

不同间距比的大跨度穹顶结构风致干扰效应研究

霍林生,潘林俊,陈超豪

(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 目的 研究周边建筑物对大跨度穹顶结构屋面风压的干扰效应,揭示周边干扰建筑的距离对干扰效应的影响规律。方法 选取一栋单体大跨度穹顶结构及2种间距比下的风压分布特性进行数值模拟研究,并通过风洞试验验证了数值模拟的可靠性,再基于 Fluent 数值模拟平台,考虑4种风向角和7种间距比,分析了不同间距比下单体干扰建筑对大跨度穹顶结构屋面风压分布的影响。结果 研究表明:干扰建筑对屋面产生最不利影响的风压区域发生在穹顶中心周围;不同间距比下,干扰建筑对屋面的最不利风压的影响也不一样;间距比小于1.2时,60°风向角为最不利风向角;间距比为1.2~1.4时,90°风向角为最不利风向角;当间距比大于1.4时,30°风向角为最不利风向角。结论 与规范对比,受周边建筑干扰后,最不利风向角下穹顶表面最不利风荷载影响区域的风压会增大1.5倍;笔者的研究成果可为大跨度穹顶结构的抗风设计提供参考。

关键词 大跨度穹顶结构;风荷载;风致干扰效应;数值模拟;风洞试验

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Wind-induced Interference Effects of Long-span Dome Roof Structure with Different Spacing Ratio

HUO Linsheng, PAN Linjun, CHEN Chaohao

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

Abstract: This paper studies the interference effects of surrounding buildings on the wind load distribution of long-span dome roof structures, and illustrate the influence of the space of surrounding buildings on the wind-induced interference. The numerical simulations are performed for an isolated long-span dome structure and two cases of interfering buildings with different

收稿日期:2020-05-20

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701103)

作者简介:霍林生(1975—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事抗风与风振控制方面研究。

spacing ratios, and the accuracies of numerical results are verified through wind tunnel test. Then, based on the Fluent software, the wind-induced interference effects of long-span dome roofs are studied for 4 wind direction angles, 7 types of spacing ratios for analyzing wind-induced interference of long-span dome roof structure about different spacing ratio in this paper. By comparison, it is found that under the single-interference building, the worst wind pressure area on the roof occurs around the center of the dome roof; the different spacing ratio of the single-interference buildings have a different interference effect on the worst wind pressure of the interfered structure. When spacing ratio is less than 1.2, the 60° wind direction angle is the worst wind direction angle. When spacing ratio is 1.2 ~ 1.4, the 90° wind direction angle is the worst wind direction angle. When the spacing ratio is greater than 1.4, the 30° wind direction angle is the worst wind direction angle. Compared with the regulation of the design code, the wind pressure on the worst area of roof under the worst wind direction angle will increase 1.5 times with the influence of interference effect. The results of this paper can provide a reference for wind-resistant design of long-span dome roof structures.

Key words: long-span dome roof structure; wind load; wind-induced interference; numerical simulation; wind tunnel test

大跨度穹顶结构因其外形优美和力学特性好等特点在工程上得到广泛应用,但该类结构属于风敏感性结构^[1],在风荷载作用时常发生破坏,因而风荷载往往成为结构设计中的主要控制荷载。大跨度穹顶结构的屋面风压分布受流场形式、屋面形状和周边建筑的影响较大。尤其是目前城市建筑布局更加密集,周边建筑对于大跨度穹顶结构屋面风压的气动干扰变得更加不可忽视,当前设计规范中对此问题并没有形成条文规定。因此,研究周边建筑对大跨度穹顶结构的干扰效应具有重要的工程意义。

目前风致干扰效应的研究主要集中于高层建筑与低矮房屋^[2-8],虽然部分国内外学者对大跨度屋盖结构屋面的风荷载干扰效应进行了相关研究,如文献[9-12]研究表明干扰体之间的位置关系与形状对大跨度屋盖结构屋面风压具有很大影响;文献[13-15]给出了不同风向角下建筑群的干扰影响;文献[16]发现干扰建筑的间距对大跨度敞开式悬挑结构屋面风压具有较明显的干扰效应。但目前仍缺乏周边建筑的间距对于大跨度穹顶结构干扰效应定量分析的相关研究,针对此问题规范也未提出相关的设计依据。

因此有必要针对不同间距的周边建筑对大跨度穹顶结构的风致干扰效应开展进一步的研究工作。

基于此,笔者以大跨度穹顶结构为研究对象,基于 CFD 数值模拟和风洞试验,对单体干扰建筑与大跨度穹顶结构之间的干扰效应进行了数值模拟研究,综合考虑了单体干扰建筑与大跨度穹顶结构的布置间距、来流方向对风致干扰效应的影响,并对干扰效应通过干扰因子 K 量化,提出干扰系数 I ,为同类结构的抗风设计提供依据。

1 数值模拟概况

1.1 计算模型及边界条件

以大跨度穹顶结构为研究对象,模型的实际尺寸,干扰建筑尺寸与计算域的实际尺寸如表1所示;模型位于计算域距离风速入口 $2/3$ 处,流场的阻塞率满足小于 5% 的要求,具体布置如图1所示。

流场网格划分采用混合网格,即流场内域采用四面体网格,外域采用六面体网格,模型边界层合理设置棱柱体边界层网格^[17],近壁面网格距壁面的距离可以用无量纲距离 y^+ 表示,控制 $y^+ \approx 30 \sim 60$,网格质量较好,满

足计算精度的要求。最终整体计算域网格总数约为 2.0×10^7 。

表 1 计算域尺寸

Table 1 Dimensions of the computational domain	
模型	长 × 宽 × 高/m
大跨度穹顶结构 (矢跨比 1/6)	120 × 120 × 40
计算域	2 400 × 600 × 160
干扰建筑	60 × 60 × 40

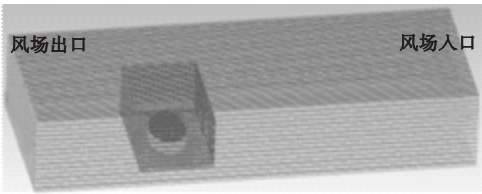


图 1 计算域布局

Fig. 1 Arrangement of the computational domain

基于 Fluent 流体计算分析软件进行数值模拟,将流域入口边界条件设为风速入口,其风速剖面采用指数风速剖面^[18]:

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

(1)

式中: $U(z)$, z 为任一高度处的风速及高度值; U_r , z_r 为参考高度处的风速及高度值,分别取 24.5 m/s, 10 m; α 为地面粗糙度指数,按 B 类地形取 0.16。

考虑来流风的湍流特性,其湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 表达式为^[17]

$$k = 1.5 (U_z \times I_u)^2.$$

(2)

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} (k^{3/2} / l).$$

(3)

$$l = 100 \left(\frac{z}{30} \right)^{0.5}.$$

(4)

式中:湍流强度 $I_u = 0.1 (z/z_G)^{-\alpha-0.05}$; z_G 为梯度风高度; B 类地形取 350 m; C_μ 通常取 0.09; l 为积分尺度。

同时,雷诺应力对来流风特性具有较大的影响,因此本研究中屋面也考虑雷诺应力的影响^[19],风速入口的雷诺正应力与切应力表达式为

$$\begin{cases} \overline{u'u'} = k; \\ \overline{u'w'} = -0.225k; \\ \overline{v'v'} = \overline{w'w'} = 0.5k. \end{cases}$$

(5)

将流域出口边界条件设为完全发展的自由入口,流域的四周及顶面设为对称边界条件,模型表面和流域地面设为无滑移壁面。数值模拟选用精度较高的雷诺应力 RSM 湍流模型^[20],并采用非平衡壁面函数模拟近壁面流场的流动情况。计算方式采用 SIMPLEC 算法求解速度-压力耦合方程,并采用二阶迎风格式控制离散情况。设定计算结果残差小于 10^{-4} ,可视为计算结果收敛。

1.2 数值模拟验证

为了研究干扰建筑与大跨度穹顶结构之间的间距对于大跨度穹顶结构屋面风压分布的干扰效应,定义参数间距比 L_x 为干扰建筑与大跨度穹顶结构几何中心的水平间距 D_x 与大跨度穹顶结构跨度 D 的比值。将干扰建筑按照不同间距比进行设置,同时,考虑到结构的对称性,风向角共考虑了 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间共 4 个不同来流风向,依次为 0° 、 30° 、 60° 以及 90° 。

笔者以《建筑结构荷载规范(GB50009—2012)》^[14]中对大跨度穹顶结构的屋面分区为基础,将屋盖表面划分为 7 个区域用于分析屋盖表面的风压变化情况,如图 2 所示,其中迎风面为 A、B、C 区,背风面为 E、F、G 区。

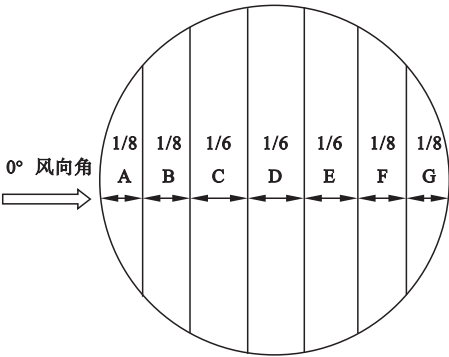


图 2 屋面分区

Fig. 2 The partition of the structure roof

考虑到风洞试验费用过高,本研究以数值模拟研究为主,首先通过典型工况的风洞试验结果对数值模拟结果进行验证,以保证后续数值模拟研究的可靠性。对 0° 风向角下,无干扰建筑和 2 种间距比 ($L_x = 1.25$ 和 1.5) 干扰下的大跨度穹顶结构共 3 种具有代表性的工况进行了试验研究。

对大跨度穹顶结构表面各个分区的风压描述采用各个区域的平均风压系数 $C_{p,a}$,定义如下:

$$C_{p,a} = \frac{\sum_i^n c_{pi} A_i}{\sum_i^n A_i} \tag{6}$$

式中: $C_{p,a}$ 为面积平均风压系数; A_i 为对应测

点 i 的从属有效面积; $c_{p,i}$ 为测点的风压时程,其定义如下:

$$c_{p,i} = \frac{p}{0.5\rho v_r^2} \tag{7}$$

式中: p 为平均风压; ρ 为空气密度; v_r 为参考高度处风速。

为了验证数值模拟的可靠性,通过大连理工大学风洞试验室 (DUT-1) 对屋盖表面风压情况进行风洞试验,风洞截面宽 3 m,高 2.5 m,最大设计风速 50 m/s,采样频率为 200 Hz,采样时间为 30 s,模型缩尺比为 1/150,参考点风速为 12 m/s,测点共计 252 个,迎风面 126 个,背风面 126 个,呈环形布置,且对称分布,风洞试验布置与结构模型如图 3(a) 和图 3(b) 所示。

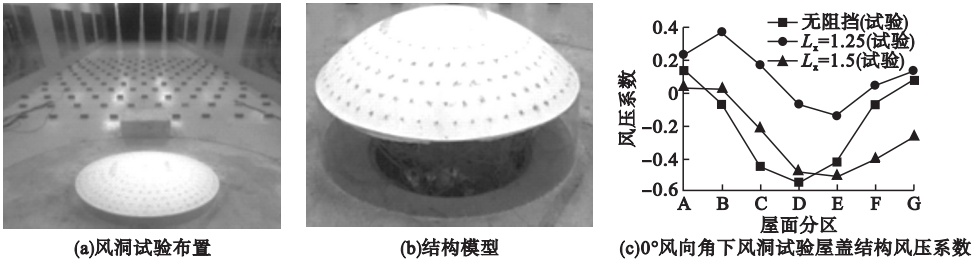


图 3 风洞试验模型与结果

Fig. 3 The model and result of wind tunnel test

试验工况如表 2 所示,并由图 3(c)可知,穹顶结构表面风压的最不利位置为屋盖中心区域(C、D 和 E 区),屋面风压在此区域为较大的负压;间距比为 1.25 时周边建筑对于迎风面的风压具有较大的干扰影响,屋面整体呈现正压分布;间距比为 1.5 时,对于背风面风压具有较大干扰影响,屋面整体呈负压分布,最不利负压增大 25%。

表 2 风洞试验工况

工况	变量	工况类型
1	干扰建筑间距	无干扰(0°风向)
2	干扰建筑间距	间距比 1.25(0°风向)
3	干扰建筑间距	间距比 1.5(0°风向)

图 4 给出了迎风屋面的风洞试验与数值模拟结果风压云图对比图,图 5 为背风屋面

的风洞试验与数值模拟结果风压云图对比图。对比云图,可以看出数值模拟和风洞试验的结果基本一致。图 6 进一步给出了屋面各区域的风压系数值,可以看出数值模拟和风洞试验的结果吻合较好,验证了数值模拟结果的可靠性。

2 大跨度穹顶结构风致干扰特性研究

2.1 结构模型与研究方法

大跨度穹顶结构周边通常分布着众多干扰建筑,呈现集体分布。周边建筑对大跨度穹顶结构屋面风压分布有明显的干扰效应。因此,将对大跨度穹顶结构在单体干扰建筑干扰效应下的屋面风压分布特性进行数值模拟研究。

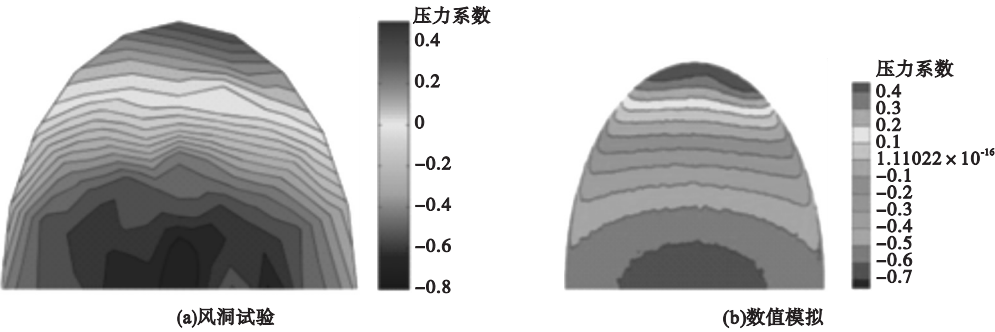


图 4 风洞试验和数值模拟结果风压对比(迎风屋面)

Fig. 4 Comparison of wind pressure about wind tunnel test and numerical simulation(windward roof)

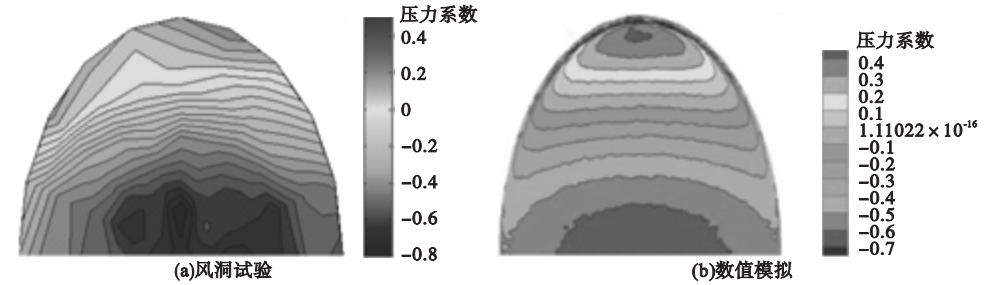


图 5 风洞试验和数值模拟结果风压对比(背风屋面)

Fig. 5 Comparison of wind pressure about wind tunnel test and numerical simulation(leeward roof)

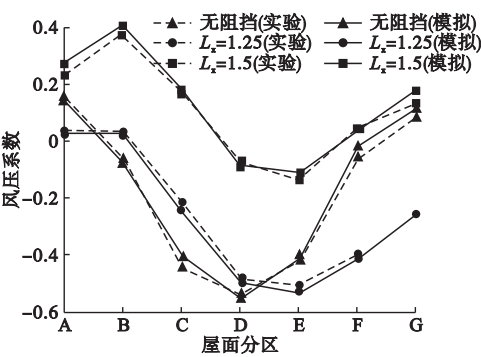


图 6 风洞试验和数值模拟结果比较

Fig. 6 Comparison of wind tunnel test and numerical simulation about pressure coefficient

综合考虑干扰建筑与大跨度穹顶结构之间不同间距比 ($L_x = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.75$ 和 2.0) 对干扰效应的影响,具体布置如图 7 所示。将屋盖表面划分为 7 个区域用于分析不同区域的风压变化情况(见图 2)。

为了更好地量化干扰效应,尤其对于最不利区域,可以定义如下干扰因子 K ,作为干扰效应的衡量指标^[10]:

$$K = \frac{C'_{p,a}}{C_{p,a}}$$

(8)

式中: $C'_{p,a}$ 为受干扰后的面积平均风压系数; K 的大小可以直接反映周边建筑对主结构屋面风荷载的干扰程度。 $K > 1$ 表示干扰增强, $K = 1$ 表示无干扰, $0 < K < 1$ 表示干扰减弱; $K < 0$ 表示,表示风压方向发生变化。

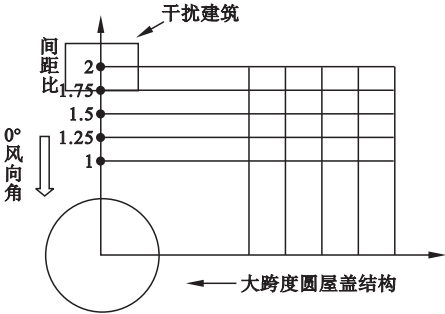


图 7 干扰建筑物与大跨度穹顶结构布置

Fig. 7 Arrangement of interference building and long-span dome structure

2.2 不同单体建筑物间距比下的数值模拟结果分析

图 8 给出了 0° 风向角下,不同间距比下的屋面各分区风压系数分布图。由图可知,

间距比为 1.2 时,干扰建筑对主结构迎风面风压有很大的干扰影响,屋盖表面产生了明显的“遮挡效应”,迎风面 A 区正压增大 88%,B 区和 C 区由负压转为正压。而当间距比为 1.5 时,干扰效应的影响主要集中于背风面,E 区负压增大为原来的 1.5 倍,F 区和 G 区由正压转为较大的负压。大跨度穹顶结构最不利风压位置位于中心区域(C、D 和 E 区),出现了很大的负压区。

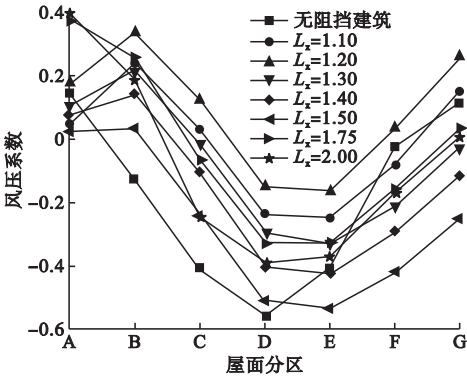


图 8 0°风向角下屋面各分区风压系数

Fig. 8 The pressure coefficient of each partition under 0° wind direction

图 9 给出了 0°风向角下屋面最不利分区干扰因子与间距比的关系情况。对屋面最不利位置处的干扰因子 K 进一步分析可知,当间距比大于 1.6 之后,“遮挡效应”开始减弱,干扰因子 K 趋近于 1。即对于间距比较大的干扰建筑,其对屋面风压的影响可以忽略。

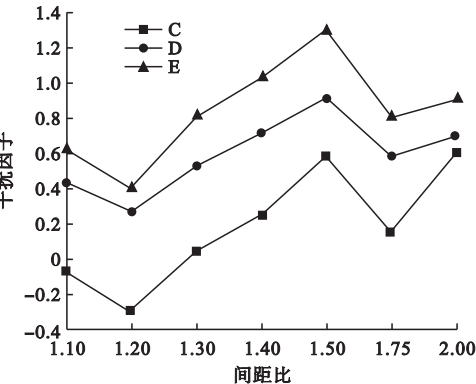


图 9 0°风向角下屋面最不利分区干扰因子

Fig. 9 The interference factor of the worst partition under 0° wind direction

图 10 给出了 30°风向角下屋面各分区的风压系数图。可以看出,间距比小于 1.3 时,大跨度穹顶结构屋面风压整体呈现正压分布;当间距比大于 1.3 时,整体呈现负压分布,且表面风压呈现明显的“放大效应”,间距比为 1.5 时负压呈现最大值。

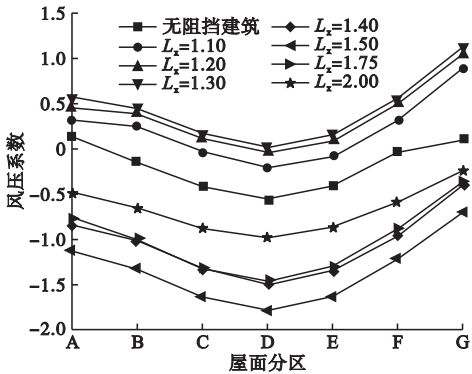


图 10 30°风向角下屋面各分区风压系数

Fig. 10 The pressure coefficient of each partition under 30° wind direction

图 11 给出了 30°风向角下屋面最不利位置处干扰因子 K 与间距比的关系。可以看出,间距比为 1.5 时,最不利区域 C、D 和 E 的干扰因子 K 分别为 4、3 和 4,之后随着间距比的增大负压减小,但间距比为 2 时,最不利区域的干扰因子 K 均接近 2,风致干扰效应的影响不应忽略。

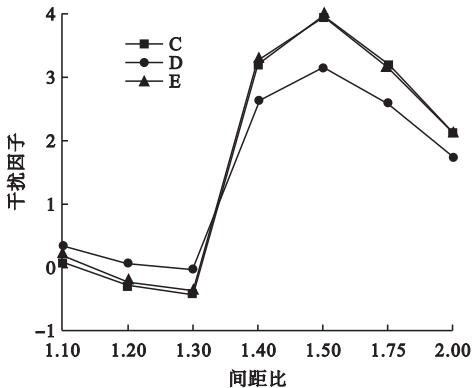


图 11 30°风向角下屋面最不利分区干扰因子

Fig. 11 The interference factor of the worst partition under 30° wind direction

60°风向角下,大跨度穹顶结构屋面各分区的风压系数与间距比的关系如图 12 所示,

可见干扰效应随着间距比的增大而逐渐减小。

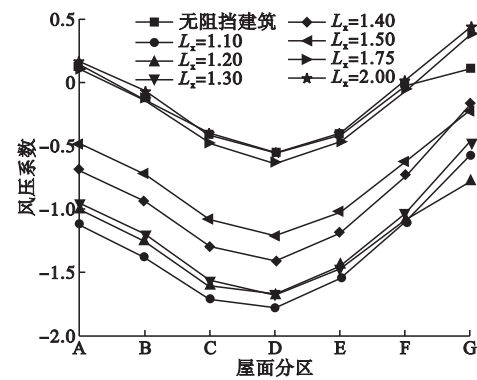


图 12 60°风向角下屋面各分区风压系数

Fig. 12 The pressure coefficient of each partition under 60° wind direction

60°风向角下,大跨度穹顶结构屋面最不利分区干扰因子 K 与间距比的关系如图 13 所示。由图可知,当间距比为 1.1 时,最不利区域 C、D 和 E 的干扰因子 K 分别为 4.1、3.2 和 3.7。当间距比大于 1.75 时,干扰建筑物的“距离效应”开始显现,屋面各分区的干扰因子 K 趋近于 1,此时周边建筑已对大跨度穹顶结构屋面风压分布不产生干扰。

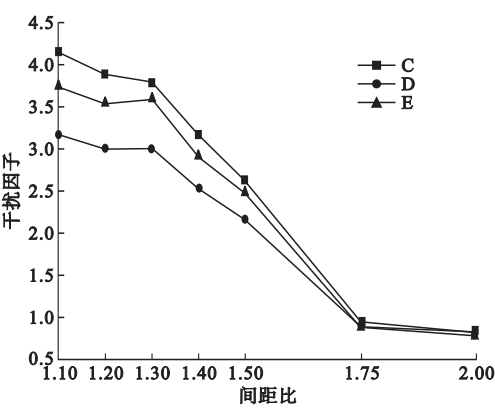


图 13 60°风向角下屋面最不利分区干扰因子 K

Fig. 13 The interference factor K of the worst partition under 60° wind direction

90°风向时,不同间距比下的各分区风压系数如图 14 所示。可以看出,随着间距比的增加,大跨度穹顶结构屋面干扰效应先增大后减小,在间距比较小时,90°风向角下会产生“狭道效应”从而对屋盖表面的风压产生

较大干扰影响。

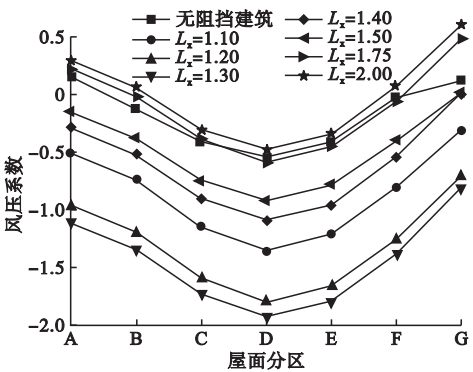


图 14 90°风向角下屋面各分区风压系数

Fig. 14 The pressure coefficient of each partition under 90° wind direction

90°风向角下,大跨度穹顶结构屋面最不利分区干扰因子 K 与间距比的关系如图 15 所示。由图可知,间距比为 1.3 时,干扰影响最大,最不利区域 C、D 和 E 的 K 值分别为 4.2、3.5 和 4.4;当间距比大于 1.4 后,干扰因子 K 逐渐趋近于 1。

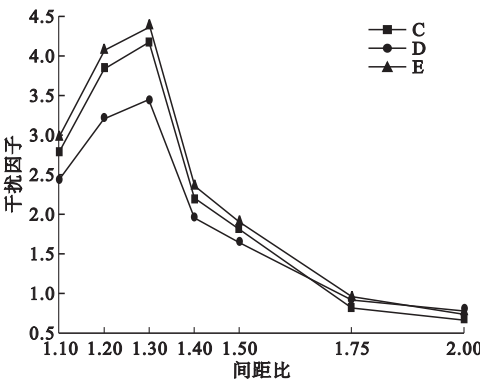


图 15 90°风向角下屋面最不利分区干扰因子

Fig. 15 The interference factor of the worst partition under 90° wind direction

对比前述各风向角的干扰因子可知,间距比小于 1.2 时,60°风向角为最不利风向角;当间距比为 1.2 ~ 1.4 时,90°风向角为最不利风向角;当间距比大于 1.4 时,30°风向角为最不利风向角。

3 考虑干扰效应的结构抗风设计

3.1 最不利风向角下的数值模拟结果分析

为了研究屋面风压在各风向角下的最不

利工况,定义最不利风压系数如下:

$C_{p,min} = \text{Min}\theta(C_p), \theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ.$ (9)

式中: $C_{p,min}$ 为各屋面分区在 4 个风向角下的最小值。

最不利风向角下,间距比对屋面风压的干扰效应还是比较明显,各间距比下的屋面负压都明显增大,最不利风压区域仍为中心区域(C、D 和 E)。最不利风向角下屋面各分区最不利风压系数如图 16 所示,周边干扰建筑的尾流加剧了穹顶结构表面风场的流动速度,致使屋面负压增大,对于屋面最不利情况下的干扰效应在间距比为 1.3 时达到最大。其中边缘区域(A 和 G)由正压转为负压。

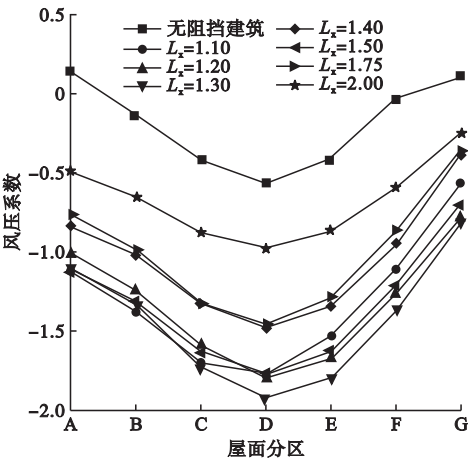


图 16 最不利风向角下屋面各分区最不利风压系数

Fig. 16 The worst pressure coefficient of each partition under the worst wind direction

屋面最不利区域的干扰因子 K 随间距比的变化如图 17 所示。可见屋面中心区域的干扰因子 K 数值最大;当干扰建筑物的间距比大于 1.5 的时候,屋盖结构的干扰因子 K 逐渐减小,距离效应逐渐显现。间距比为 2 的时候,干扰因子达到较小值,但干扰效应仍不可忽略,D 区 K 值仍有 1.6。在屋面中心区域里,间距比对干扰因子的影响在 C 区和 E 区最大,D 区相对要小一些。

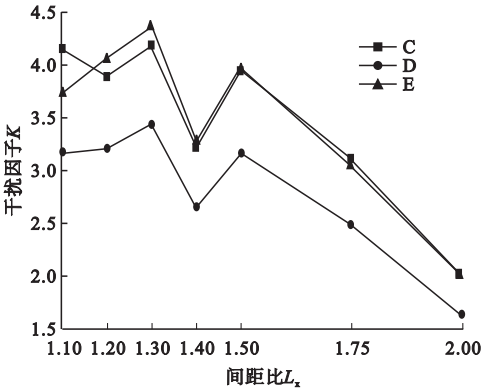


图 17 屋面最不利区域风压 K 值随间距比变化
Fig. 17 The interference factor K of worst partition with different spacing ratio

3.2 抗风设计依据

风荷载体型系数 μ_s 可以用来表示屋面风压的分布情况^[14],其表达式为

$$\mu_s = C_p \left(\frac{Z_r}{Z_i} \right)^{2\alpha}.$$
 (9)

式中: C_p 为各分区的平均风压系数; Z_r 为参考高度; Z_i 为测点高度。

对于屋面受干扰效应影响强烈的区域,例如屋盖中心区域,通过对比数值模拟获得的体型系数 μ'_s 与规范中规定的体系系数 μ_s ,提出了基于干扰系数 I 的抗风设计依据。这里,干扰系数按式(10)进行定义:

$$I = \frac{\mu'_s}{\mu_s}.$$
 (10)

$$I_{max} = \text{Max}\theta, L_x(I).$$
 (11)

其中,当 $I > 1$ 时,表明抗风设计中大跨度穹顶结构的体型系数需要加强;当 $I \leq 1$ 时,则无需加强, I_{max} 为各屋面分区在 4 个风向角 ($\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) 下,7 个间距比 ($L_x = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.75$ 和 2) 下的最大值。结构设计时,需在规范中规定的体系系数 μ_s 的基础上乘以相对应的干扰系数 I 以考虑周边建筑的干扰影响。体型系数对比及干扰系数的计算结果如表 3 所示。

屋面各分区的最不利干扰系数如图 18 所示。当考虑干扰效应时,大跨度穹顶结构各部位的体型系数都需要加强,尤其对于迎

表 3 体型系数对比表

Table 3 Comparison of shape coefficient			
屋面分区	规范体型系数	最不利体型系数(干扰影响)	干扰系数 I_{\max}
A	0.167	0.518	3.10
B	0.167	0.567	3.50
C	-0.800	-1.160	1.45
D	-0.800	-1.240	1.55
E	-0.800	-1.200	1.50
F	-0.500	-0.950	1.90
G	-0.500	-0.625	1.25

风面边缘区域,该区域的最不利干扰系数在间距比影响下达到 3,而中心区域的干扰系数分别为 1.45、1.55、1.5,因此迎风面边缘区域受干扰效应影响最大。

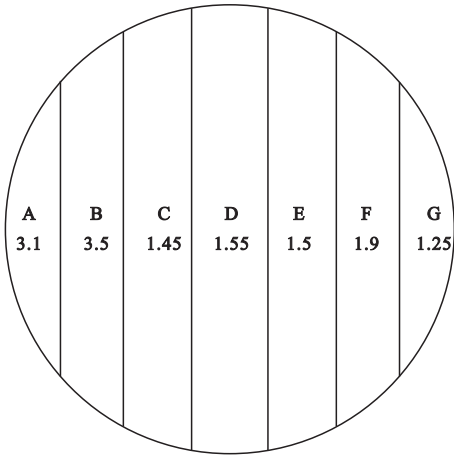


图 18 屋面各分区的最不利干扰系数 I_{\max}

Fig. 18 The worst I_{\max} of each partition

4 结 论

(1)不同风向角下,干扰建筑对屋面产生最不利影响的风压区域均发生在穹顶中心区域周围;当间距比大于 1.5 后,由于“距离效应”的作用,周边建筑对大跨度穹顶结构的干扰效应均逐渐减小;0°和 30°风向角下,1.5 为最不利间距比;60°和 90°风向角下,由于“狭道效应”,对应的最不利间距比分别为 1.1 和 1.3。

(2)干扰效应的最不利风向角与间距比

相关,间距比小于 1.2 时,60°风向角为最不利风向角;当间距比为 1.2 ~ 1.4 时,90°风向角为最不利风向角;当间距比大于 1.4 时,30°风向角为最不利向角。

(3)相比规范,考虑最不利风向角的影响,中心区域的最不利干扰系数 I_{\max} 约为 1.5,受干扰后的最大负压增大约 1.5 倍;迎风面边缘区域又是受干扰影响最大的区域,因此在抗风设计中这两个区域都需要重点考虑。

参考文献

[1] ZHOU Peng, TANG Baijian, LIU Ping. Study on wind load distribution on the surface of dome structure based on CFD numerical simulation [C]//Proceedings of 2018 international seminar on computer science and engineering technology. Shanghai: [s. n.], 2018;169 – 175.

[2] 陈强,陈水福,史卓然. 等距布局双塔高层建筑风荷载特性研究[J]. 建筑结构,2019,49 (14):126 – 130.
(CHEN Qiang, CHEN Shuifu, SHI Zhuoran. Study on wind-load characteristics of twin-tower high-rise buildings in equal distance layout[J]. Building structure, 2019, 49 (14): 126 – 130.

[3] PINDADO S, MESEGUER J, FRANCHINI S. Influence of an upstream building on the wind-induced mean suction on the flat roof of a low-rise building[J]. Journal of wind engineering & industrial aerodynamics, 2011, 99 (8): 889 – 893.

[4] 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):470 – 477.
(WANG Li, LI Gang, GAN Shi, et al. Wind induced interference effects of low-rise buildings with different height under strong wind[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2019, 39 (3): 470 – 477.)

[5] 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 Yongxin, LI Gang, GAN Shi. Study on wind-induced mean interference effects between low rise buildings [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2017,37(6):1023 – 1029.)

[6] 张培红,成凤,董清明,等. 建筑布局对高层住宅小区的流场影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(4):684 – 690.
(ZHANG Peihong, CHENG Feng, DONG Qingming, et al. Study on the flow field under

- the affection of architectural layout of high-rise residential area [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28 (4): 684 – 690.)
- [7] 杨立国,唐意,金新阳. 错列超高层建筑群风荷载静力干扰效应的试验与数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2011, 41 (11): 125 – 130.
(YANG Ligu, TANG Yi, JIN Xinyang. Numerical study and tests on wind-induced mean interference effects of staggered tall buildings [J]. Building structure, 2011, 41 (11): 125 – 130.)
- [8] 成伟华. 单个高层建筑与低矮建筑群风荷载干扰效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
(CHENG Weihua. Study of interference effects of wind loads on single high-rise building and group of low-rise buildings [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.)
- [9] 李波,杨庆山,冯少华,等. 周边建筑对大跨屋盖风荷载的干扰效应研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26 (5): 27 – 30.
(LI Bo, YANG Qingshan, FENG Shaohua, et al. Research on the interference effect of surrounding buildings on the wind load of long-span roof [J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2012, 26 (5): 27 – 30.)
- [10] 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 Li, PENG Guodong, PENG Xingqian. Numerical simulation of wind interference effect on large-span stadium buildings group [J]. Building structure, 2019, 49 (11): 135 – 139.)
- [11] 伊廷华,李宏男,顾明. 典型体育馆屋盖表面平均风压特性及干扰效应风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28 (1): 177 – 181.
(YI Tinghua, LI Hongnan, GU Ming. Wind tunnel test of interference effect of mean wind pressure on typical stadium roof [J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28 (1): 177 – 181.)
- [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 Genwei, MA Jiangbo, LIU Cunpeng. Wind tunnel test of interference effects of static wind on long-span roof from high-rise buildings [J]. Building structure, 2019, 49 (9): 115 – 119.)
- [13] 刘飞霞. 大跨度球壳屋盖结构风荷载特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
(LIU Feixia. Study of wind load characteristics on long-span spherical shell roof [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.)
- [14] 王辉,刘敏,胡正生,等. 群集建筑中大跨裙摆屋盖风荷载特性的数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37 (1): 351 – 358.
(WANG Hui, LIU Min, HU Zhengsheng, et al. Numerical study of wind load characteristic on large span skirted roof in cluster buildings [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37 (1): 351 – 358.)
- [15] 沙蔚博,郑德乾,张晓斌,等. 群体球壳屋盖风荷载干扰效应风洞试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53 (3): 324 – 330.
(SHA Weibo, ZHENG Deqian, ZHANG Xiaobin, et al. Wind tunnel test study on interference effect of wind load on hemispherical dome group [J]. Journal of Tianjin university (science and technology), 2020, 53 (3): 324 – 330.)
- [16] 殷志祥,李军,张爽. 体育场馆建筑群风荷载相互干扰效应数值模拟研究[J]. 工程力学, 2015, 32 (增刊1): 289 – 293.
(YIN Zhixiang, LI Jun, ZHANG Shuang. Numerical study on mutual-interference of wind loading on stadium buildings [J]. Engineering mechanics, 2015, 32 (S1): 289 – 293.)
- [17] 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 Ying. Characteristics of wind loading on long-span roofs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of buildings: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [19] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. England: Pearson Education Limited, 2007.
- [20] 林斌. CFD 模拟技术在大型复杂结构工程中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
(LIN Bin. Application of CFD simulation technology in large complex structure engineering [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)