

高风速及风突变对风力机柔性部件振动特性研究

丁勤卫¹ 李 春^{1,2} 郝文星¹ 叶 舟^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要: 风力机运行在复杂多变的自然环境之中, 风是影响风力机气动特性和振动特性的最直接因素。高风速及风速突变将诱发风力机更强的气动载荷。为探究风力机柔性部件在高风速及突变湍流风作用下的振动特性, 以 NREL(美国国家能源部可再生能源实验室) 实测数据为湍流风数据源, 并添加相干结构描述风速突变, 以 NREL 1.5 MW 近海桩柱式风力机为样机, 建立基于 Kane 方法的风力机结构动力学模型, 并使用假设模态离散化方法对其进行柔性化, 而后将该模型与风场和气动模型一起组成气-弹相互耦合系统动力学模型, 分别研究了风力机叶片和塔架的结构动力学响应。结果表明: 相干结构的添加可使基础湍流风具有更大的风突变以及更高的湍流强度; 额定风速附近, 叶尖位移体现为挥舞, 切入风速附近, 叶尖位移同时体现为挥舞和摆振; 相干结构的添加使得叶片和塔架振动加速度成倍增加。

关 键 词: 风力机; 拟序结构; 位移; 振动; 加速度

中图分类号: TK83 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.10.017

引 言

风力机是将风能转化成电能的设备, 风力机正常运行时, 来流风向改变、边界层效应、大气紊流、阵风以及上游风力机尾迹的影响, 使得风力机在多数情况下处于非稳态的运行环境, 突变的风作用于风力机将导致非定常的气动外载^[1-2]。

早期对风力机的研究侧重于风力机气动性能的提升^[3-4], 忽视了其振动性能方面的研究, 近年来频繁出现的风力机损害事故使得风力机振动特性研究成为风力机研究领域内的新热点^[5-6]; 文献[7]根据日本实测的台风风速和日本风力机损害资料, 研究了叶片、门洞相对位置和风向对风力机损害的影响; 文献[8]考虑气弹耦合现象, 对失速型 600 kW

风力机进行振动分析; 文献[9]采用 Bladed 软件对锥筒型塔架在极限风(60 m/s)、风向偏转 90°和风向偏转 180°三种恶劣工况下分别进行了仿真分析; 文献[10~11]采用静力分析方法对台风作用下的风力机进行静力分析; 文献[12]比较了索塔型风力机和塔架型风力机在 50 年一遇阵风作用下振动响应。

2003 年台风“杜鹃”袭击广东汕尾市红海风电场^[13], 造成多台风力机的严重损坏, 该风电场风力机叶片设计抗风强度为 70 m/s, 但发生台风时实测最大风速值仅为 57 m/s。通过叶片损坏的形态等因素分析, 破坏原因不只是来自于特大风速, 还来自于极强的湍流和切变效应。由此可见, 建立更切合实际的风场模型对于研究风力机在强风作用下振动特性具有极为重要的意义。国内外学者做了大量有关风场及其建立的研究, 其国内学者大多基于单一的经典风功率谱密度函数^[14-16], 国外学者大多通过数学方法预测短时间内的局部风速变化或大时间尺度的区域风速分布情况^[17-22], 该方法对于某一节点的风速变化预测结果真实可靠性较高, 但是需要大量的实测数据支持, 作为近似模型和自回归算法的输入样本, 对于三维时变风场的模拟有一定的局限性。

因此, 本文采用结合实测风速数据与理论风谱模型的 NWTcup 功率谱密度函数, 考虑风场计算域的空间相干性, 建立三维时变的湍流风场。并将相干结构加入到普通湍流风中, 实现强湍流风场建模, 描述更高的风速和湍流强度, 对 NREL WindPACT 1.5 MW 桩柱式风力机进行结构动力学仿真, 分析风力机振动特性响应, 以期对风力机的设计和安全

收稿日期: 2015-09-01; 修订日期: 2016-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(S1676131); 上海市教育委员会科研创新(重点)项目(No. 13ZZ120, 13YZ066); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导)项目(20123120110008)

作者简介: 丁勤卫(1990-), 男, 山东济宁人, 上海理工大学博士研究生。

通讯作者: 李 春(1963-), 男, 北京人, 上海理工大学教授, 博士。

性的提高提供理论参考。

1 风力机空气动力学模型

风轮气动计算的本质就是利用流体力学控制方程求解流场压力和速度分布规律, 基于加速度势的动态入流理论利用分离变量的方法求解 Laplace(拉普拉斯) 方程表达的压力分布, 然后通过 Euler 欧拉方程求解速度分布, 结合 BEM(叶片元素法) 理论模型求解风轮气动力。

Pitt - Peters 动态入流理论模型通过 3 个参数描述风轮平面诱导速度变化规律, 通过求解诱导速度来获知风轮平面压力分布。式(1) 为风轮平面由于扰动引起的诱导速度非均匀分布的一阶 Fourier(傅里叶) 级数表达式。

$$\lambda(r, \tilde{\psi}) = v_0 + v_s \mu \sin \tilde{\psi} + v_c \mu \cos \tilde{\psi} \quad (1)$$

式中: v_0 、 v_s 、 v_c —诱导速度的平均分布、水平分布和垂直分布; μ —当地半径比; $\tilde{\psi}$ —偏航角。

气动力变化和诱导速度关系为:

$$[M] \begin{Bmatrix} v_0 \\ v_s \\ v_c \end{Bmatrix} + [V] [L]^{-1} \begin{Bmatrix} v_0 \\ v_s \\ v_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_T \\ C_{M_y} \\ C_{M_z} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $[M]$ —风轮动态入流的质量矩阵, 反映了入流动态特性; $[V]$ —质量流量参数矩阵; $[L]$ —入流增益矩阵; C_T 、 C_{M_y} 、 C_{M_z} —风轮推力系数、偏航系数和俯仰系数。具体表达式如下:

$$[M] = \begin{bmatrix} 128/75\pi & 0 & 0 \\ 0 & 16/45\pi & 0 \\ 0 & 0 & 16/45\pi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[V] = \begin{bmatrix} V_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{V} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -\frac{15\pi}{64} \sqrt{\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \\ 0 & \frac{4}{1+\sin\varphi} & 0 \\ \frac{15\pi}{64} \sqrt{\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} & 0 & \frac{4\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} C_T \\ C_{M_y} \\ C_{M_z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_T/\rho A(\Omega R)^2 \\ M_y/\rho A(\Omega R)^2 R \\ -M_z/\rho A(\Omega R)^2 R \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中: V_m —附加质量流量参数; $\bar{V}$ —与时均入流相关的质量流量参数; φ —入流角, ($^\circ$); F_T —风轮的推力, N; M_y —偏航力矩, N·m; M_z —俯仰力矩, N·m; 其大小通过 BEM 理论计算得到; Ω —风轮转速, rpm; R —风轮半径, m。

通过求解微分方程式(2) 得到风轮平面诱导速度场, 结合相应的翼型空气动力学特性, 求解风轮气动力。

2 风力机结构动力学模型

基于 Kane 方法建模的多体动力学模型将风力机视为具有 N 个自由度的刚体和柔体结构系统。柔体结构有叶片、传动轴和塔架等, 刚性体有平台、轮毂等。

对于风力机整机动力学来说, 当确定了每个刚体的偏速度和偏角速度以及相应的广义主动力 F_r 和广义惯性力 F_r^* 之后, 其动力学方程为:

$$F_r + F_r^* = 0 \quad (r = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

即每个广义速率对应的广义主动力和广义惯性力之和等于零。其中, 广义主动力 F_r 由各部件的重力、气动力、和弹性力组成:

$$F_r = \sum F_r|_{\text{重力}} + \sum F_r|_{\text{气动力}} + \sum F_r|_{\text{弹性力}} \quad (r = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

式中, $\sum F_r|_{\text{重力}}$ —各部件的重力总和; $\sum F_r|_{\text{气动力}}$ —各部件的气动力总和; $\sum F_r|_{\text{弹性力}}$ —各部件的弹性力总和。对应的广义惯性力 F_r^* 为:

$$F_r^* = \sum_{i=1}^w {}^E v_r^{N_i} \cdot (-m^{N_i} a^{N_i}) + {}^E \omega_r^{N_i} \cdot (-{}^E H^{N_i}) \quad (r = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

式中: w —风力机部件数; m^{N_i} —第 N_i 个部件广义质量, kg; ${}^E a^{N_i}$ —第 N_i 个刚体在惯性坐标系 E 中的加速度, m/s²; ${}^E H^{N_i}$ —第 N_i 个刚体在惯性坐标系 E 中的惯性力矩, N·m, 定义为 ${}^E H^{N_i} = \bar{I}^{N_i} \cdot {}^E \omega^{N_i} + {}^E \omega^{N_i} \times \bar{I}^{N_i} \cdot {}^E \omega^{N_i}$ ($\bar{I}^{N_i}$ 为第 N_i 个刚体的中心惯量并矢)。

将式(8) 和式(9) 代入式(7) 中, 可得风力机系

统动力学方程:

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \cdots & C_{1,N} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \cdots & C_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N,1} & C_{N,2} & \cdots & C_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(\dot{q}_1, q_1, t) \\ -f_2(\dot{q}_2, q_2, t) \\ \vdots \\ -f_N(\dot{q}_N, q_N, t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[C(q, t)]\{\ddot{q}\} + \{f(\dot{q}, q, t)\} = \{0\} \quad (11)$$

式中: $[C(q, t)]$ —系统加速度系数矩阵; $\{f(\dot{q}, q, t)\}$ —系统位移和速度相关的向量; $r = 1, 2, \dots, N$ 。

通过 4 阶 Adams-Bashforth 预测-校正方法求解式(10)和式(11),前 4 个时间步通过 Runge-Kutta 法求解。

3 风力机模型及坐标系

本文模拟风力机为 NREL WindPACT 1.5 MW 风力机^[23],风力机参数如表 1 所示。

表 1 风力机参数

Tab. 1 Parameters of the wind turbine

参数	数值	参数	数值
功率/MW	1.5	切入风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3
叶片数	3	额定风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	12
风轮直径/m	70	切出风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	25
轮毂直径/m	3.5	控制方式	变速变桨
轮毂高度/m	84.28	传动方式	多级齿轮箱

风力机系统动力学分析模型主要考虑风轮结构—塔架—风载荷—弹性结构的耦合关系和风载荷—整机结构—控制系统的耦合关系。因此,采用柔性多体动力学和空气动力学载荷理论结合考虑风载荷—弹性结构的耦合关系。风力机分析模型结构如图 1 所示。

在风力机上建立多个相对坐标系,分别为叶片坐标系 $\{O'X'Y'Z'\}$ 、轮毂坐标系 $\{O''X''Y''Z''\}$ 和塔架坐标系 $\{O'''X'''Y'''Z'''\}$,各结构部件坐标系如图 2 所示。

4 风场模型

根据风力机参数设定风场覆盖区域为 $149 \text{ m} \times$

149 m 如图 3 所示。风速分量 u 沿 x 轴正向(即垂直于风轮平面),风速分量 v 沿 y 轴正向,风速分量 w 沿 z 轴正向。对计算域进行网格划分,共 15×15 个节点,轮毂中心位于中心节点。

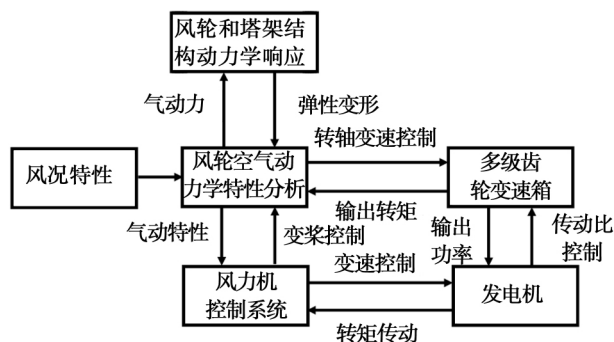


图 1 风力机分析系统

Fig. 1 Analysis system of wind turbine

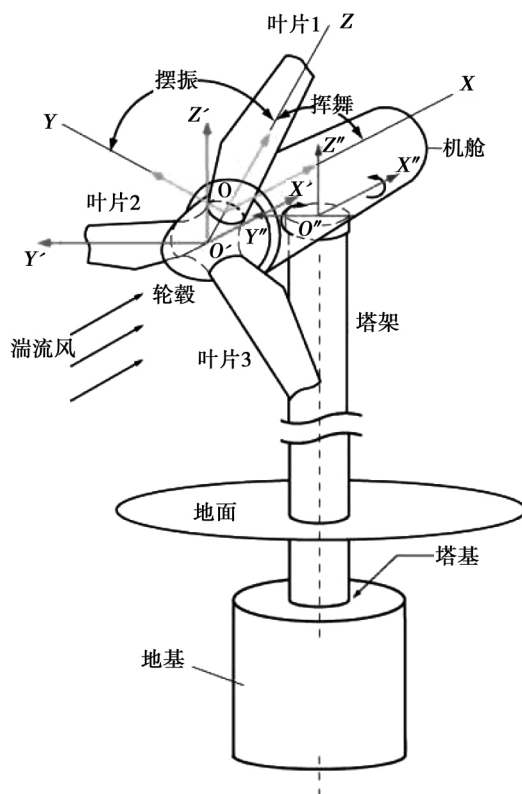


图 2 风力机坐标系

Fig. 2 Coordinates of the wind turbine model

风场模型与风载荷直接相关,风场模型选择的准确性刻画风力机运行的真实环境。为真实模拟风力机在高速及风速突变作用下柔性部件振动特性响应,本文选用由 NWTCC 建立的 NWTCCUP 风谱模

型,该模型由实测 40 Hz 时间序列数据构成的湍流模型速度谱。

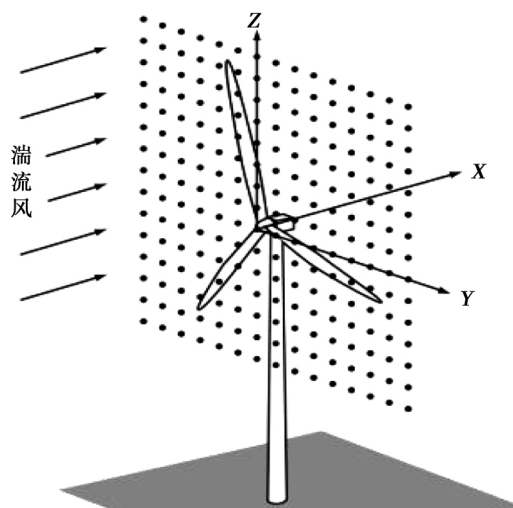


图 3 风场计算域示意图

Fig. 3 Simulation domain of wind field

相干结构是具有真实时空特征的 Kelvin - Helmholtz 不稳定流数值模拟结果,首先将其分割成具有无量纲速度信息的固定的无量纲尺寸片段,然后在空间和时间维度进行缩放,以确定其对绝对风速的影响大小。通过在普通湍流风上加入相干结构以增强风速湍动能,以此描述高风突变和高湍流度。相干结构的强弱可通过相干湍动能来描述:

$$CTKE = \frac{1}{2} \sqrt{(u'w')^2 + (u'v')^2 + (v'w')^2} \quad (12)$$

式中: u' — X 方向的风速波动值, m/s; v' — Y 方向的风速波动值, m/s; w' — Z 方向的风速波动值, m/s。

以轮毂中心为参考点,分别以轮毂高度处额定风速 12 m/s 和切出风速 24 m/s 为参考风速,对选择的 NWTcup 风谱模型进行傅里叶逆变换并考虑空间相干关系得到空间各个节点风速,以此建立 2 种基础湍流风,并分别在 150 ~ 450 s 之间在 2 种基础湍流风中添加相干结构建立更强的湍流风,共 4 种风况: 额定风速无相干、额定风速有相干、切出风速无相干和切出风速有相干结构。同时应注意,本文风谱选择 NWTcup 风谱,湍流度为 KHTST(克赫波),湍流度大小随时域平均风速大小变动,本文建立额定风速、切出风速的 2 种基础湍流风,额定风速时,根据 IEC 标准,湍流度为 0.2,切出风速时,根

据 IEC 标准,湍流度为 0.18。

图 4 为切出风况下,加入相干结构前后风速的比较。由图 4 可知,加入相干结构后空间风速分布出现了 2 个明显的涡,风速大小差异更大,且平均风速增大,说明添加相干结构的有效性。

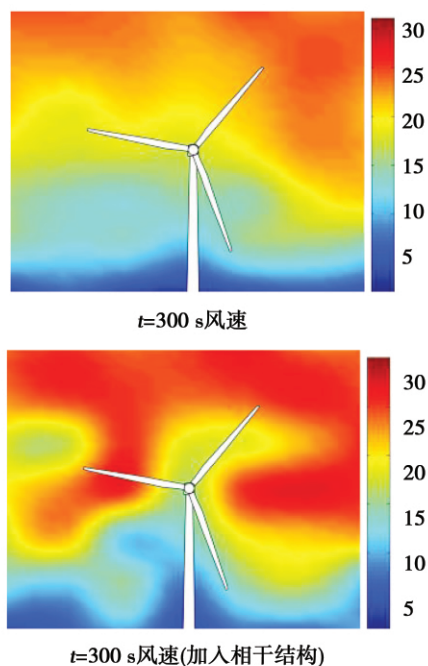


图 4 加入相干结构前后速度对比

Fig. 4 Wind speed comparison with and without adding coherent structure

添加相干结构前后,在轮毂点风速在 3 个方向分量大小及其对比情况如图 5 所示,相干湍动能的变化对比情况如图 6 所示。

由图 5 可知,添加相干结构的 150 ~ 450 s 内,额定风况、极限风况在 3 个方向的风速分量 u 、 v 和 w 均出现了剧烈的波动,尤其是 v 和 w ,风速波动的增大不仅仅引起风速绝对大小的增加,更加剧风速方向的变化。

由图 6 可知,相干结构的添加使得相干湍动能增加翻倍。

5 结果与分析

5.1 计算结果可靠性验证

分别设置风速为 3、7、12、18、21 和 25 m/s 的全

域稳态风,模拟时间为 600 s,对应功率随风速变化如图 7 所示。

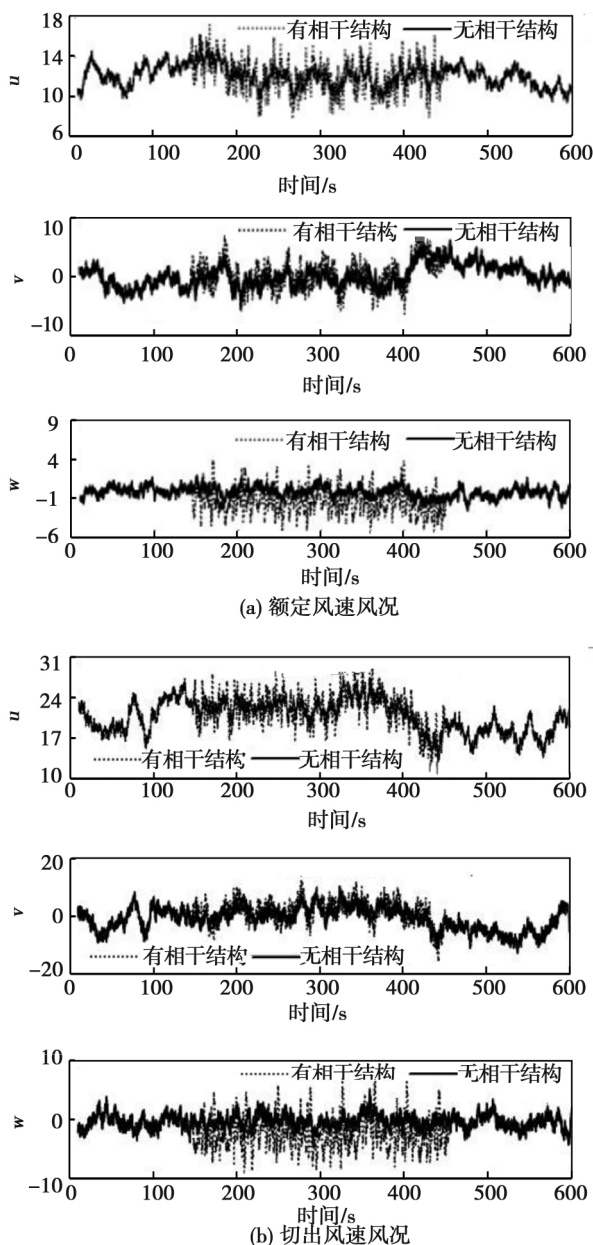


图 5 轮毂高度处风速时域分布

Fig. 5 wind velocities at hub

由图 7 可知,未达到额定风速(12 m/s)之前,风速增加,功率逐渐增大,同时,在 7 m/s 附近,出现较大功率波动;超过额定风速之后,由于风力机采用变速变桨控制策略,功率趋于稳定,且保持在额定功率附近。此与风力机实际运行时情况较为接近,计算结果表明求解方法和模型能够较好的反映风力机的真实运行情况,较大程度验证计算结果之可靠性。

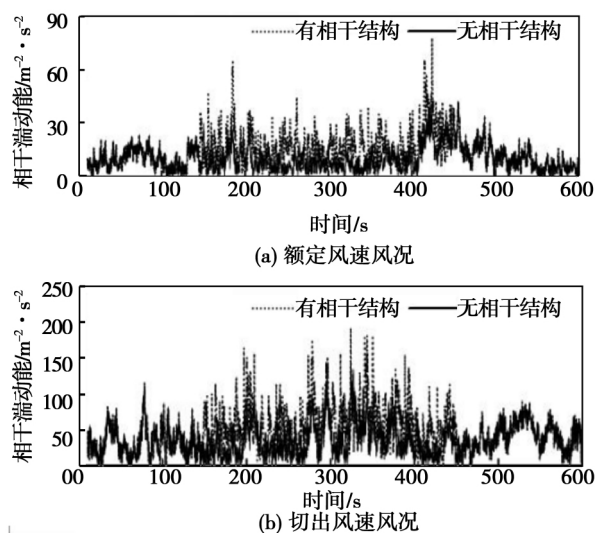


图 6 轮毂点湍动能变化曲线

Fig. 6 TKE variations at hub point

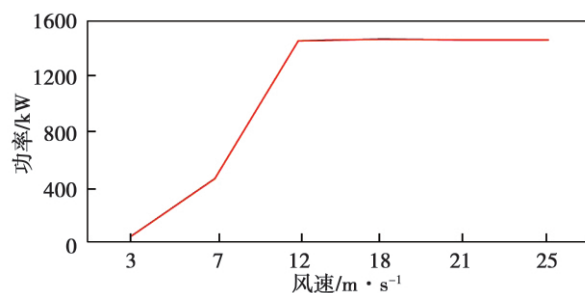


图 7 功率

Fig. 7 Rotor power

5.2 额定风速下叶尖位移响应

图 8 为风力机在额定工况作用下叶尖位移随时间的变化,在叶片坐标系中, X 方向为纵向, Y 方向为横向;叶片在 XOZ 平面内的运动为挥舞;在 YOZ 平面内的运动为摆振。

由图 8 可知,额定工况下,未添加相干结构时,叶尖挥舞波动范围为 0.56 ~ 2.4 m,叶尖摆振波动范围为 -0.56 ~ -0.01 m;添加相干结构后,叶尖挥舞波动范围为 0.3 ~ 2.45 m,叶尖摆振波动范围为 -0.6 ~ 0.02 m;

相干结构作用下,风力机叶尖位移在 150 ~ 450 s 出现更大程度的波动,即出现大变形时间缩短。由此可见,在参考风速为额定风速时,叶尖位移主要在挥舞方向。

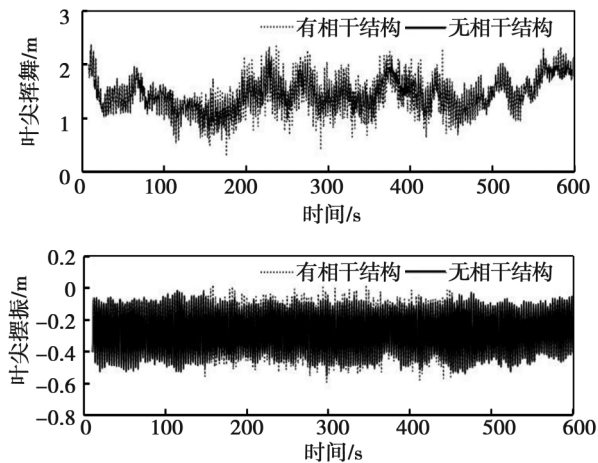


图 8 额定风速下叶尖位移

Fig. 8 Deflection of the Blade - tip in rated wind speed

无论是否添加相干结构,叶尖挥舞均满足该风力机最小叶片净空设计小于 3.3 m 的要求^[23],进一步说明计算结果准确可信。

5.3 切出风速下柔性部件结构动力学响应

图 9 为风力机切出风速风况下叶尖位移时历曲线。

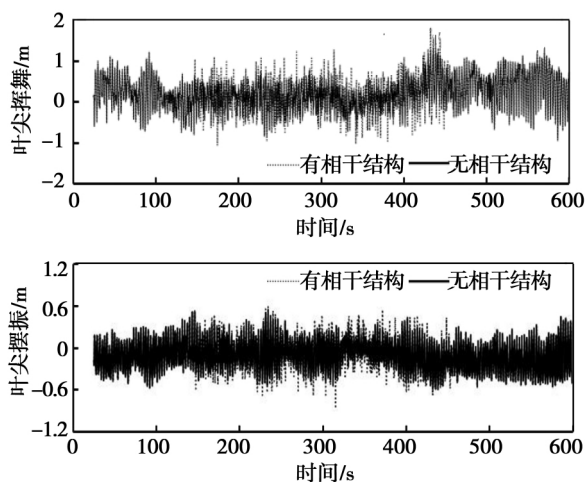


图 9 切出风速下叶尖位移

Fig. 9 Deflection of the Blade - tip in cut-out wind speed

由图 9 可知,未添加相干结构时,叶尖挥舞波动范围 $-0.91 \sim 1.42$ m,叶尖摆振波动范围 $-0.64 \sim 0.51$ m;添加相干结构之后,叶尖挥舞波动范围

$-1.03 \sim 1.81$ m,叶尖摆振波动在 $-0.80 \sim 0.61$ m;波动幅度分别为未添加相干结构时的 1.21 倍和 1.27 倍。叶尖位移同时体现为挥舞和摆振,但挥舞方向略大于摆振方向。与额定风况叶尖位移对比可知,切出风速附近,叶尖挥舞变小,叶尖摆振增大,这主要是因为超出额定风速时,风力机采取变桨控制策略,风轮推力减小。

图 10 为切出风速风况下叶根载荷时历曲线及有无相干结构对比。

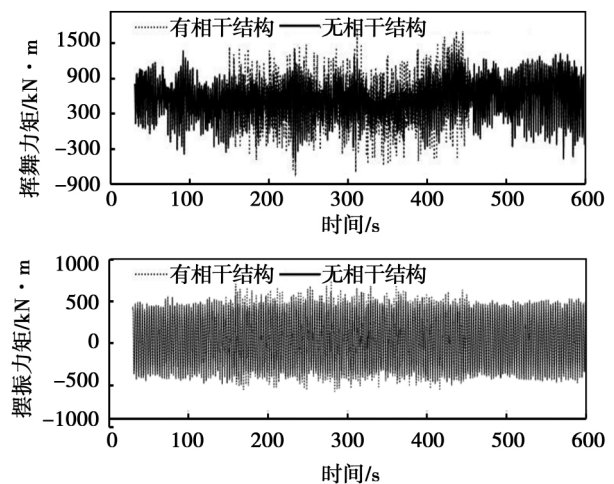


图 10 叶根载荷

Fig. 10 Loads of the Blade - root

由图 10 可知,无论是否添加相干结构,风力机叶根处承受巨大的载荷;未添加相干结构时,挥舞力矩波动幅度为 $-512.3 \sim 1240.6$ kN·m,摆振力矩波动幅度为 $-511.6 \sim 554.8$ kN·m;添加相干结构之后,挥舞力矩波动幅度 $-627.0 \sim 1410.8$ kN·m,摆振力矩波动幅度为 $-596.2 \sim 741.3$ kN·m;波动范围分别为未添加相干结构时的 1.25 和 1.16 倍。在添加相干结构的 150 ~ 450 s 内,叶根载荷发生了更大的突变,这主要是由于风速的突变造成。

图 11 为风力机在切出风速风况下叶尖振动加速度时历曲线及有、无相干结构作用的对比情况。

由图 11 可知,未添加相干结构时,叶尖挥舞振动加速度波动幅度为 $-8.81 \sim 28.63$ m/s²,摆振加速度波动幅度为 $-8.8 \sim 8.9$ m/s²;添加相干结构之后,挥舞振动加速度波动幅度为 $-97.31 \sim 92.72$ m/s²,摆振振动加速度波动幅度为 $-18.91 \sim 22.82$ m/s²;

叶尖挥舞振动加速度波动幅度为未添加相干结构的 5 倍,叶尖摆振振动加速度波动幅度约为未添加相干结构的 2 倍。叶尖振动加速度挥舞和摆振方向均较大,但挥舞方向要大于摆振方向,挥舞方向叶片所受气动载荷(风轮轴向推力)较大,挥舞方向更容易发生形变及运动。

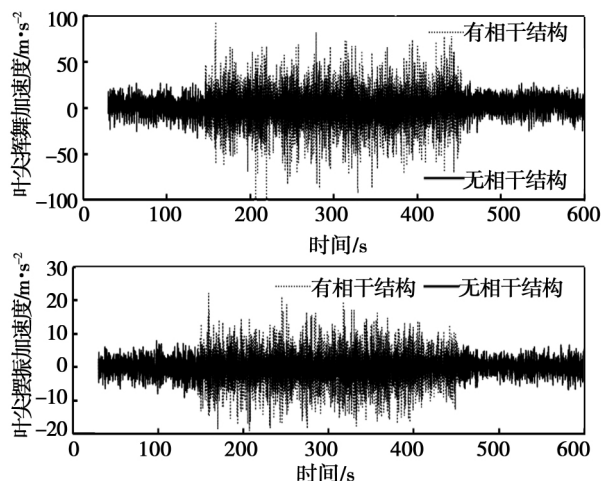


图 11 叶尖振动加速度

Fig. 11 Vibration acceleration of the Blade - tip

图 12 为风力机在切出风速工况下塔尖振动加速度时历曲线及有、无相干结构作用的对比情况。

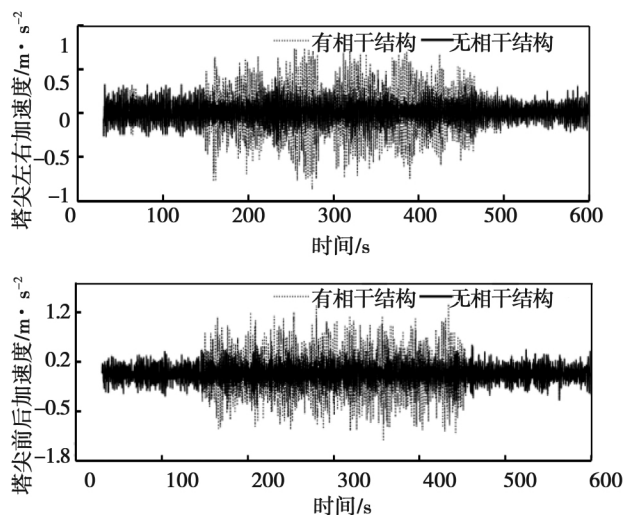


图 12 塔尖振动加速度

Fig. 12 Vibration acceleration of the Tower - tip

由图 12 可知,添加相干结构的 150 ~ 450 s 内,塔尖振动加速度波动速度和幅度剧烈增加。切出风

速附近,未添加相干结构时,塔尖左右振动加速度波动幅度为 $-0.40 \sim 0.41 \text{ m/s}^2$,前后方向振动加速度波动幅度为 $-0.61 \sim 0.92 \text{ m/s}^2$,添加相干结构之后,塔尖左右振动加速度波动幅度为 $-0.9 \sim 0.7 \text{ m/s}^2$,前后方向振动加速度波动幅度为 $-1.4 \sim 1.4 \text{ m/s}^2$,波动幅度均约为未添加相干结构时的 2 倍左右。

6 结 论

以 NREL1.5 MW 近海桩柱式风力机为样机,通过相干结构的添加,基于额定风速、切出风速 2 种基础湍流风,建立更高强湍流风共计 4 种风况,通过相干结构的添加描述大风突变和高湍流效应,模拟风力机结构动力学响应,分析风力机柔性部件即叶片和塔架的位移和振动特性,结论如下:

(1) 相干结构的添加可导致更大的风速突变、更强的湍流度效应,使风具有更高的湍动能,通过相干结构的添加可模拟强风工况;

(2) 额定风速 12 m/s 附近,叶尖位移主要体现为挥舞,切出风速 24 m/s 附近,叶尖位移同时体现为挥舞和摆振,但挥舞大于摆振;挥舞方向叶根力矩大于摆振方向叶根力矩;大风突变、高湍流度加剧了叶根处疲劳载荷;

(3) 切出风速附近,挥舞方向叶根力矩大于摆振方向叶根力矩;大风突变加剧了叶根处疲劳载荷;

(4) 相干结构的添加使得叶片和塔架的振动较之无相干结构工况下有了成倍的增加,叶尖和塔尖振动加速度增大幅度远大于叶根载荷和叶尖位移增大幅度。颤振是结构由于气动力、弹性力和惯性力的耦合作用而产生的自激振动,叶尖、塔尖振动的加剧可以诱发颤振,严重时会导致叶片和塔架的损毁,因此,风力机设计时应不仅仅考虑最大风速,更应该考虑风突变效应。

参考文献:

- [1] 周文平,唐胜利,吕红. 风剪切和动态来流对水平轴风力机尾迹和气动性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 32(014): 122 - 127.
ZHOU Wen-ping, TANG Sheng-li, LU Hong. Effect of transient wind shear and dynamic inflow on the wake structure and performance of horizontal axis wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 32(014): 122 - 127.

- [2] 李本立, 宋宪耕, 贺德馨 等. 风力机结构动力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
LI Ben-li, SONG Xian-geng, HE De-xin, et al. Wind turbine structure dynamics [M]. Beijing: Beihang University Press, 1999.
- [3] HABALI S M, SALCH I A. Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades [J]. Renewable Energy, 1995, 6(2): 161–169.
- [4] FUGLSANG P, BAK C. Development of the Risø-B1 wind turbine airfoils [J]. Wind Energy, 2004(7): 145–162.
- [5] GANERIWALA S N, YANG J, RICHARDON M. Using modal analysis for detecting cracks in wind turbine blades [J]. Sound and Vibration, 2011, 45(5): 10–13.
- [6] Kusnick J F. Vertical axis wind turbine operational modal analysis in sheared wind flow [M]. New York: Springer, 2012.
- [7] Takeshi Ishihara, Van Phuc Pham, Fujino Yozo, et al. A field test and full dynamic simulation on a tall regulated wind turbine // The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI) [C]. Korea: Seoul, 2005: 599–612.
- [8] 金鑫, 何玉林, 刘桦. 基于 Pitt-peters 理论的风力发电机振动分析 [J]. 工程力学, 2008, 25(7): 28–33.
JIN Xin, He Yu-lin, LIU Hua. Vibration analysis of wind turbine based on pitt-peters theory [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 28–33.
- [9] 许移庆, 冀东. 风力发电机组塔架仿真和分析 [J]. 能源研究与信息, 2006, 7(2): 4–5.
XU Yi-qing, JI Dong. Simulation and analysis of tower design for the wind turbine generator system [J]. Energy Research and Information, 2006, 7(2): 4–5.
- [10] 汤炜梁, 袁奇, 韩中合. 风力机塔筒抗台风设计 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 422–427.
TANG Wei-liang, YUAN Qi, HAN Zhong-he. Withstanding typhoon design of wind turbine tower [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(4): 422–427.
- [11] CHOU Jui-sheng, TU Wan-ting. Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1): 295–313.
- [12] 章子华, 刘国华, 王振宇 等. 抗台风的索塔型风机可行性研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(增刊 II): 179–185.
ZHANG Zi-hua, LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, et al. Feasibility study of anti-strong-wind cable-tower structure [J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2009, 39(z II): 179–185.
- [13] 于午铭. 台风“杜鹃”的危害与思考 // 中国科协 2004 年学术年会电力分会暨中国电机工程学会 2004 年学术年会 [C]. 海南: 2004: 886–890.
YU Wu-ming. Think and harm of typhoon “DuJuan” // HaiNan: China association for science and technology academic annual meeting 2004 power at the venue and the Chinese institute of electrical engineering academic conference in 2004 [C]. Hainan: 2004: 886–890.
- [14] 陈严, 张锦源, 王楠 等. 风力机风场模型的研究及紊流风场的 MATLAB 数值模拟 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 955–960.
CHEN Yan, ZHANG Jin-yuan, WANG Nan, et al. Wind turbine wind field models study and numerical simulation of turbulence wind field with MATLAB [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(9): 961–965.
- [15] 岳一松, 蔡旭. 风场与风力机模拟系统的设计与实现 [J]. 电机与控制应用, 2008, 35(4): 17–21.
YUE Yi-song, CAI Xu. Design and actualization of wind farm and wind turbine imitation system [J]. Electric Machines & Control Application, 2008, 35(4): 17–21.
- [16] 陈晓明. 风场与风力机尾流模型研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
CHEN Xiao-ming. The model research of wind and wind turbine wake [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.
- [17] Bossanyi E. Short-term stochastic wind prediction and possible control applications // Greece: Proceedings of the Delphi workshop on wind energy applications [C]. USA: Pacific Northwest Labs, 1985: 66–79.
- [18] Kariniotakis G, Nogaret E, Stavrakakis G. Advanced short-term forecasting of wind power production // Irish: Irish Wind Energy Association [C]. Irish: Dublin Castle, 1997: 751–754.
- [19] Nielsen T H M, Madsen H, Tofting J. Experiences with statistical methods for wind power prediction // France: European Wind Energy Conference [C]. France: Nice, 1999: 1066–1069.
- [20] MOHANDAS M A, HALAWANI T O, REHMAN S, et al. Support vector machines for wind speed prediction [J]. Renewable Energy, 2004, 29(6): 939–947.
- [21] DAMOUSIS I G, ALEXIADIS M C, THEOCHARIS J B, et al. A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2004, 19(2): 352–361.
- [22] BILGILI M, SAHIN B, YASAR A. Application of artificial neural networks for the wind speed prediction of target station using reference stations data [J]. Renewable Energy, 2007, 32(14): 2350–2360.
- [23] SMITH K. WindPACT Turbine design scaling studies-technical area 2: turbine rotor and blade logistics [R]. NREL/SR-500-29439, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2001.

(单丽华 编辑)

kJ/mol. When the conversion rate is 0.6 ,The activation energy would be as lowest as 68.93 kJ/mol. Within the range of 280 ~360 °C reaction ,the activation energy of pharmacy sludge pyrolysis reaction is 85.67 KJ/mol ,with the most probable mechanism function of $[-\ln(1-\alpha)]^3$. In 640 ~700 °C reaction range ,the activation energy of pharmacy sludge is 150.42 KJ/mol ,and the most probable mechanism function is $(1-\alpha^{-1})-1$. **Key words:** pharmacy sludge ,thermogravimetric analysis ,activation energy ,most probable mechanism function

高风速及风突变对风力机柔性部件振动特性研究 = **Vibration Characteristics of Flexible Components of Wind Turbine due to High Speed Wind and Wind Gust** [刊 ,汉] DING Qin-wei ,LI Chun (School of Energy and Power Engineering ,University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) , HAO Wen-xing ,YE Zhou (Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering , Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(10) . -96 ~103

Wind turbine suffers from complex environmental conditions and wind is the most important and direct factor that can affect the aerodynamic and structural characteristics. Abrupt wind speed change can lead to higher aerodynamic loads. In order to analyze the vibration characteristic of structure dynamics of wind turbine operating on a strong turbulent wind ,simulation was carried out based on NREL(National Renewable Energy Laboratory) 1.5 MW land-based wind turbine model. The structural dynamic model of wind turbine is flexible with the assumed mode discrimination that is established based on Kane method. Then this numerical model combines the wind field ,and aerodynamic model to form a dynamic model of an aero-elasticity coupling system ,in order to study the dynamic response of wind turbine blades and tower. The results show that adding coherent structure to turbulent flow results in higher wind speed change and stronger turbulent intensity compared to the basic turbulent wind. When the wind reaches ultimate speed ,wind rotors experience both in-plane and out-plane vibrations. With coherent structure added ,the vibration acceleration of rotors and tower increases several times. **Key words:** wind turbine ,coherent structure ,deflection ,vibration ,acceleration

基于支持向量机和 BP 神经网络的燃煤锅炉 NO_x 排放预测 = **Modeling of NO_x Emission from Coal Fired Boiler based on Intelligent Algorithm** [刊 ,汉] LI Peng-hui (Hua Dian Electric Power Research Institute ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310030) ,LIU Ran ,YU Ting-fang(Institute of thermal Energy and Power Engineering ,Nanchang University ,Nanchang ,China ,Post Code: 330031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(10) . -104 ~108

Based on the experimental data of the thermal state in the 500 MW ~600 MW load range of a coal fired boiler ,BP neural network and support vector machine regression were used to model the NO_x emission characteristics of a coal-fired power station. To address the problems of BP neural network ,the momentum method was adopted ,but for the prediction model of SVM ,the kernel function and the corresponding parameters c and g were selected through optimization. The average relative errors of the simulation results of the two models were 2.75% and 1.37% ,re-