

文章编号:1000-582X(2009)10-1126-06

风力机旋转叶片脉动风场建模与数值仿真

何玉林,刘桦,杜静

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:分析了风力机风场模型与普通建筑风场模型的相同点和不同点,指出叶片的转动将改变叶片上风速模拟点风速谱的能量分布,使相当部分的频率能量集中到风轮旋转频率及其倍频处。根据标准 von Karman 模型和旋转采样谱模型,推导并建立了风力机叶片的脉动风速谱功率矩阵,并在此基础上,采用谐波叠加法模拟了叶片脉动风速模拟点的风速时序数据。

关键词:风力发电机组;脉动风场模型;旋转采样谱;数值模拟

中图分类号:TK83;TM615

文献标志码:A

Simulation study of stochastic fluctuating wind field for wind turbine blades

HE Yu-lin, LIU Hua, DU Jing

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The differences of the wind field model between wind turbines and common architectures are investigated. It is indicated that substantial frequency contents are transferred to rotor rotation frequency and its harmonics due to the periodic motions of blade. According to standard von Karman power spectral density (PSD) model and rotationally sampled PSD model, the PSD matrix for turbulence on blades of wind turbine is setup. The longitudinal turbulence's time serials is simulated based on the superimposition of harmonic waves.

Key words: wind turbines; turbulence models; rotationally sampled PSD; numerical simulation

风能应用的日益广泛推动了风力发电机组设计和制造技术的快速发展。最近发展的风力发电机组大都采用变速恒频控制方式,且单机功率超过兆瓦级。更高的单机输出功率一方面带来的是规模化的经济性,另一方面带来的是更大部件的尺寸和整机成本的上升。为了克服这一矛盾,通常的方法是尽可能减轻部件的重量以控制成本,这意味着部件刚度减小,而使风力机系统变得更加柔性,使风力机运行时,通过风轮的风速产生的随机气动载荷对风力机动力学性能的影响也变得不容忽视,因此获得符合风力机运行环境的风场风速是进行风力机动力学分析的重要前期工作之一。

建立风力机风速风场模型与建筑物的风场模型具有共通之处,但也有自身特点,这是由风力机不同部件的运行方式造成的。风力机在运行过程中,不运动或运动很小的部件,如塔架、机舱等上的脉动风速模型与建筑物风场模型是一致的^[1-11],但对于在风场中叶片,由于其做周期性旋转运动,因此将多次切入和切出阵风,会改变叶片风速模拟点处风速谱的能量分布,这与建筑物风场建模的不同。这种现象不但改变叶片上脉动风速时序数据,也将改变叶片上的气动力、叶根弯矩等载荷,对部件的疲劳强度和整机振动影响较大,因此建立与建筑物风速谱不同的“旋转采样风速谱”^[12],是模拟叶片上各点脉动

收稿日期:2009-05-19

基金项目:重庆市科技攻关计划重点项目(CSTC3052)

作者简介:何玉林(1945-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事风力发电机组设计技术、计算机图形学研究,
(Tel)023-65102409;(E-mail)heyulin@cqu.edu.cn.

风速时程数据的关键。

笔者拟结合水平轴风力机的叶片结构和运动特征,采用平稳随机过程方法,根据给定的风速谱生成适合于风力机动力学分析时所需的叶片脉动风速时序数据。

1 风力机脉动风场风速谱

风力机叶片脉动风场的建立基于风力机脉动风场建立。所谓风力机脉动风场是指在动力学分析过程中,不运动或运动很小的部件,如塔架、机舱等所处的风场。笔者以标准 von Karman 谱建立上述两种风场,并分析它们之间的关系。

纵向脉动风速的标准 von Karman 谱^[13]为:

$$\frac{nS_{uu}(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4\tilde{n}_u}{(1+70.8\tilde{n}_u^2)^{5/6}} \quad (1)$$

其中 S_{uu} 是风速变化的自相关谱, n 是变化的频率, σ_u 是风速变化的标准差, \tilde{n}_u 是无量纲的频率参数,计算公式为 $\tilde{n}_u = n^x L_u / \bar{U}_0$, 这里的 $^x L_u$ 是纵向湍流的长度尺度, U 是平均风速。

对应的相干系数为:

$$C_u(\Delta r, n) = 0.994 [A_{5/6}(\eta_u) - \frac{1}{2} \eta_u^{5/3} A_{1/6}(\eta_u)] \quad (2)$$

其中, $A_j(x) = x^j K_j(x)$, K 是一个分数阶的第二类修正 Bessel 函数, η_u 是两节点距离和频率的函数。

湍流理论中,计算 $^x L_u$ 时首先计算:

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{u^*}{(6f)} \\ f &= 2\Omega \sin(|\lambda|) \\ u^* &= \frac{(0.4U - 34.5f \cdot z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这里的 z 是离地面的高度, h 是边界层的高度, Ω 是地球旋转的角速度, λ 为纬度, z_0 为表面粗糙长度。

纵向湍流的湍流强度定义为

$$\left. \begin{aligned} \eta &= 1 - 6f \cdot \frac{z}{u^*} \\ p &= \eta^{16} \\ \sigma_u &= \frac{7.5\eta \left(0.538 + 0.09 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right)^p u^*}{1 + 0.156 \ln\left(\frac{u^*}{f \cdot z_0}\right)} \\ I_u &= \frac{\sigma_u}{U} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

I_u 为纵向湍流强度。

$^x L_u$ 定义如下

$$^x L_u = \frac{A^{1.5} \left(\frac{\sigma_u}{u^*}\right)^3 z}{2.5K_z^{1.5} \left(1 - \frac{z}{h}\right)^2 \left(1 + 5.75 \frac{z}{h}\right)} \quad (5)$$

其中

$$A = 0.115 \left[1 + 0.315 \left(1 - \frac{z}{h}\right)^6\right]^{\frac{2}{3}}$$

$$K_z = 0.19 - (0.19 - K_0) \exp\left[-B \left(\frac{z}{h}\right)^N\right]$$

以轮毂高度为 61.5 m 的 600 kW 风力机为例,平均风速为 12 m/s,地表粗糙长度为 0.1 m,地理纬度为 50° 位置的风场为例,依据上述方程在 Matlab 7.0 的 Simulink 工具箱中建立的纵向脉动风速分量的自相关谱密度和湍流长度尺度模型如图 1 所示。

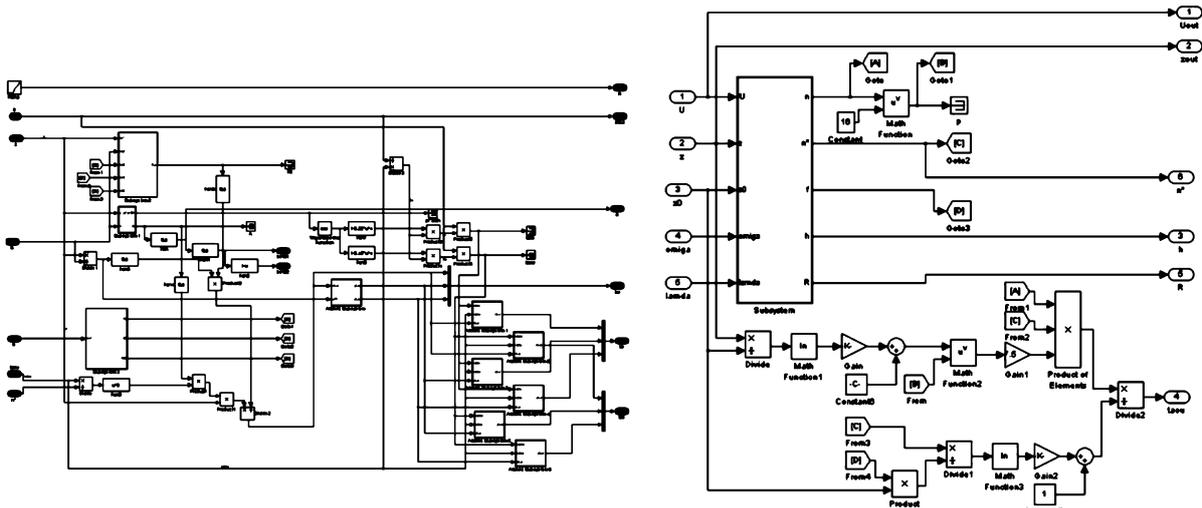


图 1 纵向脉动风速分量自相关谱与湍流长度尺度的 Simulink 模型

2 旋转叶片脉动风场特征分析

风力机在运行过程中,叶片在风场中做周期性旋转运动,通过风轮的阵风尺度经常大于该阵风在一个风轮旋转周期内通过的距离,因此在阵风通过风轮平面时,叶片将多次切入和切出阵风,实验表明,这将显著地改变叶片风速模拟点处风速谱的能量分布,增加风轮旋转频率(1P)及其谐波处(2P、3P...)的频率成分。

假设风场的风是一致的,且气流不可以压缩,根据 Taylor 的“固定紊流”假设,如图 2 所示:在时刻 τ ,位于风轮盘上点 A 的瞬时风速等于初始时刻 $\tau_0 = 0$ 时,沿上风方向距离为 $\bar{U}_0\tau$ 处的点 B 的瞬时风速,因此叶片上半径为 r 的点的纵向风速的自相关函数 $\kappa_u^0(r, \tau)$ 等于点 A 和点 B 的纵向风速之间的交叉相关函数 $\kappa_u(s, 0)$ 。

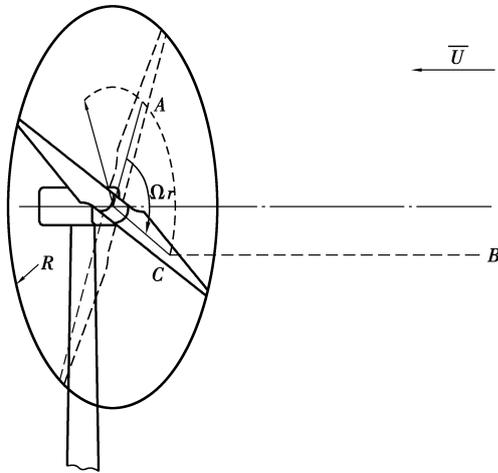


图 2 旋转叶片某点的自相关函数几何关系

旋转叶片上,半径 r 处的点的纵向脉动风速自相关函数^[12]

$$\kappa_u^0(r, \tau) = \frac{2\sigma_u^2}{\Gamma\left(\frac{1}{3}\right)} \left[\frac{\frac{s}{2}}{1.34L_u^x} \right]^{\frac{1}{3}} \left[K_{\frac{1}{3}}\left(\frac{s}{1.34L_u^x}\right) - \frac{s}{2(1.34L_u^x)} K_{\frac{2}{3}}\left(\frac{s}{1.34L_u^x}\right) \left[\frac{2r\sin\left(\frac{\Omega\tau}{2}\right)}{s} \right]^2 \right] \quad (6)$$

其中 $\Gamma(x)$ 为 Gamma 函数, s 是点 A 和点 B 在 \overrightarrow{BA} 方向上的距离, Ω 是风轮转速。

上节所述风力机,当转速为 20 r/min 时,叶片半径 $r = 0, 10$ 和 20 m 处的规格化自相关函数

$$\rho_u^0(r, \tau) = \frac{\kappa_u^0(r, \tau)}{\sigma_u^2}, \text{ 如图 3 所示。}$$

可以看到叶片的旋转运动使半径不为零的节点

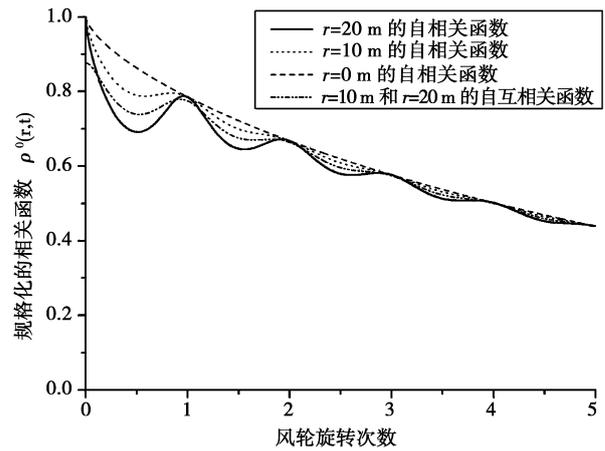


图 3 旋转叶片上不同半径处的规格化相关函数

的纵向脉动风速的规格化自相关函数 $\rho_u^0(r, \tau)$ 在每一个风轮旋转周期倍数处出现峰值;同时可以看到随着半径的增加,这种波动更加显著,当 $r = 0$ m, $\rho_u^0(r, \tau)$ 退化为标准的规格化自相关函数。

旋转叶片的采样谱可以由 $\kappa_u^0(r, \tau)$ 的傅立叶变换得到。

$$S_u(n) = \text{FFT}[\kappa_u^0(r, \tau)]. \quad (7)$$

方程(7)没有解析解,需要用离散傅立叶变换(DFT)求数值解。

利用自相关函数的性质

$$\kappa_u^0(r, \tau) = \kappa_u^0(r, -\tau). \quad (8)$$

并通过积分变换得到积分边界为 0 到 T 的方程(7)的 DFT 形式为

$$S_u(n) = 2T \left[\frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} \kappa_u^{*0}\left(r, \frac{pT}{N}\right) \cos \frac{2\pi kp}{N} \right]. \quad (9)$$

其中的 N 是时间序列的采样点,每个点的谱密度在频率 $n_k = \frac{k}{T}$ ($k = 0, 1, 2 \dots N-1$) 处计算得到。

根据 DFT 计算功率谱密度时,在接近 $\frac{N}{(2T)}$ 频率处

会受到大于 $\frac{N}{(2T)}$ 的频率分量干扰,因此认为计算得到的谱密度直到 $\frac{N}{(4T)}$ 都是正确的。图 4 是根据图 3 的自相关函数计算得到的不同半径处的点的规格化

$$\text{旋转采样谱 } R_u^0(r, \tau) = \frac{n S_u^0(r, \tau)}{\sigma_u^2}.$$

可以看到由于叶片的旋转,采样谱的很多部分频率成分集中到旋转频率 $n = 0.333$ Hz(1P)及其倍频处,但随倍频(2P、3P...)增加,频率成分的集中程度明显减弱,且随着半径增加,这种频率成分集中现象更加明显。

与固定点功率谱类似的,旋转叶片上不同点处

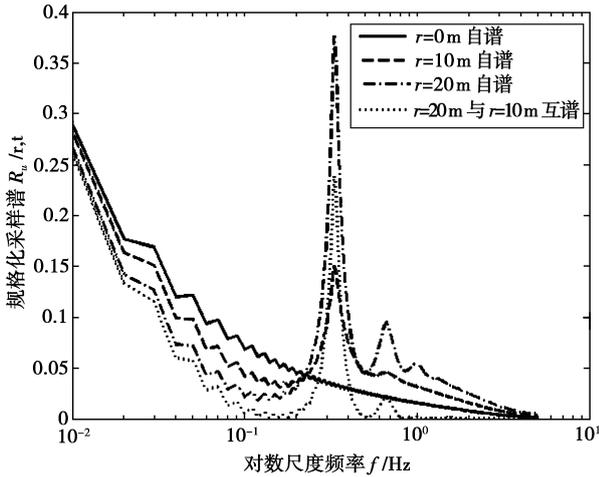


图 4 旋转叶片上不同半径处的规格化旋转采样谱

脉动风速变化也是相互影响的。

旋转叶片上各个离散点处脉动风速的互相关函数的表达式为^[12]:

$$\kappa_u^0(r_1, r_2, \tau) = \frac{2\sigma_u^2}{\Gamma\left(\frac{1}{3}\right)} \left(\frac{s}{1.34L_u^x}\right)^{\frac{1}{3}} \left[K_{\frac{1}{3}}\left(\frac{s}{1.34L_u^x}\right) - \frac{s}{2(1.34L_u^x)} K_{\frac{2}{3}}\left(\frac{s}{1.34L_u^x}\right) \times \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\Omega\tau}{s^2}\right) \right]. \quad (10)$$

根据式(10)得到的叶片半径 $r=10\text{ m}$ 和 $r=20\text{ m}$ 处的互相关函数曲线如图 3 所示;同样的,经过傅立叶变换得到两点间的旋转采样交叉谱如图 4 所示。

3 旋转叶片脉动风场数值模拟

3.1 风场的网格划分

本文仅模拟叶片的纵向脉动风场风速,将叶片上的脉动风场网格划分如图 5 所示,网格上的每个节点为风速模拟点,对应叶片处于水平位置。

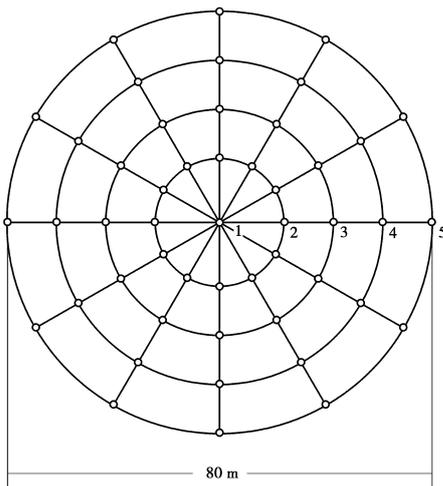


图 5 风力机叶片脉动风场的网格划分

网格的中心节点(点 1)位于风轮的轮毂中心,最大半径等于叶片的长度,因此该网格覆盖了整个叶片,模拟点按叶片展向方向等间距布置,共 4 个节点。

3.2 叶片上点的脉动风速的模拟过程

由于叶片上各模拟点处脉动风速之间存在空间相关性,因此需要将脉动风速视为一个多变量多维的平稳随机过程,对应的风场特征谱矩阵为对称阵,如式(11)所示

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1N_p}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2N_p}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{N_p,1}(\omega) & S_{N_p,2}(\omega) & \cdots & S_{N_p,N_p}(\omega) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

其中 N_p 是节点总数;对角线元素 $S_{jj}(\omega)$ 是节点 j 的自相关谱;非对角线元素 $S_{jk}(\omega)$ 是节点 j 和节点 k 之间脉动风速的互相关谱,其计算公式为

$$S_{jk}^{(i)}(\omega) = \sqrt{S_{jj}^{(i)}(\omega) S_{kk}^{(i)}(\omega)} \text{Coh}(\omega) e^{-i\omega\theta_{jk}}. \quad (12)$$

其中 $\text{Coh}(\omega)$ 为相干系数,它反映两点的脉动风速变化的相互影响; θ_{jk} 为两节点间相位差; ω 为圆频率;上标 i 为 u, v 或者 w 。

笔者采用 Shinozuka-Deodatis 谐波叠加方法^[14],根据风场脉动风速的特征谱矩阵生成各节点处的固定点风速时序数据。

根据上一节所建立的 Matlab 7.0 的 Simulink 模型,计算得到的 600 kW 风力机风场的湍流长度尺度 $^xL_i, ^yL_i, ^zL_i$ 和风速波动标准差 σ_i 如表 1 所示。

表 1 脉动风速的标准差和长度尺度

	标准差 σ_i/m	纵向方向 $^xL_i/\text{m}$	侧向方向 $^yL_i/\text{m}$	垂向方向 $^zL_i/\text{m}$
纵向分量 $i=u$	2.28	299	99.6	75.6
侧向分量 $i=v$	1.785	72.22	96.03	36.44
垂向分量 $i=w$	1.272	26.11	17.36	26.35

然后在叶片上等间距分布 5 个模拟点,分别对应的叶片半径为模拟点 1($r=0\text{ m}$),模拟点 2($r=10\text{ m}$),模拟点 3($r=20\text{ m}$),模拟点 4($r=30\text{ m}$),模拟点 5($r=40\text{ m}$);根据由 von Karman 谱推导得到的叶片旋转采样谱公式(6)和(10),计算各模拟点处的旋转采样谱,其中 $r=0\text{ m}$ 表示轮毂中心,这里的

旋转采样谱退化为标准 von Karman 谱;之后计算各模拟点的旋转采样互谱,组成纵向脉动风速的旋转采样风速谱特征矩阵 $S_u^0(5 \times 5$ 阶矩阵)。

指定上限截止频率 $n = 2.5$ Hz, 频率等分数 $N = 1024$, 仿真步长 $\Delta t = 0.1469$ s, 则可根据谐波叠加法生成风力机叶片上 5 个模拟点的脉动风速的时序数据, 这些工作是在 Matlab 7.0 中编程实现的, 伪代码可以参考文献[15]。

根据上面的讨论的方法, 并考虑风剪影响, 在轮毂处平均风速 $V_0 = 12$ m/s 时, 取风剪因子 $\alpha = 0.2$, 生成的叶片上各个模拟点处脉动风速时序曲线(未叠加平均风速 V_0 时)如图 7 所示。

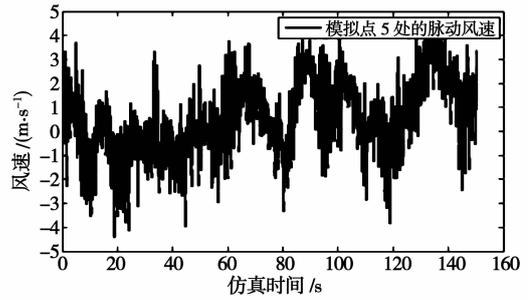
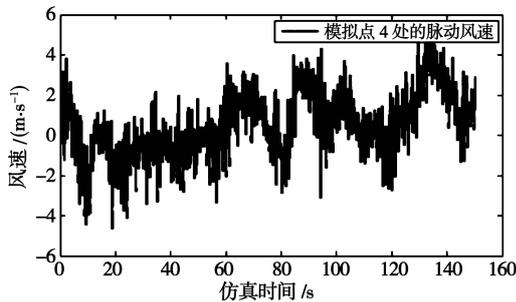
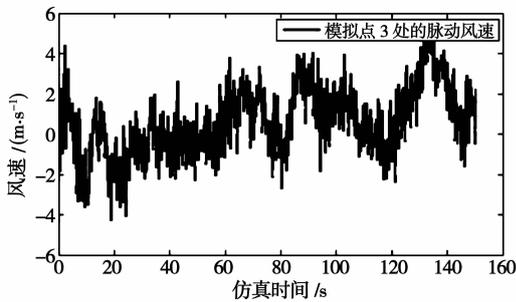
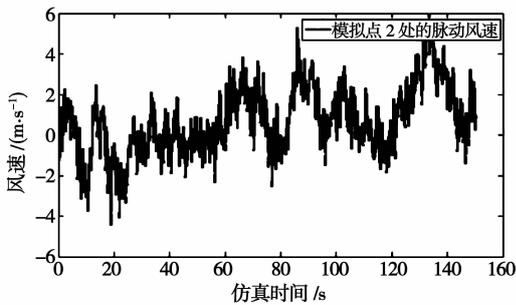
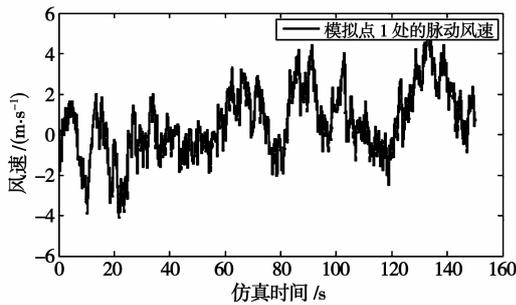


图 7 基于旋转采样谱生成的叶片上模拟点的脉动风速时序曲线



3.3 仿真结果分析

通过上述方法, 对风力发电机组旋转叶片上的模拟点处的脉动风速进行了模拟, 并给出了 1、2、3、4、5 点出的风速时序曲线。其统计特征符合假设条件。

为了验证模拟方法的正确性, 将模拟得到的脉动风速时序数据的功率谱与目标风速谱进行比较, 检验其吻合程度。模拟点 2 和模拟点 5 的风速功率谱比较如图 8 所示。如图可见, 模拟得到的风速谱与目标谱的趋势和均值很接近, 这说明了得到的脉动风速时序数据是可靠的。

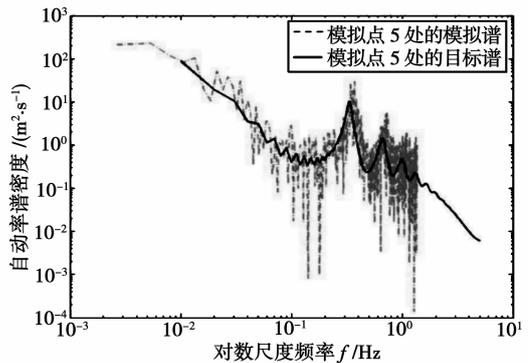
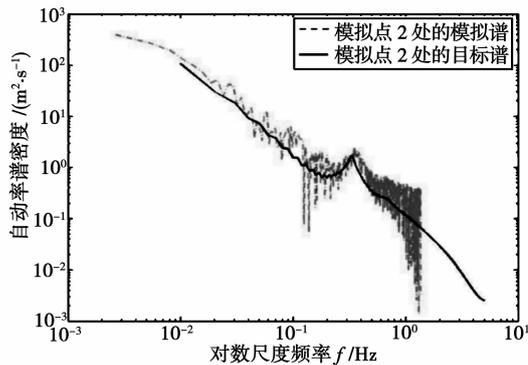


图 8 第 2、第 5 模拟点模拟风速谱与目标谱的比较

4 结 论

在时域中分析兆瓦级风力机系统动力学特性时,建立合理的脉动风场模型是重要的前期工作。由于风力机叶片的旋转运动,将显著地改变脉动风速谱中频率成分的分布,因此需要建立适合风力机仿真所需的旋转采样谱,以此模拟叶片上的脉动风速时序数据。笔者根据旋转采样谱理论,考虑了风力机叶片运动的规律,采用谐波叠加法,根据标准脉动风速谱和旋转采样脉动风速谱,建立了旋转叶片上的纵向脉动风速时序数据。与类似的算例结果(文献[3])分析对比表明,该方法得到的脉动风速时序数据合理有效,可以用于风力机系统动力学计算分析。

参考文献:

- [1] 陈严,张锦源,王楠. 风力机风场模型得研究及紊流风场的 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 Energiæ Solaris Sinica, 2006, 27(9): 955-960.
- [2] 杨叔子, 吴雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
- [3] MURTAGH P J, BASU B, BRODERICK B M. Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading [J]. Engineering Structures, 2005, 27(8):1209-1219.
- [4] SARANYASOONTORN K, MANUEL L. On the propagation of uncertainty in inflow turbulence to wind turbine loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(5):503-523.
- [5] 张文福,马昌恒,孙晓刚,巨春丽等. 基于小波分析的空间相关性风场模拟[J]. 空气动力学学报,2008,26(4): 425-429.
ZHANG WEN-FU, MA CHANG-HENG, SUN XIAO-GANG, JU XIU-LI, et al. Simulation of wind field with spatial correlation based on wavelet analysis method[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2008, 26(4): 425-429.
- [6] MANN J. Wind field simulation [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1998, 13(4):269-282.
- [7] MAGNUSSON M. Near-wake behaviour of wind turbines [J]. Wind Engineering, 1999, 80 (1/2): 147-167.
- [8] GURLEY K R, KAREEM A. Analysis and simulation tools for wind engineering [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1997,12(1):9-31.
- [9] ROSEN A, SHEINMAN Y. The average output power of a wind turbine in a turbulent wind [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 51(3):287-302.
- [10] 穆安乐,刘宏昭,张彦斌等. 风力发电机三维阵风谱建模与仿真的向量自回归法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8):117-120.
MU AN-LE, LIU HONG-ZHAO, ZHANG YAN-BIN, et al. VAR approach for 3D gust wind spectral modelling and simulation of wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8):117-120.
- [11] 白海峰,李宏男. 大跨越输电塔线体系随机脉动风场模拟研究[J]. 工程力学, 2007, 24(7):146-151.
BAI HAI-FENG, LI HONG-NAN. Simulation study of stochastic fluctuating wind field on large span electricity transmission tower-line system [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7):146-151.
- [12] BURTON B, SHARPE D, JENKINS N. Wind energy handbook [M]. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [13] MORIARTY P J, HANSEN A C. Aerodyn theory manual[EB/OL]. (2005-1)[2009-09-01]http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/.
- [14] SHINOZUKA M, JAN C M. Digital simulation of random process and its application[J]. Journal of Sound and Vibration, 1972,25(1): 111-128.
- [15] ROSSI R, LAZZARI M, VITALIANI R. Wind field simulation for structural engineering purposes [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2004, 61(5):738-763.

(编辑 张小强)