

屋面光伏板风荷载的数值模拟

胡启煜 周颖 王雅南

衢州学院建筑工程学院

DOI:10.12238/ems.v4i5.5790

[摘要] 本文采用雷诺平均的方法模拟研究不同女儿墙高度和排列方式的屋顶上的光伏板,得到了不同倾角的屋面光伏组件和 3×3 光伏组件阵列在不同风向角情况下的风荷载体型系数,并与风洞试验结果进行对比,研究表明对于单个光伏板来说,有女儿墙的光伏板比地面光伏板表面体型系数大,且女儿墙越高、距离光伏板越近,对表面的体型系数影响越大;光伏板阵列中,光伏板上表面的体型系数随着板间距离的增大而逐渐减小(负的绝对值增大),光伏板下表面的体型系数接近于零。

[关键词] 光伏板; 平均风压; 数值模拟

中图分类号: TU **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Wind Load on Roof Photovoltaic Panels

Qiyu Hu Ying Zhou Yanan Wang

College of Civil Engineering and Architecture, Quzhou University

[Abstract] In this paper, the Reynolds average method is used to simulate and study the photovoltaic panels on the roof with different parapet height and arrangement. The wind load shape coefficients of the roof photovoltaic modules with different inclination angles and 3×3 photovoltaic module array under different wind directions are compared with the wind tunnel test results. The research shows that for a single PV panel, the surface shape coefficient of PV panel with parapet is larger than that of ground PV panel, and the higher the parapet and the closer to the PV panel, the greater the impact on the surface shape coefficient; In the photovoltaic panel array, the shape coefficient of the upper surface of the photovoltaic panel gradually decreases with the increase of the distance between the panels (the negative absolute value increases), and the shape coefficient of the lower surface of the photovoltaic panel is close to zero.

[Key words] photovoltaic panel (PV panel); mean wind pressure; numerical simulation

引言

太阳能作为一种可再生能源,近年来被广泛利用,太阳能光伏板的需求随之增加。目前,光伏产业在国内迅速发展,受到地形区域的限制,其布置一般分为地面和屋面两种阵列形式。光伏板自身结构较为轻盈,对于不同的光伏板结构体系及不同高度的女儿墙,屋面光伏板的风荷载很难确定。在实际的工程中,风荷载取值受到各种因素的影响,包括风向角、离地高度、安装形式及建筑物尺寸等参数,因此研究光伏阵列体型系数对于光伏板风荷载取值具有十分重大的意义^[1]。

由于光伏板结构质量轻,刚度小,在风雨气候条件下易破坏,造成不可挽回的经济损失,尤其是在我国东南沿海地区,光伏板常常需要安置在屋顶或者横跨河流,风荷载破坏更为显著。光伏板常以一定的倾角布置在建筑屋顶,风荷载作用下光伏板的破坏现象较为复杂,目前国内外规范对其风荷载取值规定尚不完善,仅有一些针对单一光伏板的规范,对光伏阵

列的介绍较少。马文勇、孙高健等^[2]对单一光伏板分布模型进行试验分析,研究表明目前我国《光伏电站设计规范》中对于倾角大于 30° 的光伏板体型系数取值偏于危险;黄伯城和马文勇等^[3]的研究认为上游光伏板对下游光伏板的遮挡效应,跟光伏板的尺寸和间距有很大关系。王彩玉和马文勇等^[4]对不同女儿墙高度下平屋面阵列光伏板上风荷载分布进行分析,研究发现女儿墙高度的增加可以有效减小平屋面光伏板所受到的风吸力。房彦山等^[5]和高亮等^[6]采用CFD数值模拟对光伏板阵列中组件的风荷载体型系数展开分析,研究表明迎风处一层光伏板的风振响应最为强烈,相比较中间层的光伏板,最外围光伏板的体型系数更为显著。孙光华^[7]针对大型地面光伏板阵列群,提出了一种适合此类工程问题的数值模拟建模方法。楼文娟等^[8]通过CFD数值模拟超大型阵列光伏板体型系数及群体遮挡效应,研究得到了超大型阵列光伏板体型系数随光伏板阵列数的变化规律。

为了得到屋面光伏组件风荷载体型系数, 本文采用雷诺平均的方法模拟研究不同女儿墙情况下, 不同倾角的屋面光伏组件和3*3光伏组件阵列在不同风向角情况下的风荷载体型系数, 并与风洞试验结果进行对比, 得到了单个屋面光伏组件和3*3阵列情况下风荷载体型系数的变化规律, 为光伏结构抗风设计提供参考。

1 风洞试验模型及工况

1.1 风洞试验模型

屋面光伏组件为平板阵列结构, 在结构设计时必须考虑风荷载。由于光伏板的倾角会根据当地阳光照射实际情况调整, 建筑屋面高度以及不同光伏板阵列结构都会影响光伏板风荷载, 使得其表面风荷载很难精确确定。通过风洞试验和数值模拟方法掌握屋面光伏组件风荷载体型系数, 是进行此类结构抗风设计的必要手段^[9]。本次风洞实验分别模拟了单一光伏板、有女儿墙的光伏板以及光伏阵列三种模型, 试验模型如图1所示。试验一共设计了三个刚性模型, 通过风洞试验, 得到各种情况下光伏组件的表面风压, 进而通过数据处理得到其平均风压系数与均方根风压系数, 分析各种工况下结构表面风荷载, 为光伏工程结构抗风设计提供参考。



(a) 单一光伏板

(b) 有女儿墙的光伏板

(c) 光伏阵列

图1 风洞试验模型

为了模拟屋面的情况, 设计了一个0.2m高的矩形屋面。工况一: 仅模拟单个光伏组件, 在5°、10°、20°、30°倾角下的体型系数。工况二: 取光伏组件倾角为10°, 模拟不同高度的女儿墙对光伏结构的影响, 设置3种女儿墙高度, 分别为0.05m、0.10m和0.15m, 同时, 根据场地情况, 考虑光伏组件离女儿墙的距离分别为0.5D, 1D, 1.5D三种。工况三: 考虑3*3的阵列布置, 如图2所示, 不考虑女儿墙以及女儿墙高度为0.10m两种情况下, 研究单元间距为0.25D, 0.5D, 0.75D, 1D等四种情况下的风荷载体型系数。其中, D为单元横截面横向外框尺寸, 模型测压点布置及风向角示意图如图3所示。

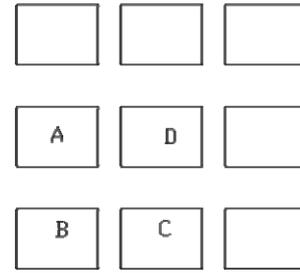


图2 光伏板A、B、C、D分布

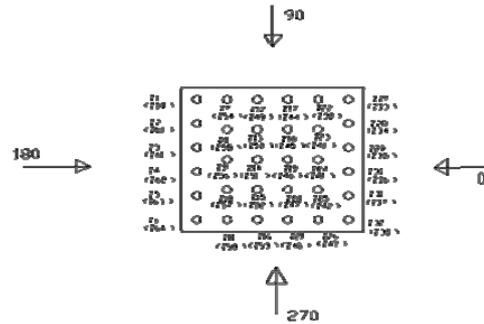


图3 实验测点及风向角示意图

1.2 风洞试验设备

本试验在武汉大学WD-1风洞试验室中进行。该风洞为单直流、吸入式边界层风洞。模型试验区横截面宽3.2m、高2.1m, 试验段风速1~30m/s连续可调。其工作转盘直径为2.5米, 采用挡板、尖塔、粗糙元装置模拟大气边界层风场。风洞气动轮廓如图4所示。

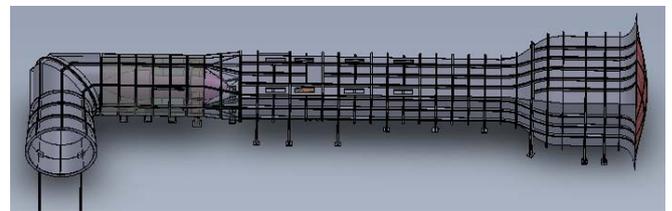


图4 武汉大学WD-1风洞气动轮廓图

本文通过风洞试验, 主要对单一太阳能板风荷载分布、光伏板安置在不同高度的女儿墙上以及阵列光伏板之间的相互影响等进行了分析, 并对3*3阵列布置的光伏板进行研究, 得到了阵列光伏板在一定间距下模型表面测点的体型系数, 通过试验得出三种工况下太阳能光伏板模型表面测点的体型系数, 依据试验结果建立有限元模型, 研究光伏板布置高度及3*3的阵列布置的光伏板风振响应。

2 数值模拟方法及过程

2.1 湍流模型及计算方法

风洞试验是分析光伏结构风荷载的重要方法, 但是试验结果往往只针对特定的情形, 难以找到通用的规律或实用方法, 因此, 计算风工程的发展对于风荷载的实际工程及科学研究至关重要。本文基于雷诺平均方法, 建立湍流模型进行分析, 在紊流的工程计算中, 双方程模型的应用最为广泛, 并且也取得了较为

可靠地结果。由于风荷载受到建筑结构的影响,其流动一般属于不可压缩、低速湍流,因此本文选用双方程模型对光伏板结构风振响应进行模拟求解。

2.2 光伏板几何参数

依据风洞试验的工况,数值模拟的对象也分三种工况。无干扰的情况(即工况一)中,取最危险的发电板倾角 30° 模型;有女儿墙单个发电板的情况(即工况二)下,三种女儿墙高度和三种女儿墙距离的九种模型;光伏发电板阵列分别有女儿墙和无女儿墙情况(即工况二)下,四种发电板距离的八种模型。计算风向角均为 180° ,风向角定义与风洞试验相同。

2.3 计算流域及网格划分

计算流域在垂直方向上高度采用 $10H$,模型上游边界到迎风面的距离设为 $10L$,模型下游边界到背风面的距离为 $10L$,宽度为 $10B$ 。流域的设置横风向满足阻塞比的要求,顺风向能够确保湍流在出口边界已经发展完全。

为了提高计算的精度,所有的工况均采用结构化网格。其中单个发电板且无女儿墙的情况下,网格数为三百五十万;单个光伏板且有女儿墙的情况下,网格数超过五百万; 3×3 发电板阵列且无挡板的情况下,网格数超过一千万; 3×3 发电板阵列且有挡板的情况下,网格数接近一千二百万。流域及实体的整体网格如图5所示。

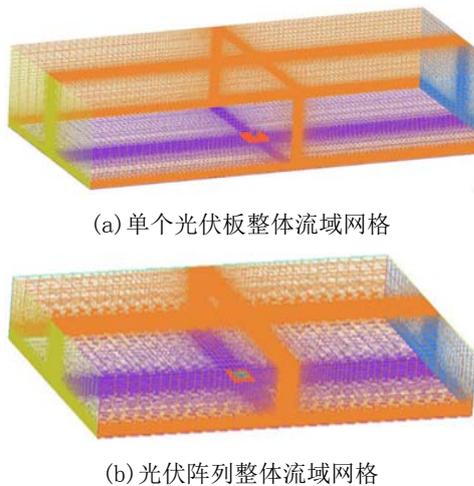


图5 整体网格

2.4 边界条件及计算参数设置

在本文模拟中,采用速度入流边界条件(velocity-inlet);假定出流面上的流动已充分发展,流动已经恢复为正常流动,因此出流面选择自由出口边界条件(outflow);流域顶部和两侧采用对称边界条件(symmetry);结构表面和地面采用无滑移的壁面条件(wall),并选用标准壁面函数来模拟地面附近的流动。

(1) 来流面风速的选取

由于光伏板安置区域并非完全光滑平坦,风速受地表摩擦的影响随着离地高度的减小而降低。直到高于梯度风 $300 \sim 500\text{m}$ 以上的地方,风速才不受地表影响,可以在大气梯度的作用下自由流动。

(2) 来流湍流度选取

来流的湍流特性我们通过采用湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 来定义,湍动能 k 可以表示为平均风来流和湍流强度的函数,即:

$$k = 1.5 \times [V_{avg} \times I(z)]^2 \quad (2-1)$$

由湍流长度尺度 L 和湍流动能可以得到耗散率 ϵ 的表达式:

$$\epsilon = \frac{(C_\mu)^{0.75} \times k^{1.5}}{L} \quad (2-2)$$

式子中 $C_\mu = 0.09$,湍流特征尺度 L :

$$L = 100 \left(\frac{z}{30}\right)^{0.5} \quad (2-3)$$

计算湍流强度和湍流特征尺度,B类地貌下,湍流强度 $I(z)$:

$$I(z) = I_{10} \bar{I}(z) \quad (2-4)$$

$$\bar{I}(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{-\alpha} \quad (2-5)$$

上式中, I_{10} 为 10m 高度处的名义湍流度,对应于B类地貌, $I_{10} = 0.14$;风剖面指数 $\alpha = 0.15$ 。

由于光伏板的实际总高度为 5m ,其沿高不明显,本次计算取 40m 高度处的湍流度 $I(z) = 0.114$ 。

2.5 光伏板的平均风压系数

通过CFD数值模拟,可以计算出目标建筑物表面各点处的表面平均风压值 \bar{w}_i 。这样,根据数值模型输入的风场风剖面,还可以换算得到目标建筑物表面各点处的平均风压系数 μ_{Si} ,可表示为:

$$\mu_{Si} = \frac{\bar{w}_i}{\rho V_i^2 / 2} \quad (2-6)$$

本数值模拟采用FLUENT进行模拟计算,其准确性已在不同的计算流体领域获得了验证,采用Parallel计算方法。

2.6 结果分析

单个无障碍光伏板和光伏阵列单元间距为 $0.5D$ (无女儿墙)

的数值模拟结果如图6-图7所示。由图可知,数值模拟和风洞试验得出的光伏板上下表面体型系数变化规律和数值大小基本相符。(但考虑实验中各种干扰因素的影响,局部可能不太一致)因此,认为选取的 $k-\epsilon$ 双方程模型基本能模拟出风场情况。

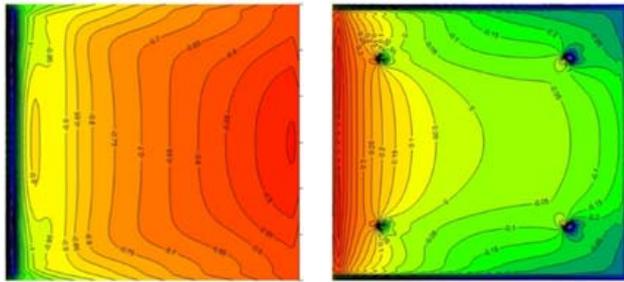


图6 单个无障碍光伏板示意图

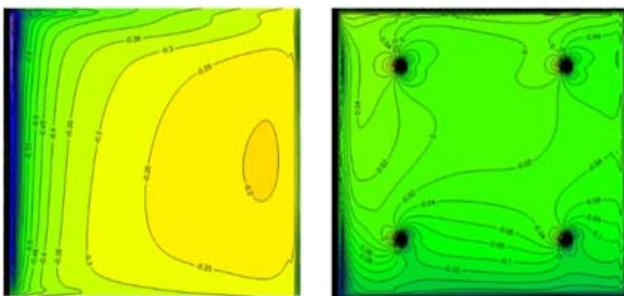


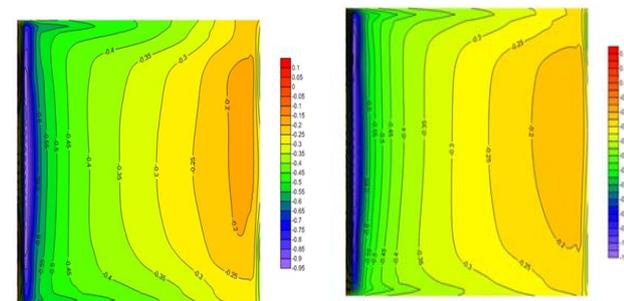
图7 光伏阵列单元间距为0.5D(无女儿墙)示意图

2.6.1 女儿墙对光伏板表面体型系数影响结果分析

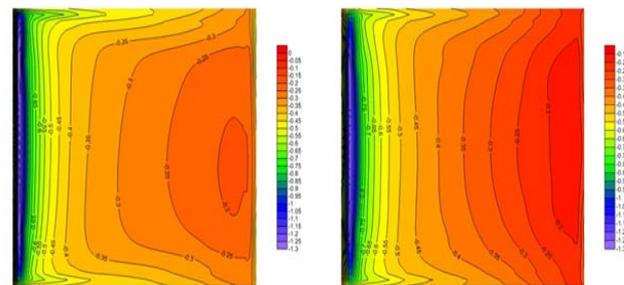
通过CFD模拟得到了工况二部分情况下风荷载体型系数,当光伏板倾角相同时,有无女儿墙,对光伏板风荷载体型系数影响明显,女儿墙会使光伏板表面体型系数增大;相同女儿墙距离的情况下,女儿墙越高,体型系数越大。同时在女儿墙为0.1m和0.15m的情况下,在光伏板的下表面会形成负压。

2.6.2 光伏阵列表面体型系数数值模拟结果分析

通过模拟无女儿墙和存在女儿墙情况下的光伏板上表面体型系数,无论是否有女儿墙,随着光伏板间的距离增大,体型系数在减小。有女儿墙的光伏板A体型系数如图8所示。



(a)L=0.25D 光伏板A上表面 (b)L=0.5D 光伏板A上表面



(c)L=0.75D 光伏板A上表面 (d)L=1D 光伏板A上表面

图8 有女儿墙的光伏板A体型系数

3 结论

本文通过对单个光伏板和光伏阵列的数值模拟研究,并与试验结果进行对比,得到结论如下:

(1) 女儿墙使光伏板的表面体型系数增大(负的绝对值减小),且女儿墙越高、距离光伏板越近,对表面的体型系数影响越大,同时女儿墙会在光伏板的下表面形成负压区(即体型系数全都为负)。

(2) 光伏板阵列中光伏板上表面的体型系数随着板间距离的增大而逐渐减小(负的绝对值增大),光伏板下表面的体型系数接近于零。

[基金项目]

*国家级大学生创新创业项目(023220007); *实验室开放项目(202111488033)。

[参考文献]

[1]张爱社,高翠兰,申成军,等.屋面光伏板风荷载特性数值分析[J].计算力学学报,2016,33(5):684-690.
 [2]马文勇,孙高健,刘小兵,等.太阳能光伏板风荷载分布模型试验研究[J].振动与冲击,2017,36(7):6.
 [3]黄伯城,马文勇,刘庆宽,等.串联光伏板体型系数遮挡效应研究[C]//第25届全国结构工程学术会议论文集(第III册).2016.
 [4]王彩玉,马文勇,韩晓乐,等.女儿墙对平屋面阵列光伏板风荷载的影响[J].工程力学,2021,38(S01):7.
 [5]房彦山,张国飞,唐雯静.太阳能光伏板阵列风压特性数值模拟研究[J].电力勘测设计,2018,(4):5.
 [6]高亮,窦珍珍,白桦,等.光伏组件风荷载影响因素分析[J].太阳能学报,2016,37(8):7.
 [7]孙光华.不规则光伏板阵列群风荷载体型系数研究[D].陕西:西安建筑科技大学,2017.
 [8]楼文娟,单弘扬,杨臻,等.超大型阵列光伏板体型系数遮挡效应研究[J].建筑结构学报,2021,42(5):8.
 [9]韩晓乐.太阳能光伏阵列风荷载取值研究[D].石家庄铁道大学,2016.