

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210621001

# 周围建筑群对大跨穹顶屋盖的风致干扰效应研究\*

霍林生, 齐昊

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 大跨穹顶屋盖的风荷载会受到周围建筑群的影响,然而目前的规范中给出的风荷载并没有考虑此影响因素,本文研究了周围建筑群的建筑布置形式和建筑面积密度对大跨穹顶屋盖的风致干扰效应及其作用规律。运用计算流体力学(CFD)方法中的雷诺时均方法定常计算屋面平均风压,其中采用指数率风速剖面定义平均风速,采用重组化群 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟湍流特性,并与风洞试验结果进行对比验证了数值模拟方法的准确性。通过在数值风洞中建立大跨穹顶结构与干扰建筑群的组合模型,考虑五种建筑布置形式、四种建筑面积密度和 $0^\circ\sim 360^\circ$ 风向角,分析穹顶屋面各区域在典型风向下和最不利风向下风压系数和干扰因子,研究不同的建筑布置形式和建筑面积密度引起的干扰效应。结果表明,当来流上游和下游均有干扰建筑时屋面风压急剧缩减,当来流两侧有干扰建筑时屋面风压显著放大;考虑建筑布置形式,穹顶结构相对的两侧有干扰建筑是最不利布置形式,其中屋面的中心区域和紧邻干扰建筑的区域是干扰效应最剧烈的屋面区域,在结构设计中需要重点关注;干扰效应的程度与建筑面积密度成正比,屋面区域风压的“放大效应”和“缩减效应”均会随建筑面积密度的增大而加剧。本文的研究结果可为大跨穹顶结构的抗风设计提供依据。

**关键词:** 大跨穹顶屋盖; 风致干扰效应; 计算流体力学; 建筑布置形式; 建筑面积密度  
**中图分类号:** TU312   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1257-10

## Research on Wind-induced Interference Effects of Surrounding Buildings on the Long-span Dome-roof

HUO Linsheng, QI Hao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The wind loads of long-span dome roofs in cities can be affected by surrounding buildings, which are not considered in the current codes. In this paper, the wind-induced interference effects of the building layout and building area density on the long-span dome-roof are studied. Reynolds Average Navier-Stokes method for computational fluid dynamics (CFD) is used to simulate the mean wind pressure on the dome-roof. The exponential wind speed profile and RNG  $k-\epsilon$  turbulence model are used to simulate the mean wind speed and turbulence characteristics, respectively. The accuracy of the numerical results is verified through a wind tunnel test. By establishing combined models of the long-span dome structure and interference buildings in the numerical wind tunnel, considering five building layout forms, four types of building area density and  $0\sim 360^\circ$  wind directions, the pressure coefficients and interference factors of each area on the dome-roof under typical wind directions and the most unfa-

\* 收稿日期:2021-06-21;修回日期:2021-08-10

基金项目:国家重点研发项目(2016YFC0701103)资助

作者简介:霍林生(1975—),男,教授,博导,博士。主要从事抗风与风振控制研究。E-mail:lshuo@dlut.edu.cn

avorable wind direction are analyzed, and the interference effects caused by different building layout forms and building area densities are studied. The results demonstrate that the upstream and downstream buildings decrease the wind pressure, while the buildings on both sides of the inflow amplify the wind pressure. Considering the building layout, the most unfavorable building layout is that there are interference buildings on the opposite sides of the dome structure. The interference effect is the most severe in the central area of the roof and the area adjacent to the interference buildings, to which attention needs to be paid in the structural design. The interference effect is directly proportional to the building area density, and the "amplification effect" and "reduction effect" of wind pressure are strengthened with the increase of building area density. The results of this paper can provide a reference for wind-resistant design of long-span dome structures.

**Keywords:** long-span dome-roof; wind-induced interference; computational fluid dynamics; building layout; building area density

## 引 言

大跨穹顶结构由于具有良好的经济效益和结构效率,是许多大型场馆建筑经常采用的结构形式。作为一种风敏感性结构<sup>[1]</sup>,大跨穹顶结构的屋盖常常会遭到风灾破坏,因此屋面的风荷载是其结构设计时的重要考虑内容。随着城市建筑空间布局越来越紧密,大跨穹顶结构周围往往会布置有密集的建筑群,这导致风场环境变得复杂多样,建筑物之间的气流特性会受到强烈干扰,导致穹顶屋面上的风荷载分布发生显著改变。

目前已有针对低矮房屋群的风致干扰效应研究<sup>[2-3]</sup>,但对于大跨空间结构的抗风设计,大都是只针对单体结构本身。文献[4]通过分析不同雷诺数下大跨穹顶结构的气动特性和涡旋分布规律,研究风荷载的形成机理;文献[5]研究了不同风向角下大跨屋盖的风压系数和风振系数的差异;文献[6-8]对比了不同的结构形式、尺寸、风场类型条件下大跨穹顶结构的平均和脉动风压特性。虽有少量文献研究了大跨空间结构风致干扰效应,但是也只考虑了周边单体建筑干扰的影响,忽略了群体建筑的影响。如文献[9]给出了周边单体干扰结构对目标穹顶结构不同区域风荷载的影响;文献[10-11]研究了相同形状的穹顶结构之间的气动干扰效应;文献[12-13]通过改变施扰建筑外形和位置,探求单体高层建筑对不规则大跨屋盖风荷载的干扰规律。

对于大跨屋盖的风致干扰效应,目前尚无针对周围建筑群影响规律的研究,如建筑群不同的形式和密

集程度如何影响屋盖表面的风荷载。本文以典型的大跨穹顶结构为研究对象,采用CFD数值模拟方法中的雷诺时均方法(Reynolds Average Navier-Stokes),对处于建筑群中的大跨穹顶屋面的平均风压进行数值模拟。研究的因素包括周围建筑群的布置形式和建筑面积密度,同时考虑各个风向,得出周围建筑群对大跨穹顶屋面的风致干扰效应规律。

## 1 数值模拟概况

### 1.1 湍流模型与计算域设置

由于本文研究的是屋面的平均风压,因此采用雷诺时均方法进行数值模拟,并选择ANSYS FLUENT软件中提供的重组化群 $k-\epsilon$ (RNG  $k-\epsilon$ )湍流模型来模拟湍流特性。与标准 $k-\epsilon$ 模型和雷诺应力模型相比,RNG  $k-\epsilon$ 模型提高了大变形率流场的计算精度,已被广泛应用于建筑物间的气流模拟。例如,J.J.Kim等<sup>[14]</sup>使用RNG  $k-\epsilon$ 模拟了城市建筑群之间和街道中气流的流动和扩散,发现RNG  $k-\epsilon$ 模型能够比标准 $k-\epsilon$ 模型更好地再现气体在上层建筑物上方的流动分离和反向流动;N.Koutsourakis等<sup>[15]</sup>通过多组实验数据评估了雷诺应力模型、标准 $k-\epsilon$ 模型和RNG  $k-\epsilon$ 模型三种湍流模型模拟城市街道中气体流动的效果,结果表明,RNG  $k-\epsilon$ 模型在大多数实验工况中表现最好。

本文采用指数率风速剖面定义来流风速<sup>[16]</sup>:

$$U = U_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, $U$ 为高度 $z$ 处的水平风速; $U_r$ 为参考高度 $z_r$ 处

的参考风速,本文取参考高度为 10 m,参考风速为 12 m/s; $\alpha$ 是地面粗糙度指数,本文根据我国荷载规范中的C类地形取为 0.22<sup>[17]</sup>。

对于来流风的湍流特性,湍动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  的表达式为<sup>[18]</sup>:

$$k = 1.5(U \times I_u)^2 \quad (2)$$

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} (k^{3/2} / L_u) \quad (3)$$

式中,  $C_\mu$  为模型常数,取 0.09;  $L_u$  为湍流积分尺度,

$L_u = 100 \left( \frac{z}{30} \right)^{0.5}$ ;  $I_u$  为湍流强度,参考日本荷载规范定义为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} I_u = 0.1(z_b/z_G)^{-\alpha-0.05}, & z \leq z_b \\ I_u = 0.1(z/z_G)^{-\alpha-0.05}, & z_b \leq z \leq z_G \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $z_b$  和  $z_G$  分别为界面层高度和梯度风高度,按照日本规范中与我国C类地形相近的Ⅲ类地形,分别取 10 m 和 450 m。

图 1 为计算域示意图。流场计算域的长度  $L$  设置为 3 000 m,将目标建筑放置在距离风速入口 1/3 长度处,以保证气流充分耗散;根据建筑数量和布置形式的不同,计算域的宽度  $W$  设置为 1 500~3 000 m,高度  $H$  设置为 320~400 m,满足流场的阻塞率小于 3% 的需求。

采用混合网格来对计算域进行网格划分,如图 2 所示,其中采用非结构化网格划分流场内域,便于调整模型的方向和位置;采用结构化网格划分流场外域,可以有效提高网格生成效率。计算域的入口和出口边界分别设置为速度入口和压力出口,顶部

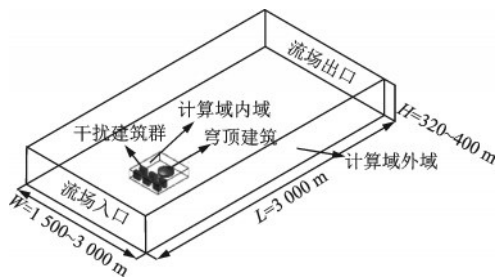


图1 计算域示意

Fig.1 Computational domain

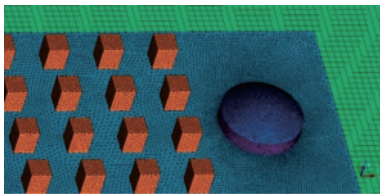


图2 网格划分示意

Fig.2 Grid discretization

和侧面边界被设置为对称边界,底面和建筑物表面采用无滑移壁面边界条件。建筑物表面的边界层网格采用棱柱体单元,第一层网格与壁面之间的距离用无量纲距离  $y^+$  表示,为满足近壁面流动的要求,保证  $y^+$  的值在 30~60<sup>[19]</sup>,并采用非平衡壁面函数进行模拟。计算域的网格总数为 300 万至 900 万不等。

## 1.2 结构模型与数据分析方法

本文选择矢跨比为 1/6 的穹顶结构作为研究对象,模型直径为 120 m,屋檐高度为 20 m,总高度为 40 m。为了便于进行数据分析,需要对穹顶屋面进行区域划分。根据穹顶的几何形状和气流特性,将屋面进行圆环状区域划分<sup>[9]</sup>,如图 3 所示。屋面共 25 块区域,每块扇形区域的圆心角均为 45°,同时将屋面划分出 4 个同心圆,同心圆的半径从小到大各相差 15 m。

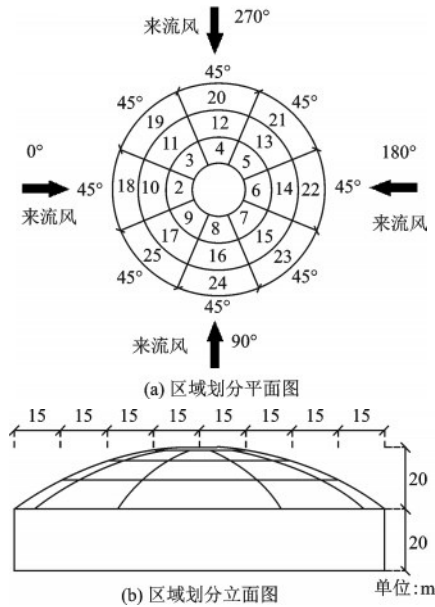


图3 屋面分区示意

Fig.3 The partitioned regions of the dome roof

对于建筑表面的平均风压,通常用无量纲的平均风压系数  $C_p(i)$  进行描述,定义为建筑物表面某一位置  $i$  上的平均压力值除以参考速压<sup>[20]</sup>,即:

$$C_p(i) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P(i, t_j)}{\frac{1}{2} \rho U_H^2} \quad (5)$$

式中,  $P(i, t_j)$  为压力值的时程数据;  $n$  为数据个数;  $\rho$  为空气密度;  $U_H$  为参考高度处的风速。

将屋面各分区的平均风压系数定义为分区内各个位置风压系数的面积加权平均值,即:

$$C_{p,A} = \frac{\sum_i^n C_p(i) A_i}{\sum_i^n A_i} \quad (6)$$

式中,  $C_{p,A}$  为区域平均风压系数;  $A_i$  为位置  $i$  的有效从属面积。

在屋盖的抗风设计中,通常认为风吸力对结构最为危险,因此认为绝对值最大的负压(即压力值最小)是最不利的。为了考虑不同风向的影响,本文将某一区域的最不利风压系数  $C_{p,\min}$  定义为该区域考虑所有风向时的风压最小值,即:

$$C_{p,\min} = \min_{\theta}(C_{p,A}), \theta = 0^{\circ} \sim 360^{\circ} \quad (7)$$

式中,  $\theta$  为风向角。

采用干扰因子 IF 为干扰效应的衡量指标,定义为屋面某一区域在受到建筑群干扰后的平均风压与无干扰建筑时的平均风压之比,具体表达式为:

$$IF = \frac{C'_{p,\min}}{C_{p,\min}} \quad (8)$$

式中,  $C'_{p,\min}$  为屋面区域受到建筑群干扰后的平均风压系数。

当干扰因子  $IF > 1$  时,表示干扰效应对屋面风压产生放大效应;当干扰因子  $0 < IF < 1$  时,表示干扰效应对屋面风压产生缩减效应;当干扰因子 IF 值趋近于 1 时,表示干扰效应非常微弱。

## 2 模拟方法验证

以 B 类风场下的风洞实验结果<sup>[21]</sup>为例,验证数值模拟方法的准确性。风洞实验在大连理工大学风洞实验室(DUT-1)中进行,穹顶模型的原型尺寸与本文研究对象相同,缩尺比为 1:150,参考风速和参考高度分别为 12 m/s 和 200 mm。实验的雷诺数  $Re$  根据风场环境和模型尺寸取为  $6.8 \times 10^4$ , 计算公式为:

$$Re = \rho v d / \mu \quad (9)$$

式中,  $\rho$  为空气密度,取  $1.293 \text{ kg/m}^3$ ;  $\mu$  为黏性系数,取  $1.81 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ ;  $d$  为特征长度,取模型直径 800 mm;  $v$  为空气流速,取参考风速 12 m/s。

对比的工况包括一组无干扰工况(图 4)和一组有干扰工况(图 5),穹顶表面风压系数如图 6 所示。可以看出,无干扰工况下数值模拟与风洞试验地风压分布和大小比较一致,有干扰工况下数值模拟也

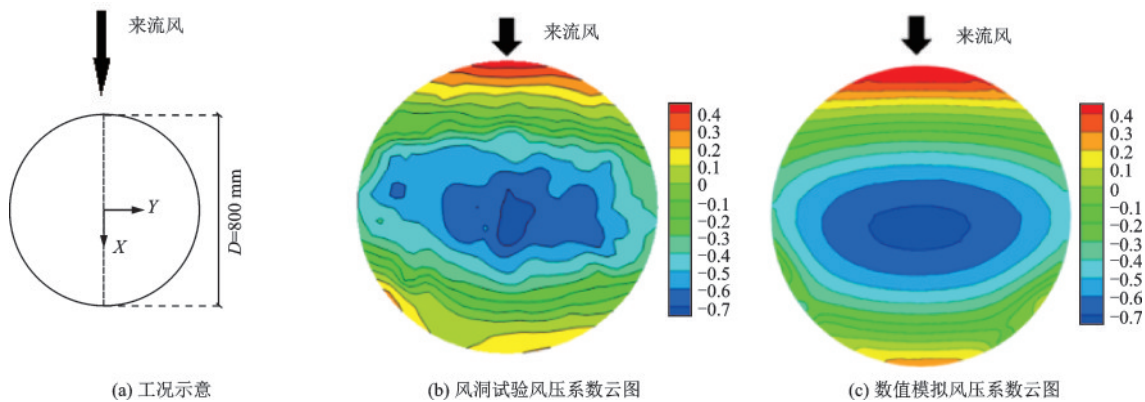


图 4 无干扰建筑时穹顶平均风压系数对比 ( $Re = 6 \times 10^4$ )

Fig.4 Mean pressure coefficients of the isolated dome structure ( $Re = 6 \times 10^4$ )

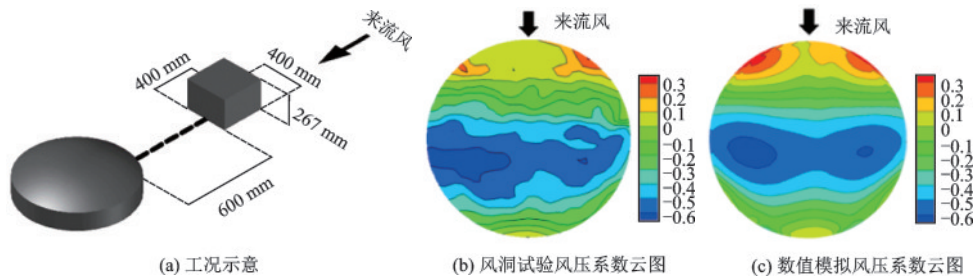


图 5 有干扰建筑时穹顶平均风压系数对比 ( $Re = 6 \times 10^4$ )

Fig.5 Mean pressure coefficients of the interfered dome structure ( $Re = 6 \times 10^4$ )

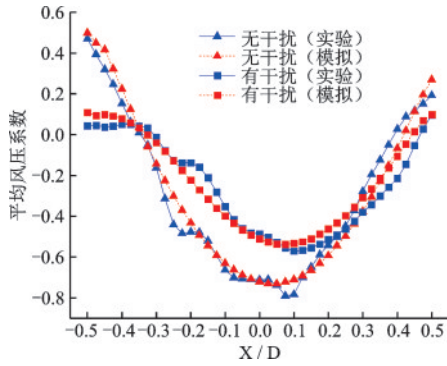


图6 穹顶表面中央子午线上的风压系数对比

Fig.6 Mean pressure coefficients at the center meridian

能够较为真实地还原干扰建筑带来的气流分离,证明了数值模拟方法准确可靠。

### 3 建筑群包围形式的影响

参考实际城市的建筑空间布局,考虑五种建筑群布置形式对穹顶建筑屋面风压的干扰效应,称为干扰建筑群对穹顶建筑的“包围形式”,如图7所示。建筑群中各个建筑的尺寸均为  $30\text{ m} \times 30\text{ m} \times 40\text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),建筑间距  $L_1$  均为  $80\text{ m}$ ,最内侧建筑与穹顶建筑间的水平投影距离  $L_2$  均为  $120\text{ m}$ 。每种包围形式均考虑风向角  $\theta=0^\circ\sim 360^\circ$  的不同情况,各个风向角之间间隔  $15^\circ$ ,一共 24 个风向角

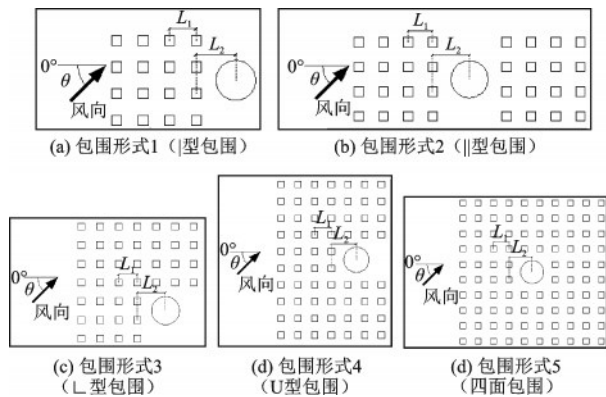


图7 建筑群包围形式示意

Fig.7 Surrounding forms of buildings

#### 3.1 典型风向分析

图8和图9给出了  $0^\circ$  风向下几种工况时穹顶屋面各区域的平均风压系数和水平风速剖面图。从图8可以看出,相比无干扰工况,其他工况时屋面大部分区域的平均风压系数绝对值出现明显缩减。

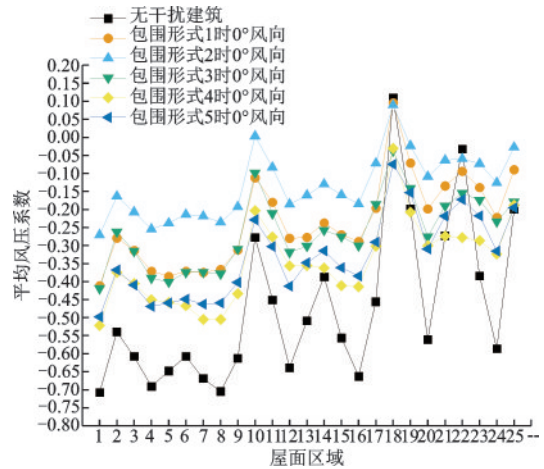


图8  $0^\circ$  风向时屋面的风压系数

Fig.8 Pressure coefficients of the roof in a  $0^\circ$  wind direction

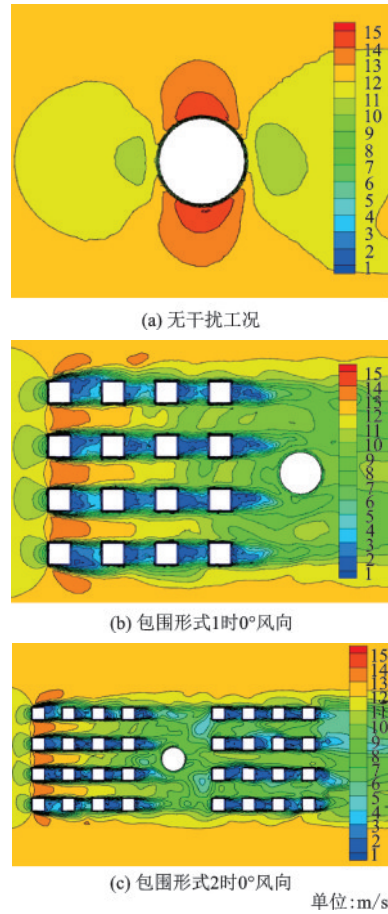


图9  $0^\circ$  风向下无干扰与有干扰时  $30\text{ m}$  高度处水平风速剖面

Fig.9 Contours of the wind velocity profile at  $30\text{ m}$  without and with interference in a  $0^\circ$  wind direction

这一干扰效应的产生原因如图9所示,可以看出来流风吹来时,上游建筑群对来流风起到一定的屏蔽作用,使得到达穹顶建筑屋面的风速大大降低;同

时,来流风会在干扰建筑的正后方形成一定数量的涡旋,涡旋产生的吸力会大大降低周围风场的风速,从而在穹顶建筑周围形成低风速区域,最终导致穹顶建筑屋面的风吸力减弱,即所谓的“遮挡效应”。

通过分析图8可以发现五种干扰工况中包围形式2时穹顶屋面的平均风压系数最为平均,且风压绝对值较小,各区域的平均风压系数为 $-0.27\sim -0.09$ 。将图9(c)与图9(a)、(b)比较可以看出,气流在经过穹顶建筑后的尾流特性被下游建筑干扰,原有的耗散路径被阻挡,在穹顶建筑下游区域形成两个风速为 $5\text{ m/s}$ 左右的低速涡旋,致使穹顶建筑周围的风速减小。另外,可以看出包围形式4和包围形式5时屋面的平均风压绝对值是五种干扰工况中较大的,绝对值最大的区域风压系数达到 $-0.52$ ,说明来流方向两侧的建筑群制约了气流向两侧的扩散,致使穹顶建筑周边环境平均风速增大。

$90^\circ$ 风向下几种工况下穹顶屋面各区域的平均风压系数和水平风速剖面如图10和图11所示。由图10可见,位于来流方向一侧的建筑群会增大穹顶屋面的平均风压绝对值,包围形式1和包围形式2时屋面大部分区域的风压绝对值相比无干扰建筑时均增大,绝对值最大区域的平均风压系数可以达到 $-0.82$ 和 $-0.90$ 。对于这一现象的机理,通过分析图11可以看出干扰建筑与穹顶建筑之间狭窄的间隙加快了气流流动,导致穹顶屋面周围的风速最大可以达到 $15\text{ m/s}$ ,从而引起负压绝对值的增大,这就是所谓的“狭道效应”。另外,比较图11(a)、(b),可以发现图11(b)中“狭道效应”对穹顶屋面风压系数以及穹顶周围风速的放

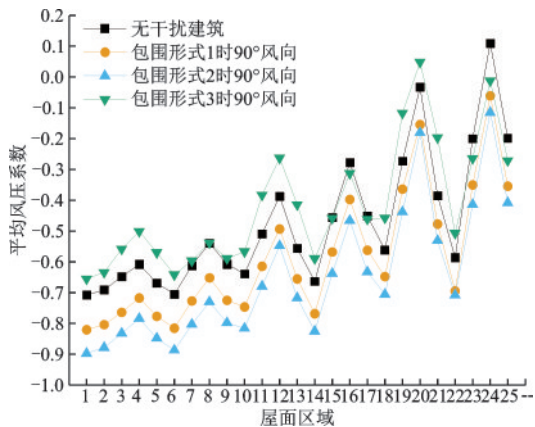


图10  $90^\circ$ 风向时屋面风压系数

Fig.10 Pressure coefficients of the roof in a  $90^\circ$  wind direction

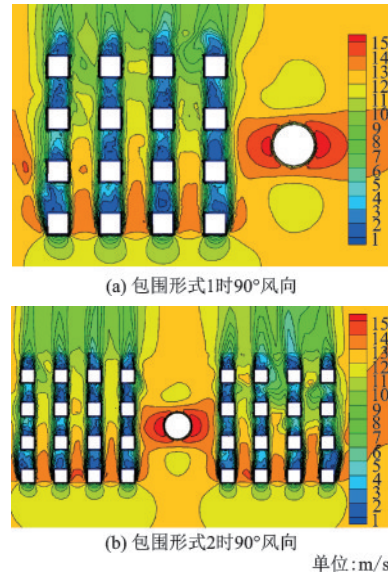


图11 干扰建筑群位于来流方向两侧时2种工况的 $30\text{ m}$ 高度处水平风速剖面图

Fig.11 Contours of the wind velocity profile at  $30\text{ m}$  without and with interference in a  $90^\circ$  wind direction

大效应更加明显,这说明当穹顶建筑两侧都有干扰建筑时,两条“狭道”比一条“狭道”的作用更为强烈。

### 3.2 最不利风压系数分析

图12展示了在5种建筑群包围形式下穹顶屋面各区域的最不利风压系数和相应的干扰因子。由图可见,建筑群不同的包围形式对穹顶屋面的最不利风压系数的干扰效应有很大差别。在包围形式2中,穹顶屋面中有多达 $76\%$ 的区域出现了最不利风压绝对值增大(干扰因子大于1)的现象,而在包围形式1中这一数字也达到了 $68\%$ ,在包围形式4中则是 $36\%$ ,周围建筑群在这三种包围形式中均产生了明显的风压放大效应;而在包围形式3中,只有一个区域出现了最不利风压绝对值增大的现象,在包围形式5中则是全部区域的风压绝对值均减小,这说明在这两种包围形式中周围建筑群对来流风主要起到了屏蔽作用。对于可能会对屋面风压产生放大效应的包围形式1~4,图13进一步给出了其不同风向时的屋面平均风压系数。可以看出对于包围形式1和包围形式2, $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 风向角是最不利风向角,此时屋面平均风压系数分别可以达到 $-0.55$ 和 $-0.61$ ,大大超过无干扰建筑时的 $-0.44$ ;对于包围形式4,最不利风向角为 $165^\circ$ 和

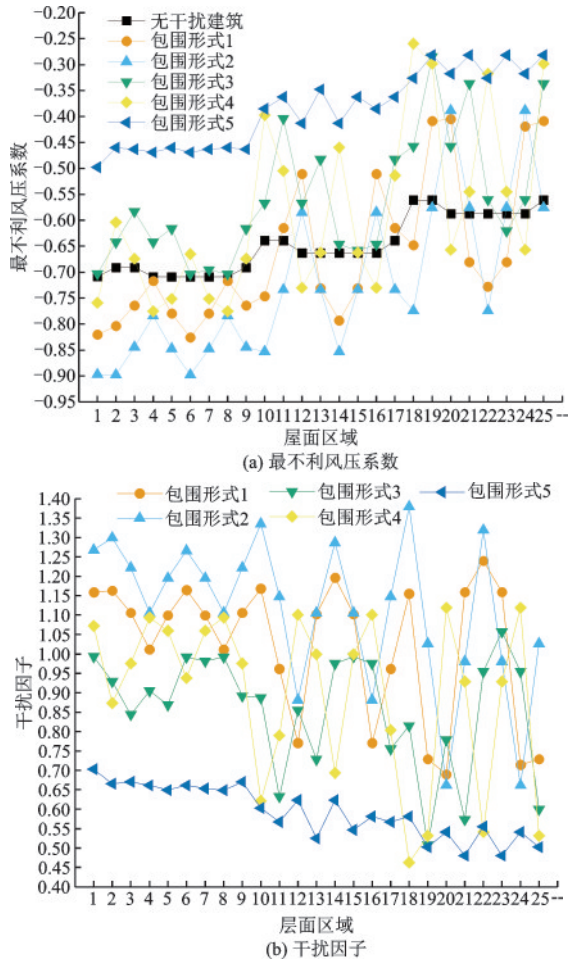


图12 不同包围形式下最不利风压系数及干扰因子  
Fig.12 The worst pressure coefficients and interference factors under different surrounding forms

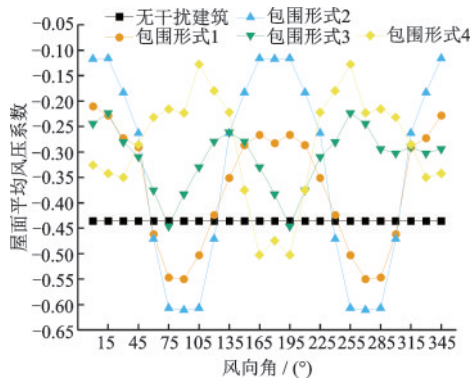


图13 不同包围形式下各风向时的屋面风压系数  
Fig.13 Mean pressure coefficients on the roof in different wind directions under different surrounding forms

196°, 风压系数达到-0.50; 包围形式3的最不利风向角则为75°和195°, 此时屋面平均风压系数绝对值仅比无干扰建筑时增大0.1。上述分析显示, 来流从穹顶建筑与建筑群之间的通道流入的风向通常为各种工况下的最不利风向, 进一步说

明屋面区域的最不利风压基本上均由“狭道效应”所引起, 因此“狭道效应”最显著的包围形式2的风压放大效应最明显。

此外图12显示, 对各个包围形式而言, 穹顶屋面的不同区域也呈现出不同的变化。在包围形式2中, 紧邻干扰建筑的区域(2、6、10、14、18、22)受到“狭道效应”的影响最为剧烈, 最不利风压系数增幅最大可达到37%; 对于不靠近任意一侧干扰建筑的区域(12、16、20、24), 它们在任何风向下都不会受到“狭道效应”的影响, 而当气流从一侧流入时则会受到上游建筑的“遮挡效应”, 因此最不利风压绝对值减小, 减小的最大幅度可以达到34%。包围形式1与包围形式2相比, 虽然穹顶建筑仅一侧靠近干扰建筑群, 但屋面的中心区域(1~9)、靠近干扰建筑群的区域(10、18)以及远离建筑群的区域(13~15、21~23)的风压仍然出现明显的放大效应, 增幅在10%~24%不等; 受到“遮挡效应”影响显著的区域除了12、16、20、24还增加了区域19和25, 风压降幅在23%~31%。对于包围形式4而言, 由于穹顶建筑三个方向都被干扰建筑群包围从而形成了一面开口的“U”型分布, 只有当气流从开口处流入建筑群时才能产生明显的“狭道效应”, 因此穹顶屋面上相应的靠近两侧气流通道的区域(4、5、7、8、12、16、20、24)和中心区域1的风压随之增大, 但又受到下游建筑阻碍尾流扩散的影响, 最不利风压系数的增幅并不显著, 约在6%~12%; 相应地, 屋面区域(10、11、17、18、19、25)位于建筑群包围的最严密位置, 来流受阻挡大大降低了风速, 最不利风压系数大幅降低, 受影响最大的区域18的风压降幅可以达到54%。

从包围形式3的建筑分布来看, 干扰建筑群对穹顶建筑形成了“L”型包围, 即便干扰建筑与穹顶建筑之间形成气流通道, 下游建筑对尾流扩散的阻挡效应仍然对穹顶屋面的风压大小起到主导作用, 因此建筑群包围最外侧的区域23以外, 其他各区域的最不利风压绝对值均降低; 包围最内侧的区域(11、13、17~21、25)的降低幅度最大, 约在18%~49%。包围形式5穹顶建筑四面均被包围, 来流被干扰建筑群的阻挡情况最为严重, 屋面各区域风压的缩减效应最为显著, 且分布状况趋于平均, 风压降幅在30%~52%不等, 靠近建筑群夹角的区域(19、21、23、25)的降幅最大。

## 4 建筑面积密度的影响

为了研究干扰建筑群内建筑的密集程度对穹顶屋面风压的干扰效应,定义建筑面积密度为<sup>[22]</sup>:

$$C_A = \frac{BD}{WL} \quad (10)$$

式中, $B$ 和 $D$ 分别为单个干扰建筑的宽度和长度; $W$ 和 $L$ 分别为两个相邻干扰建筑在宽度和长度方向的中心距离。

以包围形式5为例,不同建筑面积密度时的建筑布置情况如图14所示。

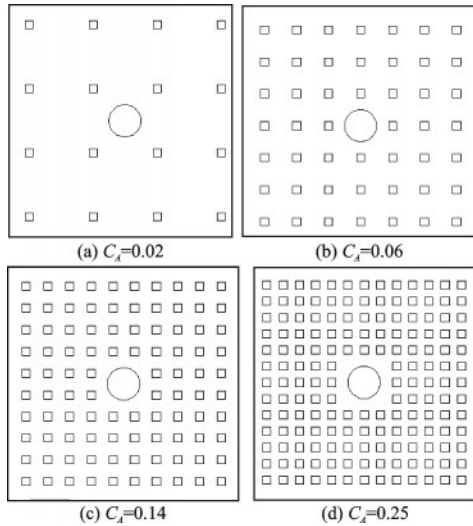


图14 建筑面积密度示意

Fig.14 Building area density

根据3.1节的研究结果,本节选择风压放大效应最明显的包围形式2和风压缩减效应最明显的包围形式5来研究建筑面积密度对穹顶屋面最不利风压系数的干扰效应。每种工况中干扰建筑尺寸均为 $30\text{ m} \times 30\text{ m} \times 40\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),考虑 $0^\circ \sim 360^\circ$ 共24个风向角,各个风向角之间间隔 $15^\circ$ 。

对于包围形式2,根据建筑布置形式的对称关系,可以通过区域1、2、3、4、10、11、12、18、19、20来代表整个屋面,因此这里只给出这部分区域在不同建筑面积密度下的最不利风压系数和干扰因子,如图15所示。总体而言,当建筑密度较小时,屋面各区域的最不利风压较为平均且干扰因子较小;随着建筑面积密度的增大,各区域的最不利风压波折明显,干扰效应加剧。对于区域12和20,由于位于两侧建筑群之间的中间位置且处于穹顶屋面的外环,因此受到“狭道效应”的影响微弱,主要受到建筑“遮挡效

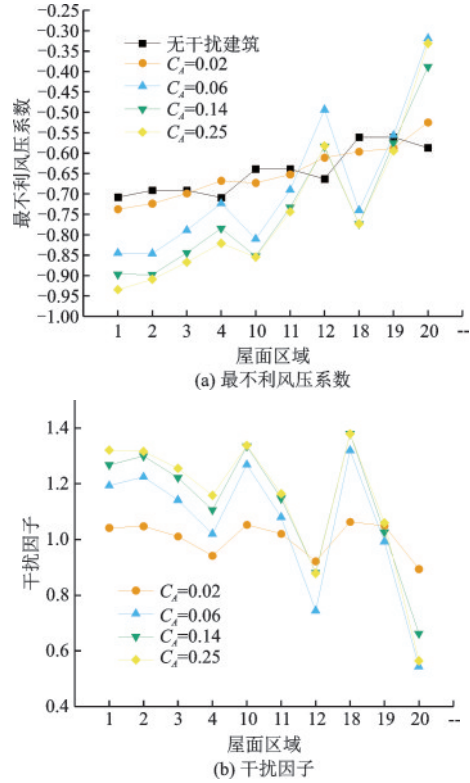


图15 包围形式2下不同建筑面积密度时的最不利风压系数及干扰因子

Fig.15 The worst pressure coefficients and interference factors under different building area densities in surrounding form 2

应”的影响而产生风压的缩减效应,当建筑面积密度为0.06时缩减效应最为明显,两个区域的风压降幅可以分别达到26%和46%。而屋面的中心区域(1、2、3、4)和靠近两侧风速通道的区域(10、11、18、19)则会剧烈地受到“狭道效应”的影响而导致风压绝对值放大,并且会随着建筑面积密度的增大而加剧,当建筑面积密度达到最大时( $C_A=0.25$ )放大效应最为显著,各区域的风压增幅在6%~39%不等。

同样根据对称关系,图16给出了包围形式5下可以代表整个屋面的7个区域(1、2、3、10、11、18、19)的最不利风压系数和干扰因子。由图16可见,当穹顶建筑四周都被建筑群包围时,随着建筑面积密度增大,上游建筑的“遮挡效应”对穹顶屋面风压的干扰效应显著加剧,屋面各个区域的风压绝对值均明显缩减,且各区域的干扰因子较为平均,具有很强的整体性。当建筑面积密度为0.02时,屋面的风压缩减效应不明显,各区域的风压降幅仅为1%~9%;而当建筑面积密度达到0.25时,各区域的风压降幅则可以达到44%~52%,干扰效应达到最大。

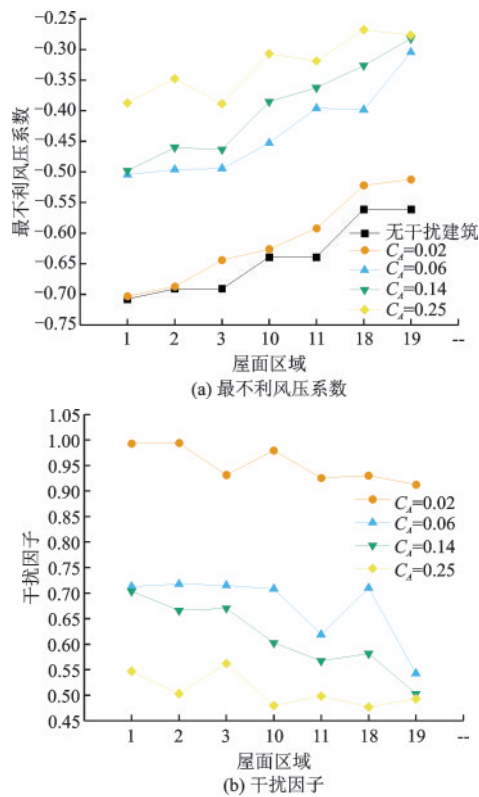


图 16 包围形式 5 下不同建筑面积密度时的最不利风压系数及干扰因子

Fig.16 The worst pressure coefficients and interference factors under different building area densities in surrounding form 5

## 5 结 论

(1) 来流风吹来时,位于穹顶建筑上游的干扰建筑会引起明显的“遮挡效应”,位于穹顶建筑下游的干扰建筑则会阻碍尾流扩散,均会导致屋面风压绝对值显著减小;位于来流方向一侧的干扰建筑会引起“狭道效应”,引起穹顶屋面风压绝对值增大,当两侧都有干扰建筑时“狭道效应”更加明显。

(2) 建筑布置方式对屋面最不利风压有很大影响。当穹顶建筑相对的两侧有干扰建筑时,屋面 76% 的区域的最不利风压被放大,其中紧邻干扰建筑区域的最大增幅达到 37%;当穹顶建筑被建筑群“U”型包围时,靠近两侧气流通道的区域和中心区域的风压被放大,位于包围深处的区域风压则缩减,最大降幅达到 54%;当穹顶建筑被“L”型包围或四面都被包围时,各区域最不利风压显著缩减,其中四面包围时风压降幅在 30%~52%。在对大跨穹顶结构进行建筑选址或对周边建筑进行规划

布局时,应尽量避免大跨穹顶建筑位于两排建筑的中间;若无法避免,在对穹顶屋面进行抗风设计时应针对屋面中心区域和靠近周边建筑的外侧区域进行加强。

(3) 干扰效应的程度与建筑面积密度成正比关系。当建筑群主要位于穹顶建筑的一侧或相对的两侧时,随着建筑面积密度的增大,干扰建筑产生的风压“放大效应”会随之加剧,屋面中心区域和靠近风速通道的区域受影响最为剧烈;穹顶四周都有建筑时,全屋风压的“缩减效应”也会随建筑密度的增大而加剧。在对大跨穹顶结构的周围建筑进行规划时,应尽量控制两侧的建筑群不要太过密集,以减小屋面遭受更大程度风灾的可能性。

## 参考文献:

- [1] Zhou P, Tang B, Liu P, et al. Study on wind load distribution on the surface of dome structure based on CFD numerical simulation [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1176:52-56.
- [2] 李永鑫, 李钢, 甘石. 低矮房屋风致干扰效应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(6):1023-1029.  
Li Y X, Li G, Gan S. Study on wind-induced mean interference effects between low-rise buildings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(6):1023-1029. (in Chinese)
- [3] 王立, 李钢, 甘石, 等. 强风下不同高度低矮建筑间干扰效应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 110-117.  
Wang L, Li G, Gan S, et al. Wind-induced interference effects of low-rise buildings with different heights under strong wind [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3):110-117. (in Chinese)
- [4] 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):328-344.
- [5] 张雪峰, 崔家春, 张映洲. 南京牛首山文化旅游区佛顶宫大穹顶大跨空间自由曲面屋盖风荷载特性研究 [J]. 建筑结构, 2018, 48(14):14-18.  
Zhang X F, Cui J C, Zhang Y Z. Study on wind load characteristics of large-dome and large-span spatial free-surface roof of Fo Ding Palace in Nanjing Niushoushan Cultural and Tourism Zone [J]. Building Structure, 2018, 48(14):14-18. (in Chinese)

- [6] Hou Y, Chen C, Zhou Y, et al. Investigation of natural ventilation performance of large space circular coal storage dome [J]. *Building Simulation*, 2021, 14 (4) : 1077-1093.
- [7] Kim Y C, Yoon S, Cheon D, et al. Characteristics of wind pressures on retractable dome roofs and external peak pressure coefficients for cladding design [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2019, 188:294-307.
- [8] 何星星, 苏波, 石启印. 阶梯型大跨屋盖结构风荷载数值模拟研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(3): 307-312.  
He X X, Su B, Shi Q Y. Numerical simulation of wind-induced loads on large span ladder-type roof structures [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(3):307-312. (in Chinese)
- [9] 刘庆宽, 卢照亮, 郑云飞, 等. 大跨球壳结构风压分布规律和风致干扰效应试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(10):140-146.  
Liu Q K, Lu Z L, Zheng Y F, et al. Experimental study on wind pressure distribution and wind-induced interference effects on long-span spherical structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(10):140-146. (in Chinese)
- [10] Sadeghi H, Heristchian M, Aziminejad A, et al. CFD simulation of hemispherical domes: structural flexibility and interference factors [J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2018, 19(5):535-551.
- [11] 殷志祥, 姜昕彤, 崔翰博. 开洞口煤仓风致干扰效应的 CFD 模拟 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(5): 841-846.  
Yin Z X, Jiang X T, Cui H B. CFD simulation of wind induced interference effects of opening round coal bunker [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(5):841-846. (in Chinese)
- [12] 王根伟, 马江波, 刘存鹏. 周边高层建筑对大跨屋盖结构静风干扰效应试验研究 [J]. *建筑结构*, 2019, 49 (9):115-119.  
Wang G W, Ma J B, Liu C P. Wind tunnel tests of interference effects of static wind on long-span roof from high-rise buildings [J]. *Building Structure*, 2019, 49 (9):115-119. (in Chinese)
- [13] 吴立, 彭国东, 彭兴黔. 大跨体育场馆建筑群风干扰效应数值模拟研究 [J]. *建筑结构*, 2019, 49(11):135-139.  
Wu L, Peng G D, Peng X Q. Numerical simulation of wind interference effect on large-span stadium buildings group [J]. *Building Structure*, 2019, 49(11):135-139. (in Chinese)
- [14] Kim J J, Baik J J. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG  $k-\epsilon$  turbulence model [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(19):3039-3048.
- [15] Koutsourakis N, Bartzis J G, Markatos N C. Evaluation of Reynolds stress,  $k-\epsilon$  and RNG  $k-\epsilon$  turbulence models in street canyon flows using various experimental datasets [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2012, 12(4):379-403.
- [16] Architectural Institute of Japan. Recommendations for loads on buildings [S]. Japan: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [17] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 孙瑛. 大跨屋盖结构风荷载特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
Sun Y. Characteristics of wind loading on long-span roofs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [19] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3(2):269-289.
- [20] 日本建筑学会. 建筑风荷载流体计算指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Architectural Institute of Japan. Guide for numerical prediction of wind loads on buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [21] 霍林生, 潘林俊, 陈超豪. 不同间距比的大跨度穹顶结构风致干扰效应研究 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(1):17-26.  
Huo L S, Pan L J, Chen C H. Study on wind-induced interference effects of long-span dome roof structure with different spacing ratio [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2021, 37(1):17-26. (in Chinese)
- [22] 陈波, 程行, 张丽娜, 等. 不同排列方式平屋面建筑群极值风荷载干扰效应影响研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(10):1-10.  
Chen B, Cheng X, Zhang L N, et al. Investigation on interference effects on peak wind loads on a group of buildings with flat roof under different arrangements [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(10):1-10. (in Chinese)

(本文责编:池营营)