词:风力机塔架; 时域分析; 脉动风模拟; 台风荷载; 动力响应

中图分类号:TK83

文献标志码:A

Typhoon-resistance Analysis of Wind Turbines with Different Towers Based on Time-domain Method

LIU Xinxi¹, DENG Zongwei^{2†}, GAO Qianfeng³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China;
3. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: In order to investigate the typhoon-resistance of wind turbines with different towers, four wind turbine integration models with different forms of towers were built by Abaqus finite element software and Autoregressive (AR) model was used to simulate the fluctuating wind for modal analyses and typhoon time-history analyses. The results show that the natural frequencies of wind turbines are greatly affected by wind rotor and nacelle. When the typhoon wind speed increases, the maximum along-wind displacement of the steel conical-cylindrical tower climbs linearly, while those of the other 3 towers show a significant nonlinear growth. As a lightweight flexible structure, the steel tube lattice tower exhibits the greatest dynamic response, and the steel conical-cylindrical tower exhibits the second one. Because of the considerable stiffness and weight, the displacement response of the reinforced concrete conical-cylindrical tower is the minimum, and the typhoon-resistance capability is the best.

Key words: wind turbine tower; time-domain analysis; fluctuating wind simulation; typhoon load; dynamic response

* 收稿日期:2016-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378082), National Natural Science Foundation of China(51378082); 湖南省教育厅科学研究重点项目(14A024), Key Project of Scientific Research of Hunan Educational Committee(14A024)

作者简介:刘新喜(1963—),男,湖南邵阳人,长沙理工大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: teapotd@163.com

台风易造成沿海和近海风力机整机倒塔、叶片断裂、机舱摧毁等事故^[1]。叶片、机舱的局部破损可在保险赔偿款的支持下降低亏损,但如塔架发生失稳或折断则将引起整个风电机组的倾覆,造成毁灭性的损失,故确保塔架结构的安全对风电机组的抗台风意义重大。目前国内外学者已对强风荷载作用下风力机的动力性能做了许多研究,如:贺广零等^[2]建立钢筒和钢筋混凝土筒2种形式风力机模型,进行了风力发电塔的风致动力响应分析,认为设计中必须考虑结构的风致动力放大效应,钢塔存在突出的拍振现象,动力响应明显偏大,钢筋混凝土塔则不存在该现象。章子华等^[3]采用 Davenport 谱模拟脉动风,用三维实体单元模拟发电机组,建立风机塔底固接和考虑桩基刚度的2种模型进行自振特性分析和风载响应分析,表明2种模型的前4阶自振频率差别不大,自重和平均风作用下响应差异不明显,而考虑脉动分量后,作用于风机上的风荷载显著增长,结构的动力响应也相应增大。Quilligan等^[4]通过不同塔架高度和风速的摆振数值模型研究了钢塔架和混凝土塔架的结构性能,认为预应力混凝土塔架在未来大型风力机塔架结构中具有较好的应用前景。然而,因风力机外形的复杂性和风的随机性,许多文献在进行风速模拟和风力机建模时做了大量简化,且大多只对钢锥筒塔架风力机进行了研究,对格构式塔架、混凝土塔架及钢-混凝土混合塔架等形式风力机的系统分析较少。

本文基于 Abaqus 软件尽可能真实地建立4种不同塔架形式(钢锥筒塔架、钢筋混凝土锥筒塔架、钢-混凝土混合锥筒塔架和钢管格构式塔架)的风力机“风轮-机舱-塔架-基础”一体化模型,分别进行模态分析和台风荷载作用下的动力时程分析,得到风力机的自振特性及风载动力响应结果,并对各风力机的抗风性能进行评价,为台风影响环境中风力机塔架形式的选择和设计提供参考。

1 抗台风分析原理和方法

1.1 AR 法脉动风模拟

脉动风时程的模拟方法有谐波叠加法和线性滤波法^[5-6]两类,其中线性滤波法中的自回归(AR)模型因速度快、计算量小已得到广泛应用。本文采用 AR 模型对风电场脉动风进行模拟,空间 M 个点相关脉动风速 $v_i(t)$ 的 AR 模型可表示为:

$$v_i(t) = - \sum_{k=1}^p \Psi_k v_i(t - k\Delta t) + N(t). \quad (1)$$

式中: $v_i(t)$ 为空间第 i 点的脉动风速, $i=1, 2, \dots, M$; Ψ_k 为 AR 模型自回归系数矩阵, 为 $M \times M$ 阶方阵; p 为 AR 模型的阶数; Δt 为时间步长; $N(t)$ 为 M 维独立正态分布的随机过程向量, $N(t) = L \cdot n(t)$ (其中 $n(t) = [n_1(t), \dots, n_M(t)]^T$, $n_i(t)$ 是均值为 0、方差为 1 且彼此独立的正态随机过程, $i=1, 2, \dots, M$; L 为 M 阶下三角矩阵, 可通过对 R_N 进行 Cholesky 分解得到)。

将式(1)两边同时右乘以 $v^T(t - j\Delta t)$, 并取数学期望值, 整理得:

$$\begin{cases} R_v(j\Delta t) = - \sum_{k=1}^p \Psi_k R[(j-k)\Delta t], \\ R_v(0) = - \sum_{k=1}^p \Psi_k R(k\Delta t) + R_N, \end{cases} \quad j=1, \dots, p. \quad (2)$$

式中: R_v, R_N 分别为 $v(t)$ 和 $N(t)$ 的协方差矩阵。

将式(2)写成矩阵形式为:

$$R \cdot \Psi = \begin{bmatrix} R_N \\ O_p \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中: Ψ 为 $(p+1)M \times M$ 阶矩阵, $\Psi = [I, \Psi_1, \dots, \Psi_p]^T$; O_p 为 $pM \times M$ 阶零矩阵; R 为 $(p+1)M \times (p+1)M$ 阶自相关 Toeplitz 矩阵, 写成分块矩阵形式为:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11}(0) & R_{12}(\Delta t) & \dots & R_{1(p+1)}(p\Delta t) \\ R_{21}(\Delta t) & R_{22}(0) & \dots & R_{2(p+1)}[(p-1)\Delta t] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{(p+1)1}(p\Delta t) & R_{(p+1)2}[(p-1)\Delta t] & \dots & R_{(p+1)(p+1)}(0) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中: $R_{ij}(m\Delta t)$ 为 $M \times M$ 阶方阵, $i, j=1, \dots, p+1, m=0, \dots, p$ 。根据 Wiener-Khintchine 公式有:

$$S_{ij}(m\Delta t) = \int_0^\infty S_{ij}(f) \cos(2\pi f \cdot m\Delta t) df. \quad (5)$$

式中: $S_{ij}(f)$ 为脉动风速谱, 当 $i=j$ 时, $S_{ij}(f)$ 为脉动风速自功率谱密度函数, 当 $i \neq j$ 时, $S_{ij}(f)$ 为脉动风速互功率谱密度函数, $i, j=1, 2, \dots, M$; f 为脉动风速频率。

互功率谱可由自功率谱和相干函数确定:

$$S_{ij}(f) = r_{ij}(f) \cdot \sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)}. \quad (6)$$

式中: $S_{ii}(f), S_{jj}(f)$ 为自功率谱; $r_{ij}(f)$ 为相干函数, 根据 Shiotani 的建议取值:

$$r_{ij} = \exp\left\{-\left[\frac{(x_j - x_i)^2}{L_x} + \frac{(y_j - y_i)^2}{L_y} + \frac{(z_j - z_i)^2}{L_z}\right]^{1/2}\right\}. \quad (7)$$

式中: L_x, L_y 和 L_z 分别为考虑风速空间各方向相关

性的系数,取值为 $L_x=L_y=50, L_z=60$.

工程界普遍认可的脉动风功率谱有 Simiu 谱、Davenport 谱及 Kaimal 谱等. 我国学者石沅通过对上海地区台风实测数据的分析,提出了石沅台风风谱,其数学表达式为^[7]:

$$S_{ii}(f) = \frac{5.46k\bar{v}_{10}^2 x^{2.4}}{f(1+1.5x^2)^{1.4}}. \quad (8)$$

式中: k 为地面粗糙度系数; \bar{v}_{10} 为 10 m 高处平均风速; x 为湍流积分尺度系数, $x=1200f/\bar{v}_{10}$.

1.2 风荷载计算方法

塔架上第 i 点处 t 时刻的风速由周期在 10 min 以上的平均风和周期只有几秒的脉动风组成,即:

$$V_i(t) = \bar{v}_i(t) + v_i(t). \quad (9)$$

式中: $V_i(t)$, $\bar{v}_i(t)$, $v_i(t)$ 分别为第 i 点在 t 时刻的风速、平均风速和脉动风速, m/s. 平均风速只与高度 z 有关,用指数率模型表示为: $\bar{v}(z) = \bar{v}_*(z/z_*)^\alpha$ (其中 z_* 常取 10 m, 相应地 $\bar{v}_* = \bar{v}_{10}$, α 为风切变指数).

则塔架上第 i 点处 t 时刻的风压可表示为:

$$w_i(t) = \frac{1}{2}\rho V_i(t)^2 = \frac{1}{2}\rho\bar{v}_i^2 + \frac{1}{2}\rho[2\bar{v}_i v_i(t) + v_i^2(t)]. \quad (10)$$

式中: $w_i(t)$ 为第 i 点在 t 时刻的风压, Pa; ρ 为空气密度, kg/m^3 .

式(10)中脉动风风速平方项数值较小,可忽略. 将得到的风压乘以相应特征点的所辖面积即可计算出第 i 点的风荷载,对于塔架结构,考虑风载体型系数后的风荷载表达式为:

$$F_i(t) = \frac{1}{2}\rho\mu_s A_i V_i(t)^2 = \frac{1}{2}\rho\mu_s A_i \bar{v}_i^2 + \rho\mu_s A_i \bar{v}_i v_i. \quad (11)$$

式中: $F_i(t)$ 为第 i 点 t 时刻的风荷载, N; μ_s 为结构风载体型系数; A_i 为第 i 点所辖迎风面面积, m^2 .

在台风天气,风力机必然处于停机状态. 此时,作用在风力机机舱和叶片上的风荷载亦可根据式(11)分区进行计算,平均风速和脉动风速均采用风力机轮毂高度处的数值.

1.3 结构运动方程

在结构的动力响应分析中,时域分析法将随机的风荷载模拟成时间的函数,然后直接求解运动方程. 风力发电机结构在风荷载作用下所有节点的振动方程写成矩阵形式为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t). \quad (12)$$

式中: u, \dot{u}, \ddot{u} 分别为结构位移、速度、加速度向量; $F(t)$ 为节点随机风荷载向量; M, K, C 分别为质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵.

在实际分析中,体系的总阻尼矩阵可采用瑞利阻尼,即

$$C = \alpha M + \beta K. \quad (13)$$

式中: α 和 β 为瑞利阻尼系数,可根据结构体系的 2 个固有频率以及相应阻尼比确定.

2 不同塔架风力机建模

采用文献[8-9]建立的某典型 2 MW 水平轴风力机的风轮-机舱模型进行研究,其轮毂高度为 80 m,风轮直径为 93 m,额定风速为 11 m/s,风轮转速为 9.7~17.5 r/min. 该模型采用实际外轮廓尺寸,并将风轮和机舱视为单层空心结构,用壳单元模拟,叶片骨架及机舱内部设备以增加叶片或机舱厚度的方式加以考虑. 风轮与机舱罩均采用玻璃钢,其物理力学参数^[9]为:展向弹性模量 42.6 GPa,径向弹性模量 16.5 GPa,剪切弹性模量 5.5 GPa,泊松比 0.22,密度 1 950 kg/m^3 . 通过对该模型进行气动性能分析和风雨荷载有限元分析,文献[8-9]表明该风轮-机舱模型的几何形态可靠,所采用的物理力学参数能很好地描述材料的主要性能.

塔架采用钢锥筒塔架、钢筋混凝土锥筒塔架、钢-混凝土混合锥筒塔架和钢管格构式塔架 4 种不同的结构形式. 它们的设计参数主要参考了文献[9-13],并进行了适当优化与改进,具体见表 1. 文献[11]将数值模拟结果与现场实测数据进行对比,验证了钢锥筒塔架 Abaqus 有限元模型的准确性. 本文中,钢材均采用弹塑性模型,弹性模量为 210 GPa,屈服强度为 345 MPa,泊松比为 0.2,阻尼比为 0.03;混凝土采用损伤塑性模型,弹性模量为 30 GPa,抗拉强度为 1.57 MPa,抗压强度为 16.7 MPa,泊松比为 0.25,阻尼比为 0.05.

为了考虑风力机塔架基础与地基之间的相互作用,本文采用文献[14]给出的方法,即在基础和地基之间设置弹簧阻尼器. 对于一个刚性圆形基础,可依据基础周围土体性质和基础尺寸来确定刚度系数和阻尼系数,表达式分别为^[13]:

$$k_h = \frac{8GR}{2-\mu}, k_v = \frac{4GR}{1-\mu}, k_\varphi = \frac{8GR^3}{3(1-\mu)}, \quad (14)$$

$$c_h = \frac{4.6R^2}{2-\mu}\sqrt{G\rho}, c_v = \frac{3.4R^2}{1-\mu}\sqrt{G\rho},$$

$$c_{\varphi} = \frac{0.4R^4}{1-\mu} \sqrt{G\rho} \quad (15)$$

式中: k_i ($i=h, v, \varphi$) 分别为水平向、竖直向和转动向(抗弯、扭)刚度系数; 类似地, c_i ($i=h, v, \varphi$) 为对应的阻尼系数; R 为圆形基础的半径; G, μ 和 ρ 分别是土体的剪切模量、泊松比和密度。

表 1 各形式塔架的主要参数

塔架形式	主要参数
钢塔模型	材料: Q345 钢; 尺寸: 截面外直径 4.8~2.8 m, 壁厚 0.030~0.015 m
混凝土塔模型	材料: C30 混凝土、HRB400 钢筋; 尺寸: 截面外直径 6.0~2.8 m, 壁厚 0.45~0.20 m
混合塔模型	材料: Q345 钢、C30 混凝土; 尺寸: 混凝土塔高 30 m, 截面外直径 6.0~4.8 m, 壁厚 0.45~0.35 m, 钢塔高 48 m, 截面外直径 4.0~2.8 m, 壁厚 0.028~0.015 m
格构塔模型	材料: Q345 钢; 尺寸: 立柱钢管外直径 560 mm, 壁厚 30 mm, 横梁及斜杆钢管外直径 160 mm, 壁厚 15 mm

本文采用的弹簧刚度系数和阻尼系数见表 2。图 1 给出了 4 种塔架的“叶轮-机舱-塔架-基础”风力机一体化有限元模型。

表 2 弹簧刚度系数及阻尼系数
Tab.2 Stiffness coefficients and damping coefficients of the spring

类型	方向	弹簧刚度系数 $k_i / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	阻尼系数 $c_i / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
锥筒形塔架基础	水平向 $i=h$	532×10^9	$2\ 005 \times 10^9$
	竖直向 $i=v$	608×10^9	$3\ 380 \times 10^9$
	转动向 $i=\varphi$	$32\ 798 \times 10^9$	$32\ 222 \times 10^9$
格构式塔架基础	水平向 $i=h$	118×10^9	99×10^9
	竖直向 $i=v$	135×10^9	167×10^9
	转动向 $i=\varphi$	360×10^9	79×10^9



(a) 钢塔 (b) 混凝土塔 (c) 混合塔 (d) 格构塔

图 1 不同塔架形式的风机模型

Fig.1 Wind turbine models with different towers

3 风力机模态分析

塔架结构无阻尼自由振动的自振频率和振型

是结构的基本动力特性, 尤其是低阶振型能量大, 当激振力频率接近这些频率时易引起共振, 使结构遭到破坏. 建立“基础-塔架-机舱-风轮”一体化模型和“塔架-基础”模型(不考虑风轮与机舱的影响)进行模态分析, 得到各风力机的前 5 阶模态, 对应的自振频率见表 3。

表 3 各塔架模型风机的自振频率

不同塔架 风机模型	自振频率/Hz				
	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
钢塔 有	0.381	0.409	1.317	1.613	1.850
模型 无	0.984	1.006	3.933	4.372	4.458
混凝土 有	0.892	0.901	1.936	2.087	2.110
塔模型 无	1.250	1.255	3.453	3.472	8.188
混合塔 有	0.449	0.463	1.039	1.398	1.570
模型 无	1.113	1.120	3.557	3.584	6.165
格构塔 有	0.421	0.430	1.187	1.766	2.145
模型 无	1.354	1.354	4.600	4.652	5.093

注: 表中“有”“无”分别表示有、无风轮和机舱, 即是否考虑风轮及机舱对塔架自振特性的影响。

从表 3 发现, 不考虑风轮及机舱影响时钢管格构式塔架的自振频率最大, 而考虑风轮及机舱影响后钢锥筒塔架的基本频率最小, 钢筋混凝土锥筒塔架最大, 而钢-混凝土混合塔架的基本频率介于两者之间. 由此可见风轮和机舱对风力机自振频率的影响很大, 分析时不可忽略它们对塔架的影响. 引起塔筒共振的激振频率包括叶轮转动频率和风振频率^[15]. 风轮转速范围为 9.7~17.5 r/min, 相应风轮转动 1P 频率为 0.162~0.292 Hz, 3P 频率为 0.485~0.875 Hz, 考虑风轮及机舱时各风力机的固有频率都避开了风轮转动 1P 和 3P 频率范围, 不会发生共振。

4 塔架台风响应分析

本文将风力机沿轮毂高度均分为 16 份, 共计 17 个特征点, 采用石沅台风风谱, 通过 MATLAB 编程对脉动风进行模拟. 10 m 高度处的平均风速取 35 m/s, 40 m/s, 45 m/s 和 50 m/s 4 个不同强度, 分别对应于蒲福风力等级的 12, 13, 14 和 15 级台风. 其他模拟参数取值如下: 地面粗糙度系数 $k=0.003$, 自回归阶数 $p=4$, 时间步长 $\Delta t=0.1$ s, 时距取 200 s. 图 2 给出了 50 m/s 台风下风力机第 9 点 (40 m 高处) 的脉动风模拟结果, 可知模拟谱与石沅台风风谱吻合较好, 说明用 AR 法模拟得到的台风

脉动风速时程是可靠的. 图 3 为按式(11)计算得到的 50 m/s 台风时钢锥筒风力机上第 9 点的水平风荷载时程曲线.

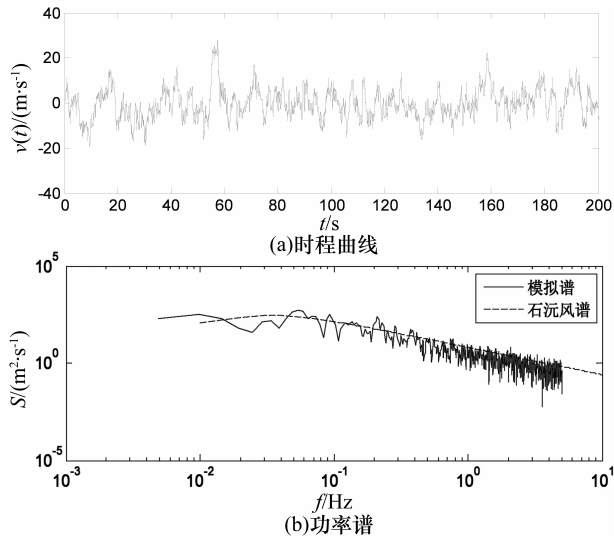


图 2 脉动风时程曲线及功率谱 ($\bar{v}_{10}=50$ m/s)

Fig.2 Time-history and power spectrum curves of fluctuating wind speed ($\bar{v}_{10}=50$ m/s)

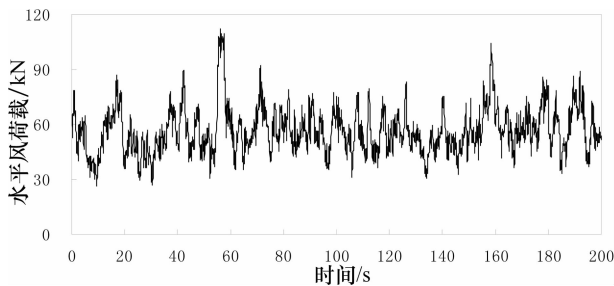


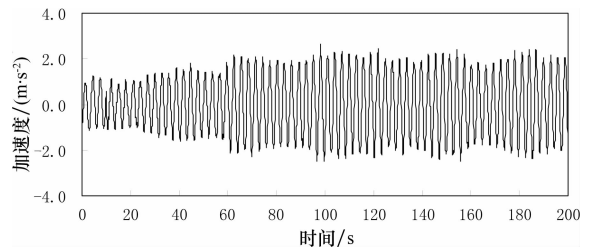
图 3 钢锥筒风力机第 9 点的水平风荷载

Fig.3 Horizontal wind load at the ninth point of the steel conical-cylindrical tower

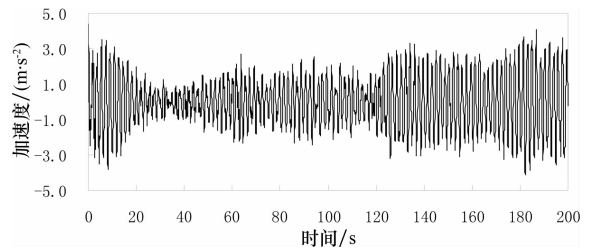
利用 Abaqus 有限元软件对台风荷载下各塔架形式的风力机进行动力时程分析. 分析工况是在 10 m 高处风速为 35 m/s, 40 m/s, 45 m/s 和 50 m/s 4 种风速条件下风力机顺桨停机成功, 但风向突然偏转 90° 这一最危险工况^[16-17], 此时叶片和机舱受到的风荷载最为显著. 分析时塔架风荷载以集中力的形式施加在已选定的特征点上, 风轮及机舱所受的风荷载则以集中力和力矩的形式施加在其作用中心.

图 4 为 4 种塔架形式风力机在 50 m/s 台风条件下的塔顶顺风向加速度时程曲线, 由图可知, 塔顶顺风向加速度幅值最小的是钢锥筒塔架风力机, 为 2.63 m/s^2 ; 加速度幅值最大的是钢管格构式塔架风力机, 为 9.61 m/s^2 . 图 5 给出了 50 m/s 台风条件

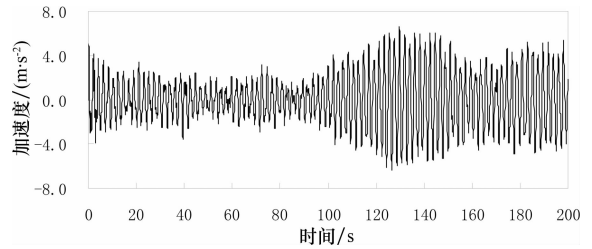
下各风力机塔架最大顺风向位移沿高度的分布情况. 从图 5 可知, 各风力机的顺风向位移从塔底至塔顶呈非线性增加, 其中钢筋混凝土锥筒塔架的顺风向位移最小, 为 0.443 m; 钢管格构式塔架的顺风向位移最大, 为 1.125 m; 钢-混凝土混合塔架在塔底混凝土段发生的位移比钢锥筒塔架小, 沿高度增加, 其顺风向位移慢慢接近并超过钢锥筒塔架的位移. 根据《高耸结构设计规范》(GB 50135—2006) 规定, 按非线性分析的高耸结构的水平位移不应大于其高度的 1/50. 针对本文 80 m 高的塔架, 其水平位移限值为 1.6 m, 可知以上 4 种塔架在台风作用下均未超限.



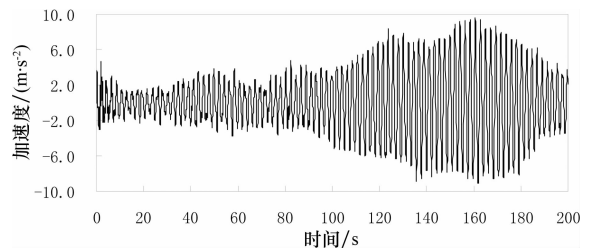
(a) 钢锥筒塔架



(b) 钢筋混凝土筒塔架



(c) 钢-混凝土混合塔架



(d) 钢管格构式塔架

图 4 塔架顶部加速度响应时程曲线

Fig.4 Time-history curves of the acceleration responses at the tower tops

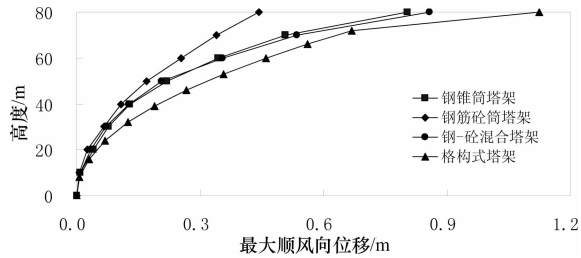


图5 塔架顺风向位移峰值沿高度分布

Fig.5 Distributions of downwind displacement peaks of towers along height

表4统计了50 m/s台风条件下各风力机塔架内力和变形的最大值.从表4可看出,4种塔架结构中,钢材等效应力最大值为301.84 MPa,未超过钢材屈服强度345 MPa;混凝土拉应力最大值为1.08 MPa,小于其抗拉强度1.57 MPa;混凝土压应力最大值为9.67 MPa,亦未超过其抗压强度16.7 MPa,因此4种塔架均未发生破坏.另外,从位移幅值与平均位移的比值(U_{\max}/\bar{U})来看,钢管格构式塔架风力机的值最大,为4.28,而钢筋混凝土锥筒塔架风力机的值最小,仅为2.03.图6给出了不同台风风速条件下各风力机塔架最大顺风向位移的变化情况.从图6可知,各风力机塔架的最大顺风向位移均随台风风速的增大而增加;钢筋混凝土锥筒塔架的位移随风速的增大呈平缓线性增加趋势,变化幅度较小;而对于其他3种塔架,随着风速的增加,最大顺风向位移呈非线性增加,增加幅度越来越大.

表4 50 m/s 台风下各塔架应力和位移响应峰值

Tab.4 Stress and displacement peaks of different towers under a typhoon with $v_{10} = 50$ m/s

塔架类型	最大等效应力/MPa	最大拉(压)应力/MPa	塔顶最大位移/m	$\frac{U_{\max}}{\bar{U}}$
钢锥筒塔架	277.93	—	0.805	3.51
钢筋混凝土筒塔架	140.71	1.08 (9.67)	0.443	2.03
钢-混凝土混合塔架	183.56	1.03 (7.83)	0.859	2.77
格构式塔架	301.84	—	1.125	4.28

注:表中最大等效应力为对钢材而言,最大拉(压)应力则对应于混凝土材料.

综上所述,钢筋混凝土锥筒塔架因刚度和自重较大,其风载动力响应较小,抗风性能最好且比较稳定,钢-混凝土混合塔架次之,而钢管格构式塔架属轻型柔性结构,其风载响应最大.

5 结论

1)采用自回归(AR)模型对脉动风进行模拟,并

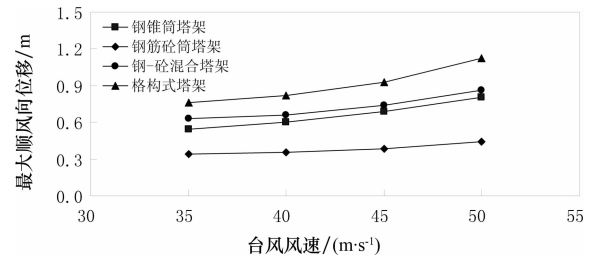


图6 塔架顺风向位移最大值与台风风速的关系

Fig.6 Relationship between the maximum downwind displacement of towers and typhoon wind speed

结合 MATLAB 编程得到的脉动风功率谱与石沅台风风谱吻合较好,说明采用 AR 法模拟脉动风是合理的,同时也确保了风速时程模拟与后续分析过程的可靠性.

2)塔架结构的对称性使同一塔架的相邻模态两两接近相等,当考虑风轮和机舱影响时风力机的自振频率明显减小,故分析时不可忽略风轮及机舱对塔架的影响;所研究的4种塔架形式风力机的固有频率均避开了风轮转动1P和3P频率范围,不会发生共振.

3)风力机塔架的顺风向位移沿塔高呈非线性增加,其中钢筋混凝土锥筒塔架最小,而钢管格构式塔架最大.塔架的最大顺风向位移均随台风风速的增大而增加,其中钢筋混凝土锥筒塔架的位移随风速增加呈平缓线性增加趋势,而其他3种塔架的位移随风速的增加表现为非线性增加.

4)在50 m/s台风作用下,钢管格构式塔架作为轻型柔性结构,其塔顶水平位移、水平加速度及塔架应力均较大,风载响应最为显著,钢锥筒塔架次之,而钢筋混凝土塔架因具有较大的自重和刚度,其位移响应最小,抗风性能较好.

参考文献

- [1] 章子华,周易,诸葛萍.台风作用下大型风电结构破坏模式研究[J].振动与冲击,2014,33(14):143-148.
ZHANG Z H, ZHOU Y, ZHUGE P. Failure modes of large-scale wind power structure subjected to typhoon[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 143-148. (In Chinese)
- [2] 贺广零,李杰.风力发电高塔系统风致动力响应分析[J].电力建设,2011,32(10):1-9.
HE G L, LI J. Dynamic response analysis of wind-excited wind turbine systems [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(10): 1-9. (In Chinese)
- [3] 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 Z H, WANG Z Y, LIU G H. Simulation of fluctuating wind in wind farm and dynamic response of wind turbine tower

- [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2011, 32(7): 992—998. (In Chinese)
- [4] QUILLIGAN A, O'CONNOR A, PAKRASHI V. Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers[J]. *Engineering Structures*, 2012, 36(4): 270—282.
- [5] AAS-JAKOBSEN K, STRØMMEN E. Time domain buffeting response calculations of slender structures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(5): 341—364.
- [6] 张文福, 马昌恒, 肖岩. 风场模拟中 AR 模型的若干问题[J]. *计算力学学报*, 2009, 26(1): 124—130.
ZHANG W F, MA C H, XIAO Y. Some issues on AR models for wind field simulation [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, 26(1): 124—130. (In Chinese)
- [7] 徐旭, 刘玉. 高耸结构在台风作用下的动力响应分析[J]. *建筑结构*, 2009, 39(6): 105—109.
XU X, LIU Y. Dynamic response analysis of a high-rising structure under typhoon[J]. *Building Structure*, 2009, 39(6): 105—109. (In Chinese)
- [8] 邓宗伟, 彭文春, 高乾丰, 等. 复杂山地风力机流场及气动性能[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(10): 4294—4300.
DENG Z W, PENG W C, GAO Q F, *et al.* Flow field and aerodynamic performance of wind turbine in complex terrain[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(10): 4294—4300. (In Chinese)
- [9] 高乾丰, 董辉, 邓宗伟, 等. 大型风力机风雨结构三场耦合分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47(3): 1011—1016.
GAO Q F, DONG H, DENG Z W, *et al.* Three field coupling analysis for large-scale wind turbine with wind-rain-structure [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47(3): 1011—1016. (In Chinese)
- [10] 李超, 艾丽昆, 曲世明, 等. 透平膨胀机叶轮耦合应力的强度有限元分析[J]. *流体机械*, 2012, 40(2): 15—19.
LI C, AI L K, QU S M, *et al.* Strength analysis based on coupling stress of high-speed rotary turbo expander impeller with finite element method[J]. *Fluid Machinery*, 2012, 40(2): 15—19. (In Chinese)
- [11] 彭文春, 邓宗伟, 高乾丰, 等. 风机塔筒流固耦合分析与受力监测研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(7): 136—142.
PENG W C, DENG Z W, GAO Q F, *et al.* Fluid-solid interaction analysis and stress monitoring research of wind turbine tower[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(7): 136—142. (In Chinese)
- [12] 张文礼, 张锁怀, 王开专, 等. 应用 ANSYS 二次开发的塔架应力研究[J]. *现代制造工程*, 2008(10): 45—49.
ZHANG W L, ZHANG S H, WANG K Z, *et al.* Research on the stress of the tower based on the secondary developing of ANSYS[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008(10): 45—49. (In Chinese)
- [13] 陈俊岭, 阳荣昌, 马人乐. 基于向量式有限元法的风力发电机组一体化仿真分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(11): 141—148.
CHEN J L, YANG R C, MA R L. Integrated simulation of wind turbine based on vector form intrinsic finite element[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(11): 141—148. (In Chinese)
- [14] 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.
HE G L. Seismic response analysis of wind turbine tower systems considering soil-structure interaction[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 87—94. (In Chinese)
- [15] 杜静, 冯博, 何玉林. 风力发电机组塔筒的横向振动分析[J]. *现代制造工程*, 2011(9): 116—118.
DU J, FENG B, HE Y L. Analysis of transverse vibration for wind turbine tower[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2011(9): 116—118. (In Chinese)
- [16] 王振宇, 张彪, 赵艳, 等. 台风作用下风力机塔架振动响应研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(8): 1434—1442.
WANG Z Y, ZHANG B, ZHAO Y, *et al.* Dynamic response of wind turbine under typhoon[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2013, 34(8): 1434—1442. (In Chinese)
- [17] 孙远, 马人乐, 邱旭. 三角形桅杆杆身风荷载特性风洞试验研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2017, 44(1): 39—46.
SUN Y, MA R L, QIU X. Wind tunnel investigation on wind load characteristics of triangular guyed mast[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2017, 44(1): 39—46. (In Chinese)