

湍流脉动风速的谐波-分形模拟

吕 瑞^{1,2}, 胡 非¹, 刘 磊¹, 程雪玲¹

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 真实大气湍流中的脉动风速具有多尺度自相似分形特点, 传统的模拟方法对自相似分形特征描述不足。为此, 提出谐波-分形模拟法, 该方法能准确模拟出脉动风速的功率谱特征和分形结构。通过对比实测脉动风速和模拟脉动风速的统计特征, 如阵风系数、概率密度等, 发现该方法模拟结果与实测符合较好。

关键词: 湍流风速; 分形; 谐波叠加法(WAWS); Weierstrass-Mandelbrot 函数

中图分类号: TK81

文献标识码: A

0 引 言

风力发电作为风能资源最主要的利用方式, 成为近几十年的研究热潮^[1-4]。大气边界层的风总是湍流的, 表现为风速的大小和方向总不断变化, 这种脉动风速不但影响风力发电机的出力曲线, 其长期作用在风力机部件上的载荷也会造成风力机的损坏^[5]。因此, 对脉动风速时程的研究对于提高风电场发电量、控制风力发电机运行风险具有重要意义。由于控制大气运动的方程组是非线性的, 难以求出其解析解, 通过数学模型构建单点或多点脉动风速时程便成为主要的模拟手段^[6]。

湍流在空间和时间上都具有随机性和多尺度性, 谐波叠加法和线性滤波法能很好地模拟脉动风速的这种特征。谐波叠加法根据谱分解和余弦函数叠加的思想模拟随机过程, 其模拟效果理想, 但计算量大。线性滤波法计算量小, 但模拟结果质量不如谐波叠加法^[7]。20 世纪 70 年代后, “相干结构”的发现让人们认识到湍流中存在着某些确定性的结构, 由此诞生一系列研究湍流的新理论, 如混沌理论、分形理论^[8]。大量研究表明, 真实大气湍流具有自相似分形特征^[9,10]。针对脉动风速这些特征的模拟方法也相应出现, 如小波模拟法^[11]、Weierstrass-Mandelbrot 函数模拟法^[12-14]等。小波分析能够提供信号的多尺度和局部化特征, 可用来模拟

脉动风速的间歇性和局部自相似性。Weierstrass-Mandelbrot 函数(以下简称 WM 函数)模拟法可模拟指定分形维数的脉动风速时程。

本文目的是模拟具有指定功率谱和特定自相似分形结构的脉动风速时程。虽然 WM 函数能模拟脉动风速的自相似分形结构, 但该函数对脉动风速功率谱的低频段模拟效果不够理想^[13]。为了修正这种误差, 本文提出谐波-分形模拟法, 将脉动风速低频段和高频段分开模拟, 低频段采用谐波叠加法模拟, 高频段采用 WM 函数模拟, 2 个模拟序列合成即得满足要求的脉动风速时程。

1 模拟方法

1.1 谐波叠加法

谐波叠加法(WAWS)的原理是将脉动风速看成是若干个简谐波的叠加, 空间 p 个点脉动风速时程的互谱密度矩阵如式(1)所示^[15]。

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1p}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2p}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{p1}(\omega) & S_{p2}(\omega) & \cdots & S_{pp}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $S_{jk}(\omega)$ ——第 j 点和第 k 点的互谱密度(其中 $j, k = 1, 2, \dots, p$, ω 为角频率), 且有 $S_{jk}(\omega) = \overline{S_{kj}(\omega)}$ ($\overline{S_{kj}(\omega)}$ 为 $S_{kj}(\omega)$ 的共轭矩阵)。互谱密度矩阵可进行 Cholesky 分解, 即 $S(\omega) = L(\omega)\overline{L(\omega)}^T$, $\overline{L(\omega)}^T$ 为下三

收稿日期: 2016-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(11472272); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05040301)

通信作者: 胡 非(1962—), 男, 博士、研究员、博士生导师, 主要从事大气边界层和大气湍流理论方面的研究。hufei@mail.iap.ac.cn

角矩阵 $L(\omega)$ 的共轭转置, 则第 j 点的脉动风速样本可由式(2)模拟:

$$H_j(t) = \sum_{l=1}^j \sum_{i=1}^N |L(\omega_l)| \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\omega_l' t + \theta_{ji}(\omega_l) + \phi_{il}] \quad (2)$$

式中, $H_j(t)$ ——风速时间序列; $\Delta\omega$ ——角频率增量, $\Delta\omega = \omega_{up}/N$ (其中 ω_{up} 为角频率上限, N 为频率离散化的组数, l 代表第 l 组); $\theta_{ji}(\omega_l)$ ——第 j 点与第 i 点的相位角, $\theta_{ji}(\omega_l) = \tan^{-1}\{\text{Im } L_{ji}(\omega_l) / \text{Re } L_{ji}(\omega_l)\}$, 其中 L_{ji} 为第 j 点与第 i 点的互谱密度分解值, ω_l 为第 l 组的角频率; ϕ_{il} ——均匀分布于 $[0, 2\pi]$ 上的随机变量。 ω_l 和 ω_l' 由式(3)给出:

$$\begin{cases} \omega_l = (l - \frac{1}{2})\Delta\omega \\ \omega_l' = \omega_l + \delta\omega_l \end{cases} \quad (3)$$

在扰动角频率 ω_l' 中引入随机变量 $\delta\omega_l$ 是防止模拟的随机过程出现周期性, 为了模拟结果的准确性, $\delta\omega_l$ 要远小于 $\Delta\omega$ 。为了使 $H(t)$ 服从正态分布, 根据中心极限定理, N 的取值需要很大, 在采样频率一定时, $\Delta\omega$ 需要很小。当模拟脉动风速时长较长和模拟采样频率较高时, 计算量将很大。

对于单点脉动风速的模拟, 用频率 f 取代角频率 ω , 模拟式(2)可简化为式(4)。

$$\begin{cases} H(t) = \sum_{l=1}^N C_l \cos(2\pi f_l t + \phi_l) \\ f_l = (l - \frac{1}{2})\Delta f + \delta f \end{cases} \quad (4)$$

式中, $H(t)$ ——谐波叠加法得到的时间序列; C_l ——振幅, $C_l = \sqrt{2S_H(f_l)\Delta f}$, (其中 $S_H(f)$ 为风速序列 $H(t)$ 对应于频率 f_l 的理论功率谱密度); f_l ——第 l 组频率; Δf ——频率增量; δf ——均匀分布在 $[\Delta f'/2, \Delta f'/2]$ 上的随机变量, 且 $\Delta f' \ll \Delta f$; ϕ_l ——服从 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量。

1.2 WM函数

WM 函数的一般形式如式(5)所示^[16]:

$$W(t) = A \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{[(1 - e^{i\gamma^m t})e^{i\phi_m}]}{\gamma^{(2-D)m}} \quad (5)$$

式中, $W(t)$ ——WM 函数时间序列; A ——正实数; m ——整数; D ——分形维数, $1 < D < 2$; γ ——大于 1 的实数; ϕ_m ——任意相位, ϕ_m 为确定值时, 表示确定型 WM 函数, ϕ_m 为随机变量时, 表示随机型 WM 函数。

WM 函数为分形函数, 通过指定 D 的值, WM 函数可构造出指定分形维数的时间序列。

真实大气边界层风速具有随机性, 因此采用随机型 WM 函数模拟脉动风速更为合理, 取 ϕ_m 为 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布, 对应的随机型 WM 函数可用式(6)表示。

$$\text{Re } W(t) = A \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma^{(2-D)m}} [\cos \phi_m - \cos(\gamma^m t + \phi_m)] \quad (6)$$

可将 WM 函数看成是时域上无穷多个角频率为 γ^m 的波的叠加(图 1), 对应频域上有无穷多个离散频率。对于某一固定角频率 γ^m , 对应的振幅为 $\frac{1}{\gamma^{(2-D)m}}$, 当角频率增大 γ 倍, 频率振幅增大 $\frac{1}{\gamma^{(2-D)}}$ 倍。

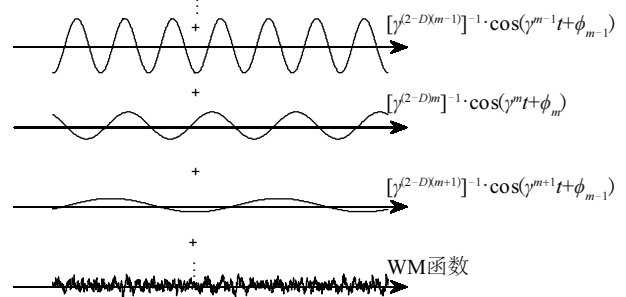


图 1 WM 函数频域分解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of WM function decomposition in frequency domain

WM 函数在相空间的频域从负无穷延伸到正无穷, 因此不存在最大或最小尺度。运用 WM 函数模拟脉动风速时, 可以根据实际情况, 截取适当的频率, 使其在截止频率范围内保持分形特征。

当 $\gamma \rightarrow 1$ 时, 经过频率平滑后的随机型 WM 函数的单边功率谱密度为:

$$\overline{S_{WM}(f)} = \frac{A^2}{2 \ln \gamma (2\pi)^{4-2D} f^{5-2D}} \quad (7)$$

可看出, WM 函数的功率谱密度与频率间存在幂指数规律, WM 函数的这种性质, 表明其可以模拟脉动风速的惯性区分。

工程上常用来描述脉动风速的功率谱有 Von Karman 谱、Davenport 谱、Simiu 谱、Kaimal 谱等。本文采用国际电工技术委员会推荐的 Kaimal 谱^[17], 带参数的 Kaimal 谱可用式(8)表示。

$$S(f) = \frac{\alpha z}{\bar{u}(1 + \beta n)^{5/3}} \quad (8)$$

式中, $n = \frac{fz}{\bar{u}}$ ——归一化频率; α 、 β ——待定参

数; \bar{u} ——平均风速; z ——离下垫面高度。在高频区, 谱密度与频率间近似满足式(9)所描述的幂律:

$$S(f) \approx \frac{\alpha}{\beta^{5/3}} \left(\frac{\bar{u}}{z} \right)^{2/3} f^{-5/3} \quad (9)$$

对比 Kaimal 谱在中高频的表达形式, 可以得到 WM 函数中 D 和 A 的取值:

$$\begin{cases} D = \frac{5}{3} \approx 1.7 \\ A = \left[2(2\pi)^{2/3} \alpha \beta^{-5/3} \left(\frac{\bar{u}}{z} \right)^{2/3} \ln \gamma \right]^{1/2} \end{cases} \quad (10)$$

1.3 谐波-分形法

谐波-分形法是根据 WM 函数可以模拟湍流惯性区成分的性质, 用 WM 函数模拟脉动风速的高频区域, 低频区域的脉动风速采用谐波叠加法模拟。

模拟脉动风速的最终表达式如式(11)所示:

$$u'(t) = H(t) + W(t) \quad (11)$$

下面将具体阐述谐波-分形法的性质及参数选取。

1.3.1 谐波-分形法的功率谱密度性质

图 2 展示了用谐波叠加和 WM 函数结合的方法模拟的功率谱密度示意图。谐波叠加模拟序列的功率谱密度在频率大于某一频率 f_c 时近似为零, WM 函数模拟序列的功率谱密度在频率小于 f_c 时近似为零, 定义该频率 f_c 为衔接频率, 即式(12)所示:

$$S = \begin{cases} S_H & f \leq f_c \\ S_{WM} & f > f_c \end{cases} \quad (12)$$

式中, S ——理论功率谱; S_H ——谐波叠加功率谱; S_{WM} ——WM 函数功率谱。

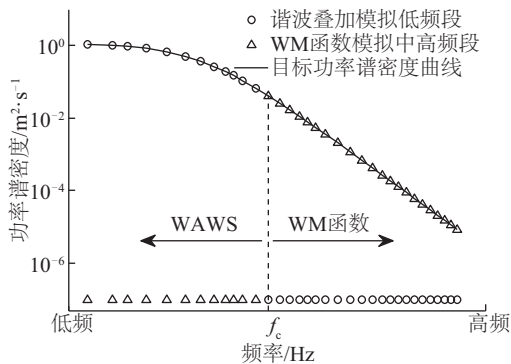


图2 谐波-分形法模拟脉动风速功率谱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wind fluctuations power spectral density using WAWS-WM method

风速谱的计算基于傅里叶变换, 由于傅里叶变换具有线性性质, 故谐波叠加法模拟的序列 $H(t)$ 与 WM 函数模拟的序列 $W(t)$ 功率谱密度之和便为模拟的脉动风速 $u'(t)$ 的功率谱密度:

$$S = S_H + S_{WM} \quad (13)$$

1.3.2 谐波-分形法的分形维数性质

常用的分形维数为计盒维数, 若 E 是任意图形, $N_\delta(E)$ 表示需要覆盖 E 的边长为 δ 的正方形的最少数量, 则 E 的计盒维数 $\dim_B E$ 由式(14)所定义:

$$\dim_B E = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_\delta(E)}{-\ln \delta} \quad (14)$$

计盒维数具有下面的性质, 若 g, h 是连续函数, $\text{graph}g$ 和 $\text{graph}h$ 表示函数 g 和 h 的图, 若 $\text{graph}g$ 和 $\text{graph}h$ 盒维数存在, 且 $\dim_B \text{graph}g \neq \dim_B \text{graph}h$, 则:

$$\dim_B \text{graph}(g+h) = \max(\dim_B \text{graph}g, \dim_B \text{graph}h) \quad (15)$$

因此, 模拟的脉动风速 $u'(t)$ 的分形维数为:

$$\dim_B u'(t) = \max\{\dim_B H(t), \dim_B W(t)\} = \dim_B W(t) \quad (16)$$

1.3.3 谐波-分形法的均值性质

截断后的随机型 WM 函数的均值也具有随机性, 为了保证脉动速度的时间平均为零, 即 $\bar{u}' = 0$ (\bar{X} 表示 X 的时间平均), 应对 WM 函数进行多次模拟试验, 选取其中满足 $\overline{W(t)} \approx 0$ 的序列, 由于 A 的取值一般较小, 故这一条件易得到满足。同时, 由于, $H(t)$ 的表达式中不包含直流分量, 故其均值为零。因此, 谐波-分形法能够满足 $\bar{u}' = 0$ 。

1.3.4 谐波-分形法衔接频率的确定准则

WM 函数模拟频率大于衔接频率 f_c 的高频区域, 因此在频率大于 f_c 时保持自相似分形结构。衔接频率的左端是低频区域, 右端是中高频区域, 衔接频率可看成是低频含能区和惯性子区的分界频率。在近地层中, 惯性子区的起始频率和高度以及大气稳定度有关, 稳定度越高, 起始频率越大。不稳定层结中, 惯性子区归一化起始频率满足 $n = \frac{fz}{\bar{u}} \sim 1$, 强稳定层结条件下, 惯性子区归一化起始频率满足 $n = \frac{fz}{\bar{u}} \sim 10$ [18]。实际模拟时, 可结合这样的规则选取 f_c : 选取某一频率, 使该频率对应的

WM 函数功率谱密度值与 Kaimal 谱的相对误差保持在 15%时的临界值范围内,即选取的 f_c 需要满足式(17)所示的不等式。

$$\frac{\ln(S_{WM}(f)) - \ln(S(f))}{\ln(S(f))} \leq 15\% \quad (17)$$

1.3.5 谐波-分形法截止频率的确定准则

首先,规定模拟时长为 T ,模拟采样频率为 F_s 。确定了衔接频率后,谐波叠加模拟的频率段和 WM 函数模拟的频率段也随之确定。将谐波叠加方法和 WM 函数模拟法的最小频率和最大频率分别称为对应的最小截止频率和最大截止频率。

谐波叠加模拟的频率段介于 0 Hz 和 f_c 之间。因此谐波叠加模拟的最小截止频率为 0 Hz,最大截止频率为 f_c 。

WM 函数中最小截止角频率为 $\gamma^{m_{\min}}$,最小截止频率需满足 $\gamma^{m_{\min}} \sim 2\pi f_c$ 。由于能谱在相空间的折叠效应,能谱能分辨的最大频率为采样频率的一半,即 $F_s/2$,故 WM 函数中最大截止角频率 $\gamma^{m_{\max}}$ 只需满足 $\gamma^{m_{\max}} \sim \pi F_s$ 即可。通过这种方法选取的 m_{\min} 和 m_{\max} 既能保持能谱的与目标谱一致,又能保证风速在模拟采样频率范围内保持分形特征。谐波-分形法中各参数的综合选取参见表 1。

表1 谐波-分形法参数选取准则

Table 1 Selecting rules of parameters using WAWS-WM method		
	谐波叠加	WM 函数
模拟频段	$[0 \text{ Hz}, f_c]$	$[f_c, F_s]$
具体参数	$\Delta f \ll 1/T$	$\gamma^{m_{\min}} \sim 2\pi f_c, \gamma^{m_{\max}} \sim \pi F_s$

注: f_c —衔接频率; Δf —频率增量; $\gamma^{m_{\min}}$ 、 $\gamma^{m_{\max}}$ —截止角频率; T —模拟时长; F_s —模拟采样频率。

2 案例模拟

本文给出一个模拟案例。用于模拟的观测资料来源于甘肃省民勤县的沙漠边界层野外观测实验(102°55'11"E, 38°37'44"N),下垫面为近似平坦沙漠,观测塔高 65 m,在观测塔的 2、4、8、16、32 和 62 m 高度装有 UAT-2 型超声风速仪(中国科学院大气物理研究所研发),采样频率为 100 Hz^[19]。观测数据在用于分析前均经过严格的质量控制,包括仪器的校准、超声风速仪声阵阴影效应的修正、野

点和随机脉冲的剔除等。限于篇幅所限,本文仅给出近地层中具有代表性的 16 m 高度上持续时长为 10 min 的脉动风速模拟结果,用于模拟的观测时段为 2014 年 4 月 15 日 03:00:00~03:10:00,此时空气为稳定层结条件。

2.1 模拟参数结果

对实测的顺风向、侧风向和垂直方向脉动风速分别进行 Kaimal 谱拟合,表 2 给出了拟合结果(γ 取 1.1)。

表2 实测脉动风速 Kaimal 谱拟合参数结果

Table 2 Parameter fitting of measurement using Kaimal spectrum		
风向	待定参数 α	待定参数 β
顺风向	0.289	6.527
侧风向	0.072	2.592
垂直方向	0.019	1.136

注:平均风速为 4.02 m/s。

表 3 给出使用谐波-分形法模拟顺风向、侧风向和垂直方向脉动风速的具体参数。

表3 谐波-分形法模拟脉动风速各参数

Table 3 Parameters of wind fluctuations using WAWS-WM method		
	谐波叠加参数	WM 函数参数
顺风向 频段	$[1.7 \times 10^{-5} \text{ Hz}, 0.14 \text{ Hz}]$	$[0.14 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}]$
顺风向 参数	$\Delta f = 1.7 \times 10^{-8} \text{ Hz}$ $\Delta f' = 1 \times 10^{-11} \text{ Hz}$	$A = 0.0573,$ $m_{\min} = -2, m_{\max} = 60$
侧风向 频段	$[1.7 \times 10^{-5} \text{ Hz}, 0.25 \text{ Hz}]$	$[0.25 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}]$
侧风向 参数	$\Delta f = 1.7 \times 10^{-8} \text{ Hz}$ $\Delta f' = 1 \times 10^{-11} \text{ Hz}$	$A = 0.0618,$ $m_{\min} = 5, m_{\max} = 60$
垂直方 向频段	$[1.7 \times 10^{-5} \text{ Hz}, 0.52 \text{ Hz}]$	$[0.52 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}]$
垂直方 向参数	$\Delta f = 1.7 \times 10^{-8} \text{ Hz}$ $\Delta f' = 1 \times 10^{-11} \text{ Hz}$	$A = 0.0623,$ $m_{\min} = 12, m_{\max} = 60$

注: Δf —频率增量; $\Delta f'$ —扰动频率增量; A —WM 函数系数; m_{\min} 、 m_{\max} —WM 函数截止频率参数;模拟时长(T)10 min,模拟采样频率(F_s)100 Hz。

2.2 实测与模拟对比

将通过对比实测和模拟脉动风速的统计特征来检验谐波-分形法的模拟效果,这些统计特征包括功率谱密度、计盒维数、阵风系数和概率密度分布。作为对比,同时给出使用 WM 函数模拟的脉动风速结果。图 3 仅展示了顺风向的实测和模拟脉动风速时程,以便对脉动风速整体概况有所了解。侧风向和垂直方向脉动风速时程可同样给出。WM 函数模拟的结果(图 3c)相对于实测(图 3a)和谐波-分形法模拟(图 3b)的结果包含了更多的低频成分。

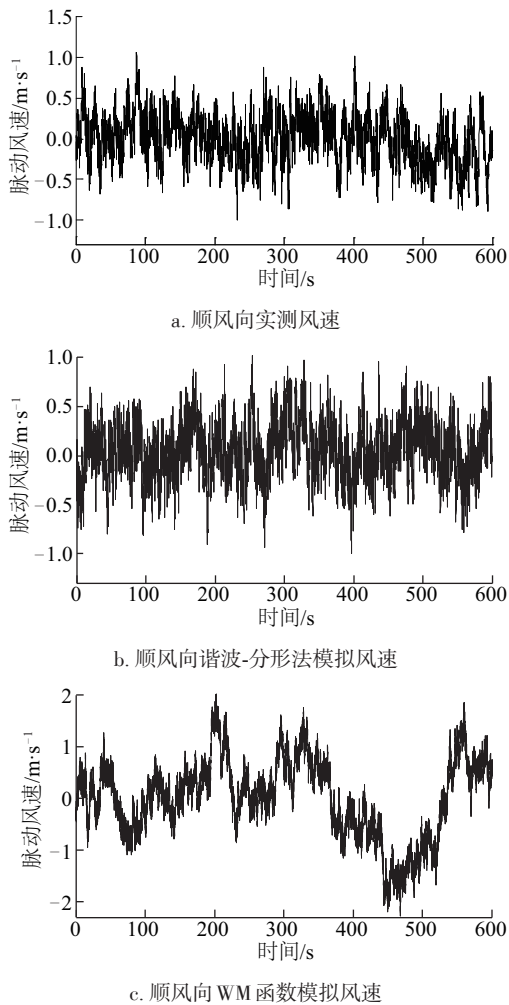
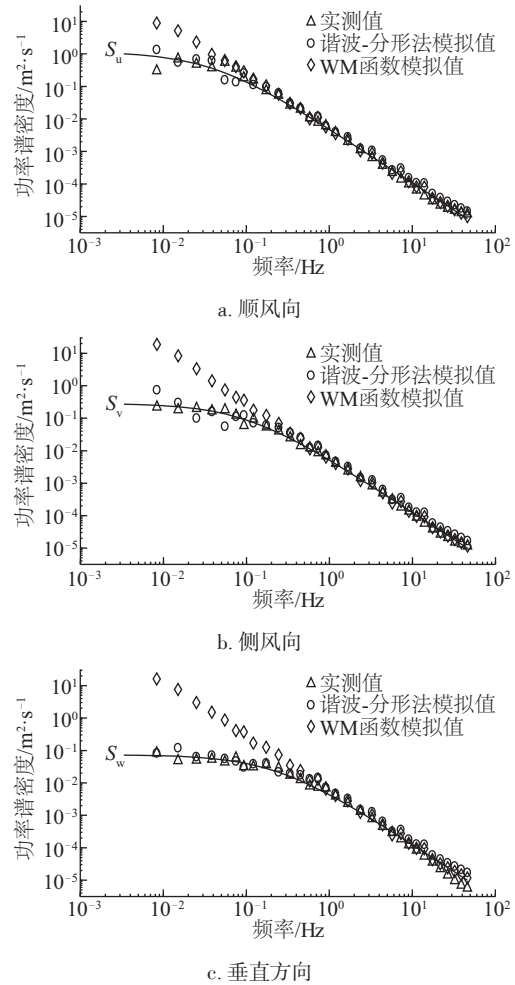


图 3 顺风向实测和模拟脉动风速对比

Fig. 3 Comparison between measurement and simulation in longitudinal direction

图 4 是实测脉动风速和模拟脉动风速经频率平滑处理后的功率谱密度曲线,可看出,在 3 个方

向上,WM 函数模拟的功率谱密度在低频段均存在偏高现象,这种偏高在垂直方向上表现地尤为明显,而谐波-分形法模拟的功率谱密度在各个方向上和实测功率谱密度均能很好地吻合。



注:实线为顺风向、侧风向和垂直方向的目标功率谱密度 S_u 、 S_v 、 S_w

图 4 实测和模拟脉动风速经频率平滑后的功率谱密度对比

Fig. 4 Comparison of PSD with frequency smoothing between measurement and simulation

阵风系数常用来表征风速中湍流或阵风的强度,其定义为:

$$G_u(t, T) = \frac{u(t, T)_{\max}}{\overline{U(T)}} \quad (18)$$

式中, $G_u(t, T)$ ——阵风系数; $\overline{U(T)}$ ——平均时间为 T 的顺风向平均风速(本文 T 取 10 min); $u(t, T)_{\max}$ ——对风速序列求滑动时间(t)滑动平均后的最大风速值。

图 5 是实测风速和模拟风速的阵风系数对比图,谐波-分形法模拟脉动风速的阵风系数和实测风速很接近,且在变化规律上一致,而 WM 函数模拟脉动风速的阵风系数与实测值偏差较大。

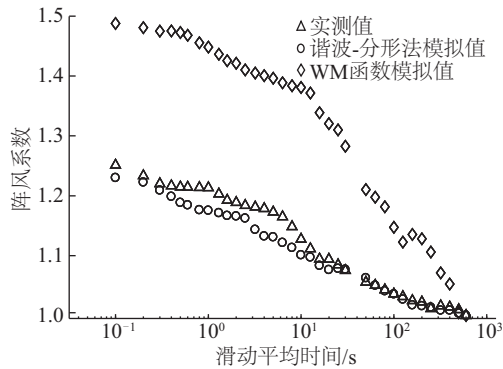
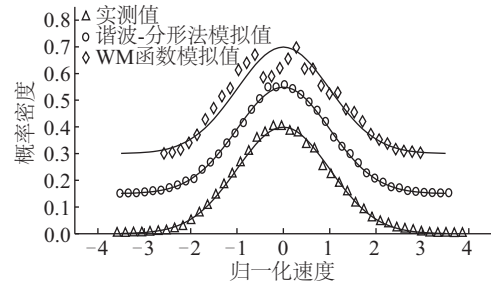
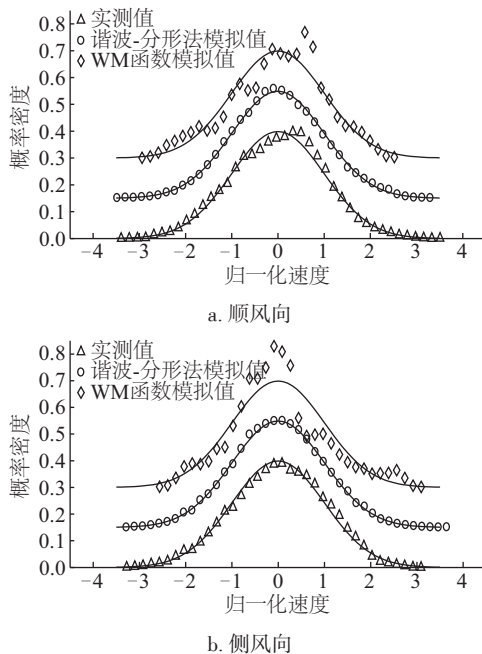


图 5 实测阵风系数和模拟阵风系数对比

Fig. 5 Comparison of gust factors between measurement and simulation

图 6 给出了顺风向、侧风向和垂直方向实测风速和模拟风速的归一化概率密度函数。在 3 个方向上,实测风速的归一化概率密度均接近高斯分布,相对于 WM 函数模拟的结果,谐波-分形法模拟的结果更接近高斯分布。表 4 给出了实测和模拟结果统计量的数字特征,从表中可看出,谐波-分形法模拟的结果不仅很好地模拟出脉动风速的惯性区分形特征,而且其他统计特征如峰度、偏度等更接近实测风速。



c. 垂直方向

注:实线为高斯分布,为了显示清楚,谐波-分形法模拟值上移了 0.15 个单位,WM 函数模拟值上移了 0.3 个单位

图 6 顺风向、侧风向和垂直方向的实测和模拟归一化脉动风速概率密度对比

Fig. 6 Comparison of normalized wind fluctuations PDF between measurement and simulation in longitudinal, lateral and vertical direction

表 4 实测和模拟脉动风速的数字特征对比

Table 4 Comparison of numerical characteristics between measured and simulative wind fluctuations

参数	实测值	谐波-分形法	WM 函数
标准差 σ	$\sigma_u=0.29$	$\sigma_u=0.28$	$\sigma_u=0.76$
	$\sigma_v=0.26$	$\sigma_v=0.22$	$\sigma_v=0.96$
	$\sigma_w=0.16$	$\sigma_w=0.18$	$\sigma_w=0.79$
峰度 K	$K_u=2.86$	$K_u=2.98$	$K_u=2.73$
	$K_v=2.77$	$K_v=3.00$	$K_v=3.26$
	$K_w=3.08$	$K_w=3.00$	$K_w=2.37$
偏度 SK	$SK_u=-0.04$	$SK_u=0.03$	$SK_u=-0.30$
	$SK_v=-0.15$	$SK_v=0.04$	$SK_v=0.41$
	$SK_w=0.14$	$SK_w=-0.01$	$SK_w=-0.14$
计盒维数 d	$d_u=1.57$	$d_u=1.61$	$d_u=1.67$
	$d_v=1.61$	$d_v=1.63$	$d_v=1.64$
	$d_w=1.61$	$d_w=1.66$	$d_w=1.67$
惯性区 幂率 k	$k_u=-1.72$	$k_u=-1.63$	$k_u=-1.65$
	$k_v=-1.66$	$k_v=-1.60$	$k_v=-1.68$
	$k_w=-1.66$	$k_w=-1.62$	$k_w=-1.63$

注:下标 u, v, w —顺风向、侧风向、垂直方向。

3 结 论

脉动风速的模拟对提高风电场发电量、控制风力发电机运行风险具有重要意义,传统模拟方法对湍流脉动风速的物理机制描述不够充分。大气湍

流在含能区和惯性区具有不同特点,针对这种特性,本文提出用谐波-分形法对脉动风速进行模拟,为风电场中脉动风速的模拟提供了新的思路。对均一下垫面的脉动风速进行个例模拟,得到以下结论:

基于谐波-分形法的湍流脉动风速模拟,克服了谐波叠加法不能模拟分形结构和WM函数对低频段功率谱模拟较差的缺点,最大限度还原了真实脉动风速的功率谱特征和分形特点。该方法模拟的脉动风速在阵风系数、概率密度等统计规律上与实测脉动风速十分接近。同时该方法具有计算量小的优点。

致 谢:感谢中国科学院大气物理研究所罗卫东高级工程师提供的观测数据。

[参考文献]

- [1] 薛 桁,朱瑞兆,杨振斌,等.中国风能资源贮量估算[J].太阳能学报,2001,22(2):167—170.
- [1] Xue Heng, Zhu Ruizhao, Yang Zhenbin, et al. Assessment of wind energy resources in China[J]. Acta Energiæ Solaris Sinca, 2001, 22(2): 167—170.
- [2] 罗承先.世界风力发电现状与前景预测[J].中外能源,2012,17(3):24—31.
- [2] Luo Chengxian. Wind power generation today in the world and prospect forecast[J]. Sino-Global Energy, 2012, 17(3): 24—31.
- [3] 陈 欣,宋丽莉,黄浩辉,等.中国典型地区风能资源特性研究[J].太阳能学报,2011,32(3):331—337.
- [3] Chen Xin, Song Lili, Huang Haohui, et al. Study on characteristics of wind energy resources in two typical areas in China[J]. Acta Energiæ Solaris Sinca, 2011, 32(3):331—337.
- [4] Peña A, Floors R, Sathe A, et al. Ten years of boundary-layer and wind-power meteorology at Høvsøre, Denmark[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2016, 158(1): 1—26.
- [5] 芮晓明,马志勇,康传明.小尺度风特性建模与分析[J].太阳能学报,2007,28(12):1335—1338.
- [5] Rui Xiaoming, Ma Zhiyong, Kang Chuanming. Modeling and analysis of wind characteristics with little periods [J]. Acta Energiæ Solaris Sinca, 2007, 28(12): 1335—1338.
- [6] 张希黔,葛 勇,严春风,等.脉动风场模拟技术的研究与进展[J].地震工程与工程振动,2008,28(6):206—212.
- [6] Zhang Xiqian, Ge Yong, Yan Chunfeng, et al. Advances in research of simulation technology of fluctuation wind loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 206—212.
- [7] 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.
- [8] 胡 非.湍流、间歇性与大气边界层[M].北京:科学出版社,1995.
- [8] Hu Fei. Turbulence, intermittency and atmospheric boundary layer[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [9] Li Xin, Hu Fei, Liu Gang, et al. Multi-scale fractal characteristics of atmospheric boundary-layer turbulence [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001(5): 787—792.
- [10] Chang Tian-Puo, Ko Hong-Hsi, Liu Feng-Jiao, et al. Fractal dimension of wind speed time series[J]. Applied Energy, 2012, 93: 742—749.
- [11] 陈艾荣,王 毅.基于小波方法的随机脉动风模拟[J].同济大学学报:自然科学版,2005,33(4):427—431.
- [11] Chen Airong, Wang Yi. Simulation of random fluctuating wind speed based on wavelet method[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(4): 427—431.
- [12] 刘 罡,李 昕,胡 非.大气边界层风速脉动的分形模拟[J].气候与环境研究,1998,3(3):260—265.
- [12] Liu Gang, Li Xin, Hu Fei. Fractal representation of wind speed fluctuation in atmospheric boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research, 1998, 3(3): 260—265.
- [13] 刘 磊,胡 非,李 军,等.基于Weierstrass-Mandelbrot函数的分形风速脉动仿真[J].气候与环境研究,2013,18(1):43—50.
- [13] Liu Lei, Hu Fei, Li Jun, et al. On the use of Weierstrass-Mandelbrot function to simulate fractal wind fluctuation[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(1): 43—50.
- [14] Humphrey J A C, Schuler C A, Rubinsky B. On the use of the Weierstrass-Mandelbrot function to describe the fractal component of turbulent velocity[J]. Fluid

- Dynamics Research, 1992, 9(1-3): 81—95.
- [15] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random processes and its applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 25(1):111—128.
- [16] Berry M V, Lewis Z V. On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function[J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1980, 370(1743): 459—484.
- [17] IEC 61400-1 Amd. 1 Ed. 3.0 en; 2010 Amendment 1-wind turbines-Part 1: Design requirement, international electrotechnical commission[S]. IEC, 2010.
- [18] Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric turbulence: Models and methods for engineering applications [M]. New York: Wiley, 1984.
- [19] Cheng Xueling, Hu Fei, Zeng Qingcun. Stochastic method to determine the scale and anomalous diffusion of gusts in a windy atmospheric boundary layer[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(34): 4890—4898.

SIMULATION OF TURBULENT WIND FLUCTUATIONS USING WAWS-WM METHOD

Lyu Rui^{1,2}, Hu Fei¹, Liu Lei¹, Cheng Xueling¹

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Simulation of wind fluctuations has received extensive attention in wind engineering research, especially in wind energy research. Wind fluctuations in atmosphere are multi-scale and self-similar fractal. Self-similar fractal characteristic of wind fluctuations is often neglected in conventional simulations. A method called WAWS-WM is proposed in our research. Both the spectral and fractal characteristics of wind fluctuations can be simulated well using this method. By comparing the statistical characteristics of simulation and measurement, such as gust factor and probability density, we find that simulation and measurement follow similar statistical laws. This method can effectively simulate wind fluctuations.

Keywords: turbulent wind; fractal; weighted amplitude wave superposition; Weierstrass-Mandelbrot function