

文章编号:0254-0096(2016)07-1774-06

基于CFD方法的地面光伏阵列风压时程特性研究

牛 斌¹, 张 超¹, 侯 巍¹, 王立敏¹, 马 丽², 漆文刚³

(1. 中国建筑 设计研究院(集团) 中国建筑设计咨询有限公司, 北京 100011; 2. 北京港源建筑装饰工程有限公司, 北京 100142;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 针对光伏阵列所受风压复杂且具有时程特性, 采用CFD方法分析平均风及脉动风影响下多排阵列风荷载的时间历程, 并与稳态场结果对比。研究表明: 基于改进的谐波叠加法和 Davenport 谱编写的计算程序所得的脉动风信号在频域能量分布上与目标谱相近; 流场中漩涡脱落使得平均风下壁面受力呈周期性振荡, 其幅值除首排阵列外相对稳态场均有所增大, 考虑脉动风后, 各排受力幅值相对平均风又有所增大; 脉动风影响下光伏板受力主频范围扩大, 与结构固有频率更接近; 顺风向各排所受风压存在一定的折减。光伏阵列排布及结构设计时, 应基于脉动风计算结果划分风荷载区域并考虑防振抗振。

关键词: CFD; 光伏阵列; 风压时程; 脉动风; 净力系数; 频谱转换

中图分类号: TK51

文献标识码: A

0 引 言

在光伏结构设计中, 强风下光伏板所受载荷不容忽视。有学者关注光伏结构受风力的影响, 并应用数值模拟开展相关研究。Banks^[1]率先提出光伏阵列风压的计算机模拟会直接影响未来光伏产业的发展。Chung 等^[2]对光伏结构所受风吸力及压力系数进行研究。Bitsuamlak 等^[3]采用流体力学计算软件对光伏阵列进行风载模拟。Yu^[4]基于 CFD 方法采用不同湍流模型模拟稳态条件下光伏板在强风下的受力情况, 通过与现场实测结果对照验证计算机模拟的可行性和有效性。Warsido 等^[5]以阵列间距为参数研究其对光伏结构风压的影响。但上述文章均未考虑流场的瞬时特性。Väsies^[6]在对安装在有无女儿墙平屋顶上的光伏结构进行数值模拟分析, 基于计算机模拟结果对结构设计提出指导, 但并未考虑脉动风影响下结构的瞬态特性。

由于光伏阵列各区域所受风压不同、阵列受力不均匀等特点, 传统的工程算法对光伏结构进行风荷载计算已不再适用。此外, 采用稳态方法数值模拟光伏阵列流场忽略了流场的瞬态特性, 不能反映漩涡脱落引起的结构受力时程变化, 导致分析结果不具说服力。如何运用计算流体力学方法刻画光

伏阵列风压时程及脉动风场的随机特性, 并将之应用于光伏结构的风载评估, 为光伏阵列的结构设计提供指导, 尚缺少系统的研究。

本文利用谐波叠加法基于 Davenport 谱生成脉动风速时程信号。应用 CFD 方法研究地面光伏阵列的风压特性, 通过分析稳态、平均风和考虑脉动风时流场及光伏板气动力特性, 对光伏阵列及结构进行风荷载评估, 为光伏结构设计提供技术指导。

1 脉动风速时程的数值模拟

自然风观测记录表明瞬时风速包含周期 10 min 以上的平均风和周期几秒钟的脉动风^[7]。平均风在周期内速度及方向不变, 而脉动风则具有明显的随机性, 一般用零均值平稳高斯随机过程来描述。为使模拟的近地大气湍流边界层更符合实际, 脉动风速谱选用 Davenport 谱, 其表达式为:

$$S_u(f) = 4k\bar{V}_{10}^2 \frac{x}{f(1+x^2)^{4/3}}, \quad x = \frac{1200f}{\bar{V}_{10}} \quad (1)$$

式中, S_u —— Davenport 脉动风速谱; \bar{V}_{10} —— $z=10$ m 高处的平均风速; f —— 频率, Hz; k —— 反映地面粗糙度的系数, 其值由王修琼等^[8]所提出的计算公式确定。本文则采用基于平稳高斯随机过程的谐波叠加法(WAWS法)模拟脉动风速时程, 并且按

收稿日期: 2014-07-07

通信作者: 牛 斌(1989—), 男, 硕士、助理研究员, 主要从事太阳能和光电转换技术、流固耦合及计算力学方面的研究。lcgxn@126.com

时间抽取快速离散傅里叶变换(DIT-FFT)对该方法进行优化^[9,10]。

采用 Matlab 编程生成边界脉动风时程,其中时间步长取 0.02 s,总时间为 200 s,得到的脉动风模拟的功率谱与 Davenport 谱的对照及风速时程如图 1 所示, n 为频率, V_f 为脉动风速。从图中可知,脉动风时程基本符合零均值,其主频在 0.01~1 Hz 之间,谐波叠加法模拟的风速在频域能量分布上与目标谱相近,较好地反映了风速在频域上的能量分布。

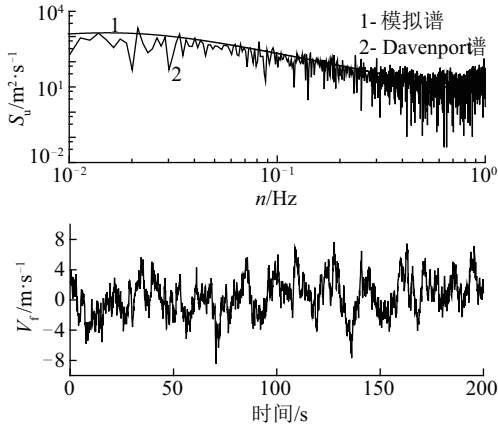


图1 脉动风速谱及时程

Fig. 1 Spectrum and time history of the fluctuating wind

2 流场的CFD模拟

2.1 理论与方法

流场求解方程采用基于 Favre 平均的 N-S 方程,其数学描述如下^[11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} + \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial P}{\partial t} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_i \left\{ (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right\} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

对于不可压缩流动,密度 ρ 不随时间变化。为保证上述方程封闭,选用 SST $k-\omega$ 双方程湍流模型,其中湍动能 k 和耗散率 ω 由式(6)、式(7)确定。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \bar{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, F_1 —— 调配函数。湍流涡粘性系数由式(8)确定。

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (7)$$

该模型中各变量的物理意义及求解可见参考文献[12]。

通过给定入口风速边界条件,求解流体控制方程,得到流体域内各变量的分布情况,即可获得光伏阵列所受风压及其时程变化。对风压时程进行快速傅里叶变换(FFT),可得到光伏板所受风压的主频。

2.2 计算模型与参数

计算模型选用我国某地面光伏电站标准光伏组件,光伏板的几何尺寸:20 m×3.43 m×0.1 m,安装倾角 25°,底部距地面高度 0.3 m;选用光伏板间距 D 为计算参数,取值范围:4.26 m + $n \times 0.5$ m, $n=0 \sim 8$ 。

计算 5 排阵列,流体几何模型大小为:120 m×30 m×35 m,数值算法为有限体积法,计算时间 40 s。为保证计算精度,靠近结构壁面区域网格逐渐加密。壁面边界层为 10 层,最小尺寸 0.001 m,增长系数 1.2。计算模型及边界层网格划分如图 2 所示,其中 $Z=0$ 平面为几何模型的对称面。

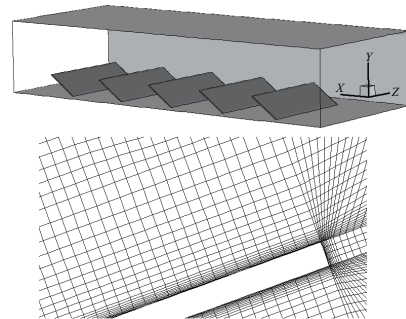


图2 计算模型及壁面附近网格划分

Fig. 2 Computational model and mesh around the wall

来流垂直于光伏板排布方向(北风)。来流参数:

$$\begin{cases} V = \bar{V} + V_f \\ p = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \\ Re = 2.5 \times 10^6 \text{ 1/m} \\ T = 288.15 \text{ K} \end{cases}$$

其中,平均风速 $\bar{V} = 30 \text{ m/s}$, V_f 为脉动风速;下游流出为压力边界,相对压力为零;底部地面及光伏板壁面为无滑移边界。

3 计算结果和分析

3.1 流场计算结果

图 3 为 $D=6.26 \text{ m}, t=15 \text{ s}$ 时 $Z=0$ 面的流线分布图,由流线图可得,自然风流入光伏阵列后绕过第一排光伏板,在板后形成一主漩涡,其尺度与 Re 大小有关;同时由于剪切层分离后再附,产生了一定的回流,在光伏板间也会有局部涡的存在;中心大涡与局部涡方向相反,这些涡都会对光伏板产生一定“吸力”。涡旋结构的相互影响,使得流动变得十分复杂,再次证明了光伏阵列中采用 CFD 方法预测风载的必要性。

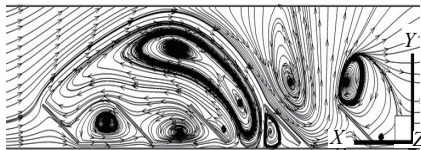


图 3 $t=15 \text{ s}$ 时 $Z=0$ 面上流线分布

Fig. 3 Streamline distribution on plane $Z=0$ at 15 s

3.2 稳态场光伏阵列气动力特性

根据来流条件计算光伏阵列所受风压环境,图 4 为板间距 6.26 m ,北风,稳态场光伏板表面压力分布云图,其中上、下图分别为迎风、背风面风压分布。由图 4 可得,第 1 行组件迎风面承受风压最大,

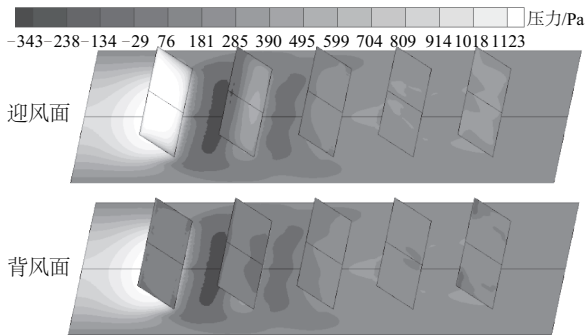


图 4 稳态场光伏板壁面压力云图

Fig. 4 Pressure contours on PV panels under steady field

其余顺风向组件所荷载荷均有不同程度折减。由于板间涡旋的存在,在前三排板间均存在一定的负压区,而 4、5 排间的局部涡旋在板的偏上方,故两板间为弱正压。

由流场计算得出的壁面压力值以参考动压为基准做归一化处理,可得光伏板面无量纲压力系数 C_p :

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho \bar{V}_h^2} \quad (8)$$

式中, p ——光伏板壁面压力; p_0 ——参考高度 h 下的平均静压; ρ ——空气密度; \bar{V}_h ——参考高度 h 下的平均风速。

定义净压力系数为迎风面与背风面压力系数之差,则其时间历程 $\Delta C_{pN}(t)$ 如式(10)所示:

$$\Delta C_{pN}(t) = C_{pW}(t) - C_{pL}(t) \quad (9)$$

式中,下标 N、W 和 L ——分别表示净压力、迎风面和背风面。对其进行面积分得到垂直壁面方向的总净力 $F_N(t)$:

$$F_N(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{V}_h^2 \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{2} C_{pWi}(t) A_{Wi} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} C_{pLi}(t) A_{Li} \right) \quad (10)$$

式中, m 、 n ——迎风面和背风面上网格数量; A_{Wi} 、 A_{Li} —— C_{pWi} 和 C_{pLi} 对应的壁面单元面积。

通过归一化处理将 $F_N(t)$ 转为如下无量纲形式:

$$C_{FN}(t) = \frac{F_N(t)}{\frac{1}{2} \rho_a \bar{V}_h^2 BL} \quad (11)$$

式中, B 、 L ——光伏板的宽度和长度。至此,在光伏结构设计中起关键作用的风荷载计算转变为净力系数 $C_{FN}(t)$ 的计算和分析。

图 5 为稳态条件下,不同光伏阵列间距下各排 C_{FN} 变化曲线。从图中可得,迎风第一排 C_{FN} 为最大

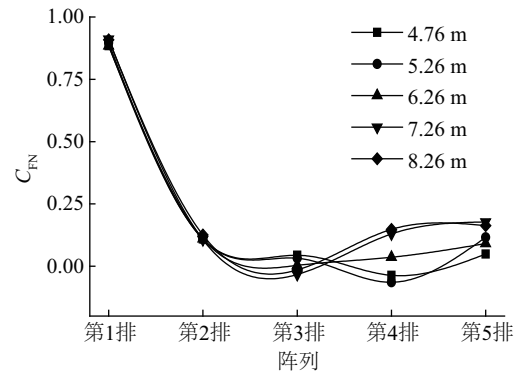


图 5 光伏阵列各排 C_{FN} 曲线图

Fig. 5 C_{FN} variation among the rows of photovoltaic array

正值,说明第一排光伏板受较大的“掀起力”;之后各排的净力系数均有不同程度折减,其中第2排相对第1排的折减最为显著,其值约为第1排的13%,后排压力系数变化相对平缓。

后排中 C_{FN} 出现负值,即板受“下压力”,是因为剪切层分离后再附,板迎风侧为局部涡而背风侧为整体涡(参考图3),涡旋不同导致其净力系数为负。具体数值结果详见表1,由表可得,在间距较小(4.26~5.76 m)时, C_{FN} 负值出现在第4排,间距较大(7.26~8.26 m)时负值在第3排,这是因为整体涡的位置与雷诺数相关,涡心与首排板距离变化相对较小,随着板间距的增大,净力系数负值由第4排转至第3排。

表1 不同间隔下光伏阵列各排 C_{FN} 计算结果

Table 1 Results of C_{FN} on PV rows at different distance

间距/m	第1排	第2排	第3排	第4排	第5排
4.26	0.75	0.10	0.05	0.03	-0.07
4.76	0.89	0.11	0.05	-0.04	0.05
5.26	0.90	0.11	0.03	-0.07	0.12
5.76	0.89	0.11	0.03	-0.05	0.14
6.26	0.89	0.11	0.01	0.04	0.09
6.76	0.91	0.12	0.01	0.07	0.18
7.26	0.91	0.11	-0.04	0.13	0.18
7.76	0.92	0.08	-0.05	0.16	0.18
8.26	0.91	0.13	-0.02	0.15	0.17

由于中心涡位置的相对固定性及不同间距对首排风载影响较小,研究阵列排布间距对风载的影响意义并不大。来流下第1排光伏板为主要受力结构,其余阵列受首排保护受力较小;因此,光伏阵列排布时,受风荷载影响最大的为外围光伏结构。

3.3 瞬态场光伏阵列气动力特性

图6为板间距5.76 m,北风, $t=25$ s时光伏板表面压力分布云图,其中上、下图分别为迎风面和背风面的风压分布。图7a为间距5.76 m,平均风作用下第4排光伏板净力系数变化时程曲线与稳态计算结果对比;采用Welch谱估计法进行快速傅里叶变换(FFT),得到平均风下净力系数功率谱密度如图7b所示。考虑脉动风后的净力系数时程曲线及其频谱分析如图8所示。

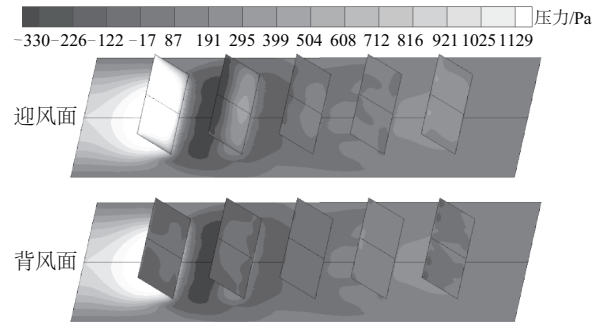
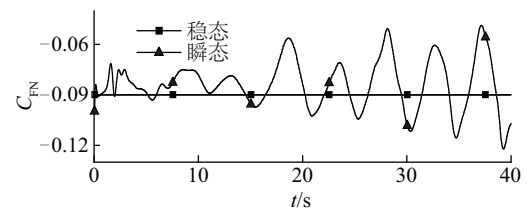
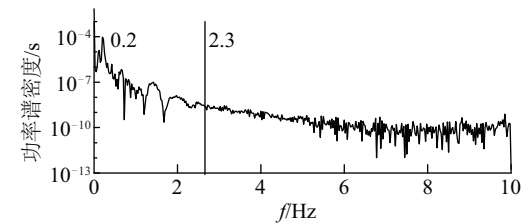


图6 $t=25$ s平均风下光伏板壁面压力云图

Fig. 6 Pressure contours on PV panels at 25 s under average wind

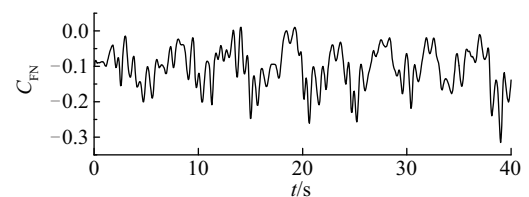


a.

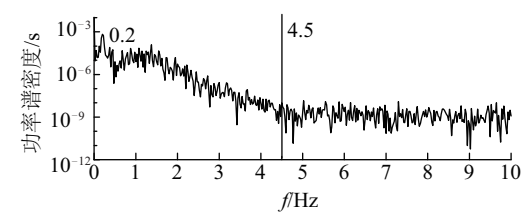


b.

图7 平均风下第4排阵列 C_{FN} 时程曲线及功率谱密度
Fig. 7 Time-history and power spectral density of C_{FN} on row 4, under average wind



a.



b.

图8 考虑脉动风时第4排 C_{FN} 时程曲线及功率谱密度
Fig. 8 Time-history and power spectral density of C_{FN} on row 4, consider the fluctuating wind

图 9 为第 2、3 排平均风和考虑脉动风作用下净力系数变化时程曲线对比。

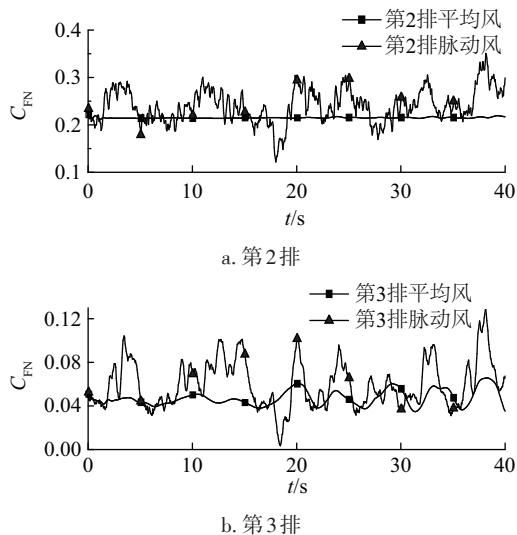


图 9 平均风和考虑脉动风下第 2 排和第 3 排 C_{FN} 时程曲线对比

Fig. 9 Comparison of time-histories of C_{FN} between average and fluctuating winds on row 2 and row 3

由表 1 和图 6~图 9 可得:

1) 相对稳态场计算结果, 平均风作用下的瞬态过程由于漩涡脱落会引起壁面风压呈周期性变化, 除首排外各排压力幅值相对稳态场均有所增大。

2) 功率谱中的最大主频即为漩涡脱落频率, 平均风及考虑脉动风作用两种情况下最大主频均为 0.2 Hz, 说明考虑脉动风对主漩涡脱落频率影响不大。

3) 由于光伏阵列与地面距离较小且呈多排分布, 阻止了漩涡的完整脱落, 使得平均风作用下光伏板净力系数主频范围较大 (0~2.3 Hz), 即整体漩涡脱落后被“分散”。

4) 考虑脉动风后分散效应更加明显, 最大主频依然存在, 但主频范围扩大 (0~4.5 Hz), 使得其与结构固有频率更加接近。因此, 在结构设计中需引起重视, 考虑相关防振抗振措施。

5) 与仅考虑平均风相比, 加入脉动风后, 各排净力系数的平均幅值均又有所增大, 说明基于稳态场和仅考虑平均风的瞬态场计算结果进行结构设计是不安全的。

6) 考虑脉动风时, 折减效应依然存在, 第 1 排光伏板为主要受力结构, 其余阵列受首排保护受力

较小; 光伏阵列排布时, 受风荷载影响最大的为外围光伏结构, 因此在结构设计时可考虑脉动风影响下的风压折减, 划分风荷载区域, 在保证结构强度、刚度、稳定性的前提下节约成本。

4 结 论

本文采用 CFD 方法研究地面光伏阵列的风压特性。其中脉动风速时程利用改进的谐波叠加法基于 Davenport 谱生成。模拟的风速在频域能量分布上与目标谱相近, 验证了其准确性。通过分析不同间距下稳态、平均风和考虑脉动风时流场及光伏板气动力特性, 说明了基于 CFD 计算结果进行结构设计的必要性, 同时证明了基于稳态场结果或仅考虑平均风下的瞬态计算结果进行结构设计会偏于不安全。通过研究平均风及考虑脉动风影响下结构净力系数的功率谱, 验证了结构设计中参考脉动风计算结果进行防振抗振的必要性。考虑到光伏阵列排布时, 受风荷载影响最大的为外围光伏结构, 提出在光伏阵列排布及结构设计时需基于脉动风计算结果考虑风压折减, 划分风荷载区域, 节约成本。

致 谢: 感谢中国建筑设计研究院、中国建筑设计咨询公司对该项目的资助; 感谢黄小东总工程师、姜涛总工程师对项目的大力支持; 感谢中国建筑设计咨询公司光伏事业部胡淑晶、周振宇、张一贺及任国华工程师在技术方面给予的大力帮助!

[参考文献]

- [1] Banks D. How wind load studies will impact the solar industry [EB/OL]. https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0419_full%20paper.pdf, 2014-03-21.
- [2] Chung K, Chang K, Liu Y. Reduction of wind uplift of a solar collector model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(8-9): 1294—1306.
- [3] Bitsuamlak G, Dagnew A, Erwin J. Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD [A]. *Proceedings of the 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)* [C], Chapel Hill, North Carolina, USA, 2010.
- [4] Yu Y. Numerical simulation of wind load on roof mounted solar panels [D]. Windsor, Canada: University

- of Windsor, 2012.
- [5] Warsido W P, Bitsuamlak G T, Barata J, et al. Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 48(6): 295—315.
- [6] Văsies G, Axinte E, Elena-Carmen T. Numerical simulation of wind action on solar panel placed on flat roofs with and without parapet[J]. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași-Construction and Architecture*, 2012, 62(1): 139—155.
- [7] Simiu E, Scanlan R H. *Wind effects on structures: Fundamentals and applications to design* (3 edition)[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1996, 35—48.
- [8] 王修琼, 崔剑峰. Davenport 谱中系数K的计算公式及其工程应用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(7): 849—852.
- [8] Wang Xiuqiong, Cui Jianfeng. Formula of coefficient kin expression of davenport spectrum and its engineering application[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science Edition)*, 2002, 30(7): 849—852.
- [9] 孙 振. 建筑结构风荷载的计算机模拟与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [9] Sun Zhen. *Computer simulation and analysis of wind loading of structures*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [10] Folland G B. *Fourier analysis and its applications* [M]. Washington: American Mathematical Society, 1992.
- [11] Biswas G(Editor), Eswaran V(Editor). *Turbulent flows: Fundamentals, experiments and modeling* (1 edition)[M]. Delhi: Narosa, 2002.
- [12] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598—1605.

TIME HISTORY ANALYSIS OF WIND LOAD ON ARRAYED SOLAR PANELS BASED ON CFD SIMULATIONS

Niu Bin¹, Zhang Chao¹, Hou Wei¹, Wang Limin¹, Ma Li², Qi Wengang³

(1. *China Building Design Consultants Co., Ltd., China Architecture Design and Research Group, Beijing 100011, China*; 2. *Beijing GangYuan Architectural Decoration Design Co., Ltd., Beijing 100142, China*; 3. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: Based on the CFD method, transient wind loads on arrayed solar panels under average and fluctuating wind were studied. The fluctuating wind time-history was generated by compiling frequency-time transform programs based on the advanced WAWS method and Davenport spectrum. Comparing with the result of steady field, the analysis showed that transient loads under average wind appeared periodic vibration with time due to vortex shedding, and the amplitude is higher than steady result. Moreover, the amplitude increased after considering fluctuating wind. The main frequency spread out over a wider range under the influence of fluctuating wind, which is close to structure's natural frequencies. Reduction exists between first and second rows along wind direction. Therefore, division of wind load regions and consideration of anti-vibration based on the fluctuating wind results are necessary when aligning the PV arrays and designing the structure of PV panels.

Keywords: CFD; photovoltaic array; wind load time-history; fluctuating wind; net force coefficient; spectrum transformation