

基于改进 VonKarman 模型的风力机来流三维风速模拟

杨从新^{1,2}, 郜志腾¹, 张旭耀¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

摘要:为准确表征风力机来流的三维脉动风场, 基于改进 VonKarman 模型, 分别采用谐波叠加法(harmony superposition method, HSM)和自回归滑动平均法(auto-regressive moving-average, ARMA)对某 33 kW 水平轴风力机来流风况进行脉动风速模拟, 并采用现有软件在同等参数下模拟结果与 2 种方法的对比。结果表明, HSM 法所模拟出脉动风速的功率谱与目标谱更加吻合; 3 种方法自相关性都随时间增大而减小, 其中 ARMA 法和软件模拟结果的自相关性较好; HSM 法互相关系数极差值在 8.49、11.31、19.80 m 的间距上分别为 0.764 9、0.580 7、0.438 7, 其互相关系数随间距增大而减小, 更符合实测结果。研究不仅可为不同风场随机来流条件下风力机气动计算提供依据, 也可为近地面其他农业机械及工程设施的风荷载计算提供参考。

关键词: 风力机; 速度; 模型; 脉动风速; 谐波叠加法; 自回归滑动平均; 改进 VonKarman 模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.15.006

中图分类号: TK89; TM315

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-15-0039-08

杨从新, 郜志腾, 张旭耀. 基于改进 VonKarman 模型的风力机来流三维风速模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 39-46. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.15.006 <http://www.tcsae.org>

Yang Congxin, Gao Zhiteng, Zhang Xuyao. Simulation of 3D wind velocity inflowing into wind turbine based on improved VonKarman model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(15): 39-46. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.15.006 <http://www.tcsae.org>

0 引言

大气边界层内复杂风况对近地面农业机械及工程设施的运行及安全性影响重大。以风力机为例, 大气边界层内风力机时刻处在风速大小和方向快速变化的非正常状态, 故在进行气动载荷计算时, 风场模型的建立尤为重要^[1]。正常风况下, 风速可分解为平均风速和脉动风速。其中, 平均风的变化规律称为风切变, 可通过指数律或对数律描述^[2-4]; 脉动风速具有非平稳随机性, 通常选用符合风场特征的脉动风速谱并结合随机过程理论进行时程模拟^[5-8]。脉动风速的模拟方法主要有谐波叠加法^[9]、线性滤波法^[10]等。

为生成满足工程计算需要的脉动风速时程, Samras 等对 HSM 法研究发现随着模拟点数增加, 其模拟难度显著增加^[11]; 李春祥等基于 Davenport 谱, 采用 AR 模型模拟了 200 m 超高层建筑的脉动风速时程^[12]; 李东东等基于 VonKarman 谱, 采用 ARMA 法对风力机进行脉动风速模拟, 其模拟结果满足目标谱要求, 且仿真效率较高^[13]; 柯世堂等采用 HSM 法和改进的叶素动量理论相结合对随机风速来流条件下风力机三维风场进行模拟, 模拟结果符合风场特性^[14]。文献[12]和[13]只采用

了顺风向上的脉动风速谱生成脉动风速; 而对于风力机风场而言, 改进 VonKarman 谱修正了 VonKarman 谱在 150 m 以下高度上的缺陷^[15], 且能够在 3 个风向上对脉动风速进行描述, 更适于风场来流中脉动风速的生成。

文献[12]、[13]、[14]采用基于随机过程理论的模拟方法, 分别对建筑物、风力机风场进行仿真, 然而杨伦等研究表明, 基于随机过程理论的模拟方法仅能表征空旷场地风速能量在频域内的特征, 并通过 CAARC 标准高程建筑的流场计算, 验证了雷诺应力湍流模型与随机流场生成技术相结合的混合模拟方法的准确性^[16]。风力机运行环境中, 入口来流相当于空旷场地, 可以采用特定湍流谱表征; 而动态旋转风轮相较于静态建筑物来说, 对于来流的扰动更加剧烈。因此, 在来流入口生成满足目标谱要求的随机风速, 并结合湍流模型进行计算的混合模拟数值方法更适宜大型风力机的流场计算。

本文基于三维改进 VonKarman 谱, 分别采用 HSM 法、ARMA 法对 30×30 点的风场入口进行脉动风速时程模拟, 并与考虑风切变效应的平均风叠加, 得到入口边界处顺风向、横风向、垂风向的三维随机风速分布, 以便为 CFD 计算提供更准确的入口边界条件。PSCAD 为电力行业广泛使用的仿真软件, 可以结合平均风、阵风、斜坡风及脉动风速等多种风速模型进行风力发电系统的仿真分析, 故采用 PSCAD 软件中脉动风速仿真模块生成结果作为本文方法计算结果的对比。算例分析表明, 本文方法比 PSCAD 软件在脉动风模拟精度上有一定改进, 可以在入口边界处生成满足目标谱特征的三维风场, 且计算效率满足 CFD 计算要求。

收稿日期: 2015-01-25 修订日期: 2016-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(11262011); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046201)

作者简介: 杨从新, 男(汉族), 陕西兴平人, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械的设计与研究。兰州 兰州理工大学能源与动力工程学院, 730050。Email: ycxwind@163.com

1 随机风场建模分析

1.1 平均风速修正

平均风速随高度变化的风切变效应通常以指数律或对数律描述,本文选用指数模型^[17]如下

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

式中 $v(h)$ 为高度在 h 处的平均风速, m/s; $v(h_0)$ 为参考高度 h_0 处的风速, m/s; h_0 为轮毂高度, m; α 为风切变指数, 本文取为 0.2^[18]。

1.2 脉动风速的自功率谱

脉动风在每个计算点上同时存在 3 个方向的分量: 顺风向、横风向和垂风向。本文采用工程科学数据组织 (Engineering Sciences Data Unit, ESDU) 推荐的改进 VonKarman 谱, 其中顺风向向上改进 VonKarman 谱为

$$\frac{f \cdot S_{uu}(f)}{\sigma_u^2} = \beta_1 \frac{2.987 \tilde{n}_u / a}{[1 + (2\pi \tilde{n}_u / a)^2]^{5/6}} + \beta_2 \frac{1.294 \tilde{n}_u / a}{[1 + (\pi \tilde{n}_u / a)^2]^{5/6}} F_1 \quad (2)$$

式中 S_{uu} 为顺风向 (u) 风速变化的自谱, m^2/s^2 ; f 为频率, Hz; σ_u 为风速标准差; \tilde{n}_u 为无量纲频率参数, F_1 、 β_1 、 β_2 为无量纲中间参数。

$$\tilde{n}_u = \frac{f \cdot L_u^x}{v(h)} \quad (3)$$

式中 L_u^x 为顺风向的湍流长度尺度, m。

设 i 取 v 、 w , 则横风向 (v) 和垂风向 (w) 分量的自谱为

$$\frac{f S_{ii}(f)}{\sigma_i^2} = \beta_1 \frac{2.987 (\tilde{n}_i / a) [1 + (8/3)(4\pi \tilde{n}_i / a)^2]}{[1 + (4\pi \tilde{n}_i / a)^2]^{11/6}} + \beta_2 \frac{1.294 \tilde{n}_i / a}{[1 + (2\pi \tilde{n}_i / a)^2]^{5/6}} F_2 \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} \tilde{n}_i = \frac{f \cdot L_i^x}{v(h)} \\ L_i^x = \frac{1}{2} L_u^x \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_u} \right)^3 \\ \frac{\sigma_v}{\sigma_u} = 1 - 0.22 \cos^4 \left(\frac{\pi h}{2h_{abl}} \right) \\ \frac{\sigma_w}{\sigma_u} = 1 - 0.45 \cos^4 \left(\frac{\pi h}{2h_{abl}} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中 h_{abl} 为大气边界层高度, m。式(2)、式(4)中另外 5 个无量纲中间参数 a 、 β_1 、 β_2 、 F_1 、 F_2 如下

$$\begin{cases} a = 0.535 + 2.76(0.138 - A)^{0.68} \\ A = 0.115 [1 + 0.315(1 - h/h_{abl})^6] \\ \beta_1 = 2.357a - 0.761 \\ \beta_2 = 1 - \beta_1 \\ F_1 = 1 + 0.455 \cdot \exp[-0.76(\tilde{n}_u/a)^{-0.8}] \\ F_2 = 1 + 2.88 \cdot \exp[-0.218(\tilde{n}_i/a)^{-0.9}] \end{cases} \quad (6)$$

由此, 可得出各个计算点顺风向、横风向、垂风向上的自功率谱密度。

1.3 脉动风速的互功率谱

互功率谱体现了脉动风场中 2 个计算点间的相干性, 可通过各点处自功率谱及相干系数得到

$$S_{ij}(\omega) = \sqrt{S_{ii}(\omega) S_{jj}(\omega)} \text{Coh}(\omega) e^{i\theta(\omega)} \quad (7)$$

式中 S_{ij} 为 i 点和 j 点间的互功率谱, m^2/s^2 ; S_{ii} 和 S_{jj} 分别为 i 点和 j 点的自功率谱, m^2/s^2 ; $\text{Coh}(\omega)$ 为相干系数; $\theta(\omega)$ 为互谱相位角, 二者分别为

$$\text{Coh}(\omega) = \exp \left(\frac{-2f \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\bar{v}(z_i) + \bar{v}(z_j)} \right) \quad (8)$$

$$\theta(\omega) = \begin{cases} \frac{\omega \Delta z}{8\bar{v}(z)}, & \frac{\omega \Delta z}{2\pi\bar{v}(z)} \leq 0.1 \\ -5 \frac{\omega \Delta z}{\bar{v}(z)} + 1.25, & 0.1 < \frac{\omega \Delta z}{2\pi\bar{v}(z)} \leq 0.15 \\ \text{random number}, & \frac{\omega \Delta z}{2\pi\bar{v}(z)} > 0.125 \end{cases} \quad (9)$$

其中 C_x 、 C_y 、 C_z 为衰减系数, 参考文献[20]分别取 16, 8, 10。

综合自功率谱、互功率谱, n 个风速模拟点上脉动风速谱密度矩阵为

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (10)$$

2 脉动风速模拟方法

2.1 HSM 法

采用 HSM 法生成脉动风速, 第 m 个计算点的脉动风速为

$$v_m(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^N |H_{mk}(\omega_l)| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_l t + \theta_{mk}(\omega_l) + \varphi_{kl}] \quad (11)$$

式中 N 为采样点数; H_{mk} 是由公式(6)进行 Cholesky 分解后的下三角阵; $\omega_l = \omega_n + (l - 0.5)\Delta\omega$, $\Delta\omega = (\omega_u - \omega_n)/N$; ω_u 和 ω_n 分别为角频率的上限和下限; φ_{kl} 为 0 和 2π 范围内均匀分布的随机数; $\theta_{mk}(\omega_l)$ 为 2 个不同计算点间相位角。

$$\theta_{mk}(\omega_l) = \arctan \left[\frac{\text{Im} H_{mn}(\omega_l)}{\text{Re} H_{mn}(\omega_l)} \right] \quad (12)$$

由此即可按 HSM 法生成 3 方向上的脉动风速。

2.2 ARMA 法

采用 ARMA 法生成脉动风速, 脉动风速为

$$v_m(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_m(t-i) + a(t) + \sum_{j=1}^m \beta_j a(t-j) \quad (13)$$

式中 $v_m(t)$ 为脉动风速时程, m/s; $a(t)$ 为零均值白噪声; α_i 、 β_j 分别为自回归系数和滑动平均系数; n 、 m 分别为自回归阶数和滑动平均阶数。对于风力机模型, 参照文献[13]取 $n=2$, $m=1$ 。

自回归系数 α_i 通过 Yule-Walker 方程求解, 其展开形式为

$$\begin{cases} R_x(m+1) = \alpha_1 R_x(m) + \alpha_2 R_x(m-1) + \cdots + \alpha_n R_x(m-n+1) \\ R_x(m+2) = \alpha_1 R_x(m+1) + \alpha_2 R_x(m) + \cdots + \alpha_n R_x(m-n+2) \\ \vdots \\ R_x(m+n) = \alpha_1 R_x(m+n-1) + \alpha_2 R_x(m+n-2) + \cdots + \alpha_n R_x(m) \end{cases} \quad (14)$$

式中 $R_x(l)$ 为脉动风速序列 $v_m(t)$ 的自相关函数, 可通过对功率谱函数 $S(f)$ 做傅里叶逆变换得到。

对于滑动平均系数 β_i , 设

$$Y(t) = v_m(t) - \sum_{i=1}^n \alpha_i v_m(t-i) = a(t) + \sum_{j=1}^m \beta_j a(t-j) \quad (15)$$

则 $Y(t)$ 的自相关函数 $R_y(l)$ 可以表示为 $v_m(t)$ 的自相关函数 $R_x(l)$ 的表达式

$$R_y(l) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \alpha_i \alpha_j R_x(l+j-i), \quad l=0, 1, \dots, m \quad (16)$$

同时有

$$R_y(l) = \sigma_a^2 \sum_{j=l}^m \beta_j \beta_{j-l}, \quad l=0, 1, \dots, m \quad (17)$$

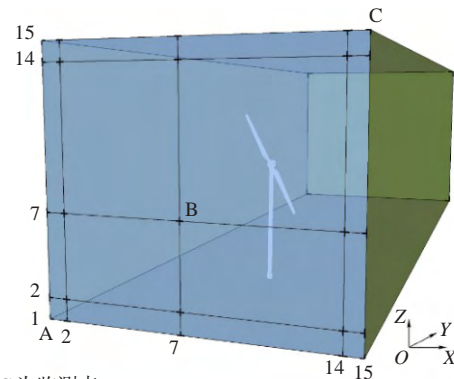
其中 $\alpha_0 = -1, \beta_0 = 1, \sigma_a^2$ 为白噪声 $a(t)$ 的方差。

由此即可按 ARMA 法生成 3 方向上的脉动风速。

3 结果与分析

本文以兰州理工大学外场平台中一台 33 kW 两叶片水平轴风力机为研究对象, 所处纬度为 $N37^\circ 05'$, 该地点目标谱根据文献 [15] 和文献 [19] 确定, 风轮直径 14.8 m, 轮毂高度 15.4 m, 额定工况下轮毂高度处风速 11 m/s, 地面粗糙度为 0.03, 风切变指数为 0.2, 模拟时间步长 0.1 s, 总模拟时长 100 s, 上限频率取为 2π rad/s, 来流入口距风轮旋转平面为 30 m, 入口为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 矩形区域, 网格步长为 2 m。设立 A 点 (1,1)、B 点 (7,7)、C 点 (15,15) 3 个监测点, 计算区域及监测点位置如图 1 所示。

同时, 采用 PSCAD 软件在相近参数下进行计算, 作为与本文 2 种方法的对比; 并通过与目标谱的对比较验证 3 者计算结果的准确性。



注: A、B、C 为监测点。
Note: A, B, C are monitoring points.

图 1 来流入口及监测点示意图

Fig.1 Inlet and monitoring points

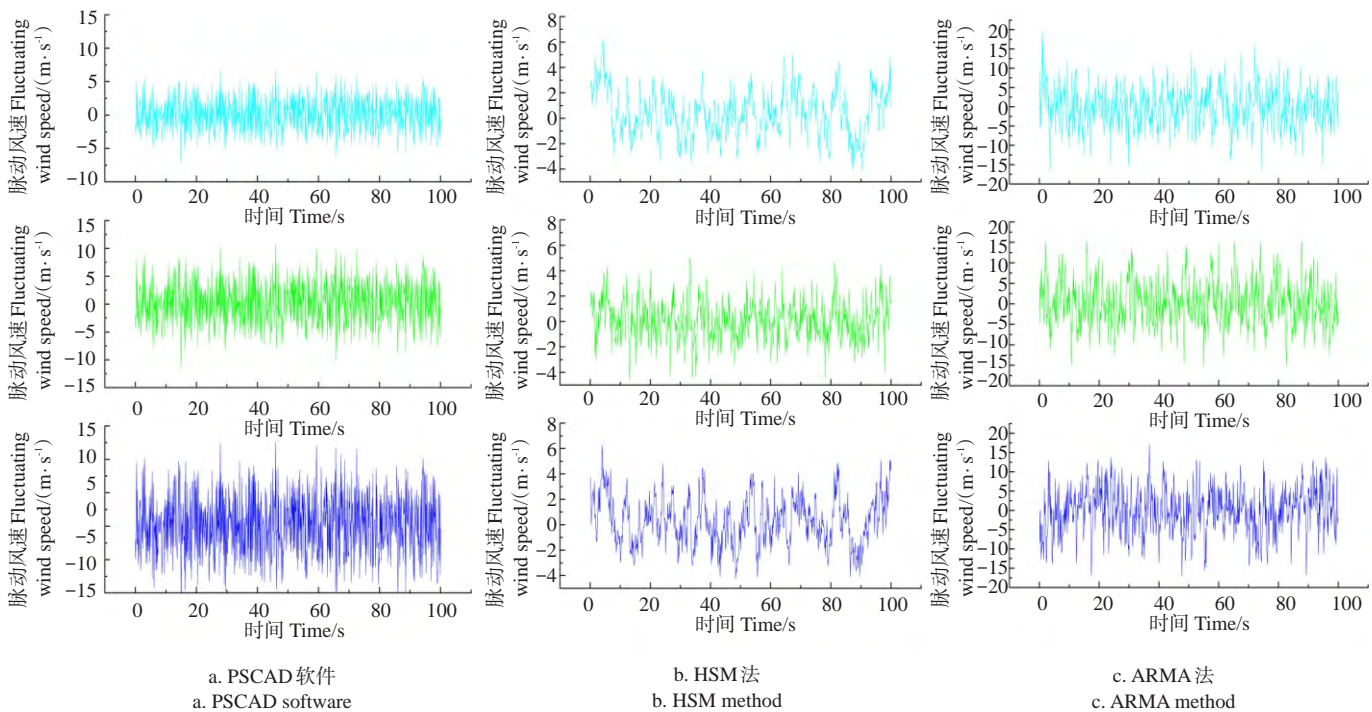
3.1 顺风向模拟结果对比

图 2 分别为 PSCAD 软件、HSM 法及 ARMA 法在 A 点、B 点、C 点所生成顺风向脉动风速时程图。图 3 为 3 种方法在对应点处的顺风向脉动功率谱。表 1 为每个频率点上计算谱与功率谱的差值的平均值。对比可看出 PSCAD 软件在低频区计算谱略高于目标谱, 而高频区计算功率谱略低于目标谱, 中间部分吻合较好; ARMA 法在高频区计算谱高于目标谱; HSM 法在整个频域内与目标谱符合程度较好, 其计算谱与目标谱的差值平均值最小。

表 1 计算谱与功率谱的差值平均值

Table 1 Mean of difference between calculation spectrum and target spectrum

指标 Index	差值平均值 Mean of difference		
	A 点 Point A	B 点 Point B	C 点 Point C
PSCAD	14.223 2	16.243 3	18.384 4
HSM	1.586 1	3.054 3	3.067 4
ARMA	8.395 0	13.722 5	16.985 8

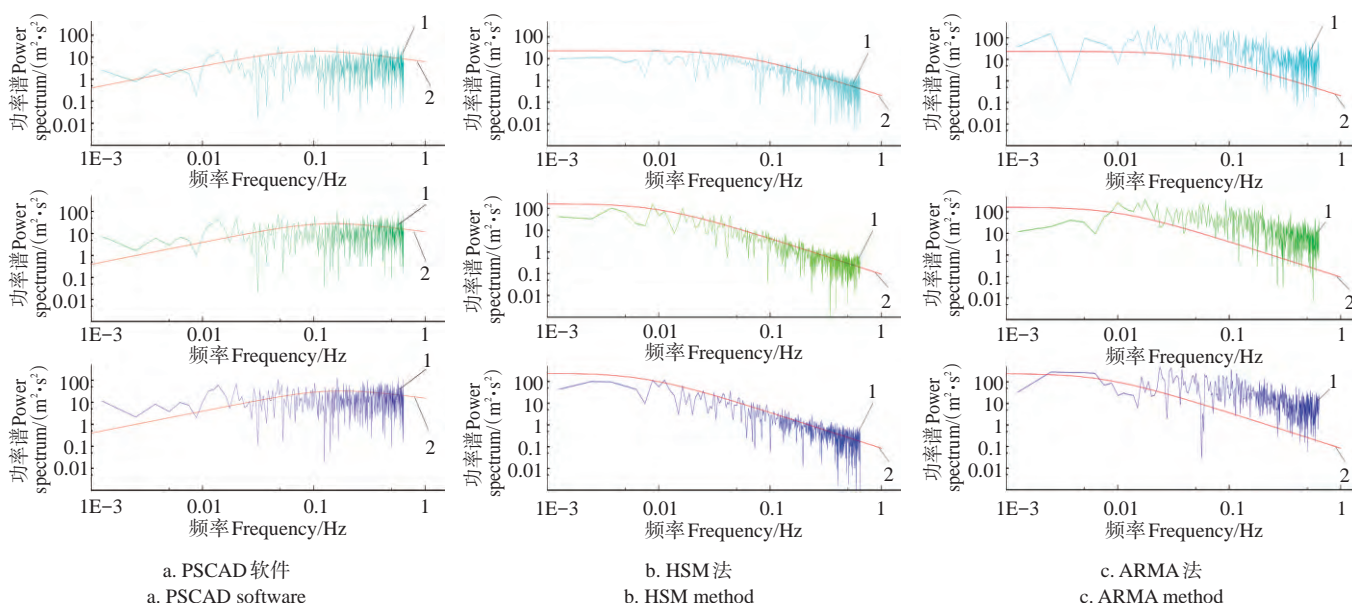


注: 每个小图从上到下依次为 A、B、C 点。下同。

Note: Each small figure are point A, point B, point C from top to bottom. The same as below.

图 2 顺风向脉动风速时程

Fig.2 Fluctuating wind speed with time in along-wind



注:1、2分别表示计算谱和目标谱。
Note: 1, 2 are calculation spectrum and target spectrum, respectively.

图3 顺风向功率谱

Fig.3 Power spectrum in along-wind

图4为3种方法在监测点处所生成顺风向脉动风速对应的自相关系数曲线。3种方法自相关性皆随时间变长而减小。其中,HSM法在B、C点离原点较远处出现局部区域增大现象;而PSCAD和ARMA法自相关性良好。

ARMA法是基于时间序列建立的随机差分模型,其自回归系数、滑动平均系数分别代表时程上游脉动速度对计算时间节点处的影响^[21],故自相关性更好;而HSM法采用离散谱逼近目标随机过程,故在功率谱匹配上精度更高。

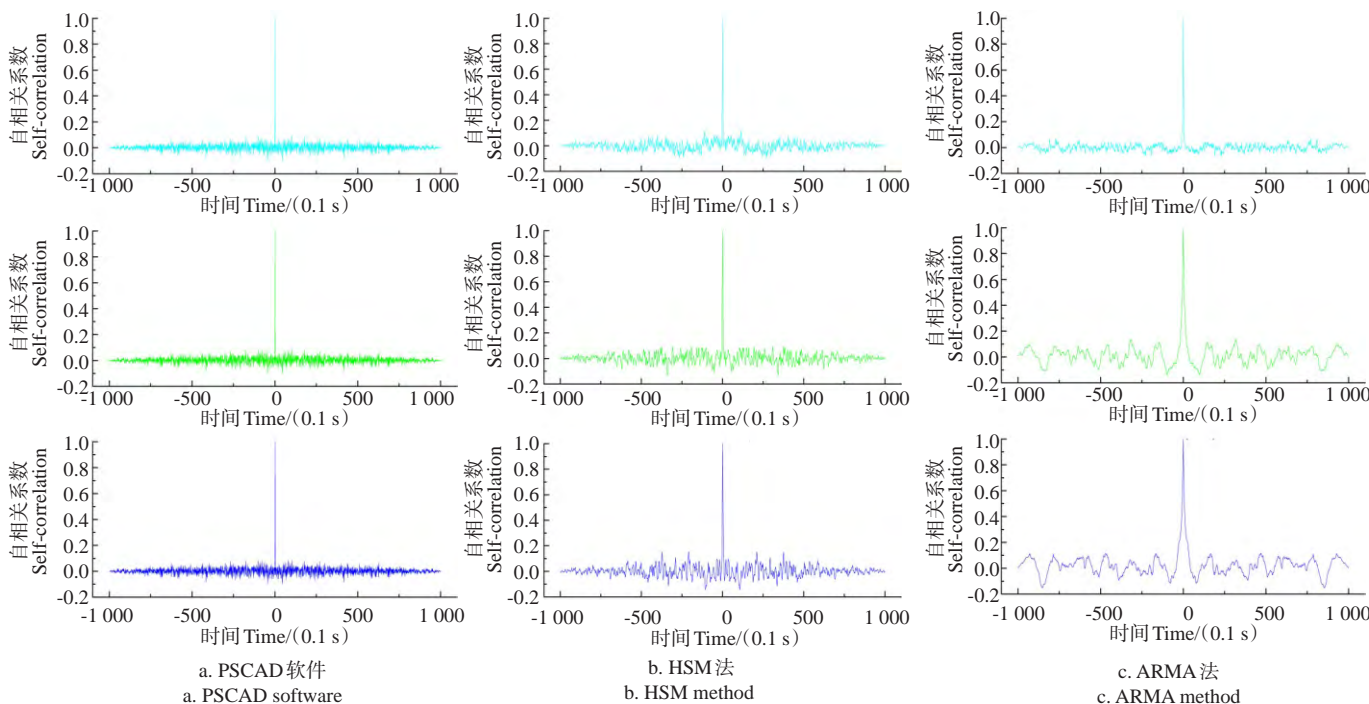


图4 顺风向向上自相关性对比

Fig.4 Comparison of self-correlation in along-wind

2点间互相关性与其间距有关,间距越大,互相关性越弱。图5为3种方法顺风向脉动风速中A、B点(间距8.49 m),A、C点(间距19.80 m)以及B、C点(间距11.31 m)的互相关曲线,表2为其互相关系数的极差表,对比可得出HSM法模拟结果中,互相关性是A、C点极差最小,而A、B点和B、C点上的互相关性较大;且随着时间增大,相关性逐渐减小,这与文献[22]中实测风速所得相关性曲线相符。

PSCAD软件和ARMA法所对应互相关性系数极差并没有在A、C点取最小值,即其互相关性距离无关,所模拟风速结果难以反映空间结构上周围节点对计算节点的影响。

综上所述,HSM法在功率谱精度、互相关性上优于PSCAD软件和ARMA法,但自相关性较差;PSCAD软件和ARMA法模拟结果所对应自相关性较好,但功率谱精度较差。

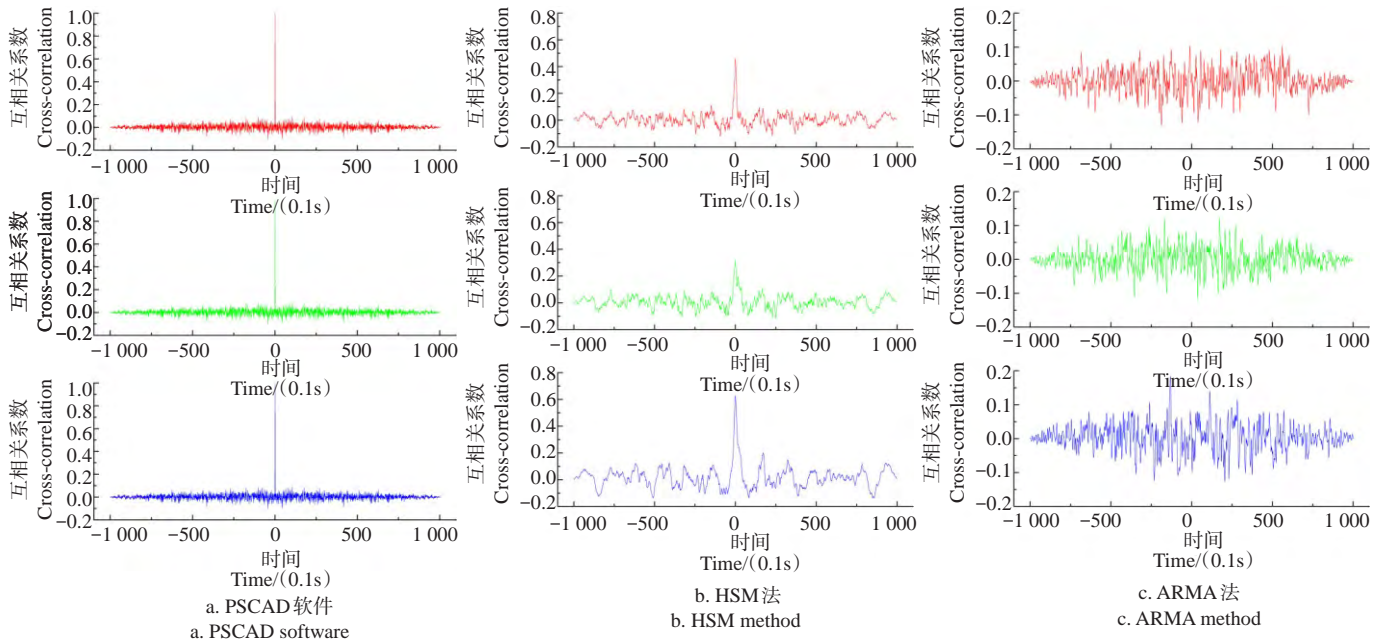


图5 顺风向上互相关性对比

Fig.5 Comparison of cross-correlation in along-wind

表2 顺风向互相关系数极差

Table 2 Range of cross-correlation in along-wind

指标 Index	极差 Range		
	8.49 m	11.31 m	19.80 m
PSCAD	1.101 4	1.098 5	1.098 7
HSM	0.764 9	0.580 7	0.438 7
ARMA	0.236 8	0.313 5	0.240 5

3.2 湍流效应对比

以精度较高的HSM法计算所得脉动风速为例,通过脉动风速曲线、入口处脉动风速云图、所得脉动风速沿高度分布的湍流度比较顺风向、横风向、垂风向上的湍流效应。

表3为3方向上监测点处脉动风速的脉动幅度。图6、图7分别为3方向上监测点处脉动风速时程图和100 s

时入口处脉动速度云图。对比顺风向、横风向、垂风向上脉动风速的幅值可得3方向上顺风向脉动幅度最大,而垂风向上脉动幅度最小。

表3 脉动风速的脉动幅度

Table 3 Fluctuating amplitude of fluctuating wind speed $m \cdot s^{-1}$

指标 Index	A点 Point A	B点 Point B	C点 Point C
顺风向 In along-wind direction	9.608 8	10.250 2	10.543 8
横风向 In crosswind direction	7.356 2	8.176 0	8.545 8
垂风向 In vertical wind direction	4.448 7	6.018 2	6.198 4

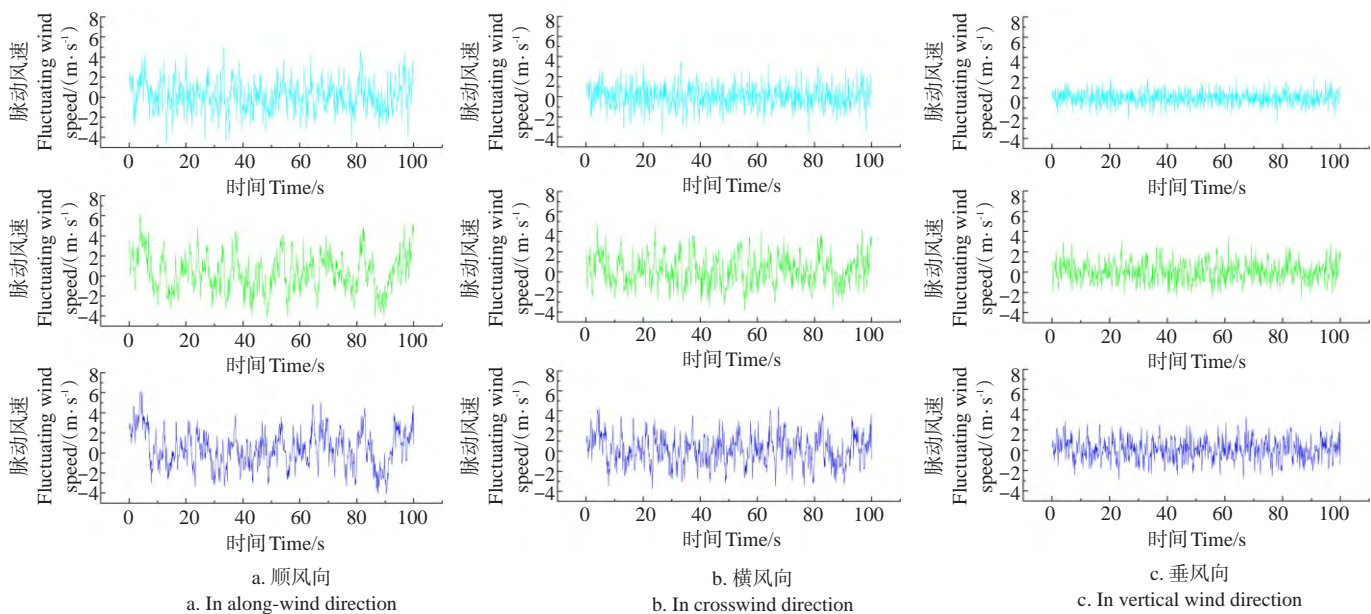


图6 监测点处脉动风速时程

Fig.6 Fluctuating wind speed time series of monitoring points

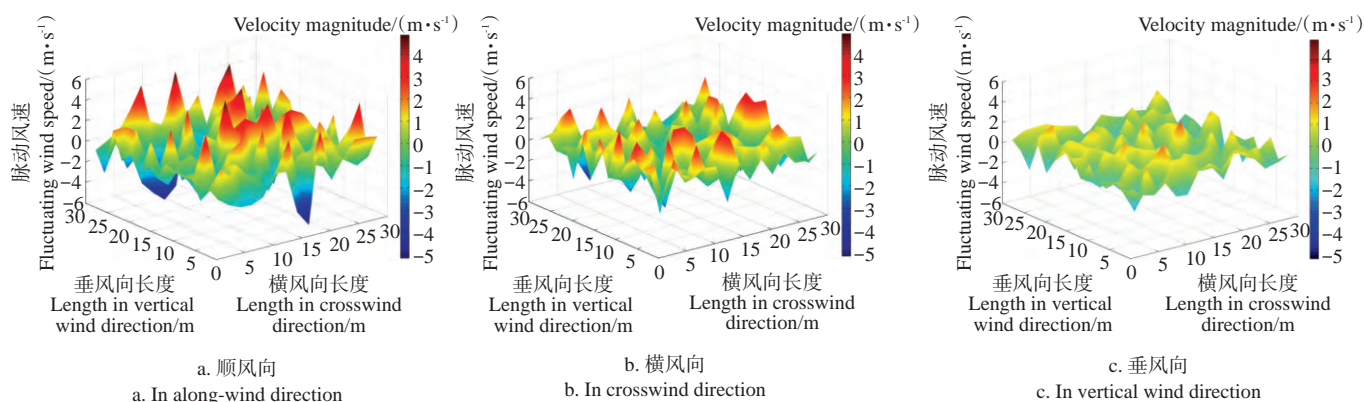


图7 来流入口处脉动速度云图

Fig.7 Fluctuating wind speed at inlet

图8为图6、图7中所得脉动风速在3方向上湍流度随高度的变化曲线,3方向上湍流度都随着高度增加而减小;其中,顺风向上湍流度约比横风向上湍流度大3.46%~5.44%,而横风向上湍流度约比垂风向上湍流度大3.62%~5.69%,高度越高,3方向分量上湍流度相差越小;从地面到距地面30 m高的跨度上,顺风向、横风向、垂风向上湍流度分别相差8.96%、6.98%、4.91%。随着风力机大型化发展,顺风向上湍流度随高度的切变效应也渐具规模,故在进行气动载荷计算时,尤其针对大型风力机,除了平均风的切变效应,也应考虑顺风向上湍流度的切变分布。

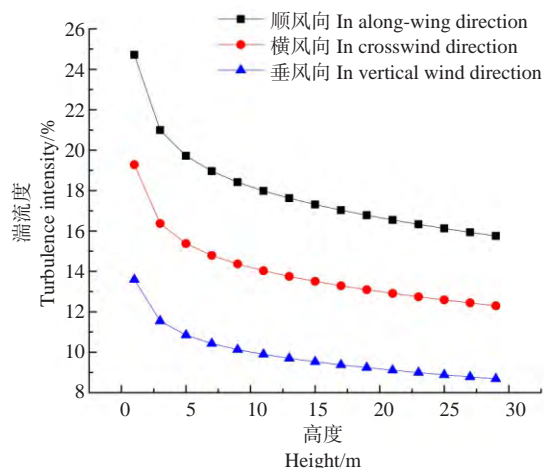


图8 湍流度随高度变化曲线

Fig.8 Curve of turbulence intensity and height

4 结论

本文采用的2种仿真算法相较PSCAD软件在所取风谱适应度、多点三维脉动风计算、仿真精度及效率方面均有改进,可用于产生满足目标谱特征的来流入口处随机风速,并能为CFD计算提供更准确的入口边界条件。主要结论如下:

- 1) HSM模拟所得功率谱比ARMA法更吻合目标谱,ARMA法所得功率谱密度在高频区比目标谱偏高。
- 2) 两者自相关性都随着时间增大而减小,其中ARMA自相关性优于HSM法;两者互相关性都随着距离增大而减小,其中HSM法互相关曲线更符合实测结果。
- 3) 3方向上湍流度大小:顺风向>横风向>垂风向;三者湍流度皆随着高度增加而减小;顺风向、横风向、垂风向

上的湍流度在30 m高的跨度上分别相差8.96%、6.98%、4.91%,对于大型风轮这种差距会更加明显,故对大型风力机而言,宜同时考虑平均风的切变效应以及顺风向上湍流度的切变效应。

[参考文献]

- [1] 王珑,王同光. 风力机设计及其空气动力学问题[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(12): 59-68.
Wang Long, Wang Tongguang. Wind turbine design and its aerodynamic issues[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2013, 43(12): 59-68.(in Chinese with English abstract)
- [2] Ray M L, Rogers A L, McGowan J G. Analysis of wind shear models and trends in different terrain[J]. American Wind Energy Association Windpower, 2006.
- [3] 徐宝清,吴婷婷,李文慧. 风能风切变指数计算方法的比选研究[J]. 农业工程学报, 2014, 16: 188-194.
Xu Baoqing, Wu Tingting, Li Wenhui. Screening of calculation methods for wind shear exponent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(16): 188-194.(in Chinese with English abstract)
- [4] 彭怀午,冯长青,包紫光. 风资源评价中风切变指数的研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 21-23, 28.
Peng Huaiwu, Feng Changqing, Bao Ziguang. Study on the wind shear exponent for wind resource assessment[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(1): 21-23, 28.(in Chinese with English abstract)
- [5] 高静,洪冠新,梁灶清. Von Karman模型三维大气紊流仿真实理论与方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(6): 736-740.
Gao Jing, Hong Guanxin, Liang Zaoqing. Theory and method of numerical simulation for 3D atmospheric turbulence field based on Von Karman model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(6): 736-740.(in Chinese with English abstract)
- [6] 曹玉生,包格日乐图. 基于Matlab的大型兆瓦级风电机脉动风速时程数值模拟[J]. 内蒙古工业大学学报, 2013, 32(4): 278-284.
Cao Yusheng, Bao Geriletu. Study on fluctuating wind velocity time series for large scale megawatt wind turbine based on matlab [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 2013, 32(4): 278-284.(in Chinese with English abstract)
- [7] Yang J N. Simulation of random envelope process[J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 25(1): 73-85.

- [8] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic process[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1996, 122(8):778-787.
- [9] 陈小波,陈健云,李静. 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, Li Jing. Numerical simulation of fluctuating wind velocity time series of offshore wind turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(32): 111-116.(in Chinese with English abstract)
- [10] 彭刚,汪新. 线性滤波法风速模拟及模型阶数确定[J]. *广东工业大学学报*, 2010, 27(2): 32-35.
Peng Gang, Wang Xin. Simulation of wind speed time series using linear filter method and model order identification[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2010, 27(2): 32-35.(in Chinese with English abstract)
- [11] Samras E, Shinozuka M, Tsurui A. ARMA representation of random process[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, 111(3): 449-461.
- [12] 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.
Li Chunxiang, Du Min, Han Bingkang. Simulation of fluctuating wind speed time series of super-tall buildings based on AR model[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 28(3): 87-94.(in Chinese with English abstract)
- [13] 李东东,陈陈. 风力发电系统动态仿真的风速模型[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(21): 44-47.
Li Dongdong, Chen Chen. Wind speed model for dynamic simulation of wind power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(21): 44-47.(in Chinese with English abstract)
- [14] 柯世堂,曹九发,王珑,等. 考虑平稳风修正和塔架干扰的风力机叶片3-D风场模拟[J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(1): 153-159.
Ke Shitang, Cao Jiufa, Wang Long, et al. Numerical simulation of 3-D wind field for wind turbine considering tower interaction and modification of steady wind[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(1): 153-159.(in Chinese with English abstract)
- [15] Engineering Sciences Data Unit. Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: Single point data for strong winds(neutral atmosphere)[DB/OL]. 2001-08-01.https://www.esdu.com/cgi-bin/ps.pl?sess=unlicensed_1151112142831kzq&t=doc&p=esdu_85020g. [2015-11-12]
- [16] 杨伦,黄铭枫,楼文娟. 高层建筑周边三维瞬态风场的混合数值模拟[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2013, 47(5): 824-830.
Yang Lun, Huang Mingfeng, Lou Wenjuan. Hybrid simulation of three dimensional fluctuating wind fields around tall buildings [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013, 47(5): 824-830.(in Chinese with English abstract)
- [17] 刘磊,石可重,杨科,等. 风切变对风力机气动载荷的影响[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(10): 1667-1670.
Liu Lei, Shi Kezhong, Yang Ke, et al. Effect of wind shear on the aerodynamic load of wind turbine[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(10): 1667-1670.(in Chinese with English abstract)
- [18] GB/T 18451.1-2012, 风力发电机组 设计要求[S].
- [19] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. *Wind Energy Handbook* [M]. John Wiley&Sons, Ltd, 2001:18-21.
- [20] 白泉. 风速时程数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005: 28-30.
Bai Quan. Research on Wind Velocity Histories Numerical Simulation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005: 28-30.(in Chinese with English abstract)
- [21] 杨叔子,吴雅,轩建平,等. 时间序列分析的工程应用[M]. 上册. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 7-19, 41-52.
- [22] 王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. *建筑结构学报*, 1994, 15(1): 44-52.
Wang Zhihong. Simulation of wind loading[J]. *Journal of building structures*, 1994, 15(1): 44-52.(in Chinese with English abstract)

Simulation of 3D wind velocity inflowing into wind turbine based on improved VonKarman model

Yang Congxin^{1,2}, Gao Zhiteng¹, Zhang Xuyao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Currently, as an effective technique to face the energy crisis, large-scale wind turbines in MW level is more and more widely used in the field of environment protection and green energy industry. In boundary layer wind field, random wind load can bring more obvious aerodynamic load fluctuation to long blades and high tower, which affects the structural stability of wind turbines. An accurate random wind speed model plays a significant role in the aerodynamic load calculations of wind turbines in the atmospheric boundary layer. Random wind speed can be decomposed into averaging wind speed and fluctuating wind speed. The averaging wind speed can be described by wind shear effect, and the fluctuating wind speed can be described by turbulence spectra. In the runtime environment of wind turbines, it's proper to use specific turbulence spectra to describe the fluctuating wind speed of inflow on the inlet because the entrance region of wind farm is the equal of a flat field. Compared with static buildings, the dynamic turbine rotor

causes great disturbances to the wind speed. So the hybrid numerical simulation to combine the random wind speed generated by specific turbulence spectra on the inlet with turbulence models is more appropriate to the aerodynamic load calculations. In this paper, we verified the accuracy of random wind speed generation methods on the inlet of wind turbines. IEC61400-1 and many research papers recommend to use exponential law to describe the wind shear effect. The improved Von Karman spectrum corrected the flaws of Von Karman spectrum below about 150 m, which is more appropriate to wind farms. Based on the exponential law, 3D improved Von Karman spectrum and cross-spectrum model. We used the harmony superposition method and auto-regressive moving-average method to generate fluctuating wind speed of a 33 kW horizontal axis wind turbine. The hub height of this wind turbine was 15.4 m, and the rated wind speed was 11 m/s. The terrain roughness length was 0.03 m and the wind shear index was 0.2. The time step was 0.1 s and the upper rate limit was 2π rad/s. The length of the simulation was 100 s. The inlet was a rectangular area with 30 m \times 30 m, and the grid step was 2 m. As a contrast, in this paper, we used the PSCAD to generate fluctuating wind speed with the same parameter. We compared these three methods, power spectrum, self-correlation and cross-correlation. The results showed that the power spectrum which was produced by HSM fit well with target power spectrum. The self-correlation of these three methods decreased as time increased, and the self-correlation of ARMA and PSCAD was better than HSM. The cross-correlation from the HSM method decreased as distance increased, which fit well with the measured results. Last, in this paper, we compared the turbulence intensity and got the three-dimensional distributions of velocity on the inlet. The turbulence intensity decreased as height increased, the difference value of turbulence intensity in the along-wind, crosswind, vertical wind was 8.96%, 6.98%, and 4.91%, respectively. This difference value would be more obvious on the large-scale wind turbines.

Keywords: wind turbines; velocity; models; fluctuating wind; harmony superposition method; auto-regressive moving-average; improved VonKarman model