

# 弧形内凹大跨屋盖结构风荷载特性的风洞试验与数值模拟

聂少锋, 孙玉金, 毛路, 陶莹

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 对弧形内凹大跨钢屋盖航站楼结构的风荷载特性进行了风洞试验研究, 得到屋盖平均和脉动风压系数, 结构分区体型系数。理论分析采用基于Reynolds时均的RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 通过FLUENT软件对结构在部分风向角下的三维定常风场进行了数值模拟, 分别从风压系数分布、分区体型系数变化和风速矢量图等方面进行详细研究, 并与风洞试验结果对比分析。结果表明: 风洞试验和数值模拟结果吻合良好, 两者可相互验证。屋盖结构均承受风吸力作用, 气流在迎风区域分离后形成的漩涡作用将使局部产生较大的负压区。屋盖上挑檐进行开洞处理, 以及在挑檐下部设置导流板, 可以有效减小其所受风荷载作用。

**关键词:** 弧形内凹大跨屋盖; 风洞试验; 风压系数; 体型系数; 数值模拟

**中图分类号:** TU391; TU392.5 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2016)05-0669-07

## Wind tunnel test and numerical simulation on wind load characteristics of large-span roof with concave surface

NIE Shaofeng, SUN Yujin, MAO Lu, TAO Ying

(School of Architecture and Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Wind tunnel test study on wind load characteristics of inner concave circular-arc large-span steel roof of an airport terminal structure was carried out, and the mean wind pressure coefficient, fluctuating wind pressure coefficient and structure partition shape coefficient of the roof were obtained. The RNG  $k-\varepsilon$  model based on Reynolds equation was used for theoretical analysis, and computational fluid dynamics software Fluent was used to simulate the 3D wind field under different wind directions. Then, the distribution of wind pressure coefficients, changes of partition shape coefficients and wind velocity vector diagram were compared and analyzed with wind tunnel test in detail. The results show that the numerical simulation agrees well with the wind tunnel test. The roofs all suffer wind suction, and the vortex effect caused by separation of airflow in the windward area will lead to part large negative pressure zone. The wind loads can be reduced effectively by opening holes in the front eaves and setting guide plates in the bottom eaves in the meantime.

**Key words:** large-span roof with concave surface; wind tunnel test; wind pressure coefficient; shape coefficient; numerical simulation

大跨度屋盖结构凭借材料轻、跨度大的特点, 在工程领域得到越来越广泛的应用, 而大跨屋盖的风敏感特性使得其在强风情况下极易被毁坏。

Fu Jiayang等<sup>[1]</sup>对凡亚比台风下广州国际体育演艺中心屋盖结构的风效应进行实测试验, 研究风速、风向角及加速度响应等因素对屋盖的影响。Ye Jihong等<sup>[2]</sup>对在锥形涡诱导下的均匀风场及湍流场下大跨平屋盖的风压特性进行风洞试验, 比较了两种风场下平均风压和脉动风压分布。金新阳<sup>[3]</sup>对新广州火车站大跨屋盖结构进行了风洞试验和数值模拟研究, 并将主导风向角下, 平均风压分布进行相互比较和验证。陆煜等<sup>[4]</sup>对双曲型塔柱大跨凸面悬挑结构进行风洞试验, 得到结构在不同风向角下的风压系数, 研究该结构上部悬挑结构和下部塔柱形结构的体型系数分布规律。吴迪等<sup>[5]</sup>对球面和柱

面屋盖结构分别进行风洞试验, 并运用广义极值理论和极大似然估计方法系统分析极值风压的概率分布特征。何星星等<sup>[6]</sup>采用RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对阶梯型大跨屋盖风荷载进行了研究, 并与风洞试验结果进行对比分析。张明亮等<sup>[7]</sup>对复杂体型大跨屋盖表面风压分布进行风洞试验研究表明: 迎风处的挑檐区和屋面凸起的天窗部位气流有较大分离, 屋盖表面主要呈负风压分布。我国现行的《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)<sup>[8]</sup>, 仅给出了常规外形建筑各面的体型系数, 而近年来大跨度空间结构在工程中的迅速发展, 且在建筑美观上不断追求新颖性, 而工程中出现的各类新颖建筑, 体型系数并无相关规律可循, 仅能依靠风洞试验和数值分析进行研究。因此针对弧形内凹大跨屋盖结构的风荷载特性进行研究具有重大的理论与工程意义<sup>[9]</sup>。

对弧形内凹大跨屋盖结构模型进行风洞试验,采用计算流体动力学软件 FLUENT 对其风荷载特性进行数值分析,并与试验结果相互验证,分别从风压系数分布、分区体型系数变化和风速矢量分布等方面进行详细研究,为该类结构的抗风设计提供依据。

## 1 风洞试验概况

### 1.1 试验模型及测点布置

青海果洛机场航站楼为长悬挑弧形内凹大跨度钢屋盖结构,效果图见图1。该航站楼主体长81 m,宽34.8 m,挑檐长6.3 m。钢屋盖以内凹弧形覆盖于结构,屋盖四周为双层挑檐,屋盖前挑檐上开有孔洞以减小风压作用。屋盖上分布有天窗。其建筑尺寸见图2。



图1 航站楼建筑效果图

Fig.1 Architectural rendering of airport terminal

模型风洞试验在长安大学风洞实验室进行。采用有机玻璃制作刚性模型,几何缩尺比为1:70。试验中选取风场不受干扰的点作为风速参考高度,取为0.84 m,对应于实际高度为58.8 m,试验风速为13 m/s,采样频率为312 Hz,采集时间约为30 s。

试验风场通过尖劈和地面粗糙元来实现被动模拟。根据工程所处实际环境,按《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)<sup>[8]</sup>模拟B类地貌风场以及大气边界层风速剖面。风速剖面以式(1)表示:

$$V_z = V_0 (Z / Z_0)^\alpha \quad (1)$$

式中:  $V_z$  为离地面高度  $Z$  处的风速;  $Z$  为测压点高度;  $V_0$  为参考高度处风速度;  $Z_0$  为参考高度;  $\alpha$  为地面粗糙度指数, B类风场,  $\alpha=1.5$ 。

模型各分区测点布置及风向角定义见图3。

为方便描述试验结果,将屋盖定义为前、后、左、右四个方向,墙面及屋盖共分为14个区域,其中航站楼中间钢屋盖为1~6区;前、后、左、右墙面分别为7~10区;左侧屋盖为11区,右侧屋盖为12区;中间屋盖下左侧墙(弧形)为13区;中间屋盖下右侧墙(弧形)为14区。屋盖四周挑檐及屋盖下方一圈挑檐测点均为上下表面同步测压,上下表面测压点位置重合,其它区为单面测压。风压值符号以受

力面受压为正,受力面受吸力为负。风洞中试验模型见图4。

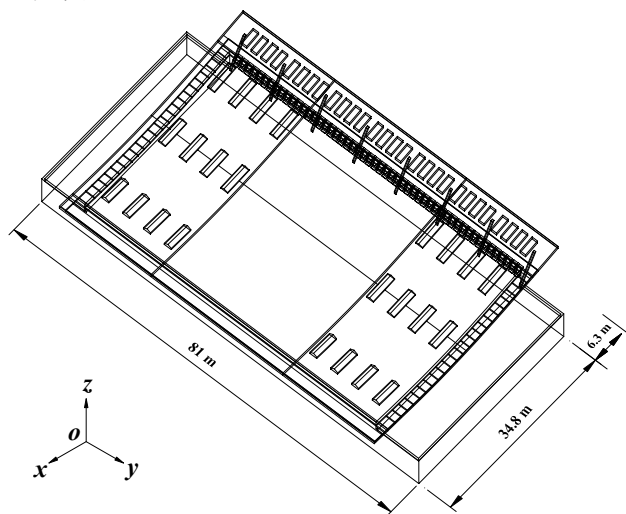
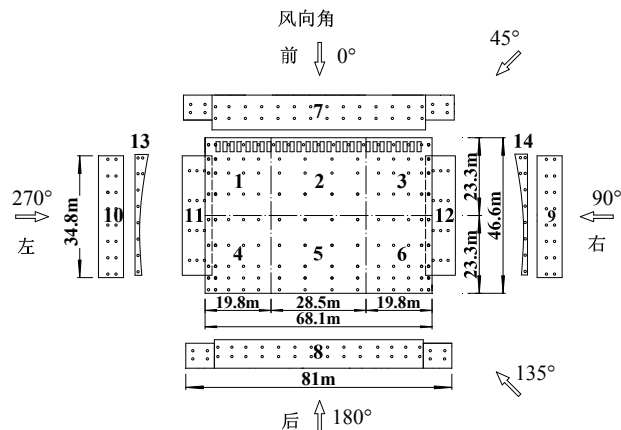


图2 航站楼三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of the airport terminal



注: 图中点划线为屋盖分区线, 圆点为测点位置

图3 模型分区测点布置及风向角

Fig.3 Arrangement of partition testing points of model and wind direction

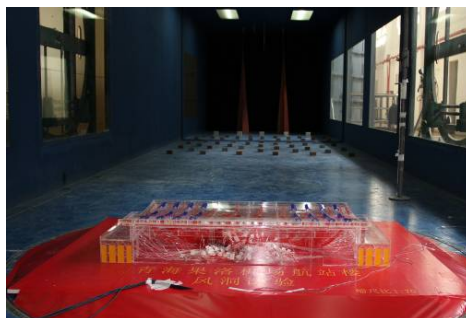


图4 试验模型

Fig.4 Test model

### 1.2 数据处理

#### 1.2.1 风压系数

以试验参考点处的动压为参考风压,按式(2)计算各测点无量纲风压系数和脉动风压系数。

$$C_{pir} = \frac{p_i - p_{r\infty}}{p_{r0} - p_{r\infty}} = \frac{p_i - p_{r\infty}}{q_r} \quad (2a)$$

$$C_{p_{rmsr}} = \frac{\sigma_p}{p_{r0} - p_{r\infty}} \quad (2b)$$

式中:  $C_{p_{ir}}$  为第  $i$  测点的风压系数;  $C_{p_{rmsr}}$  为第  $i$  测点的脉动风压系数;  $p_i$  为第  $i$  测点的风压;  $p_{r0}$  和  $p_{r\infty}$  分别为参考点的总压和静压.  $q_r = p_{r0} - p_{r\infty}$  为参考点的动压;  $\sigma_p$  为脉动风压均方根.

为便于统一对比分析,将式(2)计算结果再按式(3)换算为以 10 m 高度处风压为参考风压的风压系数  $C_{pi}$ .

$$C_{pi} = (Z_r/H_0)^{2\alpha} C_{p_{ir}} = (58.8/10)^{0.30} C_{p_{ir}} \quad (3)$$

式中:  $C_{pi}$  为第  $i$  测点的平均风压系数  $C_{p_{imean}}$  或脉动风压系数  $C_{p_{irms}}$ ;  $Z_r$  为试验参考点高度,取 58.8 m.

### 1.2.2 体型系数

根据风洞试验各测点风压系数结果,将各测点的局部体型系数  $\mu_{si}$  处理为各分区体型系数  $\mu_s$ :

$$\mu_s = (\sum \mu_{si} A_i) / \sum A_i \quad (4)$$

式中:  $A_i$  为测点  $i$  所属面积,  $\mu_i$  为测点  $i$  局部体型系数.

## 2 试验结果

### 2.1 平均风压系数

部分风向角下屋盖平均风压系数等值线见图 5. 由图 5 可知: 在各风向角下, 屋盖上表面整体均受风吸力作用.  $0^\circ$  风向角下, 风压系数沿中心线基本呈对称分布. 来流接触到建筑物, 在屋盖前挑檐有较大的气流分离, 随后形成带有很大逆压梯度的

旋涡, 导致前挑檐处形成很大负压, 绝对值最大的负平均风压系数达到 -1.3 左右, 发生在前挑檐角部区域.  $45^\circ$  风向角下, 气流在迎风拐角处分离, 随后顺着迎风边缘向左后方, 平均风压系数绝对值逐渐减小, 在迎风拐角处平均风压系数达 -1.4 左右.  $90^\circ$  风向角下, 由于旋涡的影响, 在右侧挑檐形成很大负压, 绝对值最大平均风压系数达 -1.2, 梯度变化较大, 主要集中在右侧靠近檐口处, 整体屋盖平均风压系数沿着来流方向逐渐递减.  $135^\circ$  风向角下, 其分压系数分布规律和  $45^\circ$  时很相似, 只不过气流来自右后方, 在右后方拐角处形成很大负压, 顺着来流方向逐渐减小.  $180^\circ$  风向角下, 来流在后缘分离处平均风压系数达 -1.5, 同样发生在后挑檐的角部, 沿着来流方向等值线逐渐较平行分布于屋盖的前后轮廓线.

通过以上分析可知: 气流在迎风面分离后形成的漩涡作用将产生极大的负压区, 在其他区域由于尾流作用风压较小. 因此, 在对构件进行设计时, 应注意最不利风向角对屋面风荷载的影响, 对于挑檐角部区域的设计应更加重视, 对其进行加固处理或者在其下方设置斜向挡板引导气流流出.

### 2.2 脉动风压系数

部分风向角下屋盖脉动风压系数等值线见图 6. 由图 6 可知:  $0^\circ$  风向角下, 脉动风压系数沿中心线基本呈对称分布, 屋盖四周挑檐处脉动风压系数值较大, 其值最大为 0.26, 发生在后部挑檐上.  $45^\circ$

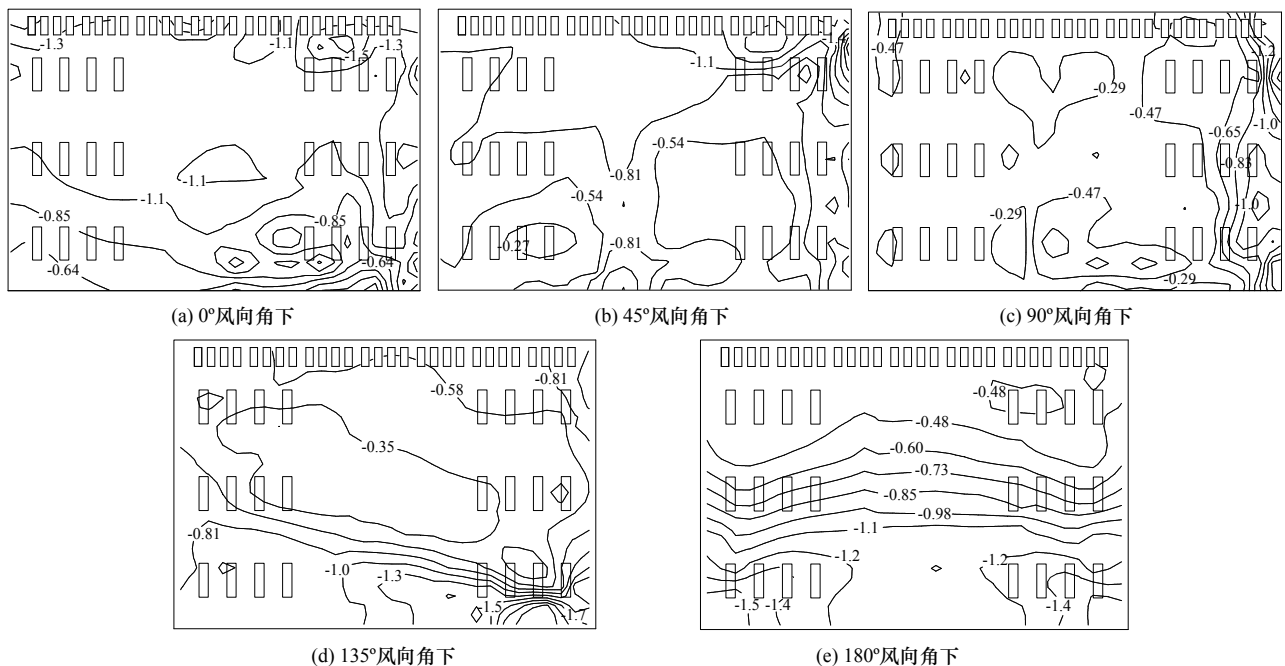


图5 屋盖平均风压系数等值线

Fig.5 Isolines of mean pressure coefficient of roof

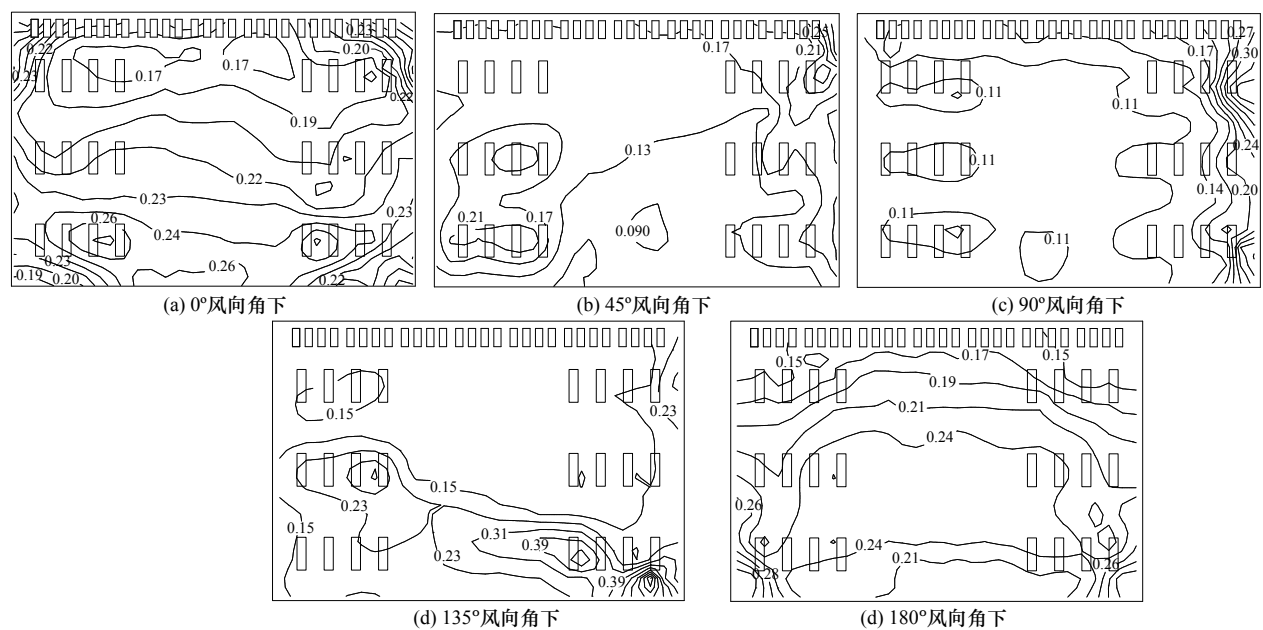


图6 屋盖脉动风压系数等值线

Fig.6 Isolines of fluctuating pressure coefficient of roof

风向角下, 由于气流在迎风拐角处分离, 脉动风压系数在此处最大达0.25. 90°风向角下, 在右侧挑檐附件最大脉动风压系数达0.30, 在屋盖其余大部分区域分布均匀, 值为0.11. 180°风向角下, 来流在后缘分离处脉动风压系数最大为0.28, 沿着来流方向等值线逐渐较平行分布于屋盖的前后轮廓线, 到前挑檐处最小减少到0.15.

2.3 体型系数

屋盖各分区的体型系数随风向角变化曲线如图7. 部分风向角下, 各分区体型系数对比分析见图8.

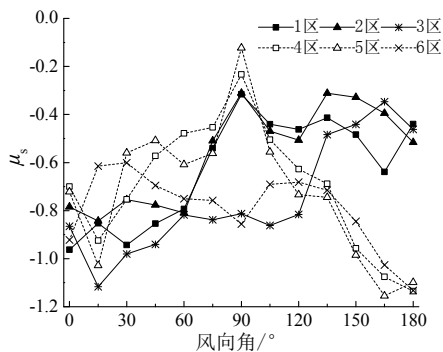


图7 屋盖分区体型系数随风向角变化曲线

Fig.7 Variation curves of roof partition shape coefficients with different wind directions

由图7~8可知: 随着风向角的变化, 各分区体型系数变化很大, 甚至出现变号的现象, 如9区, 在0°风向角时为侧风墙面, 其体型系数为-0.72, 而风向角转为90°时变为迎风墙面, 体型系数为0.68, 当风向角为180°时再次由迎风墙面转化为侧风墙面, 体型系数再次变号, 为-0.76. 1~6区在各个风

向角下, 其体型系数均为负值, 其中3区在45°风向角下承受最大负压, 体型系数为-1.14, 在0°风向角时仍承受较大的负压, 体型系数-0.86. 同时4区在180°风向角下的负压绝对值也相对较大, 体型系数为-1.23, 在135°~180°风向角下, 仍然承受较大负压, 体型系数在-1.23~-0.68之间.

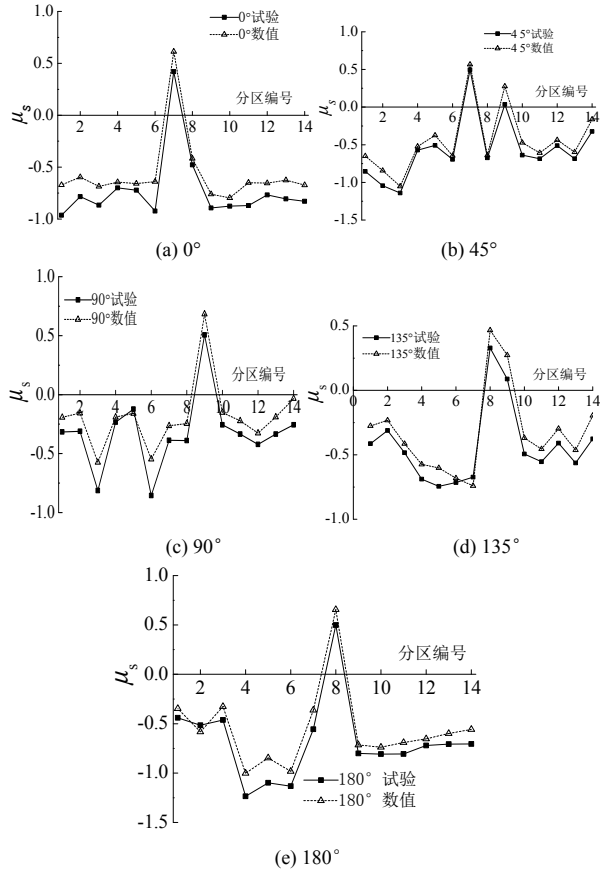


图8 分区体型系数对比分析

Fig.8 Contrastive analysis of shape coefficients



### 3 数值模拟方法

#### 3.1 模型建立及网格划分

采用FLUENT软件进行数值模拟分析. 采用结构化网格划分计算流域, 在建筑周围区域使用较小尺寸网格, 远离区域放射性地加大网格尺寸. 计算流域取 $1\,500\text{ m} \times 800\text{ m} \times 100\text{ m}$ . 计算模型及网格划分见图9.

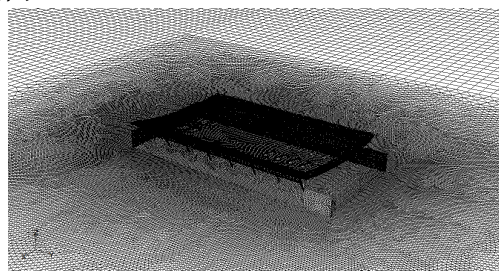


图9 计算模型及网格划分

Fig.9 Calculation model and mesh generation

#### 3.2 边界条件及参数设定

进流面选择速度入口边界条件. 采用式(1)模拟大气边界层风速剖面, 参考高度为 $10\text{ m}$ . 计算中来流特性通过编程在入流处给定湍动能 $k$ 和耗散率 $\varepsilon$ :  $k=1.5(U)^2$ ,  $\varepsilon=0.09^{0.75}k^{1.5}/l$ , 式中:  $l$  为湍流尺度,  $I$  为湍流强度, 参考日本规范<sup>[10]</sup>取值:

$$I = \begin{cases} 0.23 & Z \leq 5\text{ m} \\ 0.1(\frac{Z}{350}) & 5\text{ m} < Z \leq 350\text{ m} \end{cases} \quad (5)$$

出流面选用完全发展出流边界条件; 流场的地面和建筑物的表面均采用无滑移壁面条件; 流域两侧以及顶面采用对称边界条件.

选用基于Reynolds时均的RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型, 不可压缩的常密度空气模型, 采用分离式求解器. 流

项的离散格式为二阶迎风格式, 速度-压力耦合选取SIMPLEC算法, 壁面附近复杂的流动现象通过选用非平衡壁面函数来模拟.

### 4 数值模拟结果及分析

#### 4.1 平均风压系数及分区体型系数

以屋盖部分为研究对象, 不同风向角下的平均风压系数等值线数值模拟结果见图10. 数值模拟各分区体型系数结果列于图8中. 将试验和数值模拟得到的平均风压系数等值线、分区体型系数对比分析可知: FLUENT软件本身由于精度的限制, 存在一定的误差, 但各分区体型系数的数值模拟和风洞试验结果趋势一致, 总体吻合也较好; 屋盖平均风压系数的分布规律也基本相同. 基于Reynolds时均的RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型应用于该航站楼工程的研究是可行的.

#### 4.2 风速矢量分布

以模型中轴线处竖向剖面 and  $1.8\text{ m}$  高度处横截面的风速矢量分布为例, 对比分析不同风向角下的风速矢量图, 见图11. 由图11知:  $0^\circ$ 和 $180^\circ$  风向角下, 风速矢量图分布规律较为相似. 竖向剖面图中, 气流到达建筑物迎风面时, 会绕两侧和顶面流动, 在迎风挑檐和墙面之间气流回旋形成漩涡, 在屋盖上部形成较大漩涡, 带有很大的逆压梯度, 存在气流分离、涡旋、环绕及再附着复杂流动现象, 使屋盖上表面受较大风吸力. 图(a)中, 部分气流向上越过挑檐洞口, 缓解了屋盖下表面的压力. 从图(b)、(d)中可以看出, 气流从侧面绕过建筑物, 在建筑物后部形成一对较大的漩涡.

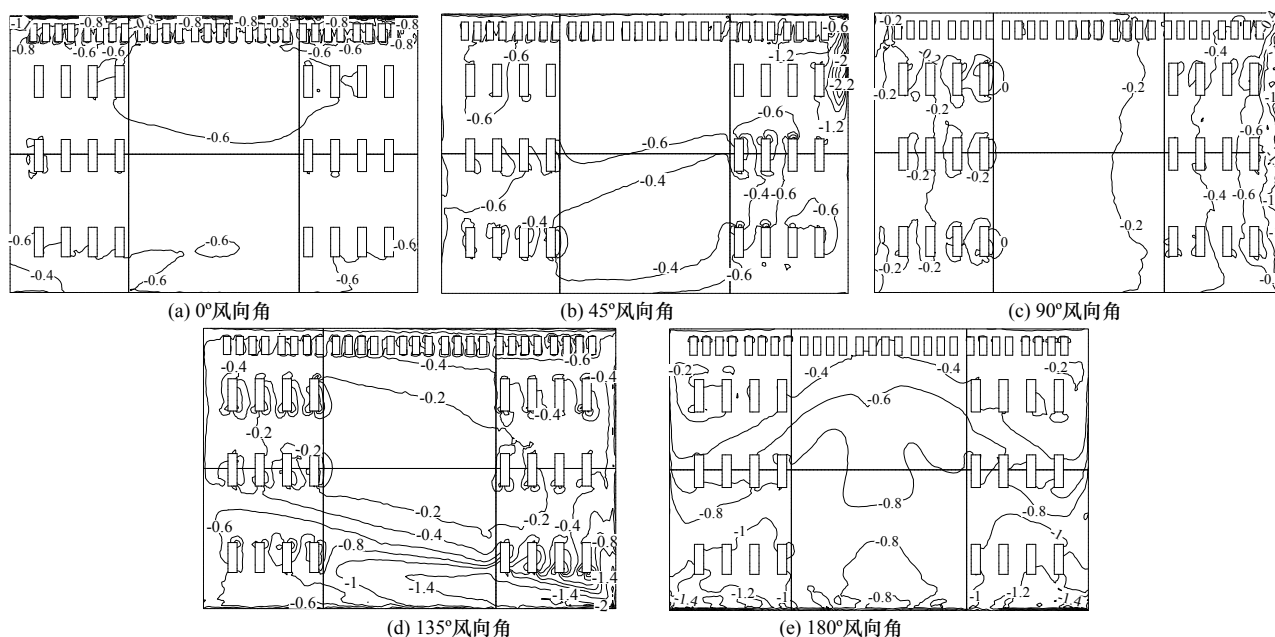


图10 数值模拟平均风压系数等值线

Fig.10 Isolines of mean pressure coefficient under computational wind simulation

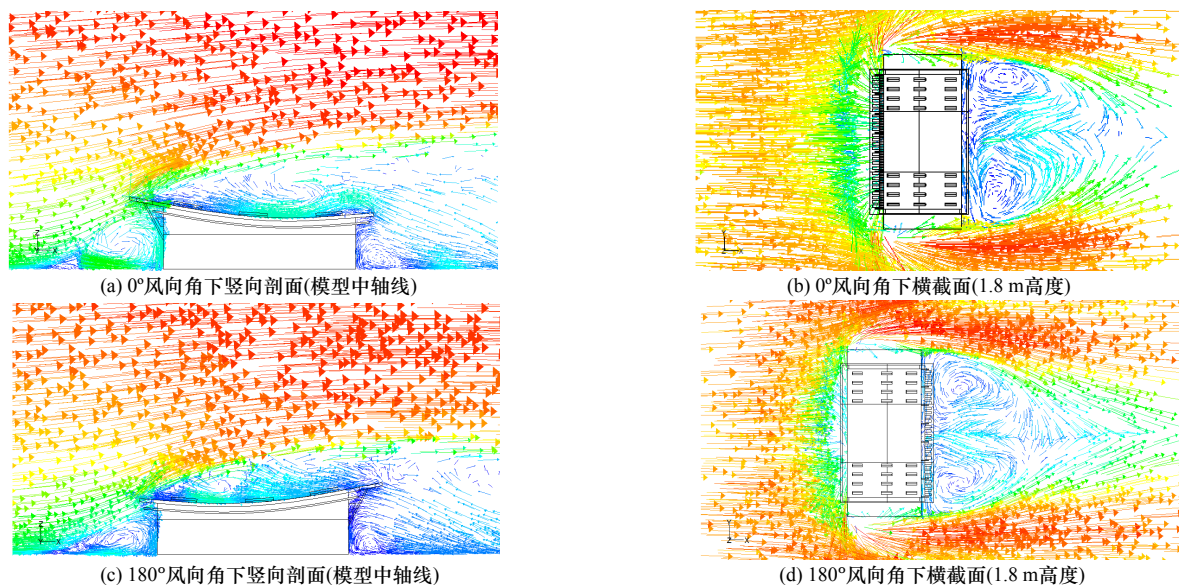


图11 各风向角下立面和横截面速度矢量分布

Fig.11 Velocity vector distribution of vertical section and cross section under different wind directions

#### 4.3 上挑檐洞口的影响

该航站楼挑檐有上下两层,且前挑檐长度达6.3 m,对风荷载极为敏感.取最不利的 $0^\circ$ 风向角(该风向角前挑檐处于正迎风面)为对象,以挑檐局部风速矢量图来分析上挑檐开设洞口所产生的影响,见图12.

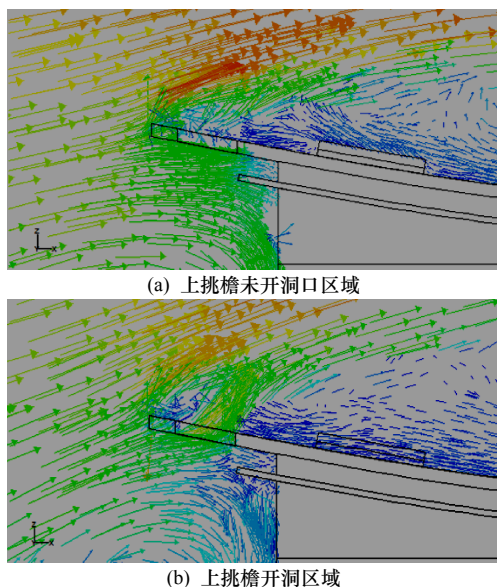


图12 挑檐局部风速矢量对比

Fig.12 Comparison of different conditions in the front eaves

在上挑檐未开洞口区域,当风流至屋盖前缘时,在上挑檐处发生剧烈分离,上挑檐下方发生严重阻滞,给其造成很大的向上升力;上挑檐的上方由于空气粘性效应,风流动的方向与来流方向相反,从而形成很大的漩涡,给其造成很大的吸力.上吸下顶,使上挑檐极易受到破坏,见图12(a).上挑檐开设洞口区域,当风流至屋盖前缘时,上挑檐下方气流从洞口穿过,明显缓解了下方气流的阻滞现

象,可有效地减小所受风荷载的影响,该构造措施效果显著,见图12(b)

## 5 结 语

(1) 基于RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型的数值模拟结果和风洞试验结果总体上吻合良好.数值模拟可以直观的呈现建筑物周围风场特性及对结构的影响,为研究风荷载特性提供有力的理论依据.

(2) 该结构屋盖均承受风吸力作用.不同风向角下,各分区体型系数发生较大变化.气流在迎风面分离后形成的漩涡作用将产生极大的负压区.因此,在设计时,应注意最不利风向角下屋盖局部区域极大风吸力的影响.对于挑檐角部区域的设计应更加重视,需对其进行加固处理.

(3) 屋盖上挑檐进行开洞处理,以及下部设置导流板,不仅使建筑造型更加美观,而且有效地缓解了上挑檐上吸下顶的现象,而且可以缓解下挑檐所受气流的阻滞现象,减小所受风荷载的影响.

## 参考文献 References

- [1] FU Jiyang, ZHENG Qingxing, WU Jiurong, et al. Full-scale tests of wind effects on a long span roof structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(2): 361-372.
- [2] YE Jihong, DONG Xin. Wind pressure features of large-span flat roof in different wind fields induced by conical vortex[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2015, 38(8): 975-990.
- [3] 金新阳, 杨易, 盛平, 等. 新广州火车站大跨屋盖结构风荷载风洞试验与数值模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 39(12): 55-58.  
JIN Xinyang, YANG Yi, SHENG Ping, et al. Research on wind loads of new Guangzhou Railway Station by wind tunnel test and numerical simulation[J]. Journal of Building Structures, 2009, 39(12): 55-58.

- [4] 陆煜, 赵善博, 马文勇, 等. 双曲型塔柱大跨凸面悬挑结构风荷载特性研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2015, 28(4): 6-10.  
LU Yu, ZHAO Shanbo, MA Wenyong, et al. Study on wind loads of hyperbolic columnar structure with large-span convex cantilever roof[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural science), 2015, 28(4): 6-10.
- [5] 吴迪, 武岳, 孙瑛. 大跨度屋盖结构极值风压概率分布特征研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 29-35.  
WU Di, WU Yue, SUN Ying. Probability distribution characteristics of extreme wind pressure for large span roofs[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 29-35.
- [6] 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 Xingxing, SU Bo, SHI Qiyin. 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.
- [7] 张明亮, 李秋胜, 陈伏彬, 等. 复杂体型大跨屋盖表面风压分布的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(10): 1-6.  
ZHANG Mingliang, LI Qiusheng, CHEN Fubin, et al. Experimental study of wind pressure distributions on a long-span complex roof structure[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2011, 38(10): 1-6.
- [8] 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 building structures: GB50009-2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [9] 日本建筑学会. 建筑风荷载流体计算指南[M]. 孙瑛, 孙晓颖, 曹曙阳, 译. 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]. SUN Ying, SUN Xiaoying, CAO Shuyang, translated. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [10] AIJ. Recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 2004.

(编辑 桂智刚)

(上接第642页)

## 参考文献 References

- [1] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of construction of the People's Republic of China. Standard methods for testing of concrete structures: GB/T 50152-2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [2] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB50152-92[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.  
Ministry of construction of the People's Republic of China. Standard methods for testing of concrete structures: GB50152-92[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1992.
- [3] 茆诗松, 王静龙, 濮晓龙. 高等数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 施普林格出版社, 1998.  
MAO Shisong, WANG Jinglong, PU Xiaolong. Advanced mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, Springer-Verlag Press, 1998.
- [4] ANG A H S, TANG W H. Probability concepts in engineering planning and design(II)[M]. New York: John Wiley & Son, Inc, 1984.
- [5] JCSS. JCSS probabilistic model code: part 3: resistance models[S]. Copenhagen, Denmark: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [6] ISO. General principles on reliability for structures: ISO2394: 1998[S]. International Standard Organization, 1998.
- [7] 中华人民共和国建设部. 建筑结构设计统一标准: GB J68-84[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.  
Ministry of construction of the People's Republic of China. Unified standard for design of building structures: GB J68-84[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1984.
- [8] 茆诗松, 王静龙, 史定华. 统计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
MAO Shisong, WANG Jinglong, SHI Dinghua. Statistics handbook[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] 李继华, 林忠民, 李明顺. 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.  
LI Jihua, LIN Zhongmin, LI Mingshun. The probability limit state design of building structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990.
- [10] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
GONG Jinxin, WEI Weiwei. The reliability design principle of engineering structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构可靠性设计统一标准: GB50153-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of engineering structures: GB50153-2008[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.

(编辑 桂智刚)