

大型风力机塔架在脉动风下的动力响应特性研究

张湘伟, 文武

(广东工业大学机电工程学院, 广州 510006)

摘 要:采用 Kaimal 脉动风功率谱,考虑脉动风的空间相关性,采用 AR 模型模拟风电场脉动风速时程,并验证脉动风速谱与目标谱的一致性;通过有限元方法计算风力机塔架结构在风载荷作用下的动力响应特性。计算结果表明:AR 模型对实际风场风速进行有效模拟,考虑脉动风的影响,塔架的风振响应显著增加;随着风速的增加,塔架的振动也随之增加,这为风力机塔架的风致响应分析和抗风研究提供了实用方法。

关键词:塔架;脉动风模拟;有限元;动力响应

中图分类号:TB115

文献标志码:A

随着风力发电技术的发展,更大的发电功率、更大的叶轮直径和更高的塔架已成为风电发展的主流趋势^[1]。塔架是风力发电机中支撑机舱的重要结构部件,承受风轮载荷和风载荷。在过去的风力发电机组运行中,发生过被强风破坏而倾倒垮塌,造成整个风电机组的毁灭性的损失。如 2006 年温州苍南鹤顶山风电场受到超强台风“桑美”的影响致使 28 台风力发电机组受损,其中 5 台倒塌,损失惨重^[2]。风载荷导致风力机塔架的破坏,表明塔架在风载荷作用下是易损坏的。

针对我国风场的特点:平均风速低,极端风速高,有必要对风力机的塔架结构的风载荷的动力响应特性进行研究。本文结合风力机风场的特点,采用 Kaimal 谱,考虑脉动风的空间相关性,采用 AR 模型模拟风电场脉动风的随机过程,采用有限元法,对风力机塔架在风载荷作用下的动力响应特性进行计算和深入的分析,为风力机塔架结构的抗风研究提供可行性的分析手段。

1 塔架结构动力学方程

风作用于塔架的结构动力响应方程:

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = F_{B_0}(t) + F_{T_0}(t) \quad (1)$$

式中, M —塔架的质质量矩阵; C —塔架的阻尼矩阵;

K —塔架的刚度矩阵; $U(t)$ 、 $\dot{U}(t)$ 和 $\ddot{U}(t)$ 分别表示塔架结构的位移、速度和加速度; $F_{B_0}(t)$ —作用在塔架上的总风轮载荷; $F_{T_0}(t)$ —作用在塔架上的总风载荷。

根据风力机风场大量实测风的数据,工程上把风速分解为周期一般在 10 min 以上的平均风速和周期只有几秒至几十秒的脉动风速两部分^[3],即:

$$V(t) = \bar{V}(t) + V'(t) \quad (2)$$

式中, $\bar{V}(t)$ —为平均风速; $V'(t)$ —为脉动风速。以 10 m 高处风速为参考风速,平均风速跟高度成对数变化,即:

$$V(z) = V_{z_s}(z/z_s)^e \quad (3)$$

式中, V_{z_s} 是 10 m 高处的平均风速; $V(z)$ 是离地高度 z 的平均风速; e 地面粗糙指数。

对于本文的风轮的总风载荷 $F_{B_0}(t)$ 和塔架上的总风载荷 $F_{T_0}(t)$ 只考虑阻力的作用,其阻力的表达式分别为:

$$F_{B_0}(t) = 0.5C_D\rho A_{B_0}[\bar{V}(t) + V'(t)]^2 \quad (4)$$

$$F_{T_0}(t) = 0.5C_D\rho A_{T_0}[\bar{V}(t) + V'(t)]^2 \quad (5)$$

式中, C_D —阻力系数,本文中的塔架和风轮上的阻力系数为 1.1^[4]; ρ —空气密度; A_{B_0} —风轮的扫掠面积; A_{T_0} —风作用在塔架上的投影面积; $\bar{V}(t)$ —为平均风速; $V'(t)$ —为脉动风速。

收稿日期:2013-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51276043)

作者简介:张湘伟(1950-),男,湖南衡阳人,教授,博士,主要从事工程力学和机械设计理论方面的研究,(E-mail)zhangxw@gdut.edu.cn

2 脉动风模拟

2.1 脉动风功率谱

国内外学者对脉动风功率谱进行了大量研究,提出多种不同形式的脉动风功率谱,如 Kaimal 谱、Von Karman 谱和 Davenport 谱等。本文采用 Kaimal 谱,因为卡曼谱考虑了脉动风速功率谱随高度的变化,其脉动风速功率谱表达式^[5]为:

$$\frac{nS(f)}{V_*^2} = \frac{200f}{(1 + 50f)^{5/3}} \quad (6)$$

$$f = nz/\bar{V}(z) \quad (7)$$

$$\bar{V}(z) = \frac{1}{k}V_* \ln(z/z_0) \quad (8)$$

式中, $S(f)$ —功率谱密度; n —频率; f —莫宁坐标; V_* —摩擦速度; $\bar{V}(z)$ —高度 z 处的平均风速; k —Kaiman 常数。

2.2 空间相关系数

为了模拟空间中的两点的风速时间历程,必须考虑到两点风速的相关性。脉动风的空间相关性包括侧向左右相关、竖向上下相关和前后相关。风力机结构为典型高耸结构,在空间上其竖向相关性最为显著,水平相关性不明显。因此,脉动风速空间相关系数的表达式^[6-7]为:

$$Coh(\omega) = \exp\left[\frac{-2\omega C_z |Z_i - Z_j|}{V(Z_i) + V(Z_j)}\right] \quad (9)$$

式中, ω —圆频率; C_z —无量纲的衰减常数,纵向紊流的衰减系数随着高度的增加而减少。当高度低于 100 m 时, C_z 取 10 ~ 11; $V(Z_i)$ —第 i 点平均风速; $V(Z_j)$ —第 j 点的平均风速。

由相关系数的定义可知,不同空间点的脉动风速功率谱密度之间存在如下关系^[6-7]:

$$S_{ij}(\omega) = \sqrt{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega)}Coh(\omega) \quad (10)$$

式中, $S_{ii}(\omega)$ 、 $S_{jj}(\omega)$ —分别为 i 点和 j 点的脉动风自功率谱; $S_{ij}(\omega)$ — i 点和 j 点的互功率谱。

2.3 脉动风速时程模拟

根据统计大量的风速实测样本可知,脉动风是零均值平稳的随机过程。可以采用自回归(Auto - Regressive, AR)模型模拟风速,那么 M 个点空间相关脉动风速时程过程 $[V(t)] = [V^1(t), \dots, V^M(t)]^T$ 可由下式生成:

$$[V(t)] = \sum_{k=1}^p [\Psi_k][V(t - k\Delta t)] + [N(t)] \quad (11)$$

式中, $[V(t - k\Delta t)] = [V^1(t - k\Delta t), \dots, V^M(t - k\Delta t)]^T$, ($i = 1, \dots, M$); $[\Psi_k]$ —AR 模型自回归系数矩阵, $M \times M$ 阶方阵; $k = 1, \dots, p$, p —AR 模型的阶数; Δt —时间步长; $[N(t)]$ —独立随机过程向量。

根据随机振动理论,功率谱密度与相关函数(协方差)之间符合维纳—辛钦公式,即

$$R_V^{ij}[j\Delta t] = \int_0^\infty S_V^{ij}(\omega) \cos(2\pi j\Delta t) d\omega, (i, j = 1, \dots, M) \quad (12)$$

式中, $S_V^{ij}(\omega)$ 在 $i = j$ 时为脉动风速自谱密度函数; $S_V^{ij}(\omega)$ 在 $i \neq j$ 时为脉动风速互谱密度函数。

将式(11)的两侧同时乘 $[V(t - k\Delta t)]$ 并同时取数学期望,考虑 $[N(t)]$ 均值为零,且与随机过程 $V^i(t)$ 独立,结合相关函数 $R_V^i[k\Delta t] = E[V^i(t - k\Delta t)V^i(t)]$, 可得到 $R_V^i[k\Delta t]$ 与回归系数 Ψ_k 之间的关系,写成矩阵形式,有:

$$[R] = [\bar{R}][\Psi_k] \quad (13)$$

式中, $[R] = [R_V(\Delta t), \dots, R_V(p\Delta t)]$

$$[\Psi_k] = [\Psi_1^T, \dots, \Psi_p^T]$$

$$[\bar{R}]_{p \times M} = \begin{bmatrix} R_V(0) & \dots & R_V[(p-1)\Delta t] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_V[(p-1)\Delta t] & \dots & R_V[(p-2)\Delta t] \end{bmatrix}$$

其中

$$[R_V(j\Delta t)]_{M \times M} = \begin{bmatrix} R_V^{11}(j\Delta t) & \dots & R_V^{1M}(j\Delta t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_V^{M1}(j\Delta t) & \dots & R_V^{MM}(j\Delta t) \end{bmatrix}$$

$$[\Psi_j]_{M \times M} = \begin{bmatrix} \Psi_j^{11} & \dots & \Psi_j^{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_j^{M1} & \dots & \Psi_j^{MM} \end{bmatrix}, j = 1, \dots, p$$

求解式(13)给出的线性方程组,可以得到回归系数矩阵 $[\Psi_k]$ 。

对(11)式两边同时乘 $[V(t)] = [V^1(t), \dots, V^M(t)]^T$, 并对公式两边取均值得到:

$$[R_N] = [R_V(0)] - \sum_{k=1}^p [R_V(k\Delta t)] \quad (14)$$

根据式(14)求出 $[R_N]$, 对 $[R_N]$ 作 Cholesky 分解: $[R_N] = [L][L]^T$ 确定

$$[N(t)] = [L][n(t)] \quad (15)$$

式中, $[n(t)] = [n^1(t), \dots, n^M(t)]^T$ 为 M 个独立的满足零均值、单位方差的随机数向量。

脉动风速模拟的流程:由脉动风速自谱密度函数 $S_{ii}(\omega)$ 和相干函数 $Coh(\omega)$ 确定 $S_V^{ij}(\omega)$, 代入(13)式和(14)式分别解出回归系数 $[\Psi_k]$ 和协方差矩阵 $[R_N]$; 假定 $t \leq 0$ 时,风速为 0,在此基础上根据(15)式求解 $[n(t)]$, 代入(11)式即可求得水平脉动风速时程 $[V(t)]$ 。

用 Matlab 编制程序生成 10 m 高度处的脉动风速时程曲线如图 1 所示。模拟参数如下:时间间隔为 0.1 s, 总时长为 200 s, 地面粗糙系数为 0.03。截取频率区间

为 0~0.9 Hz, 频率取样点数 2~8 点。从图 2 中可以看出计算自功率谱与目标功率谱基本吻合, 证明 AR 模型方法可以对脉动风进行有效模拟。

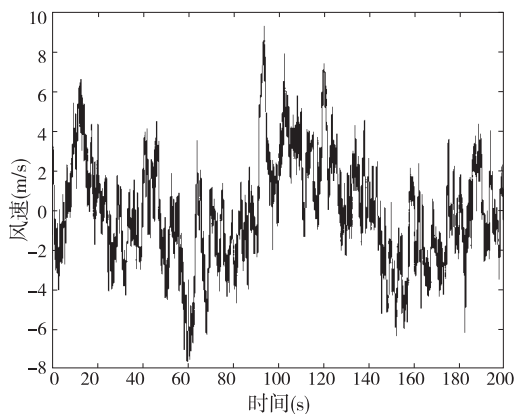


图1 10 m 高处脉动风速时程曲线

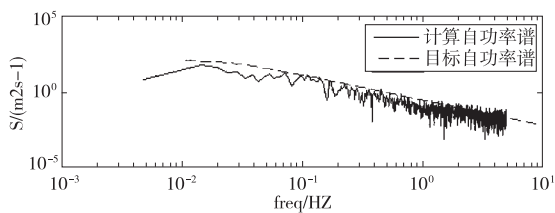


图2 风速功率谱

3 风致响应分析

某兆瓦级风力机塔架为圆锥筒型薄壁结构, 塔架的高度 $H = 65\text{ m}$, 风轮半径为 34 m , 桨叶数为 3。塔架底部内外半径分别为 3.96 m 和 4 m , 塔架顶部内外半径分别为 2.98 m 和 3 m ; 材料为钢材, 弹性模量为, 泊松比为 0.28, 密度为 7900 ; 风轮及机舱的重量为 $65\ 000\text{ N}$, 风轮及机舱重心距塔架中轴的距离为 1.5 m ^[8]。假设塔架为线弹性结构, 视为悬臂梁, 对塔架进行有限元离散, 将塔架等效为 6 个集中质点, 其简化计算模型如图 3 所示。设风力机设计基准为 50 年, 取某岛海域重现期为 50 年的最大风速 16.3 m/s 为风力机设计使用期的极值平均风速, 选定极值平均风速为 10 m 处的风速。根据该海岸线的一座高 70 m 的测风塔观测资料, 得 $10\sim 70\text{ m}$ 的地面粗糙指数为 0.1432。

塔架上的载荷主要由风轮的风载荷和塔架上的风载荷组成。风力机风轮的风载荷根据公式(4)计算, 风力机塔架的风载荷根据公式(5)计算, 采用 Matlab 模拟各点的风载荷, 并将模拟的风荷载施加在各个集中质点, 对方程(1)进行求解, 可得到塔架的位移响应。

由有限元计算结果可知, 在风轮、机舱的重力作用下, 塔架顶端的水平位移为 -0.034 m 。平均风载荷作

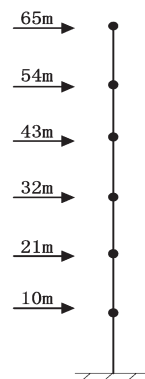


图3 风力机塔架简化模型

用下, 塔架顶端的水平位移为 0.35 m 。在总风载荷作用下, 塔架顶端的水平位移和水平加速度响应如图 4、图 5 所示。总风引起的塔顶的水平位移幅值达到 1.359 m , 塔顶的水平加速度幅值达到 59.85 m/s^2 。计算结果表明, 考虑脉动因素的影响, 作用在塔架上的风载荷显著增加, 结构动力响应也随之增大。

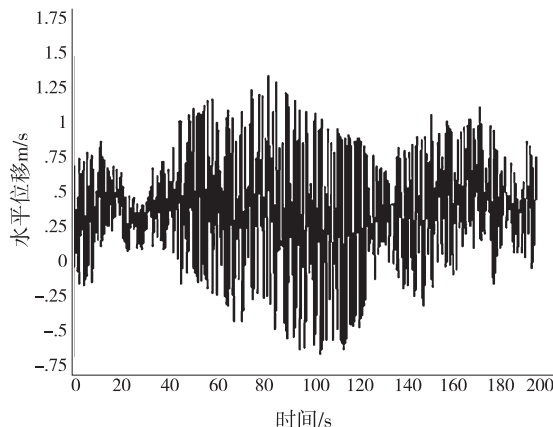


图4 总风载荷作用下的塔顶水平位移

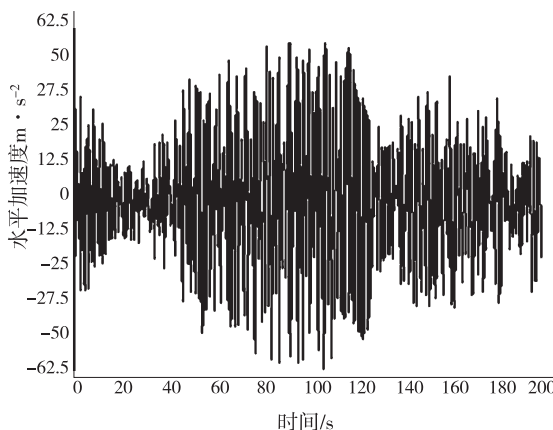


图5 总风载荷作用下的塔顶水平加速度

该兆瓦级风力机切出风速为 25 m/s , 正常条件下不超出切出风速, 假设风力机在运行过程中不偏转, 那么

以轮毂处的风速为参考,选取轮毂平均风速 16 m/s、18 m/s、20 m/s、22 m/s、24 m/s 和 25 m/s 作为条件,计算总风载荷下得到塔架的位移响应,如图 6 所示。图 6 是以轮毂平均风速 16 m/s、18 m/s、20 m/s、22 m/s、24 m/s 和 25 m/s,分别得到总风载荷下塔架顶端最大位移,再与轮毂平均风速 25 m/s 时得到总风载荷下塔架顶端最大位移的比值,从图 6 可以看出随着风速的增加,塔架的动力响应也相应的增大。

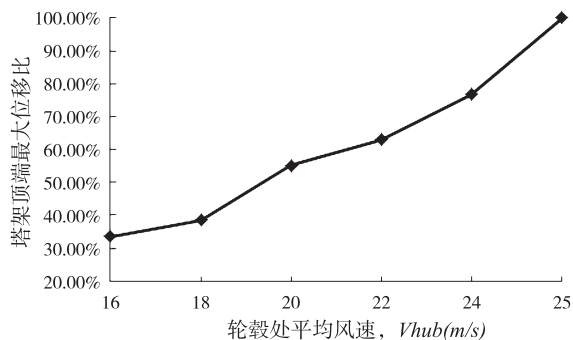


图 6 不同风速下的塔架顶端的最大位移比

4 结论

(1) 本文基于风力机风场的特点,采用 Kaimal 脉动风功率谱,采用 AR 模型,并且考虑脉动风的空间相关性,通过计算机编程快速实现模拟风电场脉动风速时程。以风力机塔架 10 m 高为例进行模拟,脉动功率谱与目标谱基本吻合,表明基于 AR 模型模拟的风速时程能有效地模拟风电场的实际风况,可应用风力发电机的气动载荷计算中;

(2) 对某兆瓦级风力机塔架风致响应的计算表明,所建立的模型能很好地反映脉动风对结构的影响,随着

脉动风速的影响,作用在塔架上的风载荷显著增加,结构动力响应也随之增大,同样地风速的增加,结构动力响应也随之增大,所以在设计风力机的过程中,必要考虑风速的作用;

(3) 本文所采用的方法不仅可以分析塔架在风载荷作用下的动力响应,也可以为风力机塔架结构的强度和刚度校核、疲劳寿命分析和结构改进提供可行性的分析手段。

参考文献:

- [1] 李俊锋.中国风电发展报告[M].北京:中国环境出版社,2012.
- [2] 国家风力发电工程技术研究中心.桑美正面袭击浙江苍南风电场遭受重大损失[EB/OL].<http://www.nwtc.cn/Article/ShowArticle.asp?ArticleID=982>.
- [3] 李春,叶舟.现代陆海风力机计算与仿真[M].上海:上海科学技术出版社,2012.
- [4] 谢峰,赵吉文.600KW 风力机塔架结构的仿真设计[J].系统仿真学报,2004,16(1):70-72.
- [5] 贺德馨.风工程与工业空气动力学[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [6] 袁波,应惠清.基于线性滤波法的脉动风速模拟及其 MATLAB 程序的实现[J].结构工程师,2007,23(4):55-61.
- [7] 李春祥,都敏,韩兵康.基于 AR 模型模拟超高层建筑的脉动风速时程[J].地震工程与工程振动,2008,28(3):87-94.
- [8] 李德源,刘胜祥.大型风力机筒式塔架涡致振动的数值分析[J].太阳能学报,2008,29(11):1432-1437.

Study on Dynamic Response of Great Wind Turbine Tower Under the Fluctuating Wind

ZHANG Xiang-wei, WEN Wu

(Faculty of Electromechanics Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 51006, China)

Abstract: Considered the correlation of the fluctuating wind between spatial points, Kaimal power spectrum of pulsating wind and AR model are employed to simulate wind velocity of wind farm. The spectrum of pulsating wind was found in agreement with the target spectrum. The dynamic response of the wind turbine tower is analyzed by using the finite element analysis method under wind loads. The results show AR model is to simulate the actual wind velocity of wind farm effectively; the wind vibration response of the tower increases significantly induced the fluctuating wind; the vibration of the tower also increases with the wind speed increasing. A method applied to wind-induced response and wind resistance of the wind turbine tower is offered.

Key words: tower; simulation of fluctuating wind; FEM; dynamical response