

文章编号: 1671-6833(2021)03-0093-06

## 大跨镂空网格屋盖风荷载数值模拟研究

郑德乾<sup>1,2</sup>, 刘帅永<sup>1</sup>, 顾明<sup>2</sup>, 全涌<sup>2</sup>, 潘钧俊<sup>3</sup>, 周健<sup>4</sup>

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200120; 4. 华建集团华东建筑设计研究总院, 上海 200002)

**摘要:** 采用 CFD 数值模拟方法对大跨空间镂空网格屋盖结构风荷载进行了研究。首先, 通过屋盖节段模型的风洞天平测力试验和数值模拟的对比, 验证了数值模拟方法及结果的有效性; 然后, 着重对比分析了光伏板布置和底部建筑对屋盖风荷载的影响, 并结合屋盖周围流场进行了影响分析; 最后, 给出了屋盖结构的整体风荷载和风压分布, 并与屋盖原方案结果进行了对比。结果表明: CFD 数值模拟方法可较好地应用于预测大跨镂空网格屋盖结构的平均风荷载。屋盖结构整体以水平风荷载为主; 竖向风荷载主要为向上的风吸力, 有利于结构的整体受力; 屋盖表面存在较明显的局部风压不均匀现象, 特别是下表面存在较大范围的局部风吸力, 这些位置可能会引起光伏板的局部破坏; 相对于光伏板布置, 底部建筑对屋盖整体和局部风荷载均有显著影响, 不仅增加了屋盖整体的竖向风吸力, 而且也增大了屋盖下表面局部位置的风吸力。

**关键词:** 大跨屋盖; 镂空网格结构; 风荷载; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号: TU312+.1 文献标志码: A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2021.03.016

### 0 引言

网格结构较广泛地应用于体育场馆、火车站、机场等有大空间覆盖要求的大跨屋盖结构中, 风荷载是这类结构的主要控制荷载, 而荷载规范<sup>[1]</sup>较难给出其设计风荷载。网格结构的杆件尺寸往往远小于其整体几何尺度, 当网格结构表面有屋面板等围护结构覆盖时, 其风荷载可较方便地通过风洞测压试验或 CFD (computational fluid dynamics) 数值模拟等方法得到<sup>[2-4]</sup>; 但当其表面没有或仅有少量覆盖物时, 则与输电塔架等格构式结构类似, 会由于模型缩尺比等原因较难进行风洞测压试验, 而多需借助天平试验得到其整体风荷载<sup>[5-10]</sup>。CFD 数值模拟方法具有不受雷诺数影响, 便于参数研究的优势, 是一种用于预测网格结构杆件和节点风荷载的方法, 但现有的数值模拟研究对象多集中于杆件数量相对较少或仅针对结构的局部节段模型<sup>[11-12]</sup>。

某大跨镂空网格屋盖结构造型独特新颖(图1), 几何尺寸为 740 m(长) × 120 m(宽) × 20 m(高),

屋盖网格纵横间距 3 m, 杆件采用 550 mm(高) × 220 mm(宽) 截面方管, 屋盖表面分散布置有大量光伏板, 项目处于 B 类地貌, 100 a 重现期基本风压为 0.6 kN/m<sup>2</sup>。该屋盖结构风荷载值较难由荷载规范<sup>[1]</sup>给出, 同时屋盖结构几何尺寸大、大面积镂空且构件尺寸较小的特点, 使得研究人员也较难通过风洞试验方法得到用于结构设计的节点风荷载。前期方案设计阶段对原方案进行了数值模拟研究<sup>[13]</sup>, 原方案屋盖结构几何尺寸约 650 m(长) × 150 m(宽) × 28 m(高), 底部由 10 栋标高为 79 m 的建筑支撑(图1(a))。与原方案相比, 新方案屋盖长度有所增加, 由 11 栋建筑支撑(图1(b)), 对屋盖结构进行了重新找形, 屋盖表面的起伏情况也有所变化, 其表面风荷载分布情况也将相应发生改变, 原方案数值模拟所得风荷载无法适用于新屋盖方案。此外, 原方案风荷载数值模拟<sup>[13]</sup>中, 未考虑表面光伏板布置和底部建筑等影响。因此, 有必要对新找形的屋盖结构风荷载进一步开展相关研究。

收稿日期: 2020-10-22; 修订日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408196)

作者简介: 郑德乾(1981—), 男, 河南泌阳人, 河南工业大学副教授, 博士, 主要从事结构抗风及 CFD 数值模拟研究, E-mail: deqianzheng@163.com。

本文采用 *realizable k-ε* 湍流模型,通过进行精细化建模,详细研究了新找形屋盖表面不同光伏板布置数量,以及底部建筑对其表面平均风荷载分布的影响,最后研究分析了设计方案调整后屋盖结构的风荷载分布特征,为其抗风设计提供参考。

## 1 数值模拟方法及参数

数值模拟计算中采用足尺模型,首先建立了图 1(c) 所示的屋盖节段模型,将其数值模拟结果与相应风洞天平试验<sup>[14]</sup> 所得整体基底风荷载进行了对比分析,以验证本文方法的有效性;然后,基于节段模型研究了不同光伏板布置数量和底部建筑的影响;最后,建立了图 1(b) 所示的屋盖整体模型,得到了屋盖整体风荷载和平均风压分布,并与原方案数值模拟结果<sup>[13]</sup> 进行了对比。

计算域取 10 000 m×6 000 m×600 m(流向×展向×竖向),网格剖分采用区域分块技术,建筑物附近区域采用加密的非结构化网格,其他区域采用结构化网格,如图 2 所示。对节段模型考虑

了 2 种网格划分方案,以及 3 种光伏板布置情况,屋盖整体模型则考虑了 1 种网格布置情况,如表 1 所示。

数值模拟计算基于大型流体计算软件 Ansys Fluent 14.5 平台,压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法,控制方程采用分离式方法(*segregated*) 求解。湍流模型选用 *realizable k-ε* 模型,计算收敛准则取残差值为  $5 \times 10^{-4}$ 。入流面采用速度入口,根据其基本风压模拟了 B 类风场;出流面采用压力出口;计算域顶部及两侧面采用对称边界条件;结构表面及地面采用无滑移壁面。数值模拟研究中,对表 1 各工况分别考虑了  $0^\circ \sim 337.5^\circ$  (间隔  $22.5^\circ$ ) 的 16 个风向角,如图 2 所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 节段模型

2 种网格情况下,CFD 数值模拟所得节段模型的整体风荷载与风洞天平试验<sup>[14]</sup> 的结果对比如图 3 所示。由图 3 可见,数值模拟所得网格

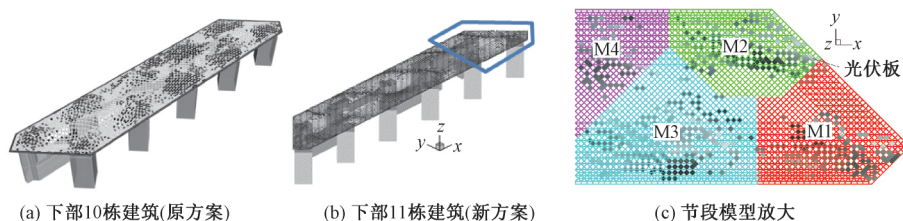


图 1 大跨网格屋盖几何模型

Figure 1 Geometric model of the long span hollow grid roof

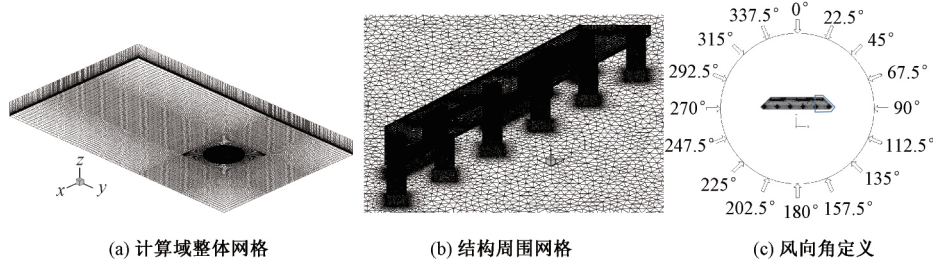


图 2 离散网格和风向角定义示意图

Figure 2 Sketches of the mesh and definition of wind angle of attack

表 1 数值模拟工况及网格参数

Table 1 Case details and mesh parameters

工况序号	工况名称	模型类型	光伏板布置数量	底部建筑	最小网格尺度/m	网格总数
1	CFD1-C1	节段模型	666	有	0.5	$1.11 \times 10^7$
2	CFD2-C1	节段模型	666	有	2.0	$3.73 \times 10^6$
3	CFD2-C2	节段模型	534	有	2.0	$3.82 \times 10^6$
4	CFD2-C3	节段模型	无	有	2.0	$4.08 \times 10^6$
5	CFD2-C1-no	节段模型	666	无	2.0	$4.37 \times 10^6$
6	CFD2-C1-Full	整体模型		有	2.0	$1.80 \times 10^7$

屋盖各分块的总体平均风荷载随风向角的变化规律及数值均与试验结果具有较好的一致性,说明选取的 CFD 数值模拟参数及结果是有效的;2 种网格下的数值模拟结果相差不甚明显,验证了数值模拟结果的网格独立性。为节省计算资源,下文分析研究中均采用了较稀疏的网格划分方式。

图 4 和图 5 分别为屋盖表面光伏板布置情况和有、无底部建筑对其平均风荷载的影响。由图可见,光伏板布置(图 4)主要影响屋盖竖向平均风荷载,随着光伏板数量的增多,屋盖受到的(向上)风吸力有所增大,其中  $0^\circ$  风向角时可达无光伏板时的 2.5 倍左右;水平方向平均风荷载则几乎不受影响。屋盖底部有、无建筑(图 5)对其平均风荷载的影响与光伏板布置的影响规律基本一致,即主要影响屋盖竖向平均风荷载,底部建筑的影响更明显;当来流垂直于屋盖长边( $180^\circ$  风向角)时,有、无底部建筑情况下屋盖受到的竖向平均风荷载绝对值均较大但

符号(方向)却相反,这主要是由于屋盖处于底部建筑的绕流影响范围内所致:有底部建筑时,竖向平均风荷载以正值为主,此时屋盖整体受到的竖向风荷载主要为向上的风吸力,这相对有利于屋盖结构的整体受力。

为进一步分析光伏板和底部建筑对屋盖局部风荷载的影响,图 6 给出了表 1 中工况 2~5 的节段模型屋盖  $180^\circ$  风向角时上、下表面平均风压云图。由图 6 可见:当考虑底部建筑时(图 6(a)~图 6(c)),屋盖上、下表面平均风压均呈现不均匀分布现象,两种光伏板布置下分布规律基本相同。相同光伏板布置(图 6(a)、图 6(d))无底部建筑时,屋盖上、下表面风压分布仍不均匀,最大风压力(正压)有所增大而最大风吸力(负压)有所减小。对于屋盖实际布置情况(有底部建筑),若光伏板连接件强度不够,易导致光伏板被掀起的风致破坏。在屋盖下表面局部较大的风吸力(负压)位置,易造成光伏板碎裂或连接件失效等局部受风破坏。

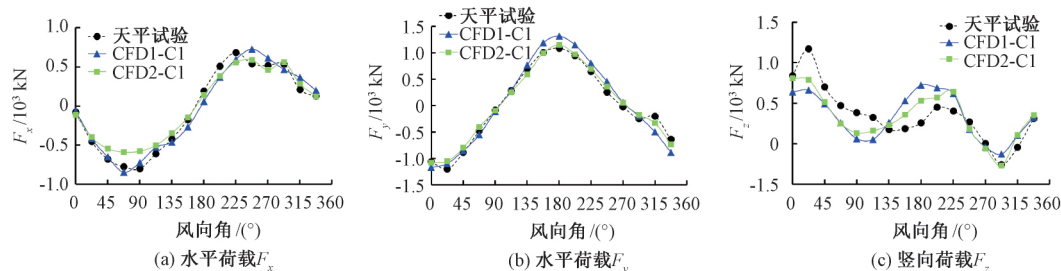


图 3 不同网格分辨率下节段模型风荷载比较

Figure 3 Comparisons of wind load on the section model with different mesh resolutions

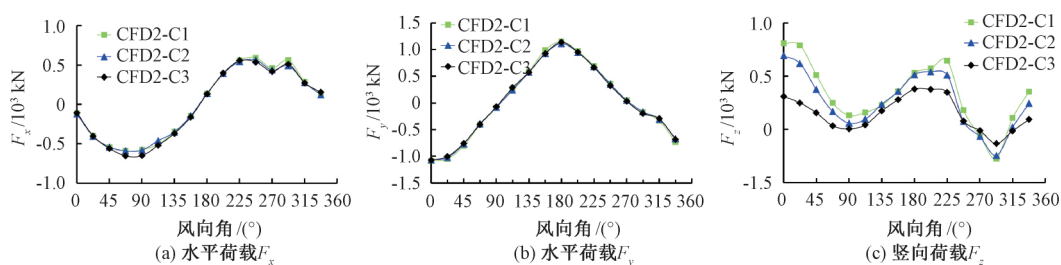


图 4 不同光伏板布置下节段模型风荷载比较

Figure 4 Comparisons of wind load on the section model with different arrangement of PV panels

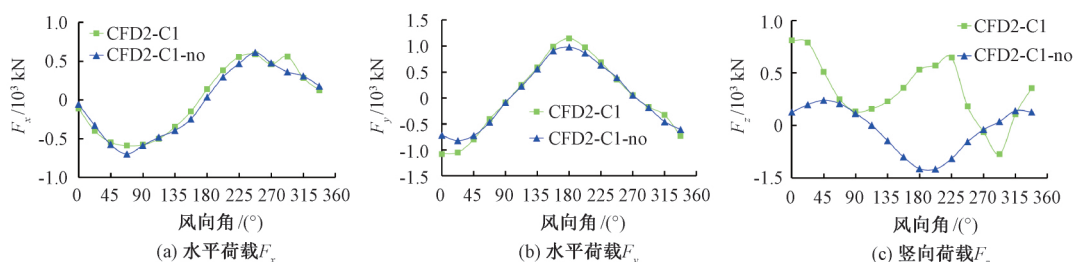


图 5 有、无底部建筑时节段模型风荷载比较

Figure 5 Comparisons of wind load on the section model with and without considering the buildings



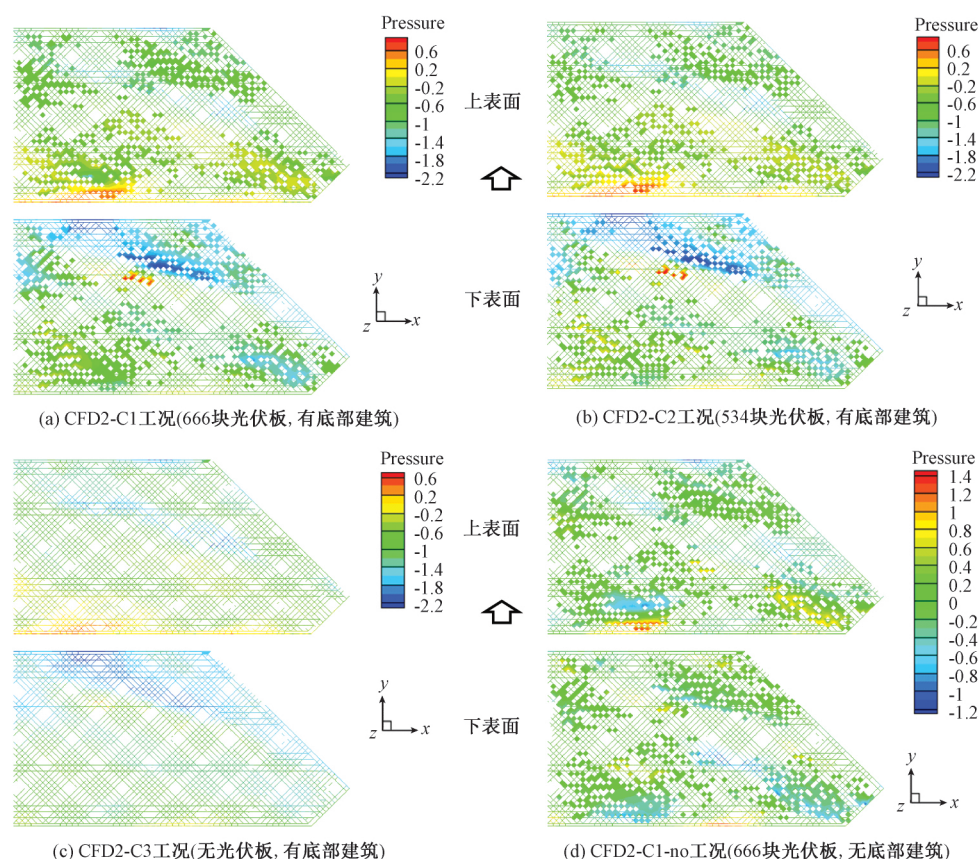


图6 节段模型屋盖表面平均风压分布 (kPa)

Figure 6 Mean wind pressure distribution on the section model roof (kPa)

## 2.2 整体模型

图7为数值模拟(新方案)所得各风向角下,屋盖整体模型各方向风荷载合力与前期数值模拟<sup>[13]</sup>结果(原方案)的比较。由图可见,2种屋盖受到的水平风荷载(图7(a)、图7(b))的正负符号随风向角发生了明显变化,表明其受来流方向的影响均较大,但2方案屋盖水平风荷载数值相对比较接近。各风向角下,屋盖受到的竖向风荷载(图7(c))均为风吸力(向上),比较有利于结构的支座设计;与原方案相比,新方案屋盖受到的风吸力有所减弱。总体上看,180°风向角时,屋盖受到的沿短轴方向的水平风荷载(图7(b))和竖向风荷载(图7(c))

均较显著。

下面以180°风向角为例,分析该大跨网格屋盖的局部风荷载分布规律。图8为数值模拟(新方案)所得屋盖上、下表面的平均风压云图。由图8可见:①总体上,屋盖上表面以负压(吸力)为主,下表面以正压(压力)为主,使得屋盖整体受到向上的风吸力作用,这与上述该风向角下屋盖在竖向总体受向上的风吸力情况一致。②具体来看,屋盖上、下表面平均风压分布均存在明显的不均匀现象,特别是在屋盖各表面的边缘局部位置均存在数值绝对值相对较大的负风压,其中上表面更明显。这是由于屋盖表面本身起伏较大引起的流动分离现象所致,屋盖表

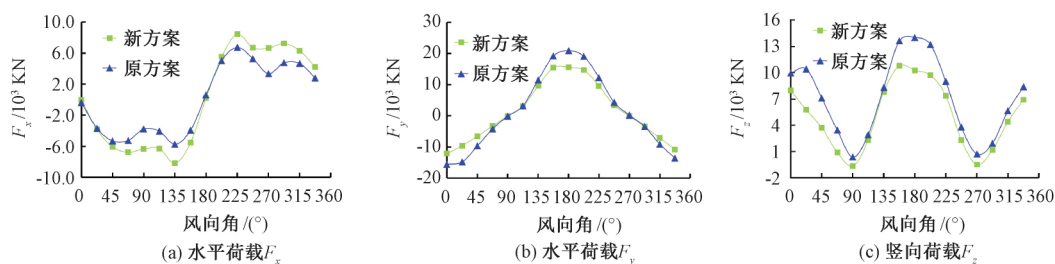


图7 2种屋盖方案整体风荷载比较

Figure 7 Comparisons of wind load between the original and current whole roof model



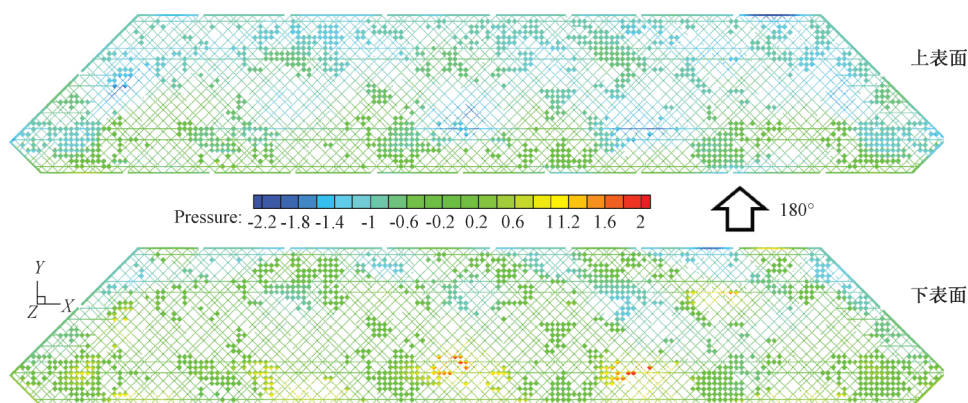


图8 新方案屋盖整体模型表面平均风压云图(180°风向角)(kPa)

Figure 8 Mean wind pressure distribution on the current whole model roof with 180° wind angle of attack(kPa)

面局部较大的负风压(风吸力)容易引起这些位置的局部风致破坏,特别是布置有光伏板且局部负风压也较大的区域,应注意加强光伏板连接件的抗风措施。需要说明的是,将屋盖各杆件节点范围内的网格单元风压和面积进行积分后叠加,即可得到用于网格结构抗风设计的节点风荷载,限于篇幅,本文未列出屋盖结构杆件的节点风荷载值。

### 2.3 流场分析

图9和图10为180°风向角下,有、无考虑底部建筑时,计算域流向的两个纵剖面速度矢量图,

图中还给出了风压等值线图。由图9、10可见,①屋盖不同位置纵剖面起伏程度均较大且趋势不尽一致,使得相应的流场也呈现不同分布,屋盖的下凹或突出部位处于上游位置部分多为正压,而位于下游的部位则因处于流动分离区出现负压,导致了上述屋盖表面风压分布的差异。②底部建筑的存在使得其上方屋盖(图9(a)、图10(a))处于建筑顶部流动分离后的流场内,部分区域屋盖附近气流方向发生了改变,造成屋盖表面风压大小甚至符号的改变,尤其是距离底部建筑较近的屋盖下凹部分最显著。

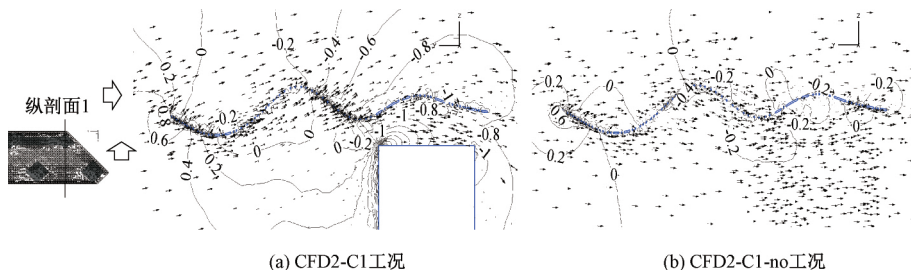


图9 有、无考虑底部建筑时,纵剖面1位置处速度矢量图(kPa)

Figure 9 Velocity vector around the longitudinal section 1 with and without considering the buildings(kPa)

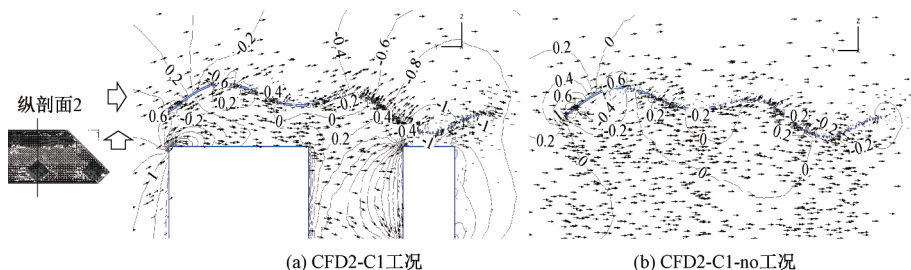


图10 有、无考虑底部建筑时,纵剖面2位置处速度矢量图(kPa)

Figure 10 Velocity vector around the longitudinal section 2 with and without considering the buildings (kPa)

## 3 结论

(1) CFD数值模拟方法可较好地应用于预测大跨网格屋盖结构的平均风荷载,不仅可以较准确地给出结构的整体风荷载,而且具有方便给出

结构局部风荷载分布的优势。

(2) 光伏板布置对屋盖整体水平风荷载的影响相对不明显,布置光伏板时竖向风荷载(吸力)可达无光伏板时的2.5倍左右。底部建筑可显著影响屋盖竖向风荷载的大小和方向,特别是当来流垂直于

屋盖长边时,有、无底部建筑情况下屋盖均受较大的竖向平均风荷载,其符号(方向)完全相反;底部建筑的存在会增大屋盖下表面局部位置风吸力。

(3) 屋盖结构整体受到的水平风荷载占主导地位,竖向风荷载以向上的风吸力为主,较有利于结构的整体受力;屋盖表面存在较明显的局部风压不均匀现象,特别是屋盖下表面存在较大范围的局部风吸力,可能会引起这些位置光伏板的局部破坏。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] CHENG C M, FU C L. Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2010, 98(6/7): 328–344.
- [3] 郑德乾, 郑启明, 顾明. 平滑流场内半圆球形大跨屋盖非定常绕流大涡模拟 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊 1): 19–24.
- [4] 黄友钦, 王艳萍, 傅继阳, 等. 基于齿形法的空间桁架结构抗风优化 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(5): 22–25, 37.
- [5] 张庆华, 顾明. 典型格构式结构风荷载及风致响应规范比较 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(6): 140–145.
- [6] 梁枢果, 邹良浩, 赵林, 等. 格构式塔架三维动力风荷载的风洞试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2007, 25(3): 311–318, 329.
- [7] 沈国辉, 项国通, 邢月龙, 等. 2 种风场下格构式圆钢塔的天平测力试验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(4): 704–710.
- [8] 杨风利. 角钢输电铁塔横担角度风荷载系数取值研究 [J]. 工程力学, 2017, 34(4): 150–159.
- [9] 李正良, 刘欣鹏, 晏致涛, 等. 遮挡型格构式塔架风力特性试验研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 99–104.
- [10] CÉLIO F C, ISYUMOV N, BRASIL R M L R F. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2003, 91(8): 1007–1022.
- [11] 游溢, 晏致涛, 陈俊帆, 等. 圆钢管格构式塔架气动力的数值模拟 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(7): 54–60.
- [12] 党会学, 赵均海, 张宏杰. 三角形格构式塔身杆件风荷载及流动干扰特性 [J]. 力学季刊, 2015, 36(4): 740–748.
- [13] 潘钧俊, 崔家春, 周健, 等. 大跨镂空屋盖平均风荷载研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(增刊 1): 15–20.
- [14] 顾明, 全涌. 上海松江漕河泾新建生产及辅助用房高频天平测力风洞试验报告 [R]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2016.

## Numerical Investigation of Wind Load on Long Span Hollow Grid Roof

ZHENG Deqian<sup>1,2</sup>, LIU Shuaiyong<sup>1</sup>, GU Ming<sup>2</sup>, QUAN Yong<sup>2</sup>, PAN Junjun<sup>3</sup>, ZHOU Jian<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 4. East China Architectural Design & Research Institute, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** Wind load of the long span roof was numerically investigated by adopting CFD simulation method. The present numerical method was firstly verified by comparing the simulated base force of the section roof model with the force balance wind tunnel experimental data. Effects of the PV panel density and the supporting buildings on the wind load distribution on the roof were then investigated. The wind load distribution mechanism was analyzed based on the simulated flow field. Finally, the base force and the wind pressure distribution on the whole roof were presented and compared with those of the old scheme roof. The CFD simulation method was verified to be capable in predicting the mean wind load on the long span hollow grid roof structure. Wind effect on the roof was dominated by the horizontal wind load. The vertical wind load was mainly wind suction which was favorable for the structure. Inhomogeneous distribution of local wind suction was observed on the roof, especially at the bottom surface of the roof. Large wind suction was easy to cause local wind-induced damage in those zones. In comparison with the PV panel density, the supporting buildings could have more remarkable influence on both the base wind forces and local wind pressure distribution on the roof structure. The existence of the supporting buildings could not only increase the vertical wind suction on the whole roof body, but also could enlarge the local wind suction on some part of the bottom of the roof.

**Key words:** long span roof; hollow grid structure; wind load; computational fluid dynamics; numerical simulation