

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.01.022

## 考虑平稳风修正和塔架干扰的风力机叶片 3-D 风场模拟

柯世堂 曹九发 王 琰 王同光

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室,南京,210016)

**摘要:**为准确模拟风力机纵向、横向和垂直向的 3-D 随机风场,以南京航空航天大学自主研发的 NH1500 风力机为例,首先采用考虑沿高度变化的指数模型、塔影效应影响的潜流模型和上游风机尾流影响的涡流粘度模型对平稳风进行修正。然后基于空间变化的改进 Von Karman 风谱模型,结合谐波叠加法模拟风力机的来流脉动风速时程,再利用改进的叶素-动量理论获得考虑叶片旋转效应和塔架-叶片相干效应的风力机纵向、横向和垂直向 3-D 随机风场。该方法充分考虑风力机风场模拟的外界干扰因素和自身特性,提高了风力机系统风场模拟的准确度。算例分析表明,本文方法可以准确地模拟给定风环境的风力机系统 3-D 风场。

**关键词:**风力机;3-D 风场模拟;平稳风修正;塔架干扰;改进的叶素-动量理论

**中图分类号:**TK83;TU279.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)01-0153-07

## Numerical Simulation of 3-D Wind Field for Wind Turbine Considering Tower Interaction and Modification of Steady Wind

*Ke Shitang, Cao Jiufa, Wang Long, Wang Tongguang*

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In order to accurately simulate 3-D wind field of wind turbines, taking the NH1500 wind turbine researched by Nanjing University of Aeronautics and Astronautics as an example, the exponential model for changing height, the undercurrent model for tower shadow effect and the eddy viscosity model for wake effect from upstream wind turbine are used to modify the steady wind. Then based on the modified Von Karman wind speed spectrum model, the incoming wind speed time history is simulated by the harmony superposition method. Finally the 3-D wind field considering the rotational effect and blade-tower interaction effect is obtained with the modified blade element momentum theory. The external interference factors and itself characteristics are fully considered to improve the accuracy of wind field simulation. The results show that the proposed algorithm is of high accuracy, which can be used to simulate 3-D wind field of wind turbines under given wind condition.

**Key words:** wind turbine; 3-D wind field simulation; modification of steady wind; tower interaction; modified blade element-momentum theory

水平轴风力机系统主要由高耸的塔架和轻柔叶片组成,属于典型的风敏感结构<sup>[1-2]</sup>。随着发电功率的增大,叶片旋翼直径和塔架高度已达到百米量级,以满足其捕捉风能的需求,但同时也会增大

**基金项目:**国家重点基础研究计划(“九七三”计划)(2014CB046200)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目;南京航空航天大学科研基金(XCA12003)资助项目。

**收稿日期:**2013-08-22;**修订日期:**2013-11-14

**通信作者:**柯世堂,男,博士,副教授,E-mail:keshitang@163.com。

叶片遭受到的随机风载,使得风力机系统结构更容易发生抖振疲劳破坏。因此,准确的风场模拟是风力机系统风振动力分析的关键基础。

针对风力机随机风场的模拟方法研究,文献[3]采用傅里叶变换方法,考虑了风剪切和塔影效应,模拟了风力机叶片纵向风场模型;文献[4]采用时间序列自回归模型分析了风力机上典型观测点的纵向随机风速,并给出了风速谱的拟合计算公式;文献[5]采用自回归滑动平均模型和谐波合成法建立了风力机随机风场的模型,对比了两种方法的精度和稳定性,得出谐波合成法略好于自回归滑动平均模型的结论;文献[6]从物理机制原理出发给出了风力机叶片考虑旋转效应的风谱模型,并和实测风谱进行对比验证;文献[7]采用谐波合成法对海上风力机叶片和塔架的纵向脉动风速时程进行模型,并考虑了叶片和塔架的相干性。采用传统分析方法进行风力机随机风场模拟时存在两个主要问题:(1)和普通高耸建筑不同的是,风力机系统主要由叶片和塔架两部分组成,其中叶片的风场模拟需要考虑其自身转动引起的旋转效应以及塔架与叶片的相干效应;(2)由于单个风力机总会处在另一上风向运行风机的尾流中,因此叶片的平稳风模拟需要考虑塔架存在引起的塔影效应,和上游风力机的尾流影响。

本文基于三维风场的改进 Von Karman 风谱模型,采用谐波叠加法模拟风力机的来流风速,考虑风力机系统的风剪切、塔影效应和上游尾流影响对平稳风进行修正,再基于改进的叶素-动量理论得到考虑叶片旋转效应和塔架-叶片相干性的风力机纵向、横向和垂直向 3-D 随机风场。算例分析和验证表明本文方法相比现有软件模拟有一定的改进,可以准确地模拟符合实际风力机自身特点的 3-D 风场。

## 1 风力机随机风场模拟方法

风力机风场可以分解为两部分:平稳风和湍流风。前者是宏观上的大气整体运动形成的,方向为水平纵向,数值与观测点高度相关;后者是局部的湍流运动,有纵向、横向和垂直向 3 个方向。对这两种速度分别计算叠加即可获得总风速,如图 1 所示。

### 1.1 稳态风的修正

风力机的平稳风速由于受到风切变、塔影效应

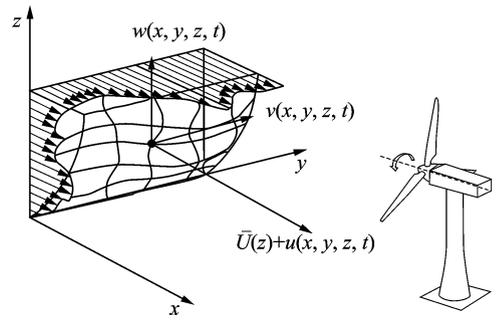


图 1 风力机风场模型坐标系示意图

Fig. 1 Wind field model coordinate system of wind turbine

和上游风机尾流的影响,风场模拟时必须要对平稳风模型进行修正<sup>[8]</sup>。其中风剪切主要采用指数模型,塔影效应主要采用适用于叶片在塔架上风向运行的潜流模型,上游尾流影响主要采用包含由于尾流引起的附加湍流的涡流粘度模型。

风剪切的影响是指平稳风速随着高度的变化。常用修正模型包括指数模型和对数模型<sup>[8]</sup>,本文选用前者,表达式如下

$$v(h) = v(h_0) \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: $v(h)$ 为高度  $h$  处的风速; $v(h_0)$ 为参考高度  $h_0$  处的风速;当不考虑风剪切的影响时,可以将  $\alpha$  的值设为 0,取值范围一般为 0.1~0.25。

塔影是由于风力机塔架的存在影响了风场平稳风速,其影响修正主要有 3 种模型<sup>[8]</sup>:叶片在塔架上风向运行的潜流模型、叶片在塔架下风向运行的经验模型和组合模型。现有风力机基本都是上风向风机设计,用以避免叶片周期地通过塔架尾迹产生的附加噪声和激振力,因此本文采用潜流模型修正

$$v(x, z) = Av_0 \quad (2)$$

$$A = 1 + \left( \frac{D}{2} \right)^2 \frac{(x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2}, D = F \cdot D_T \quad (3)$$

式中: $D_T$ 为开始考虑塔影影响的高度处的塔架直径; $F$ 为塔架直径修正因子; $z$ 为计算点到塔架中心的纵向距离; $x$ 为风矢量经过时距离塔架中心横向距离。

由于风力机很少会存在单个运营状态,都是以群体形式建立。因此在模拟风力机模型的风场时,由于单个风力机系统转子部分或者全部处于上游风力机的尾流中时,必须考虑上游风力机尾流对风场的影响,本文采用涡流粘度模型来考虑尾流引起的附加湍流影响<sup>[8]</sup>,修正公式如下

$$v = v_0(1 - \Delta e^{-\frac{r}{2w}}) \quad (4)$$

式中:  $r$  为局部速度到尾流中心的距离;  $w$  为尾流宽度;  $v_0$  为未受扰动平均风速;  $\Delta$  为速度逆差。

## 1.2 考虑塔架相干性的远处来流模拟

采用谐波叠加法模拟风力机远方来流风速, 该方法是由 Shinozuka 提出的对平稳随机过程进行离散化数值模拟的一种研究方法<sup>[9]</sup>。由于叶片和塔架在 3 个方向上存在相干性, 采用 Davenport 相关系数来考虑叶片和塔架之间相关性

$$C_{ij} = \exp \left[ -\frac{\omega \sqrt{C_x(x_i - x_j)^2 + C_y(y_i - y_j)^2 + C_z(z_i - z_j)^2}}{2\pi v(H)} \right] \quad (5)$$

式中:  $C_x, C_y, C_z$  分别为叶片和塔架上任意 2 点横向、顺风向和垂直向的衰减系数;  $\omega$  为脉动风频率;  $v(H)$  为  $H$  处平均风速。在固定的脉动风频率下各点的相关性随着距离的增大逐渐变小。

来流风谱采用改进的 Von Karman 模型<sup>[8]</sup>, 相比 Davenport 模型和 Kaimal 模型, 改进的 Von Karman 风谱模型能够产生随机风的纵向、横向和垂直向三维分量, 修正了基本模型在高度 150 m 以下的缺陷, 使其更加符合风力机自身风场特性。图 2 给出了 3 种风谱模型曲线, 对比发现在低频区, 3 种风频谱差异较大, 在峰值附近区域, Kaimal 和 Von Karman 频谱分别要低于和高于改进 Von Karman 频谱; 而在高频区域, Kaimal 和 Von Karman 频谱几乎重合, 但是改进 Von Karman 频谱会略高于另外两个频谱幅值, 因此风谱函数的选用直接影响风力机风场模拟的精度。

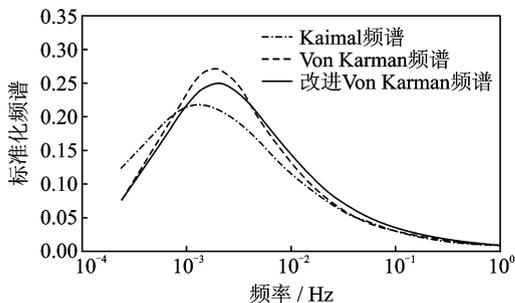


图 2 不同纵向标准化频谱

Fig. 2 Different longitudinal normal power spectrum

根据风力机风场的自身特性, 本文采用改进的 Von Karman 风谱模型

$$\frac{f S_{uu}(f)}{\sigma_u^2} = \beta_1 \frac{2.987 \tilde{n}_u / a}{(1 + (2\pi \tilde{n}_u / a)^2)^{5/6}} +$$

$$\beta_2 \frac{1.294 \tilde{n}_u / a}{(1 + (\pi \tilde{n}_u / a)^2)^{5/6}} F_1 \quad (6)$$

式中:  $S_{uu}$  为随机风速变化自频谱;  $f$  为频率;  $\sigma_u$  为随机风的标准差;  $\tilde{n}_u$  为量纲一频率参数;  $\tilde{n}_u = f L_{ux} / U_{10}$ , 其中,  $U_{10}$  为 10 m 高基本风速,  $L_{ux}$  为随机风纵向分量长度尺度。

定义风机上  $n$  个风速模拟节点, 假定均为零均值的平稳高斯过程, 其风谱密度函数矩阵为

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} s_{11}(\omega) & s_{12}(\omega) & \cdots & s_{1n}(\omega) \\ s_{21}(\omega) & s_{22}(\omega) & \cdots & s_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1}(\omega) & s_{n2}(\omega) & \cdots & s_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $s_{ii}(\omega)$  为节点脉动风自功率谱, 采用式(2)中的风谱模型计算;  $s_{ij}(\omega)$  为互功率谱, 其表达式需要用到塔架和叶片、以及塔架上任意两点之间的相干性, 计算公式为

$$s_{ij}(\omega) = \sqrt{s_{ii}(\omega) s_{jj}(\omega)} C_{ij} \quad (8)$$

其中叶片需考虑旋转平面内的各点间的相干性, 以及叶片和塔架之间的相干性影响。再将  $S(\omega)$  进行 Cholesky 分解, 此时风力发电塔架上的任何一个节点脉动风速时程可以由其功率谱决定, 根据 Shinozuka 理论, 模拟的风速时程可以表达为

$$v_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_l)| \cdot \sqrt{2\Delta\omega} \cdot \cos[\omega_l t + \psi_{jm}(\omega_l) + \theta_{ml}] \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

式中:  $N$  为风谱在频率范围内划分成相同部分的个数;  $\Delta\omega = \omega/N$  为频率增量;  $|H_{jm}(\omega_l)|$  为基于 Davenport 来流风谱矩阵进行 Cholesky 分解获得的下三角矩阵的模;  $\theta_{ml}$  为介于 0 和  $2\pi$  之间均匀分布的随机数, 可采用 Matlab 的随机数生成函数, 每次生成随机数后应恢复初始状态;  $\omega_l = l \cdot \Delta\omega$  为频域的递增变量;  $\psi_{jm}(\omega_l)$  为两个不同作用点之间的相位角, 由  $H_{jm}(\omega_l)$  的虚部和实部的比值确定。

## 1.3 风力机叶片风场模拟

解决风力机气动性能有 3 种方法<sup>[10]</sup>: 叶素-动量理论、涡尾迹方法、计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法。其中涡尾迹方法适合模拟风力机复杂风场, 能准确地计算出叶片风荷载的详细分布, 虽然计算量比 CFD 小很多, 但不能满足风力机日常快速计算的要求; CFD 方法是最能精确计算叶片气动特性的方法, 但是计算量太大、耗时太长。因此本文采用叶素-动量理论进行模拟, 实现气动和叶片结构的双向耦合。

叶素动量理论 (Blade element momentum, BEM) 是进行风力机气动载荷计算最为经典的方法。不仅由于其简便快捷, 而且在具备准确叶片数据的条件下能够提供满意的计算结果。本文采用修正的 BEM 理论<sup>[11-12]</sup>, 引入叶根损失和叶尖损失, 在轴向诱导因子较大时使用  $C_t$  的经验模型, 并加入动态入流和动态失速模型。使用该方法, 可以计算风力机在不同风速、转速、桨距角及偏航角情况下的动态载荷。进而获取作用在叶片上的脉动风速时程。具体的方法如下:

(1) 根据 BEM 理论, 叶片上的相对风  $\mathbf{v}_{rel}$  为

$$\begin{pmatrix} v_{rel,x} \\ v_{rel,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ax} \\ v_{oy} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ v_{rot} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} v_{bx} \\ v_{by} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中:  $v_{ax}, v_{oy}$  为沿顺风向和横风向的来流脉动风速, 采用式(9)谐波叠加法计算;  $v_{rot}$  为叶片旋转导致的线速度;  $\mathbf{W}$  为诱导速度;  $v_{bx}, v_{by}$  为叶片振动速度。各个速度的关系见图3。

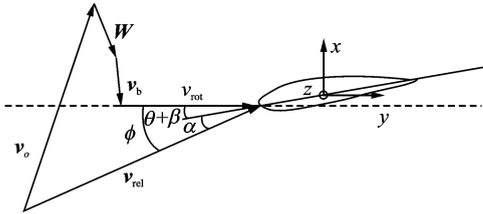


图3 流经某一叶片的局部速度三角形

Fig. 3 Local velocity triangle through a wind wheel

(2) 诱导速度  $\mathbf{W}$  表示为

$$\begin{cases} W_x = \frac{-BL \cos \varphi}{4\rho\pi r F |v_0 + f_g \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{W})|} \\ W_y = \frac{-BL \sin \varphi}{4\rho\pi r F |v_0 + f_g \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{W})|} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $B$  为叶片数;  $L$  为指升力;  $\varphi$  为入流角;  $\rho$  为空气密度;  $r$  为叶片截面的展向位置;  $\mathbf{n}$  为推力方向的单位向量;  $F$  为普朗特叶尖损失因子;  $f_g$  为 Glauert 修正。同时, 本文还采用了动态入流模型和动态失速模型, 修正叶片运转的非定常效应<sup>[13-14]</sup>。

(3) 叶片攻角  $\alpha$  为

$$\alpha = \varphi - (\beta + \theta_{twist}) \quad (12)$$

式中:  $\beta$  为桨距角;  $\theta_{twist}$  为叶片剖面几何扭角;  $\varphi$  的计算公式为

$$\tan \varphi = \frac{v_{rel,x}}{v_{rel,y}} \quad (13)$$

(4) 通过叶片翼型插值方法, 可以得到升力系数  $C_l$  和阻力系数  $C_d$ , 从而计算出升力  $L$  和阻力  $D$

$$\begin{cases} L = 0.5\rho |v_{rel}|^2 C_l c \\ D = 0.5\rho |v_{rel}|^2 C_d c \end{cases} \quad (14)$$

式中  $c$  为迎风面积。

(5) 得到叶片的法向载荷  $F_n$  和切向载荷  $F_t$

$$\begin{cases} F_n = L \cos \varphi + D \sin \varphi \\ F_t = L \sin \varphi - D \cos \varphi \end{cases} \quad (15)$$

综上所述, 先基于 1.2 节方法模拟考虑平稳风修正和塔架干扰的叶片的来流风速时程, 再基于 1.3 节方法计算每个风速时程样本对应的诱导速度, 如此循环计算最终获得叶片上的脉动风速时程。同时也可以计算得到叶片的升力系数和阻力系数, 以及受到的法向载荷和切向载荷数值。

## 2 算例分析

本文基于额定功率为 1.5 MW 的三桨叶大型风力机 NH1500 系统, 风轮直径为 83 m, 轮毂高度为 65 m, 参考风速为轮毂处风速即 20 m/s, 粗糙度为 0.01, 风剪切指数模型的系数 0.2, 风力机所处纬度为  $50^\circ$ , 考虑塔影效应对应的塔架直径为 3.5 m, 偏航角为  $0^\circ$ , 额定转速为 17 r/min。

基于上述的风场模拟方法, 编制相应的数值模拟程序。在计算过程中脉动风上限频率取为  $2\pi$ , 脉动风频率分割点数取为 2 048, 频率增量  $\Delta\omega = 0.003 07$  Hz。为验证本文方法计算风力机气动结果的正确性, 将计算得到的叶片功率系数与 GH Bladed 风力机专用软件的结果进行对比, 其中风环境参数设置相同, 结果如图 4 所示。对比结果显示本文方法的计算结果比 GH Bladed 软件的计算结果稍高, 在 12 m/s 风速对应的最大功率系数值误差约 5%, 基本上两者的结果吻合较好, 验证了本文方法模拟风场结果的正确性。

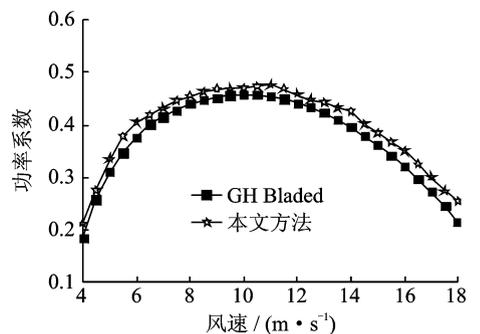


图4 风力机功率系数计算结果对比图

Fig. 4 Power coefficient contrast of wind turbine

限于篇幅, 图 5~7 分别给出 100 m, 65 m 和 30 m 3 个高度的纵向、横向和垂直向风速时程三维分布图。分析可得出如下结论:

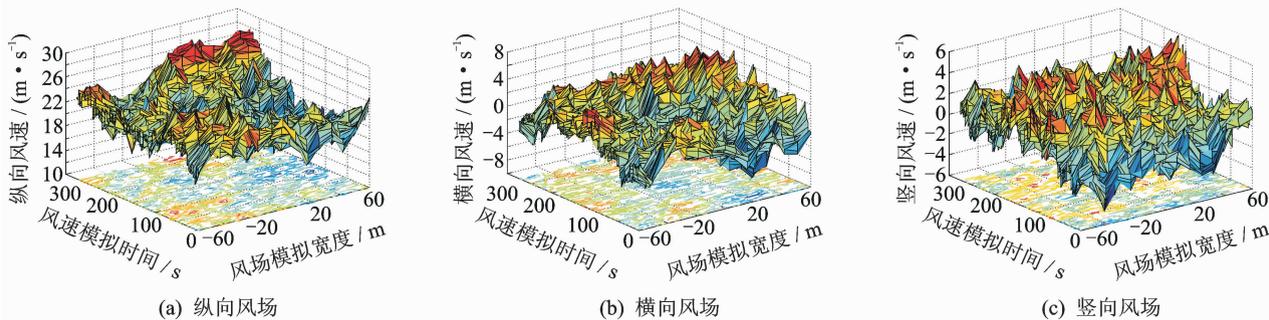


图 5 100 m 高度风力机 3-D 风场模拟结果

Fig. 5 Simulation results of 3-D wind field on 100 m height

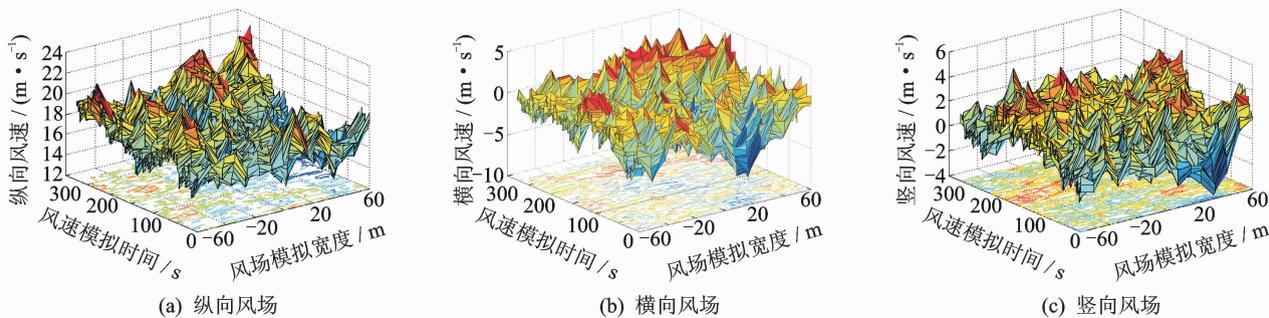


图 6 65 m 高度风力机 3-D 风场模拟结果

Fig. 6 Simulation results of 3-D wind field on 65 m height

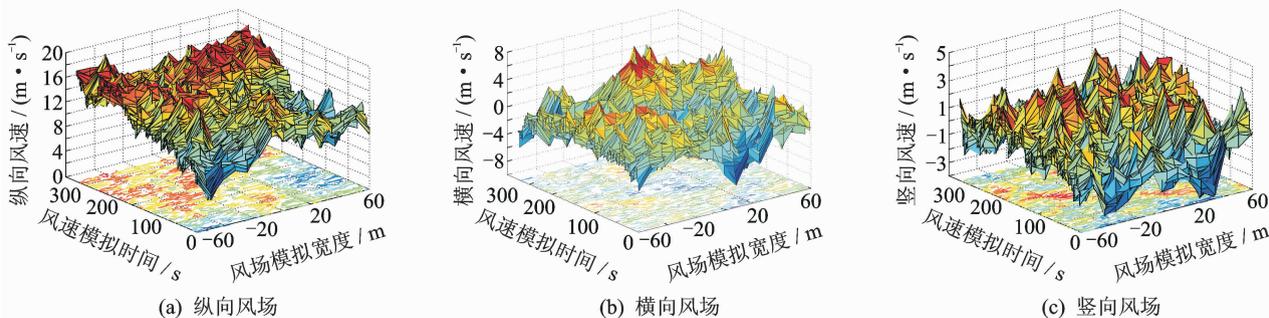


图 7 30 m 高度风力机 3-D 风场模拟结果

Fig. 7 Simulation results of 3-D wind field on 30 m height

(1)100 m 和 30 m 高度处于风力机叶片的叶尖旋转区域,其纵向和横向风场的湍流特性要明显大于中间区域,而对于竖向风场的湍流特性影响较小;

(2)对同一高度断面的风场模拟结果来说,纵向风场的脉动特性最大,其次是横向风场,最弱的是竖向风场。通常风力机系统结构的风振动力反应分析主要考虑纵向风作用,忽略横向和竖向风作用;

(3)风力机叶片的纵向风场能量主要集中在风

力机叶片的径向四周,越接近轮毂中心处的风场能量越弱,这也是由于叶片外围旋转捕捉的风能相对中心处更多,造成风场更明显的湍流特性。

基于风力机叶片的风场模拟结果,可以计算出叶片的气动载荷分布,图 8 给出了风力机叶片平面内和平面外气动载荷的分布曲线,图 9 分别给出了叶片升力、阻力和俯仰力矩系数轴向分布曲线。

从图中可以发现,叶片平面外气动载荷数值要远远大于平面内气动载荷,两者均沿着叶片轴向半径先增大再减小,并且平面外气动载荷的增幅更加

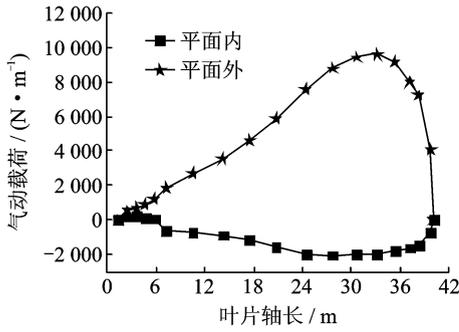


图8 叶片气动载荷分布曲线

Fig. 8 Aerodynamic loadings of wind turbine rotors

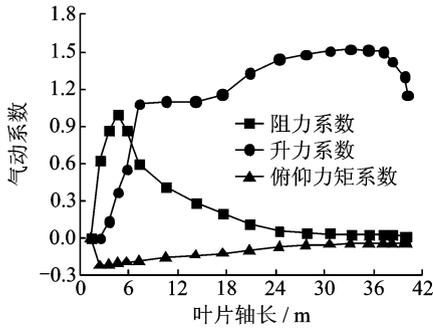


图9 叶片气动力系数分布曲线

Fig. 9 Aerodynamic loading coefficients of wind turbine rotors

明显。叶片的气动升力系数要大于阻力和俯仰力矩系数,3种气动力系数均是沿着叶片轴向半径迅速增大,然后在接近叶片中点附近数值逐渐趋于稳定。

### 3 结 论

本文提出的仿真算法相比商用软件在风谱选取和塔架-叶片相干性方面有一定改进,可以用于模拟风力机叶片的3-D随机风场。主要结论如下:

(1) 不同高度处于风力机叶片的叶尖旋转区域,其纵向和横向风场的湍流特性要明显大于中间区域,而对于竖向风场的湍流特性影响较小;

(2) 对同一高度断面的风场模拟结果来说,纵向风场的脉动特性最大,其次是横向风场,最弱的是竖向风场。说明风力机系统结构的风振分析应主要考虑纵向风作用,可忽略横向和竖向风作用;

(3) 风力机叶片的纵向风场能量主要集中在风力机叶片的径向四周,越接近轮毂中心处的风场能量越弱;

(4) 叶片平面外气动载荷数值要远远大于平面内气动载荷,两者均沿着叶片轴向半径先增大再

减小,并且平面外气动载荷的增幅更加明显。

### 参考文献:

- [1] Ke S T, Wang T G, Ge Y J, et al. Wind-induced responses and equivalent static wind loads of tower-blade coupled large wind turbine system[J]. Structural Engineering and Mechanics, An International Journal, 2014, 52(3): 485-505.
- [2] 金志昊,范宣华,苏先越,等. 风力机叶片顺风向风致振动研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 677-681.  
Jin Zhihao, Fan Xuanhua, Su Xianyue. Research on blade wind-induced vibration in wind direction[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(5): 677-681.
- [3] 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 Jinyuan, Wang Nan. Wind turbine wind field models study and numerical simulation of turbulence wind field with MATLAB[J]. ACTA Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(9):955-960.
- [4] Ewing B T. Time series analysis of wind velocity using VAR and the generalized impulse response technique[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(3):209-219.
- [5] Rossi R, Lazzari M, Vitaliani R. Wind field simulation for structural engineering purposes[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Int J Numer Meth Engng, 2004; 61:738-763.
- [6] 贺广零,李杰. 风力发电高塔系统风致随机动力响应分析[J]. 振动工程学报, 2011, 24(6): 696-703.  
He Guangling, Li Jie. Stochastic dynamic response of wind turbine systems under wind loads[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(6): 696-703.
- [7] 陈小波,陈建云. 海上风力发电塔脉动风速时程数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(32): 111-116.  
Chen Xiaobo, Chen Jianyun. Numerical simulation of fluctuating wind velocity time series of offshore wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(32): 111-116.
- [8] 廖明夫. 风力发电技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.  
Liao Mingfu. Wind turbine technologies[M]. Xi'an: The Northwest Industry University Press, 2008.
- [9] Kareem A. Numerical simulation of wind effects: A probabilistic perspective[J]. Journal of Wind Engi-

- neering and Industrial Aerodynamics, 2008 (96): 1472-1497.
- [10] Ronold K O, Larsen G C. Optimization of a design code for wind turbine rotor blades in fatigue [J]. Engineering Structure, 2001, 23: 993-1002.
- [11] 伍艳, 谢华, 王同光. 风力机叶片的非定常气动特性计算方法的改进[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 54-60.
- Wu Yan, Xie Hua, Wang Tongguang. Modification of calculating unsteady aerodynamic characteristics of wind turbine blades [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 54-60.
- [12] Wang T G, Coton F N. Prediction of the unsteady aerodynamic characteristics of horizontal-axis wind turbines including three-dimensional effects[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 2000, 214 (A5):385-400.
- [13] 许波峰, 王同光. 基于自由涡尾迹法和面元法全耦合风力机气动特性计算[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 592-597.
- Xu Bofeng, Wang Tongguang. Wind turbine aerodynamic performance prediction based on free-wake/panel model coupled method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43 (5):592-597.
- [14] 柯世堂, 王同光, 赵林, 等. 风力机风振背景、共振响应特性及耦合项分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(26): 101-108.
- Ke Shitang, Wang Tongguang, Zhao Lin, et al. Background, resonant components and coupled effect of wind-induced responses on wind turbine systems [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(26): 101-108.