

DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.027

某 T 型大跨度封闭屋盖风荷载风洞试验 和数值模拟

蒋永扬¹, 蔡本祥², 邢 丽³, 庞崇安⁴, 郭振亮¹

(1. 浙江中南绿建科技集团有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 湖南空天动力科技有限公司, 湖南 长沙 410006;
3. 浙大城市学院, 浙江 杭州 310015; 4. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231)

摘 要: 采用风洞试验和 CFD 数值模拟方法, 对某 T 型大跨度封闭屋盖风荷载进行了研究. 通过 1 : 250 缩尺模型风洞试验得到了屋盖表面的平均风压系数和等效静力风荷载的分布特征. 采用 CFD 稳态数值模拟计算了屋盖的绕流特性, 所得平均风压系数与风洞试验结果进行对比, 验证了数值模拟的可靠性, 并基于 CFD 流场信息分析了该 T 型屋盖表面的风压形成机理. 结果表明, 由于 T 型结构的对称性, 在不同风向角下 T 型屋盖对称轴两侧的风压系数关于对称轴所在风向角对称分布, 且屋盖表面风压系数沿来流风向逐渐减小; T 型屋盖两翼和中部的转角处会出现较大的风吸力; 来流风在流经屋盖上挑边缘位置时流动分离现象显著, 导致屋盖上挑边缘表面产生较大的风吸力, 设计时应当予以重视.

关键词: T 型大跨度屋盖; 风荷载; 风洞试验; CFD 数值模拟

中图分类号: TU312+.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-6578(2025)01-0027-08

Wind tunnel test and numerical simulation on wind load of a T-shaped long-span closed roof

JIANG Yong-yang¹, CAI Ben-xiang², XING Li³, PANG Chong-an⁴, GUO Zhen-liang¹

(1. Zhejiang Zhongnan Green Construction Technology Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;

2. Hunan Aerospace Power Technology Co., Ltd., Changsha 410006, China;

3. Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China;

4. Zhejiang Tongji Science and Technology Vocational College, Hangzhou 311231, China)

Abstract: This manuscript studied the wind load of a T-shaped long-span closed roof based on the wind tunnel test and CFD numerical simulation. The average wind pressure coefficient of the roof surface and the distribution of equivalent static wind load were obtained by the wind tunnel test with the scale of 1 : 250. Then the CFD steady-state numerical simulation technology was used to calculate the flow characteristics around the roof. To verify the reliability of numerical simulation, the average wind pressure coefficient obtained was compared with the wind tunnel test results, and the formation mechanism of wind pressure on the T-shaped roof surface was analyzed based on the CFD flow field information. The results show that due to the symmetry of the T-shaped structure, the wind pressure coefficient on both sides of the symmetry axis of the T-shaped roof is symmetrically distributed about the wind direction angle where the symmetry axis is located under different wind angles, and the wind pressure coefficient on the roof surface gradually decreases along the incoming wind direction. There will also be greater wind suction at the corner of the two wings and the middle of the T-shaped roof. When the incoming air flows through the

收稿日期: 2022-08-28.

作者简介: 蒋永扬(1989—), 男, 浙江杭州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事大跨度空间结构研究. E-mail: 793029081@qq.com

edge of the roof, the flow separation phenomenon is obvious, resulting in a large wind suction on the edge of the roof, which should be paid attention to in design.

Key words: T-shaped long-span roof; wind load; wind tunnel test; CFD numerical simulation

大跨度空间结构因具备空间大的优势,被广泛应用于综合枢纽站、航站楼等大型公共建筑中,为减轻结构自重对跨度的不利影响,轻质、高强材料被广泛应用,使得屋盖质量降低的同时,结构刚度也日趋变柔^[1,2]. 通常情况下,综合枢纽站、航站楼所处位置地势平坦,无密集建筑群,地面粗糙度较小,风速较大,风荷载影响更为重要. 因此,风荷载已成为该类结构的主要控制荷载.

在结构风工程领域中,针对大跨度空间结构的风荷载问题,国内外学者开展了广泛的研究. 张四化等^[3]研究了 U 型大跨悬挑屋盖表面风荷载及其形成机理. 李胜兵等^[4]发现大跨屋盖的风荷载取值受建筑外形、周边干扰、结构特性、风向等因素影响明显. 沈国辉等^[5]分析了封闭型和敞开型两种大跨结构屋面风荷载的分布特征. 李庆祥等^[6]对 L 型和 U 型建筑物的绕流特性和风压分布特征进行了数值研究. 葛义娇等^[7]对十字形高层建筑进行了三维定常风场的数值模拟,研究分析了模型各表面平均风压系数的分布规律. 顾明等^[8]中展示了北京首都机场 3 号航站楼屋面的风压分布特征,采用考虑多模态及模态间耦合效应的 CQC 法计算结构风振响应,并以此为基础应用阵风荷载因子法计算了静力等效风荷载. 顾明等^[9]讨论了大跨度屋盖不同悬挑高度对平均风荷载的影响.

因建筑效果需要,大跨度封闭屋盖表面形状、起伏处理等不尽相同,使得屋盖结构造型各异,屋盖表面的风荷载分布以及结构风振响应不尽一致. 与常见的矩形和圆形建筑相比,既有的相关研究成果不能完全适用于各类大跨度屋面的抗风设计. 本文以某 T 型大跨度海运枢纽站屋盖为研究对象,综合风洞试验和 CFD 数值模拟方法,研究屋盖表面的风荷载分布规律并结合 CFD 数值模拟流场结果对其形成机理进行探究,为该类型建筑的结构抗风设计提供参考.

1 风洞试验和数值模拟方法

1.1 风洞试验简介

某 T 型海运枢纽站大跨度屋盖,水平投影尺寸

为:578 m×427 m,屋盖最高点距离地面 42.5 m,整体结构沿中轴线左右对称. 屋盖的刚性模型测压风洞试验在国内某知名研究院低速试验段进行,试验段宽 4 m,高 3 m. 试验中采用尖劈和粗糙元模拟方法被动模拟了 1/250 缩尺比的 A 类风场,为了探究最不利风向角下风荷载对建筑的影响,本文根据结构伸缩缝将屋盖划分为 5 个区域,如图 1(a)所示,图 1(b)为试验风向角定义及测压点布置图,风场特性如图 1(c)所示(图中 U 为各高度处的平均风速, U_g 为参考高度处的风速). 风压正负符号约定为:正

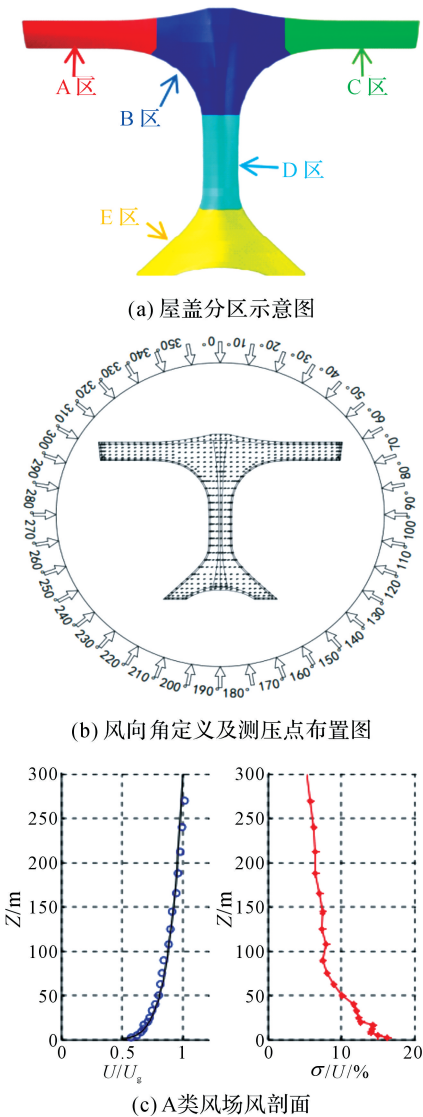


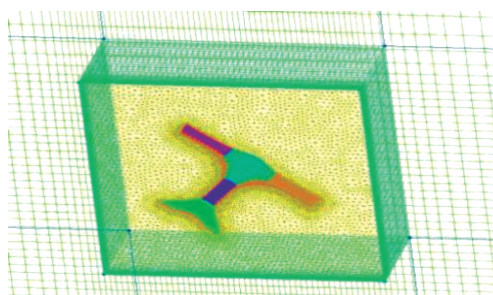
图 1 刚性模型测压风洞试验概况和分区示意图

Fig. 1 Overview and zoning diagram of the rigid model pressure measurement wind tunnel test

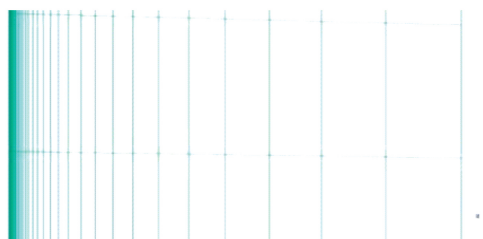
号表示压力由外表面指向模型内部(表示风压力),负号表示压力由模型内部指向外表面(表示风吸力)。

1.2 数值模拟简介

考虑和风洞试验结果的可比性,数值模拟研究采用了与风洞试验相同缩尺比(1/250)的模型进行计算。假定建筑模型高度为 H ,宽度为 B ,长度为 L ,计算域高度约为 $10H$,宽度约为 $8B$,长度约为 $12L$,此时阻塞率小于 3% ^[10]。结构几何模型见图 2。计算域大小为 $16\text{ m} \times 24\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ (X 向 $\times Y$ 向 $\times Z$ 向)。数值模拟计算中风向角定义同风洞试验保持一致。由于结构体型复杂,网格划分时采用区域分块技术。边界层网格首层高度采用 NASA 的粘性网格间距计算器(Viscous Grid Space Calculator)进行计算,边界层网格递增系数 1.15 ^[11],如图 2(b)。控制方程采用分离式方法求解,压力和速度的耦合采用 SIMPLEC 算法,湍流模型选用 SST $\kappa-\omega$ 湍流模型,对流项采用二阶迎风格式,计算收敛准则取残差值为 1×10^{-4} 。入流面采用速度入口边界条件,平均风剖面 and 湍流度剖面通过风洞实验风剖面给出,见图 1(c),来流入口设置如表 1。出流面采用 0 压力出口边界条件,计算域顶部和两侧采用对称边界条件,模型表面和计算域底部采用无滑移壁面边界条件。



(a) 枢纽站模型及网格



(b) 边界层网格

图 2 数值模拟几何及边界层网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geometry and boundary layer mesh for numerical simulation

表 1 来流入口边界设定

Table 1 Incoming flow ingress boundary settings

入口速度边界条件	指数律平均风剖面: $V(Z) = V_G (Z/Z_G)^a$
入口湍流强度	$I = \begin{cases} 0.18 & Z < 5m \\ 0.1(Z/Z_G) - a - 0.05 & Z \geq 5m \end{cases}$
入口湍动能	$k = (3/2)(\bar{v}I)^2$
入口比耗散率	$\omega = \frac{K^{1/2}}{0.09^{1/4}L}$
入口湍流积分尺度	$L = 100 (Z/30)^{-a-0.05}$

2 结果与分析

试验中取远离模型的最高试验建筑顶部高度位置为参考点,并以此处的来流动压为标准将测点压力进行无量纲化。为方便根据规范使用试验结果,将得到的压力系数进一步乘上相应的系数进行了转换,最终得到标准压力系数值。该值相当于用实际高度 10 m 处的来流表面压力(平均量)进行无量纲化,即平均风压系数,结合风压分区图,对区域各测点风压系数做平均处理。如下式:

$$C_{Pi} = \frac{P_i - P_0}{0.5\rho V_0^2} \quad (1)$$

$$C_P = \frac{\sum_{i=1}^N C_{Pi} S_i}{S} \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; V_0 为 10 m 高度处来流风速; P_0 是来流的静压; C_P 表示该区域平均风压系数; N 为测点总数; C_{Pi} 表示第 i 个测点的风压系数; S_i 表示第 i 个测点所代表的面积; S 表示该区域总面积。

2.1 屋盖表面平均风压系数

图 3 为风洞试验所得屋盖表面各区域平均风压系数随风向角的变化曲线,由图可知:1)屋盖上平均风压系数均为负值,其表面均表现为风吸力;2)A 区在 10° 风向角时平均风压系数可达 -0.93 ,B 区在 0° 风向角时平均风压系数可达 -0.69 ,C 区在 160° 风向角时平均风压系数可达 -1.1 。D 区在 $90^\circ \sim 110^\circ$ 和 $270^\circ, 280^\circ$ 风向角时平均风压系数可达 -0.8 。E 区在 $190^\circ, 200^\circ$ 风向角时平均风压系数可达 -0.89 ;3)由于屋盖结构具有对称性,因此位于屋盖对称轴上的 B 区、D 区、E 区平均风压系数曲线在 $0^\circ \sim 350^\circ$ 风向角上关于 180° 风向角呈左右对称趋

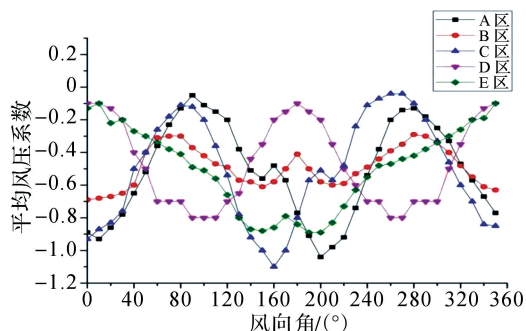
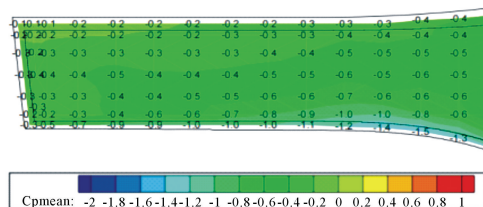


图3 屋盖表面各区域平均风压系数随风向角的变化曲线

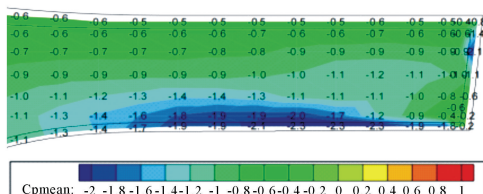
Fig. 3 Variation curves of average wind pressure coefficient of each area on roof surface with wind direction

势,而A区和C区的平均风压系数曲线在 $0^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 风向角上关于 180° 风向角互为对称曲线;4)屋盖表面各区域均在本区域处于迎风向时出现较大的负风压系数值。

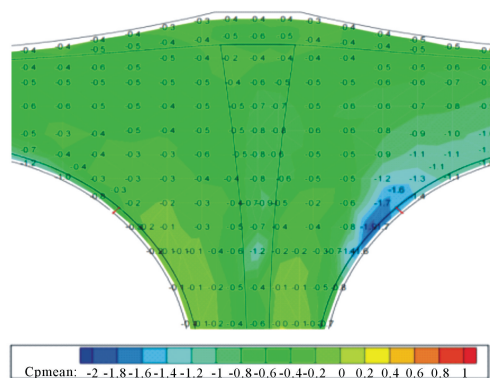
为进一步了解屋盖表面平均风压的分布情况,本文以 160° 风向角为例进行分析,该风向角下屋盖出现最大负风压值。图4为 160° 风向角风洞试验时屋盖表面风压系数分布云图。由图可知:1)图4(f)中,屋面较大负风压系数出现在B区、C区、E区,过大的风吸力容易导致这些位置的屋面板被掀起而发生局部破坏;2)图4(a)中A区右下方屋面边缘出现了最大的负风压系数,其值可达 -1.5 ,A区表面风压系数变化趋势较为平缓;3)图4(c)中B区的右下方屋面边缘出现最大负风压系数,其值可达 -1.9 ,沿着来流风向,B区迎风坡屋面风压系数变化较为急剧,背风坡风压系数变化平缓;4)图4(b)中C区右下方屋面边缘出现了最大的负风压系数,其值可



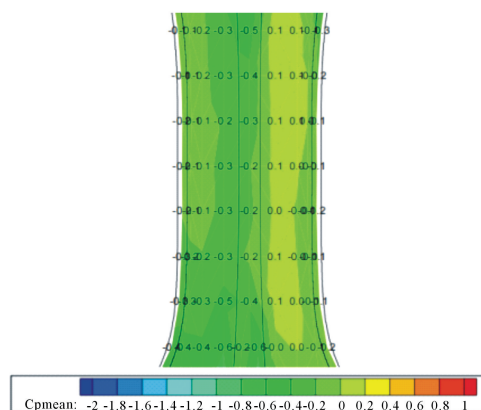
(a) A区平均风压系数云图



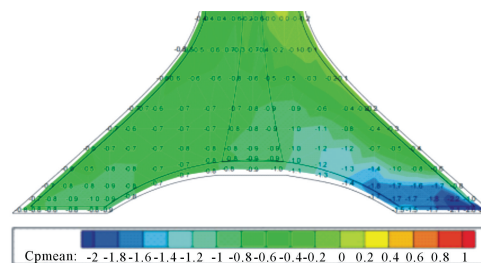
(b) C区平均风压系数云图



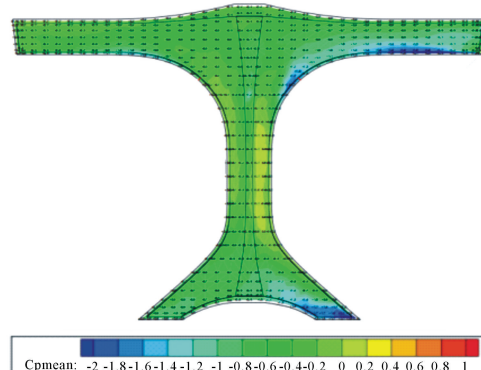
(c) B区平均风压系数云图



(d) D区平均风压系数云图



(e) E区平均风压系数云图

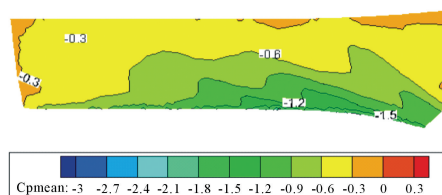


(f) 整体平均风压系数云图

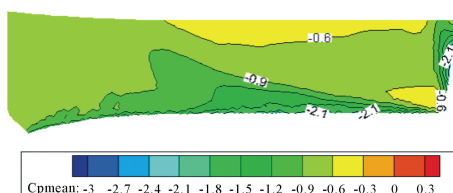
图4 屋盖表面平均风压系数(风洞试验, 160° 风向角)

Fig. 4 Average wind pressure coefficient on roof surface (wind tunnel test, 160° wind direction)

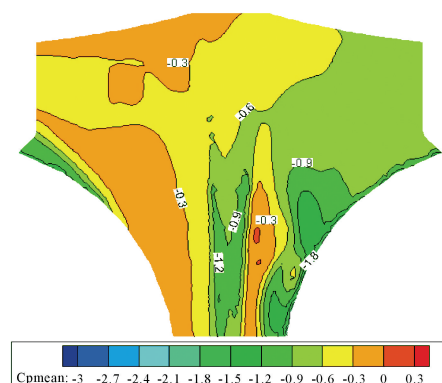
达 -2.3 ,沿着来流风向,B区屋面负风压系数逐渐变小;5)图4(d)中D区上下两侧屋脊出现了最大的负风压系数,其值可达 -0.6 ,D区迎风坡屋面风压系数大体为正值,表现为风压作用,背风坡风压系数均为负值;6)图4(e)中E区屋面右下角边缘出现最大负风压系数,其值可达 -2.9 ,为屋面最大负风压系数,E区右侧风压系数沿着来流风向逐渐变小且变化趋势较为急剧,左侧风压系数变化较为平缓。图5为 160° 风向角CFD数值模拟的屋盖表面风压系数分布云图,对比图5所示的风洞试验结果可见:CFD数值模拟的最大负风压系数在B区、C区、E区分别为 -1.8 、 -2.1 、 -2.7 ,与对应的风洞试验结果 -1.9 、 -2.3 、 -2.9 相比,CFD数值模拟结果对模型边缘局部风吸力有所低估,其他区域与风洞试验结果基本一致,本文不再赘述;总体上,本文数值模拟得到的屋盖表面风压系数的数值及其分布规律,与风洞试验结果吻合度较高,从而说明了本文数值模拟结果是有效的。



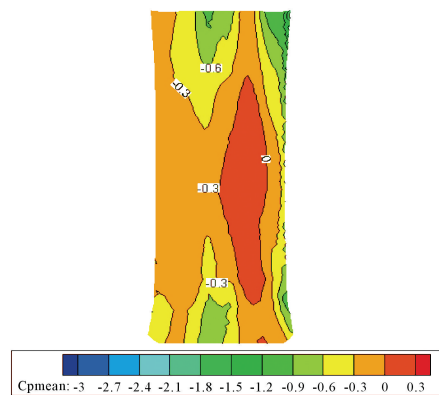
(a) A区平均风压系数云图



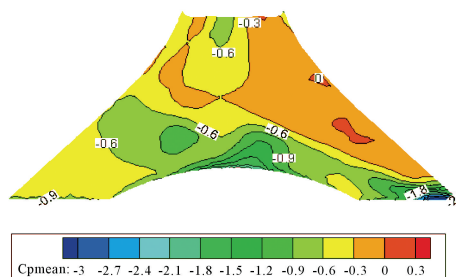
(b) C区平均风压系数云图



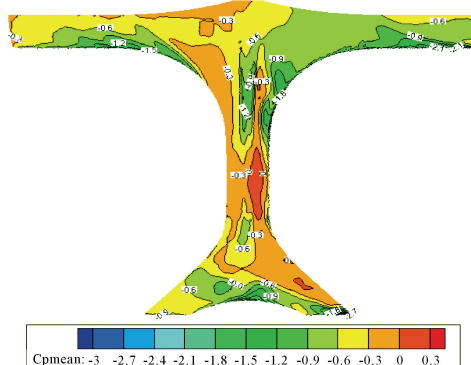
(c) B区平均风压系数云图



(d) D区平均风压系数云图



(e) E区平均风压系数云图



(f) 整体平均风压系数云图

图5 屋盖表面平均风压系数(CFD, 160° 风向角)Fig. 5 Average wind pressure coefficient on roof surface (CFD, 160° wind direction)

2.2 屋盖风致响应及等效静力风荷载

本文主要利用刚性模型风洞试验得到的脉动压力值作为风荷载自谱和相干谱的输入数据,并基于随机振动理论,采用振型分解法求解结构动力响应的位移均方差,最后再按照等效静力的方法确定动力风荷载。限于篇幅,本文对平稳激励下线性系统随机振动响应分析的CQC方法不再赘述。

2.2.1 屋盖风致响应

经随机过程的风振分析,屋面结构位移响应以

竖向位移为主。A~E区各区域间结构主体通过伸缩缝分隔,其中A区和C区结构完全对称;E区为混凝土主体结构,刚度较大,无需进行风致响应研究。A区较不利风向为 $190^{\circ}\sim 230^{\circ}$ 风向(风向定义与测压试验报告一致),最大位移响应为 $0.02\sim 0.03$ m。D区较不利风向为 $60^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 、 $230^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 风向(风向定义与测压试验报告一致),最大位移响应为 $0.02\sim 0.03$ m。B区较不利风向位于 $330^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 和 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 风向附近,其引起的最大位移响应超过 0.2 m。图6为B区最大位移响应区分布图,设计时应予以重视。

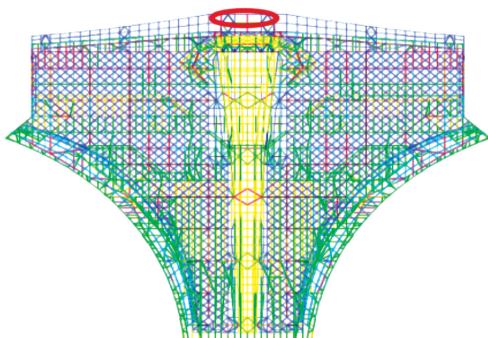


图6 B区最大位移响应区分布

Fig. 6 Distribution of the maximum displacement response area in Zone B

2.2.2 屋盖等效静力风荷载

为进一步探究风振作用对屋盖的影响,选取各风向角下各区域的最大等效静力风荷载,如图7所示,分析最大等效静力风荷载的分布规律,本文采用风振系数法来确定等效静力风荷载。定义峰值响应与平均响应之比为风振系数,以此来表征脉动风荷载对结构的放大作用。作用在结构上的以某个响应等效的等效静力风荷载可用下式计算:

$$w_i(x, y, z) = \beta \mu_{si} \mu_{zi} w_0 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\hat{R}}{R} \quad (4)$$

$$\hat{R} = \bar{R} \pm g \sigma_R \quad (5)$$

式中: w_i 为风荷载标准值; β 为风振系数; μ_{si} 为风荷载体型系数; μ_{zi} 为风压高度变化系数; w_0 为基本风压(kN/m^2); $\mu_{si} \mu_{zi} w_0$ 为平均风荷载; g 为峰值因子; σ_R 为计算得到的响应均方根; $\hat{R}$ 表示所有响应中最大响应的峰值响应; $\bar{R}$ 表示对应位置的平均响应。

图7为各风向角下各区域最大等效静力风荷载,由图7可知:1)A区在 290° 风向角下存在最大等效静风荷载,其值可达 -6.1 kPa,在 $40^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 风向角下,受其他区的阻隔,A区等效静力风荷载较小;

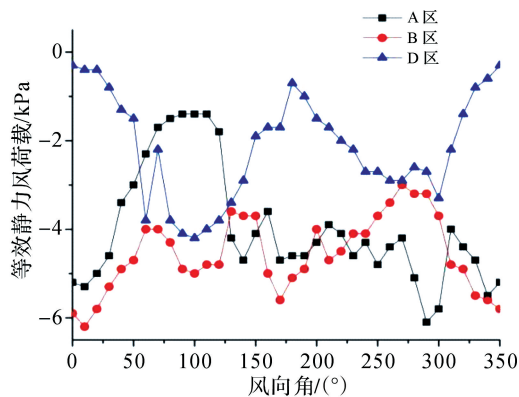


图7 各风向角下各区域的最大等效静力风荷载

Fig. 7 The maximum equivalent static wind load for each region at each wind angle

2)B区在 10° 风向角下存在最大等效静风荷载,其值可达 -6.2 kPa,最大等效静力风荷载关于 180° 风向角对称;3)D区在 100° 风向角下存在最大等效静力风荷载,其值可达 -4.2 kPa,最大等效静力风荷载关于 180° 风向角对称;4)由于B区和D区一前一后的位置原因,导致最大等效静力风荷载变化趋势总体上相反。

B区等效静力风荷载总体上大于A区和D区,因此本文以 10° 风向角下B区等效静力风荷载分布图为例如图8所示。展示等效静力风荷载的计算结果。由图8可知:1)等效静力风荷载最大值出现在各风向角下的迎风前缘,屋盖表面均为负压,最大等效静力风荷载为 -6.2 kPa;2)屋盖等效静力风荷载由迎风边缘沿着来流风向逐渐减小,此特点与平均风压分布规律一致。

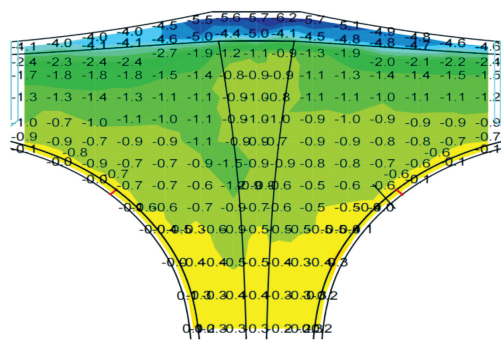


图8 10° 风向角下B区等效静力风荷载分布(单位:kPa)

Fig. 8 Distribution of equivalent static wind load in Zone B at 10° wind angle (Unit: kPa)

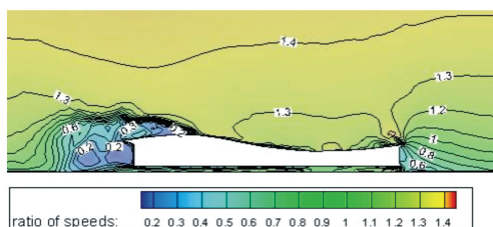
2.3 屋盖周围流场机理分析

依据CFD数值模拟结果,从流场的特征分析屋盖表面风压分布机理,本文以 160° 风向角下屋盖周围流场图为例进行分析,如图9所示。图9(a)为建

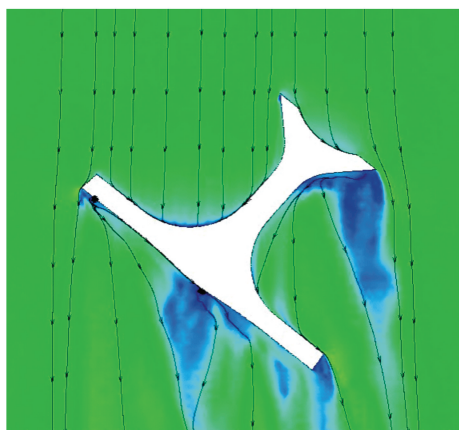
筑模型对称面的速度矢量图,图9(b)为建筑模型对称面的速度比值图.图9(c)为10 m高度处的水平剖面流线图.由图9(a)可知来流风在上挑型屋盖上方存在流动分离区,导致屋盖表面整体表现为负压区;由图9(b)可知屋盖迎风前缘速度变化强烈,风速比较大,流动分离现象显著,导致负压极值出现在屋盖边缘;流经屋盖“龟背”后,风速较小,所以该区域风压较小;由图9(c)可知来流风在以 160° 风向角吹向T型屋面时,其来流风受到幕墙的阻挡,改变了局部风场的运动状态,致使其在凹面底部出现汇集现象,导致此处风速过大,这也是B区两翼和中部的转角出现负风压系数数值过大的原因.由于受到D区和E区的阻隔,导致A区来流向的风速低于C区,这也是C区风压系数大于A区的原因.



(a) 建筑模型对称面的速度矢量图(160°)



(b) 建筑模型对称面的速度比值图(160°)



(c) 10 m高度处的水平剖面流线图

图9 屋盖周围流场图(160°)

Fig.9 Flow field diagram around the roof (160°)

3 结论

采用风洞试验和CFD数值模拟方法对某T型大跨度海运枢纽站屋盖表面风荷载进行了研究,主

要得到以下结论:

1)从整体来看,该T型大跨度屋盖受到的风荷载以负风压为主(表现为风吸力),且屋盖表面风荷载分布不均匀;由于T型结构的对称性,在不同风向角下,T型屋盖对称轴两侧的风压系数关于对称轴所在风向角(本文为 0° 、 180°)对称分布,且屋盖表面风压系数沿着来流风向逐渐减小.该T型大跨度屋盖在跨中迎风边缘处有较大等效静力风荷载,其值可达 -6.2 kPa.

2)从局部来看,在迎风方向的屋盖表面边缘位置受到较大的风吸力,其中屋盖尖角在迎风时风吸力最大,其负风压系数值可达 -2.9 .此外,该T型屋盖两翼和中部的转角处也会出现较大的风吸力.

3)从数值模拟结果可知,SST $\kappa-\omega$ 湍流模型在T型大跨度建筑屋盖表面的平均风压预测上具有较高的精度.结合流场分析可知,造成迎风屋盖表面边缘部位较大风吸力的原因是该屋盖边缘上挑处迎风时存在较为显著的流动分离现象,建议在该部位设置挡板等构造措施,减弱局部风吸力,保护该区域的屋面板不易被强风掀起.

参考文献

- [1] UEMATSU Y, WATANABE K, SASAKI A, et al. Wind-induced dynamic response and resultant load estimation of a circular flat roof[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1999, 83: 251-261.
- [2] YASUI H, MARUKAWA H, KATAGIRI J, et al. Study of wind-induced response of long-span structure [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1999, 83: 277-288.
- [3] 张四化,郑德乾,马文勇,等. U形大跨悬挑屋盖风荷载风洞试验和数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2019, (9): 133-137.
ZHANG Si-hua, ZHENG De-qian, MA Wen-yong, et al. Wind tunnel test and numerical simulation of wind loads on U type long-span cantilevered roof[J]. Building Structure, 2019, (9): 133-137.
- [4] 李胜兵,杨立国,何连华. 大跨度屋盖结构站房风洞试验研究[J]. 钢结构, 2017, 32(10): 25-28.
LI Sheng-bing, YANG Li-guo, HE Lian-hua. Wind tunnel experimental study of the station with long-span roof structure [J]. Steel Construction, 2017, 32(10): 25-28.
- [5] 沈国辉,孙炳楠,楼文娟. 大跨度屋盖结构的风荷载特征[J]. 建筑结构, 2008, (10): 90-92.
SHEN Guo-hui, SUN Bing-nan, LOU Wen-juan. Characteristic of wind load on long-span roof [J]. Building

- Structure, 2008, (10): 90-92.
- [6] 李庆祥,周云,汪大洋. L形和U形三维钝体结构绕流的数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(3): 247-254.
- LI Qing-xiang, ZHOU Yun, WANG Da-yang. Three-dimensional numerical study on wind field around L-and U-shaped models[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(3): 247-254.
- [7] 葛义娇,范存新. 十字形高层建筑风场数值模拟[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2014, 27(1): 21-26.
- GE Yi-jiao, FAN Cun-xin. Numerical simulation of wind field on cross-shaped high-rise building [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2004, 27(1): 21-26.
- [8] 顾明,黄鹏,周炬毅,等. 北京首都机场3号航站楼风荷载和响应研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 40-44.
- GU Ming, HUANG Peng, ZHOU Xuan-yi, et al. A study on wind loads and responses of Terminal 3 at Beijing Capital Airport [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 40-44.
- [9] 顾明,杨伟,傅钦华,等. 上海铁路南站屋盖结构平均风荷载的数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 141-146.
- GU Ming, YANG Wei, FU Qin-hua, et al. Numerical simulation of wind loads acting on roof of Shanghai Railway Station Building [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(2): 141-146.
- [10] 许伟. 大气边界层风洞中风场的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 23.
- XU Wei. Numerical simulation of the airflow in atmospheric airflow in atmospheric-boundary-layer wind tunnel [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 23.
- [11] 孙虎跃. 基于CFD和PIV技术的大跨屋盖表面流动结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 43-44.
- SUN Hu-yue. Research on the flow structure around large-span roofs by CFD and PIV techniques [D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 43-43.

(上接第12页)

- [9] 董石麟. 网状球壳的连续化分析方法[J]. 建筑结构学报, 1988, 9(3): 1-14.
- DONG Shi-lin. Continuum analogy method for analyzing latticed spherical shells [J]. Journal of Building Structures, 1988, 9(3): 1-14.
- [10] 沈世钊. 网壳结构的稳定性[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 11-19.
- SHEN Shi-zhao. Stability of latticed shells [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(6): 11-19.
- [11] 冯远,龙卫国,欧加加,等. 大跨度胶合木结构设计探索[J]. 建筑结构, 2021, 51(17): 43-49.
- FENG Yuan, LONG Wei-guo, OU Jia-jia, et al. Exploration on design of large-span glulam structures [J]. Building Structure, 2021, 51(17): 43-49.
- [12] 陆伟东,陆斌辉,屈丽荣,等. 大跨木结构研究现状及关键技术[J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(4): 1-26.
- LU Wei-dong, LU Bin-hui, QU Li-rong, et al. Research status and key technologies of large span timber structures [J]. Sichuan Building Science, 2021, 47(4): 1-26.
- [13] 孙小鸾,瞿以恒,刘伟庆,等. K6型单层球面木网壳稳定承载力非线性分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 62-71.
- SUN Xiao-luan, QU Yi-heng, LIU Wei-qing, et al. Nonlinear finite element analysis of stability of K6-type single layer spherical timber latticed shell [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 62-71.
- [14] DAVALOS J F. Geometrically nonlinear finite element analysis of a glulam timber dome [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989: 167-192.
- [15] HOLZER S M, WU C H, TISSAOUI J. Finite element stability analysis of a Glulam Dome [J]. International Journal of Space Structures, 1992, 7(4): 353-361.
- [16] PAN D H, GIRHAMMAR U A. Influence of geometrical parameters on behaviour of reticulated timber domes [J]. International Journal of Space Structures, 2003, 18(2): 105-121.
- [17] 何敏娟,胡超,舒展. 节点半刚性对K6单层木网壳稳定性能的影响[J]. 特种结构, 2018, 35(4): 69-80.
- HE Min-juan, HU Chao, SHU Zhan. Influence of joint semi-rigidity on stability of K6 single-layer timber reticulated shell with slotted-in joints [J]. Special Structures, 2018, 35(4): 69-80.
- [18] 陈志勇,祝恩淳,潘景龙. 复杂应力状态下木材力学性能的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(4): 629-634.
- CHEN Zhi-yong, ZHU En-chun, PAN Jing-long. Numerical simulation of mechanical behaviour of wood under complex stress [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(4): 629-634.