

屋面光伏板风荷载特性数值分析

张爱社^{*1}, 高翠兰², 申成军³, 张 兵⁴

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101; 2. 山东建筑大学 交通工程学院, 济南 250101;
3. 山东城市建设职业学院 建筑工程系, 济南 250103; 4. 山东大学 后勤保障部, 济南 250100)

摘 要:风荷载在屋面光伏阵列结构体系设计中起控制作用。采用计算风工程的方法分析讨论了屋面光伏板的风荷载特性。数值算法采用分离涡模拟方法。数值计算结果与现有风洞实验数据的比较,验证了本文方法的正确性。考虑影响光伏板风荷载的因素主要有光伏板在屋面上的安装位置、安装倾角、光伏阵列之间的距离和风向等。计算结果表明,屋面处脱落的涡对安装在不同位置的光伏阵列风荷载的影响较明显。当倾角由 15° 增加到 45° 时,光伏板受到的风荷载随着倾角的增加而增大。在一定阵列间距范围内,光伏板风荷载主要表现为前排对下游光伏板的遮挡影响。本文方法与结果能为屋面光伏建筑结构设计提供重要参考。

关键词:风荷载;光伏板;计算风工程;分离涡模拟;湍流

中图分类号: TU312; O368

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2016)05-0683-06

1 引 言

太阳能作为绿色清洁能源,是世界各国重点关注和发展的新兴能源之一。屋面光伏系统是太阳能光伏发电技术在建筑中应用的重要组成部分。对于屋面光伏系统,光伏面板受到的风荷载是结构的主要控制荷载,光伏阵列的抗风能力设计非常重要。

目前国内外对于屋面光伏板或光伏阵列风荷载的确定主要参考相关的荷载规范或依靠风洞实验的结果。国外规范最具代表性的是美国的 ASCE/SEI 7-10 (American Society of Civil Engineers)^[1],国内规范是《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[2]。这些规范都没有给出类似光伏阵列结构类型的荷载取值,因此对屋面光伏面板所受风荷载进行系统、深入的研究是非常必要的。近几年,国外对屋面光伏阵列风荷载进行了一系列的风洞实验^[3-6],讨论的主要影响因素包括光伏阵列安装倾角、离开屋面的高度、阵列间距以及建筑物设计相关参数等。文献[3]通过风洞测压实验研究了屋面光伏阵列的气动机理,认为较大倾角的光伏板所受风荷载主要由于其自身产生的湍流起控制作用,而倾

角较小的光伏板风荷载主要是由风压均衡化引起的。文献[4,5]详细讨论了光伏阵列在屋面上的位置对光伏板风荷载的影响。尽管进行了很多有意义的风洞实验,但很难从不同的实验结果得出通用的规律,甚至有些结论是相互矛盾的^[7]。因此,有必要对屋面光伏阵列风荷载问题进行深入的讨论。另外,计算风工程 CWE (computational wind engineering) 在科研和工程实践中正发挥着越来越重要的作用。Shademan 等^[8]采用计算流体力学方法对单个和阵列光伏板风荷载进行了分析,讨论了阵列间距对风荷载的影响。Bitsuamlak 等^[9]采用大涡模拟方法研究了固定于地面的光伏系统风荷载问题,结果显示计算值低估了足尺模型实测的平均风压值。Meroney 等^[10]采用雷诺平均方法,比较了不同湍流模型的计算精度。文献[11]也是基于雷诺平均方法,湍流模型采用剪切应力输运模型,分析了地面上单个光伏板的风荷载分布。上述文献的计算结果主要采用雷诺平均的湍流模型进行计算分析。本文基于减少计算量和提高计算精度的思路出发,采用分离涡数值模拟方法 DES (detached eddy simulation)^[12]对屋面光伏板和光伏阵列风荷载进行模拟分析。在近壁面湍流区域采用雷诺平均模型,在非平衡湍流区采用大涡模拟,而分离涡方法就是处理雷诺平均法与大涡模拟分区边界条件的方法之一。

收稿日期: 2015-03-30; 修改稿收到日期: 2015-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金(50678122, 51078225)资助项目.

作者简介: 张爱社^{*} (1969-), 男, 博士, 教授
(E-mail: acclan@263.net)

2 计算分析工况

应用数值分析方法讨论屋面光伏电池面板风荷载计算问题,首先需要对光伏面板和建筑物模型相关参数进行选择。为便于与已有的风洞实验结果进行比较,本文对文献[13]的风洞实验模型进行了分析。光伏面板安装朝向为正南方,验证计算只考虑安装倾角为 30° 的情况。风向规定如下,北风向为 180° ,南风向为 0° 。验证模型相关参数列入表 1 的工况 1,模型布置如图 1 所示。影响光伏板风荷载的因素有很多,本文作为光伏建筑一体化研究的一部分,在算法验证的基础上,重点讨论以下几个影响光伏板风荷载分布的主要因素,(1) 在平屋面上的安装位置影响,计算参数列入表 1 的工况 2。(2) 安装倾角的影响,参数列入表 1 的工况 3。(3) 相邻光伏板间距的影响,参数列入表 1 的工况 4。图 2 给出计算模型布置,单个光伏电池板的尺寸为 $6.0\text{ m}(\text{长}) \times 2.9\text{ m}(\text{宽}) \times 0.2\text{ m}(\text{厚})$,建筑物尺寸为 $22.5\text{ m} \times 22.5\text{ m} \times 16\text{ m}$ 。为简化计算模型,省略了光伏板支架体系。

3 数值模拟方法

对于单个和阵列光伏板计算工况,入口处均采

用指数形式的 B 类地貌风速剖面边界条件,指数 $\alpha=0.16$ 。10 m 高度处的风速取为 45 m/s ,入口处的湍流度取 16% 。地面、建筑物表面和光伏板表面等采用无滑移边界条件。计算域的两个侧面和顶部采用对称边界条件。出口采用各变量充分发展边界条件。整个计算域分为内外两个子区域。内部区域是贴近建筑物和光伏板的小区域,在该区域内采用尺寸较小的非结构化网格如图 3 所示。根据第一个内节点的无量纲距离 $y^+ = 30 \sim 100$ 的要求,第一层网格点布置在固定壁面附近,取增长因子等于 1.2。外围区域采用较粗网格。部分网格分布如图 3 所示。

采用基于 $k-\omega$ SST 两方程湍流模型^[14]的分离涡模拟方法,求解 Navier-Stokes 方程。在近壁面边界层中,采用 $k-\omega$ SST 湍流模型求解雷诺平均方程。在远离物面区域,采用基于动态亚格子 Reynolds 应力模型的大涡模拟方法计算流场。对于控制方程,采用有限体积法进行离散,对流项采用 QUICK 格式,扩散项采用二阶中心差分格式,压力速度耦合迭代采用 SIMPLE 算法。为防止迭代过程数值发散和不稳定,求解过程采用欠松弛技术。

表 1 数值模拟工况参数

Tab. 1 Parameters of numerical simulation cases

计算工况	光伏板数量及倾角 θ	间距 *	安装位置		风向
			南北向	东西向	
工况 1	单个板, 30°	—	$D_{10}=0.23 D_0$	居中, $B_{10}=0.08 B_0$	$0^\circ, 180^\circ$
工况 2	单个板, $25^\circ, 30^\circ, 40^\circ$	—	$D_1=(0.1, 0.3, 0.6) D$	居中, $B_1=0.1 B$	$0^\circ \sim 180^\circ$, 间隔 45°
工况 3	阵列, $15^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 40^\circ$	$D_2=1.8 W$	$D_1=0.23 D$	居中, $B_1=0.1 B$	$0^\circ \sim 180^\circ$, 间隔 45°
工况 4	阵列, 30°	$D_2=(0.8, 1.2, 1.8, 2.5) W$	$D_1=0.23 D$	居中, $B_1=0.1 B$	180°

注: D_1 为 0° 风向时光伏板从屋面前缘的收进距离, B_1 为光伏板从屋面两侧的收进距离, D_{10} 和 B_{10} 分别为验证模型的收进距离, B 和 D 分别为建筑物的长度和宽度, W 为光伏板的高度, 本文取 $W=2.9\text{ m}$

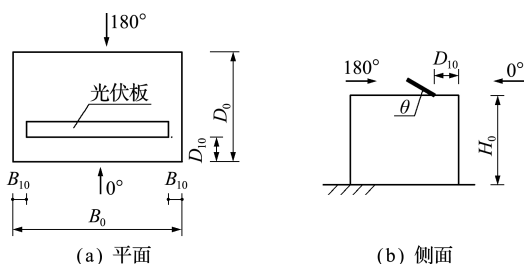


图 1 文献[13]单个 PV 板布置
Fig. 1 Single PV panel configuration in Ref [13]

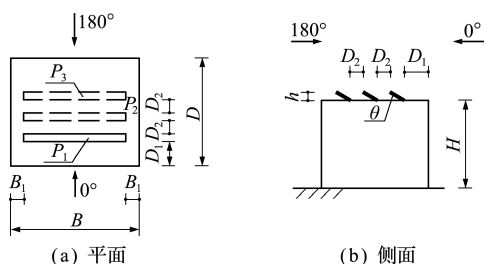
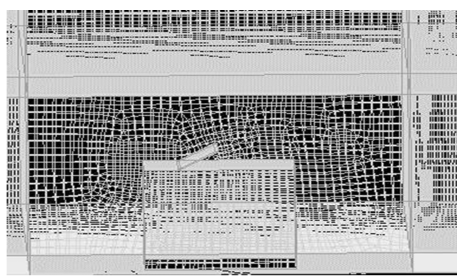
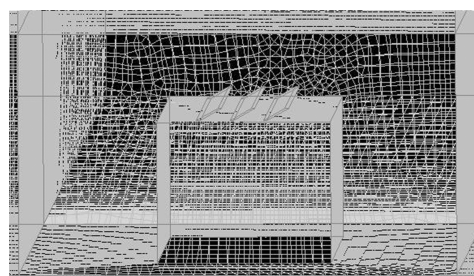


图 2 本文计算模型布置
Fig. 2 Numerical model configuration in this paper



(a) 单个光伏板网格划分



(b) 三个光伏板网格划分

图3 光伏板周围网格划分

Fig. 3 Grid arrangements around solar panels

4 计算结果讨论与分析

4.1 单个光伏板表面风压计算验证

采用风压系数 C_{pu} , C_{pl} 和 C_{pm} 分别表示光伏板上表面、下表面和光伏板平均净风压系数,如图4所示。系数 C_{pu} 和 C_{pl} 的定义如下:

$$C_{pu} = 2(p_u - p_0) / (\rho U_H^2) \quad (1)$$

$$C_{pl} = 2(p_l - p_0) / (\rho U_H^2) \quad (2)$$

式中 p_u 和 p_l 分别为光伏板上和下表面测点的计算压力, p_0 为参考风压, U_H 为光伏板中心高度处的风速。光伏板某点的净风压系数 C_p 定义为上下表面风压系数之差,即 $C_p(i) = C_{pu}(i) - C_{pl}(i)$,并规定箭头向下为正值,如图4所示。根据数值计算结果,对光伏面板表面不同位置处的风压系数按面积进行加权平均,即可得到各计算工况下垂直于面板的平均净风压系数 C_{pm} ,方向与 C_p 相同。

对屋面上单个光伏面板的风压系数进行计算(表1中的工况1),并与文献[13]的试验结果进行对比,以验证数值计算方法的正确性。工况1在风向分别为 0° 和 180° 时迎风面和背风面中心线处的

计算与试验结果对比如图5和图6所示。可以看出, x 表示沿光伏板宽度方向离开板面前缘的距离。从图5(a)可以看出,风向为 0° 时光伏板上表面平均风压系数的计算值与实验结果吻合较好。从图5(b)可以看出,光伏板下表面偏下位置处,数值模拟的结果与实验值差异较大,这是由于采用数值方法模拟该区域附近复杂的流动产生的误差较大引起的,数值模拟的平均 C_{pm} 比实验值偏大。当风向为 180° 时,光伏板上下表面的计算平均 C_{pm} 值与实验值吻合较好,如图6所示。综上所述,对于平均风压系数,数值计算和风洞实验结果误差较小。可以认为采用计算风工程数值模拟方法对屋面上光伏面板风压系数的数值计算是可行的。

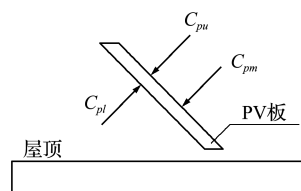
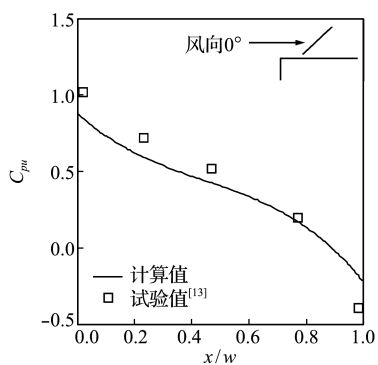
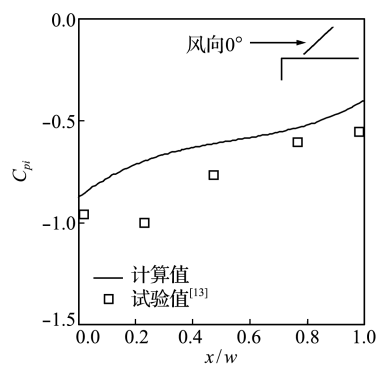


图4 风压系数的定义

Fig. 4 Definition of pressure coefficients



(a) 上表面风压系数比较



(b) 下表面风压系数比较

图5 风向 0° 时工况1风压系数比较Fig. 5 Comparison between CWE and wind tunnel mean pressure coefficients for wind direction 0° for Case 1

4.2 安装位置对屋面光伏板风荷载的影响

当风经过建筑物屋檐或山墙时,会产生流动的分离与再附等复杂流动现象。固定于屋面上的光伏板,除了承受来流风的直接作用外,还可能受到建筑物屋顶处风的分离流动的耦合影响。表1工况2讨论的是单个光伏板在屋面上左右位置居中,前后位置改变时的风荷载变化特性。图7给出了工况2下光伏板平均风压系数在不同风向($0^\circ \sim 180^\circ$)下的分布情况,同时也考虑了安装倾角的影响。当 D_1 从 $0.1D$ 增加到 $0.3D$ 时,对于不同的安装倾角和不同的风向情况,光伏板平均风压系数 C_{pm} 变化不大,如图7(a,b)所示。当风向为 180° 时, C_{pm} 略有减小。但是当收进距离 D_1 增加到 $0.6D$ 时, C_{pm} 变化较大,如图7(c)所示。当风向为 0° 时, C_{pm} 比前两种情况明显增加,安装倾角为 40° 时光伏板的风压系数最大。随着风向变化,风压系数逐渐减小。当风向从 90° 变化到 180° 时, C_{pm} 经

历了在小的收进距离($D_1 = 0.1D \sim 0.3D$)情况时的波动后,开始逐渐增大,当风向为 180° 时达到最大,并且随着安装倾角的增加而增加。当风向在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时, C_{pm} 在各种收进距离情况下都基本保持不变。从图7可以看出,当收进距离 D_1 较小时,对于风向处于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时,由于屋面前缘分离涡没有得到充分发展,光伏板的平均风压系数小于 D_1 较大时的情况。

4.3 安装倾角对屋面光伏板风荷载的影响

光伏板安装倾角与当地的纬度有关,也是影响光伏板风荷载的重要因素之一。表1的工况3讨论的是阵列布置光伏板在一定间距下(本文选取相邻排间距为 $0.23D$),光伏板风荷载受安装倾角变化的影响。图8给出了工况3在风向角分别为 0° 和 180° 时的平均风压系数的数值模拟结果。可以看出,当安装倾角 θ 从 15° 增加到 40° 时, 0° 风向角下的正风压系数随着 θ 的增加而增大,而 180° 风向

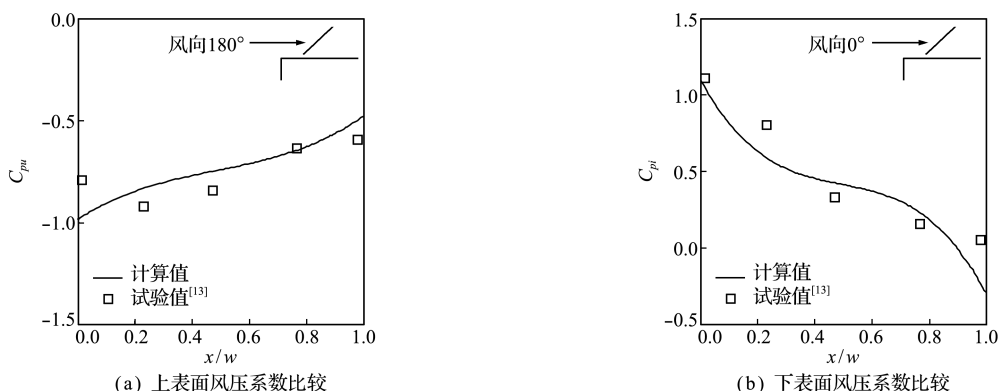


图6 风向 180° 时工况1风压系数比较

Fig. 6 Comparison between CWE and wind tunnel mean pressure coefficients for wind direction 180° for case 1

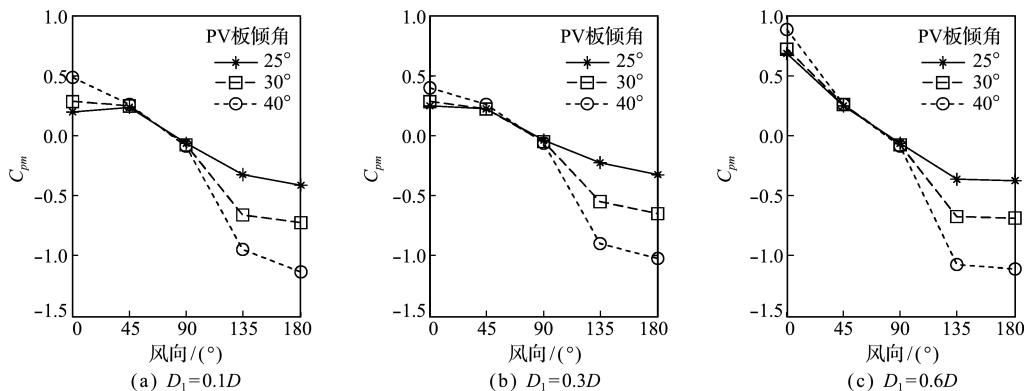


图7 单个PV板在屋面上不同位置的风压比较(工况2)

Fig. 7 Comparison of mean C_p for one single PV panel at different locations (case 2)

角下的负风压系数也随着 θ 的增加而增大。另外,对于本文给定的间距 ($D_1 = 0.23D$),中间光伏板受上游的遮挡影响较大,风压系数小于上游光伏板。

通过对计算流场的分析可以看出,光伏板产生的分离涡随着 θ 的增加而逐渐增大,光伏板风荷载主要是由风绕板的湍流运动引起的。文献[3,15]指出的固定于屋面上的光伏阵列风荷载压力均衡现象,对于本文的分析工况并不明显。

4.4 安装间距对屋面光伏板风荷载的影响

光伏阵列间距选择受到安装倾角或日照条件等的影响,该值只能在一定范围内变化。文献[15]

的结果显示,当安装倾角小于 10° 时,增大阵列间距,光伏板所受风荷载会相应减小。本文计算分析的倾角为 30° ,板间距与板高之比为 $0.8 \sim 2.5$ 范围内的阵列布置情况列入表 1 的工况 4。图 9 给出了工况 4 的计算结果。在上述间距范围内,光伏板平均风压系数随着间距的增大而增加。也就是说,根据本地区的日照条件,为减小光伏板支架压载,应尽量缩小光伏板阵列的间距。可以看出,迎风第一列光伏板受到的风压系数最大,第二列光伏板的风压系数降低较多,说明第一列尾流区对第二列光伏板的遮挡影响较大,而第三列的光伏板风压系数趋于回升。

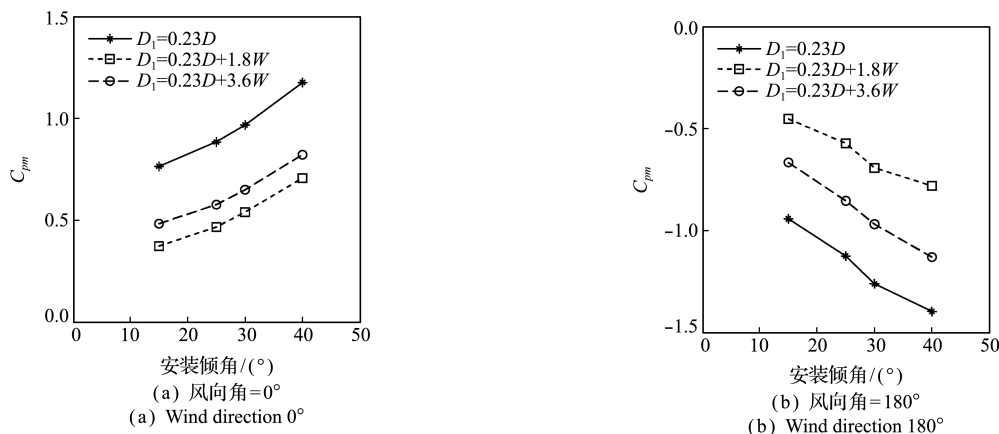


图 8 安装倾角对屋面 PV 板阵列风荷载的影响

Fig. 8 Effect of panel tilt angle on mean pressure coefficients for different wind directions

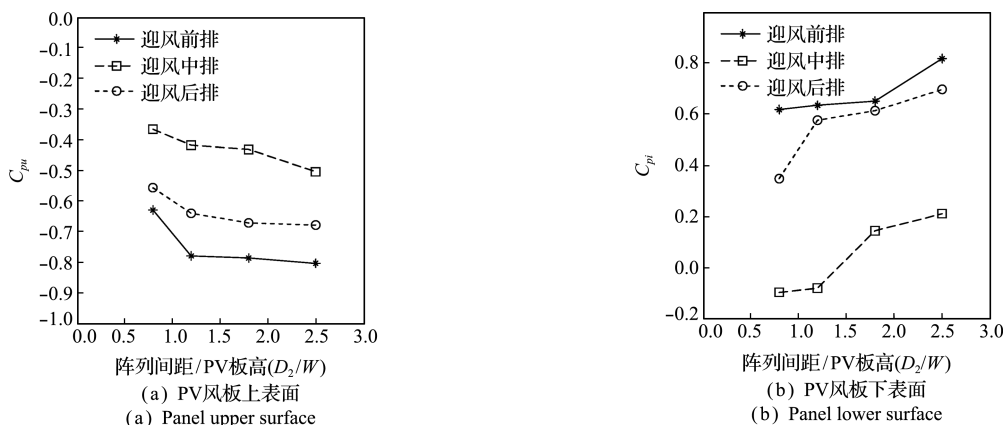


图 9 风向角为 180° 时阵列间距对屋面 PV 板风荷载的影响

Fig. 9 Effect of distance among panels on mean pressure coefficients for wind direction of 180°

5 结 论

本文采用计算风工程方法对屋面光伏板风荷

载特性进行了研究,首先对单个光伏板平均风压系数模拟结果与已有的试验结果进行了对比,然后对影响屋面光伏板风荷载的因素进行了讨论,得出以

下结论。

(1) 通过对屋面上单个光伏板平均风压系数的计算,并与现有风洞试验结果对比可以看出,两者的风压系数分布模式吻合较好,风压系数的大小基本一致,验证了采用分离涡数值模拟计算结果的可靠性。

(2) 安装位置和安装倾角对屋面上的光伏板所受平均风荷载都有影响。当光伏板收进距离较小时,平均风压系数受到的影响不明显,继续增加收进的尺寸,光伏板将受到较大的风荷载。安装倾角对光伏板平均风荷载影响较大。倾角越大,各风向下的平均风荷载越大。

(3) 在本文讨论的阵列间距范围内,当光伏板串列布置时,迎风第一排光伏面板所受风荷载为最大,其临近后排光伏板风荷载下降较多,最后一排的风荷载又趋于回升,主要表现为前排光伏板对下游光伏板的遮挡影响。

另外,本文只对屋面光伏板平均风压系数进行了分析,并且讨论的影响因素有限。因此,有待进行更深入全面的研究,并利用离散涡模拟方法系统探讨光伏板脉动风荷载分布特征。

参考文献(References):

- [1] American Society of Civil Engineers, ASCE Standard ASCE/SEI 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures [S]. Reston, Virginia, USA, 2012.
- [2] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (GB50009-2012, Load Code for the Design of Building Structures[S]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2012. (in Chinese))
- [3] Kopp G A, Farquhar S, Morrison M J. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, **111**: 40-52.
- [4] Cao J, Yoshida A, Saha P K, et al. Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, **123**: 214-225.
- [5] Browne M T L, Gibbons M P M, Gamble S, et al. Wind loading on tilted roof-top solar arrays; the

parapet effect[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, **123**: 202-213.

- [6] Kopp G A. Wind loads on low-profile, tilted, solar arrays placed on large, flat, low-rise building roofs[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, **140** (2): 04013057.
- [7] Stathopoulos T, Zisis I, Xypnitou E. Wind loads on solar collectors; a review[A]. Proceedings of Structures Congress 2012[C], ASCE, 1169-1179.
- [8] Shademan M, Hangan H. Wind loading on solar panels at different inclination angles[A]. The 11th American Conference on Wind Engineering[C]. San Juan, Puerto Rico, 2009.
- [9] Bitsuamlak G, Dagnew A, Erwin J. Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD[A]. The 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) [C]. Chapel Hill, North Carolina, USA, 2010.
- [10] Meroney R N, Neff D E. Wind effects on roof-mounted solar photovoltaic arrays; CFD and wind-tunnel evaluation[A]. The 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) [C]. Chapel Hill, North Carolina, USA, 2010.
- [11] Jubayer C M, Hangan H. Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, **134**: 56-64.
- [12] Piomelli U, Balaras E, Pasinato H, et al. The inner-outer interface in large-eddy simulations with wall layer models[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, **24** (4): 538-550.
- [13] Stathopoulos T, Zisis I, Xypnitou E. Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, **125**: 195-206.
- [14] Wilcox D C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models[J]. *AIAA Journal*, 1988, **26** (11): 1299-1310.
- [15] Bienkiewicz B, Sun Y. Wind loading and resistance of loose-laid roof paver systems[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, **72**: 401-410.

(下转第 737 页)

A frictional contact problem of a functionally graded layer resting on a Winkler foundation

CHEN Yao-geng^{1,2}, LI Xing^{*1}

(1. School of Mathematics and Statistics Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Science, Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, China)

Abstract: This paper presents the investigation to the frictional contact problem for a functionally graded layer under the action of a rigid circular stamp supported by a Winkler foundation. A segment of the top surface of the graded layer is subject to both normal and tangential traction while rest of the surface is devoid of traction. The graded layer is assumed to be an isotropic nonhomogeneous medium with an exponentially varying shear modulus and a constant Poisson's ratio. The problem is reduced to a Cauchy-type singular integral equations with the use of Fourier integral transform technique and the boundary conditions of the problem. The singular integral equations is solved numerically using Chebychev polynomials. The main objective of this paper is to study the effect of the material non-homogeneity factor, stiffness of the friction coefficient, Winkler foundation and punch radius on the contact pressure distribution and the size of the contact region.

Key words: Winkler foundation; functionally graded material; singular integral equations

(上接第 688 页)

Numerical analysis of wind load characteristics of photovoltaic panels mounted on a roof

ZHANG Ai-she^{*1}, GAO Cui-lan², SHEN Cheng-jun³, ZHANG Bing⁴

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. School of Traffic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. Department of Construction Engineering, Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan 250103, China;

4. Logistics Security, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Wind loads play a major role in designing of structural systems for roof-mounted photovoltaic panels. The detached eddy simulation method is employed in this study. Computational wind engineering method has been performed to evaluate wind loads on photovoltaic panels mounted on the roof. The simulation results have been compared and validated with a wind tunnel experimental measurements. The main parameters affected wind loads acting on photovoltaic array panels, such as panel tilt angles, the installation locations on the roof, distance between arrays, and wind directions, were considered. The numerical results showed that the mean values of the uplift wind loads increase with increasing in tilt angle from 15° to 40°. The numerical data demonstrated that wind loads on the photovoltaic panel were substantially affected by the vortices generated by building roof edges. The study also showed that sheltering effect caused by upwind photovoltaic panels reduced the wind loads on the adjacent panels when they were arranged in tandem. The proposed numerical method and the calculation results could provide an important reference for the design of photovoltaic array supporting systems, which are mounted on the roof, and the building structures.

Key words: wind loads; photovoltaic panels; computational wind engineering; detached eddy simulation; turbulence