

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.021

大跨度体育场风效应的大涡模拟及风洞实验研究

邱伦海¹, 张胜¹, 刘毛方², 孟磊²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省金田建筑设计咨询有限责任公司, 安徽 合肥 231600)

摘要:文章运用大涡模拟(large eddy simulation, LES)湍流模型对天长市某大跨度体育场风效应进行数值风洞模拟,得到体育场平均风压、脉动风压分布规律及风荷载时程,利用阵风荷载因子法计算体育场屋盖的风振系数及等效静力风荷载,与风洞实验结果开展对比研究。结果表明,数值模拟评估的体育场表面风压分布规律与风洞实验结果吻合较好,能够较好地反映大跨度体育场表面风压分布情况,2种方法计算得到的风振系数及等效静力风荷载也基本相同,说明大涡模拟技术能有效预测大跨度空间结构风荷载。研究结果可为大跨度体育场的抗风设计提供技术参考。

关键词:大跨度体育场;大涡模拟(LES);风洞实验;风压系数;等效静力风荷载

中图分类号:TU119.2

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)04-0570-07

Study of wind effect on a large-span gymnasium based on large eddy simulation and wind tunnel test

ZHI Lunhai¹, ZHANG Sheng¹, LIU Maofang², MENG Lei²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Jintian Architectural Design Consulting Co., Ltd., Hefei 231600, China)

Abstract: In this paper, the wind effect of a large-span gymnasium in Tianchang City was simulated by numerical wind tunnel using the turbulence model of large eddy simulation(LES), and the distribution law of the average wind pressure and fluctuating wind pressure and the wind load duration of the gymnasium were obtained. The wind vibration coefficient and equivalent static wind load of the gymnasium roof were calculated by the gust load factor method. The results were compared with those of wind tunnel test. The results show that the wind pressure distribution on the surface of the gymnasium evaluated by numerical simulation is in good agreement with the wind tunnel test results, proving that LES can better reflect the wind pressure distribution on the surface of the large-span gymnasium. The wind vibration coefficient and equivalent static wind load calculated by the two methods are basically the same, indicating that the wind load of large-span spatial structure can be effectively predicted by LES technology. The research results can provide technical reference for the wind resistance design of large-span gymnasium.

Key words: large-span gymnasium; large eddy simulation(LES); wind tunnel test; wind pressure coefficient; equivalent static wind load

现代大型体育场馆通常具有跨度大、自振频率低、阻尼小^[1]等特点,属于典型的风敏感结构^[2]。该类建筑体型新颖多样、表面曲率多变,从

而导致其风荷载作用机理异常复杂,目前我国《建筑结构荷载规范》^[3]尚难以准确给出表面风压及整体风荷载取值,风荷载的评估和分析是此类结

收稿日期:2022-12-20;**修回日期:**2023-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978230;52278495);安徽省自然科学基金杰出青年基金资助项目(2108085J29)

作者简介:邱伦海(1979—),男,山东菏泽人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

构抗风减灾计算的难点之一。

基于计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的数值模拟方法是获取大跨度体育场馆风荷载特征的有效手段之一,特别是随着计算机硬件的快速发展,数值模拟方法在实际工程中得到进一步的推广和应用。文献[4]通过数值模拟分析不同风向的体育场屋面压力分布规律;文献[5]对不同大跨度空间结构表面风压及周围风场开展数值模拟研究,并获得结构的风荷载体型系数;文献[6]使用大涡模拟(large eddy simulation, LES)模型研究风对大跨度可伸缩体育场屋顶压力系数和流场的影响,为大跨度体育场屋顶的抗风设计提供参考。

本文利用计算流体动力学软件 Fluent,对天천시某大跨度体育场风效应进行大涡模拟研究,分析该体育场表面风压分布特性及结构等效静力风荷载作用特征,并与风洞实验结果进行对比研究。本文研究方法和结果对于确定复杂体型的大跨屋盖结构屋面的风荷载具有一定的工程意义和科学价值。

1 工程概况及数值模型

1.1 工程概况

天천시某大跨度体育场东西纵向长度约为 213 m,南北横向长度约为 243 m,屋盖最高点标高约为 32.945 m。屋盖建筑造型呈近似钻石切割而成的几何拼接型,环绕体育场一圈。体育场建筑效果图如图 1 所示。由于该体育场跨度较大、造型独特,表面风压分布十分复杂,由现行荷载规范无法准确获得其体型系数及等效静力风荷载。



图1 体育场建筑效果图

1.2 计算方法

大涡模拟湍流模型采用空间过滤方法,过滤后的连续性方程和 Navier-Stokes 方程表达式

如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

其中: ρ 为流体的密度,当流体为不可压缩时, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$; u_i, u_j 为速度分量,经过单元平均后分别得到 \bar{u}_i, \bar{u}_j ; p 为压力; μ 为运动黏度系数; $\tau_{ij} = u_i u_j - \bar{u}_i \bar{u}_j$ 为亚格子应力,模拟小尺度涡对湍流流场的作用,为求解控制方程,需采用亚格子模型来模拟 τ_{ij} ,本文选用广泛应用的 WALE 模型。

1.3 计算模型

数值计算建模时按 1:1 实际尺寸建模,几何模型示意图如图 2 所示。文献[7-9]表明,阻塞率过大则会导致计算流域影响到建筑风作用,一般来说,建筑物的计算域应满足阻塞率 $\omega < 3\%$ 。其计算公式为:

$$\omega = \frac{A_0}{A_1} \times 100\% \quad (3)$$

其中: A_0 为建筑物最大的迎风面积; A_1 为计算域界面的面积。

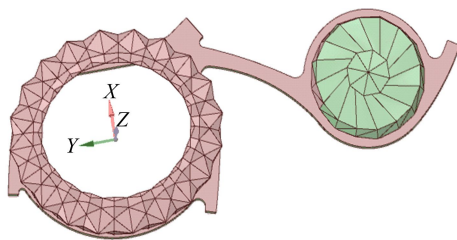


图2 几何模型示意图

除了阻塞率有要求以外,研究建筑物在流场中的位置设计也要合理。如果建筑物接近于流场出口位置,那么将在出口边界处产生回流,导致计算结果偏差很大。此外,若建筑物距离流场出口位置太远,计算域则过大,网格数量大大增加,使计算效率变低。数值模拟时在考虑计算精度和效率的基础上,选择计算流域为 $4\,000\text{ m} \times 2\,000\text{ m} \times 300\text{ m}$,建筑物距离流场出口 $1\,000\text{ m}$ 处,最大阻塞率为 1.4% 。

由于该大跨度体育馆造型复杂,特别是屋面存在多处尖角和尖面,难以在计算域中生成高质量六面体结构化网格。为正确模拟大气边界层的风场特性,获得气流撞击复杂造型屋盖后的流动现象;划分高质量网格,提高计算效率,因此在

Fluent Meshing 中,网格划分采用多面体网格。在网格划分前,先在建模软件 Space Claim 中,在尖面与尖面的空心处建一个面,两边也生成边界层,然后在计算中将此面设置 interior。面网格尺寸为 1~40 m;核心区域形状复杂,采用较小尺度网格进行划分,体育场网格为 0.1~1.0 m。在体育馆表面生成 5 层贴体棱柱体网格,第 1 层壁面网格高度取 0.01 m,网格尺寸增长率为 1.2,最大网格歪斜度为 0.81。文献[10]证明高雷诺数湍流下 LES 壁面函数对近壁面处理的正确性。本文体育场近壁面 y^+ 值为 3.5~200.0 在对数率区内,使用壁面函数对近壁面进行处理,使近壁面满足 LES 湍流模型的要求,保证模拟结果的准确。

1.4 边界条件

入口边界采用速度入口(velocity-inlet)。根据文献[3],大气边界层内风速随高度变化规律采用指数律风剖面描述,表达式为:

$$v_z = v_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

其中: v_z 为任意高度 z 处的平均风速; v_0 为标准高度处的平均风速; z 为建筑物计算位置离地面的高度; z_0 为标准高度,取 10 m; α 为地面粗糙度指数,在 B 类地貌条件下,取 0.15。

通过湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 确定入口处的湍流边界条件,由等效边界层假设^[11]给出表达式如下:

$$k(z) = 1.5 [I(z)v_z]^2 \quad (5)$$

$$\epsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} [k(z)]^{3/2}}{KL_u} \quad (6)$$

其中: C_μ 为模型常数,值为 0.09; K 为卡门常数,值为 0.4; I 和 L_u 分别为湍流强度和湍流积分尺度,根据文献[12]其表达式如下:

$$I = \begin{cases} 0.16, & z < z_b; \\ 0.1 \left(\frac{z}{z_B} \right)^{-\alpha-0.05}, & z_b \leq z < z_B; \\ 0.1, & z \geq z_B \end{cases} \quad (7)$$

$$L_u = 100(z/30)^{0.5} \quad (8)$$

其中: $z_b = 5$ m; $z_B = 350$ m。

入口湍流通过 Spectral Synthesizer^[13-14]方法生成,由于计算域出口距离建筑物足够远,可认为出口处尾流已充分发展,出口边界采用自由出流边界;计算域的顶部和侧面均采用对称边界,地面和建筑物表面采用壁面条件,为无滑移光滑壁面。

1.5 求解参数设置

在数值求解中,认为空气是不可压缩流体。

采用 WALE 亚格子模型对 N-S 方程进行求解,为提高数值模拟计算精度,在进行非定常大涡模拟计算前,先采用 RNG 标准 $k-\epsilon$ 模型增强壁面函数处理进行定常计算,并把计算结果瞬态化处理,作为大涡模拟的初始流场。LES 计算的时间步长取 0.02 s,相当于 50 Hz 的采样频率,共进行 10 000 步的 LES 非定常计算。

2 计算结果分析

大跨度体育场为敞开结构,因此体育场模型要布置双面测点。此时正反面均测到风压,各测点的风压系数计算公式为:

$$C_{pi}(t) = \frac{P_i^f(t) - P_i^b(t)}{\frac{1}{2}\rho V_H^2} \quad (9)$$

结构表面点 i 处的平均风压系数公式为:

$$\bar{C}_{pi} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N C_{pi}(t_m) \quad (10)$$

同时由式(9)、式(10)可得,结构表面点 i 的脉动风压系数均方根为:

$$\tilde{C}_{pi} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{m=1}^N [C_{pi}(t_m) - \bar{C}_{pi}]^2} \quad (11)$$

其中: $C_{pi}(t)$ 为体育场模型上某测点 i 的风压系数; $P_i^f(t)$ 和 $P_i^b(t)$ 分别为体育场模型上双面测点外内表面(或者上下表面)测点 i 的风压; ρ 为空气密度; V_H 为体育场模型前方来流未扰动处参考高度处所测得的平均风速; t 为某一时刻; N 为时域点数。

数值模拟时将正北方向定义为 0° 风向,逆时针转动,每隔 15° 为一个试验工况,共 24 个实验工况,风向角示意图如图 3 所示。限于篇幅,本文仅给出 0° 风向角工况下数值模拟结果。

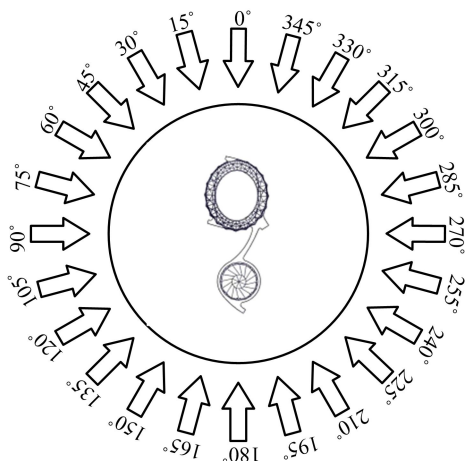


图 3 风向角示意图

2.1 平均风压系数

利用式(10)统计得到体育场外表面平均风压系数分布如图 4 所示。

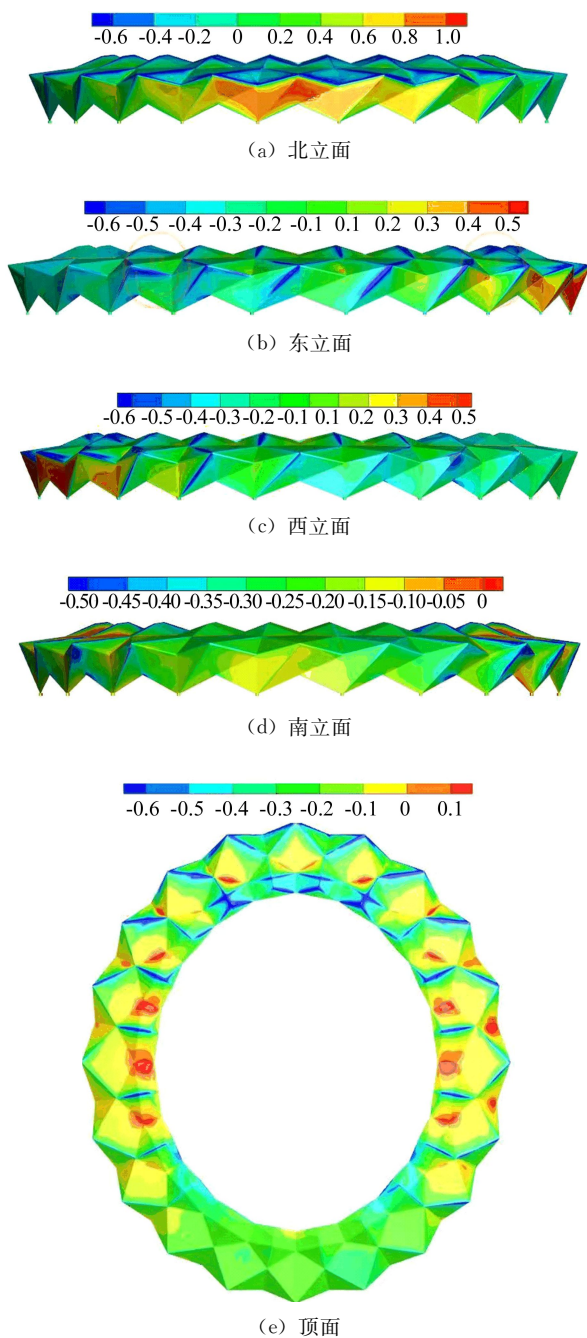


图 4 平均风压系数分布云图

经分析 0° 风向下体育场表面风压数值模拟结果可发现:

1) 体育场迎风面风压以正压为主,最大平均风压系数为 1.1;体育场背风面风压以负压为主,最大负平均风压系数值为 -0.5 。

2) 由于屋面上存在明显的尖角和凸起部分,当气流流经这些部位时,会发生明显的气流分离及回流现象。气流分离会在凸起部分后方形成较

大的负压区,最大压系数为 -0.6 ;回流会使屋面凹起部分压力系数由负变正,最大正压系数为 0.1。

3) 基于文献[3]得到与该体育场相似体型建筑表面平均风压系数,迎风面为 1.3,侧风面为 -0.7 ,背风面为 -0.4 ,屋面为 -0.7 ;模拟结果整体上略小于规范值。

2.2 脉动风压系数

脉动风压系数反映体育场表面湍流特性,其大小及分布特征受到来流湍流、气流分离、漩涡脱落以及再附等因素影响。体育场外表面的脉动风压系数分布如图 5 所示。

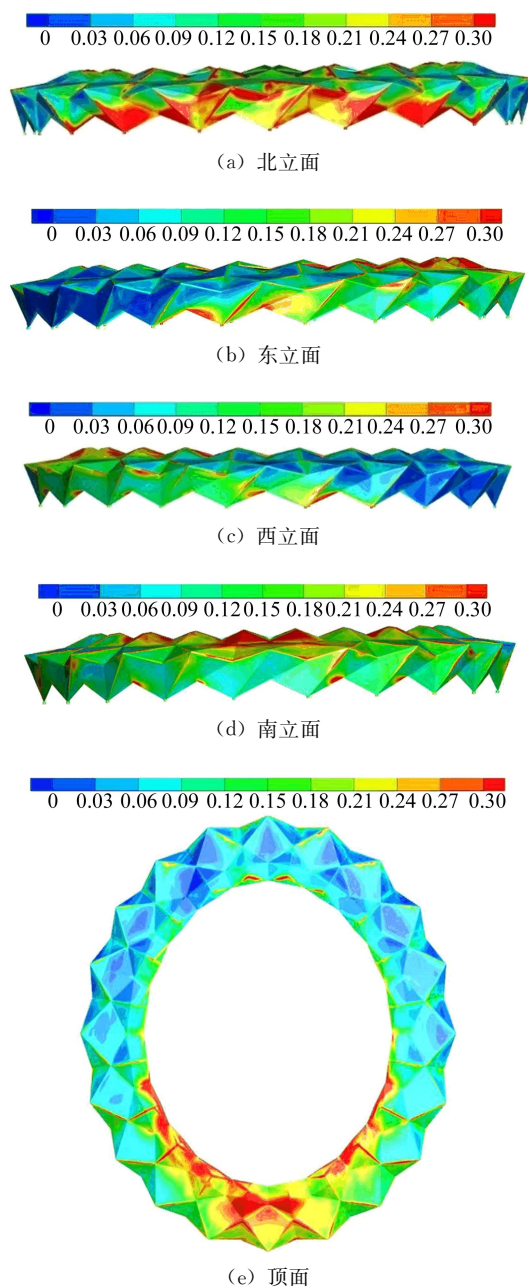


图 5 脉动风压系数分布云图

从图 5 可以看出:① 平均风压系数较大的区域其脉动风压系数也较大,体育场的脉动风压系数分布规律与平均风压系数分布规律相似。② 在屋面迎风面凸起部分,来流在屋盖迎风边缘分离后再附着,气流分离现象明显,故顶面迎风凸起部位脉动风压系数急剧增大。

2.3 与风洞实验结果的对比

为验证大涡模拟结果的准确性,需要通过先进的风洞实验来验证^[15-16],并与数值模拟结果进行对比分析。本次风洞实验采用的边界层风场与数值模拟完全相同。模型与实物在外形上保持几何相似,缩尺比为 1 : 250,高度为 12.72 cm,如图 6 所示。为获得整个结构上的风压分布,在体育场模型上下表面共布置了 440 个测点,顶面监测点布置图如图 7 所示。



图 6 风洞实验模型及周边建筑分布情况

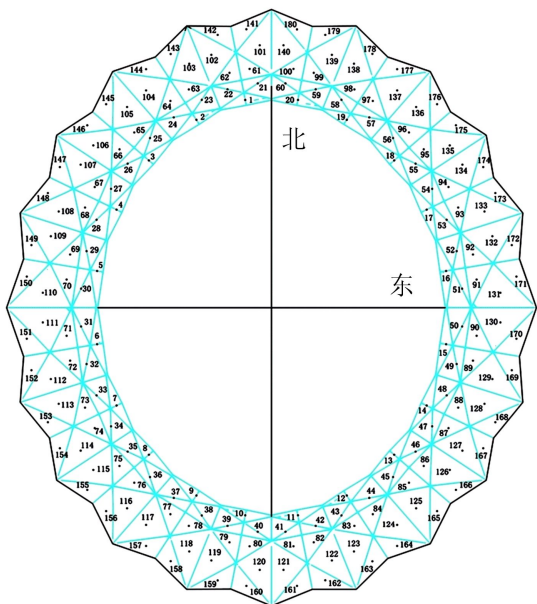


图 7 顶面监测点布置图

2.3.1 平均风压系数对比

在体育场迎风面、背风面及两个侧风面各选

取 5 个典型测点,屋盖顶面选取 10 个典型测点,共计 30 个测点。将该体育场数值模拟获得的平均风压系数与风洞实验结果进行对比研究,如图 8 所示。

由图 8 可知,2 种方法得到的迎风面与屋盖顶部平均风压系数比较接近,而位于背风边缘点的平均风压系数有一定差别。总的来说,大涡模拟获得的结构表面平均风压分布规律与风洞实验吻合较好。

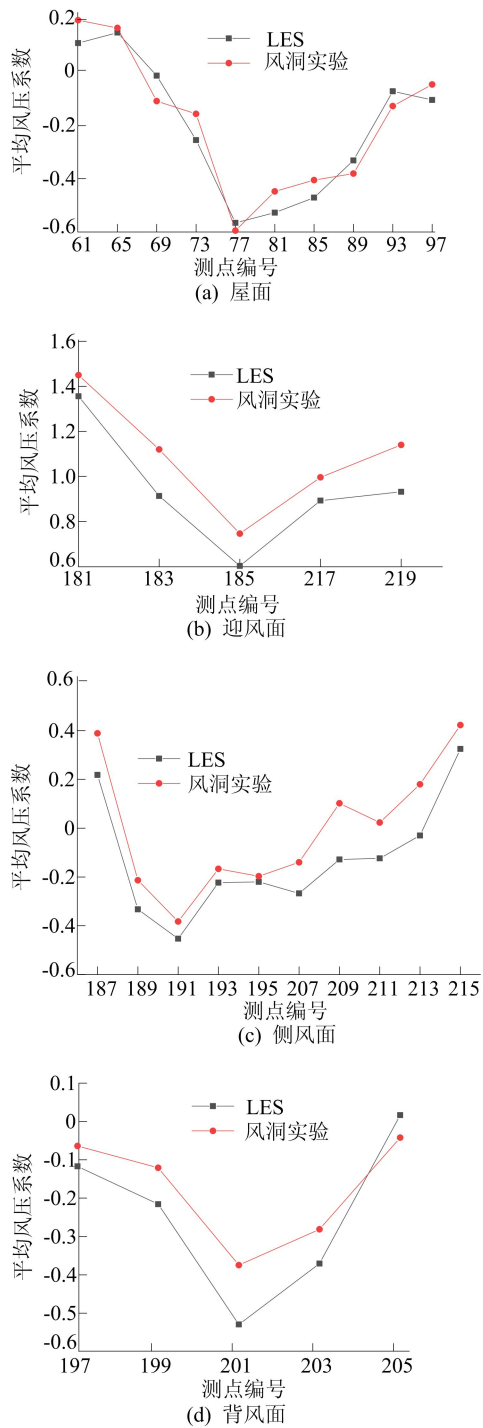


图 8 平均风压系数对比

2.3.2 脉动风压系数对比

体育场典型测点脉动风压系数的变化曲线如图 9 所示。

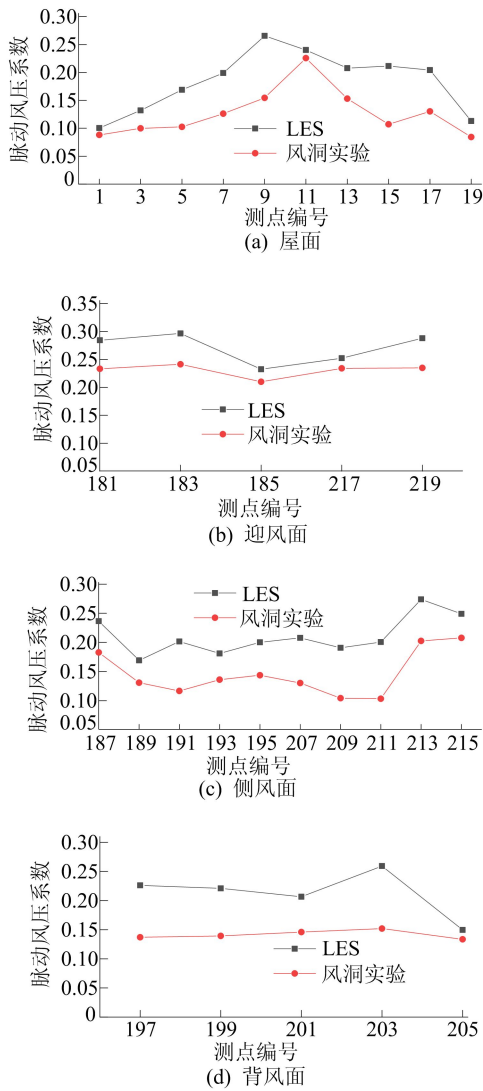


图 9 脉动风压系数对比

由图 9 可知,迎风面、背风面、侧风面及屋面典型测点的脉动风压系数均略大于风洞实验相应结果,主要是由于结构脉动风压受到来流湍流、涡旋脱落、气流分离及再附等诸多因素的影响,其分布特性比平均风压更为复杂,从而导致数值模拟及模型风洞实验结果存在一定差别,但 2 种方法得到的脉动风压变化规律基本相同。

3 体育场屋盖表面等效静力风荷载

本文采用阵风荷载因子法^[17]计算体育场屋盖各个面的等效静力风荷载。阵风响应因子法是指在一定时间范围内由平均风压与脉动风压共同作用的总响应与平均风压产生的响应之比。如果

是位移响应之比,那么该比值是位移风振系数。表达式为:

$$G(x, y, z) = \frac{y_{\max}}{|\bar{y}|} = 1 + g \frac{\sigma_y}{|\bar{y}|} \quad (12)$$

其中: g 为峰值因子,本文中取 3.5; y_{\max} 、 \bar{y} 、 σ_y 分别为各个屋面中心位置处的位移响应峰值、均值、均方根值。体育场屋盖各面的风振系数可以利用大涡模拟与风洞实验计算得到各面风压力时程,并通过多阶模态力法进行计算。本次计算采用结构的前 30 阶振型,基本风压取 0.45 kPa,计算阻尼比为 0.02。

作用在体育场屋盖各个面上的位移响应等效的静力等效风荷载的计算公式如下:

$$\hat{F}(x, y, z) = G(x, y, z)\bar{F}(x, y, z) \quad (13)$$

其中: $\bar{F}(x, y, z)$ 为平均风荷载; $G(x, y, z)$ 为位移风振系数。

基于数值模拟和风洞实验结果得到的典型测点风振系数对比情况见表 1 所列。限于篇幅,表中仅给出了体育场屋盖顶部 10 个典型测点进行分析(测点位置见图 7)。由表 1 可知,数值模拟计算的风振系数略大于风洞实验结果,两者数值最大误差为 20% 左右。但 2 种方法获得的风振系数的分布趋势基本相同。

表 1 风振系数对比情况

测点编号	LES	风洞实验	误差
61	1.397 6	1.718 5	0.186 8
65	1.900 5	1.564 8	0.231 0
69	1.821 3	1.667 8	0.091 2
73	1.887 2	1.701 7	0.108 9
77	2.047 6	1.813 7	0.128 9
81	1.726 4	1.446 2	0.193 6
85	1.699 2	1.406 8	0.207 7
89	1.722 9	1.480 1	0.164 0
83	1.490 2	1.550 6	0.039 0
97	1.560 1	1.809 7	0.137 4

本文基于式(13)计算体育场屋盖典型区域的等效静力风荷载如图 10 所示。

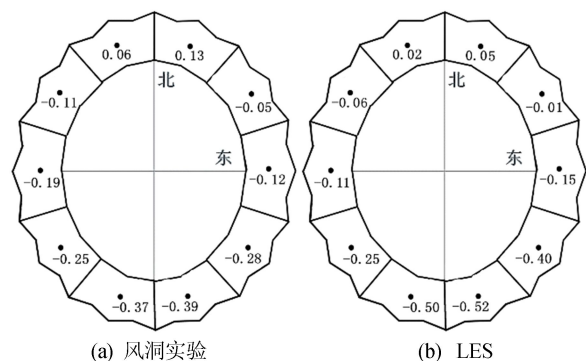


图 10 0°方向等效静力风荷载

由图 10 可知,大涡模拟得到的各区域等效静力风荷载与风洞实验结果吻合较好,在体育场迎风屋面前缘,静力等效风荷载较大。

4 结 论

本文以天长市某大跨度体育场为研究对象,开展系统的大涡模拟研究,获得体育场表面风压分布规律及动态风荷载作用特征,并与风洞实验结果进行比较,得出结论如下。

1) 体育场屋盖外表面迎风立面为正压,背风面为负压。随着立面从迎风侧向背风侧过渡,风压从正压逐步向负压过渡。体育场屋盖表面顶部以负压为主。体育场屋盖表面顶部以负压为主。屋顶形状对风压影响较大,顶部凸起部位流动分离现象严重,产生极大的负风压。

2) 由于体育场四周开敞,气流流动也较为顺畅,气流分离程度较小,因此整个体育场屋盖脉动风压值均较小。

3) 通过大涡模拟计算后得到的平均风压系数和脉动风分压系数值与风洞实验模拟结果数据基本一致,说明大涡模拟可以正确预测建筑表面风压分布。为研究建筑物表面风压分布规律提供了一种更加低成本、简便快捷的方法,其研究结果可为同类建筑的抗风设计提供借鉴。

4) 经数值模拟分析得到的风振系数和等效静力风荷载与风洞实验数据结果基本吻合,进一步验证了数值模拟方法的可行性。

[参 考 文 献]

- [1] 孙晓颖,武岳,陈昭庆. 薄膜结构流固耦合的 CFD 数值模拟研究[J]. 计算力学学报,2012,29(6):873-878.
- [2] 韩向科. 基于流体力学基本理论风场描述和风荷载的分析和研究[D]. 上海:同济大学,2012.
- [3] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:30-64.
- [4] YIN Z X, ZHANG S. Distribution rule analysis and research of wind loads of stadium by numerical simulation[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,256:826-830.
- [5] 马骏,周岱,李华锋,等. 大跨度空间结构抗风分析的数值风洞方法[J]. 工程力学,2007(7):77-85,93.
- [6] LIU M, LI Q S, HUANG S H, et al. Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2018,179:39-57.
- [7] 张建,李波,单文姗,等. 波纹状悬挑大跨屋盖的风荷载特性[J]. 建筑结构学报,2017,38(3):111-117.
- [8] OLIVEIRA P J, YOUNIS B A. On the prediction of turbulent flows around full-scale buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2000,86(2/3):203-220.
- [9] TAMURA Y, KIKUCHI H, HIBI K. Extreme wind pressure distributions on low-rise building models[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2001,89(14/15):1635-1646.
- [10] BAE H J, LOZANO-DURAN A, BOSE S T, et al. Dynamic slip wall model for large-eddy simulation[J]. Journal of Fluid Mechanics,2019,859:400-432.
- [11] 黄本才,汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 2 版. 上海:同济大学出版社,2008:247-250.
- [12] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendation for loads on building:AIJ—2004[S]. Tokyo:Architectural Institute of Japan,2004:15-40.
- [13] ROBERT H K. Diffusion by a random velocity field[J]. Physics of Fluids,1970,13(1):22.
- [14] SMIRNOV A, SHI S, CELIK I. Random flow generation technique for large eddy simulations and particle-dynamics modeling[J]. Journal Fluids Engineering,2001,123(2):359-371.
- [15] SUN X, YU R, WU Y. Investigation on wind tunnel experiments of ridge-valley tensile membrane structures[J]. Engineering Structures,2019,187:280-298.
- [16] HAO W, CHEN K, YAN Y. Design wind loads for local flexible cladding of structures based on wind tunnel tests [J]. Journal of Building Engineering,2021,44:103154.
- [17] DAVENPORT A G. Gust loading factors[J]. Journal of the Structural Division,1967,93(3):11-34.

(责任编辑 吴 亮)