

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.018

下击暴流作用下大跨扇形屋盖风压分布特性研究

王 辉¹, 汤志远¹, 李将将¹, 钟才敏², 桑立娟²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 上海中森建筑与工程设计顾问有限公司, 上海 200062)

摘要:下击暴流具有与常态风完全不同的风场特性, 对大跨屋盖破坏极大。文章基于计算流体力学暴流解析模型, 采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对大跨度扇形屋盖进行风压模拟研究, 分析静止暴流和移动暴流下扇形屋盖风压分布特性及风向对风压的影响, 并比较暴流场与常态风场之间风效应的差异特性。结果表明: 静止暴流和移动暴流作用下扇形屋面风压分布趋势不同, 移动暴流下屋盖风压显著增大, 最大可达 1 倍; 不同于移动暴流, 静止暴流下屋面气流变化会使局部区域压力方向改变。风向角对屋面风压分布影响显著, 其中移动暴流作用时风向影响最大, 3 类风剖面下屋面区域风压变化趋势一致, 均在风向 225° 时整体屋盖受吸力最大, 且在移动暴流下屋盖交接区平均风压系数最大可达 -3.00 。静止暴流和常态风下屋盖风压接近, 工程上若需考虑大跨屋盖静止暴流风荷载作用, 可以参考常态风场情况, 而移动暴流下屋盖多数区域风压骤增, 在抗风研究时需重点关注。

关键词:下击暴流; 解析模型; 大跨扇形屋盖; 风压系数; 数值模拟

中图分类号: TU312.1; V211.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)11-1556-08

Study of wind pressure distribution characteristics of large-span fan-shaped roof under downburst

WANG Hui¹, TANG Zhiyuan¹, LI Jiangjiang¹, ZHONG Caimin², SANG Lijuan²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Shanghai Zhongsen Architectural and Engineering Designing Consultants Co., Ltd., Shanghai 200062, China)

Abstract: Downbursts have completely different wind field characteristics compared to normal winds and can be extremely damaging to large-span roofs. Based on the computational fluid dynamics (CFD) downburst analytical model, the RNG $k-\epsilon$ turbulence model is used to simulate the wind pressure on the large-span fan-shaped roof. The wind pressure distribution characteristics and the effect of wind directions on the wind pressure on the fan-shaped roof under stationary and moving downbursts are analyzed, and the differences in wind effect between the downburst wind field and the normal wind field are compared. The results show that the wind pressure distribution trends of the fan-shaped roof under stationary and moving downbursts are different, and the wind pressure on the roof increases significantly under moving downburst, with the maximum value being double that under stationary downburst; unlike moving downburst, the change of airflow on the roof under stationary downburst will change the direction of pressure in the local area. The wind direction angle has a significant impact on the wind pressure distribution on the roof, with the most pronounced impact observed under moving downburst. The trends of wind pressure changes in the roof area under the three types of wind profiles remain the same, with the entire roof subjected to the greatest suction at a wind direction of 225° , and under moving downburst, the average wind pressure coefficient in the roof intersection area can reach up to -3.00 . The roof wind pressure is similar under stationary downburst and normal wind. For engineering assessments of large-span roofs under stationary downburst wind loads, the normal wind field scenario can serve

收稿日期: 2023-06-25; **修回日期:** 2023-08-10

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(11040606M116); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011]1568号)和亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题资助项目(2020ZB24)

作者简介: 王 辉(1973—), 男, 安徽安庆人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: hfutwh@sina.com.

as a reference. The wind pressure in most areas of the roof increases abruptly under moving downburst, which needs to be taken into account in wind resistance studies.

Key words: downburst; analytical model; large-span fan-shaped roof; wind pressure coefficient; numerical simulation

0 引 言

随着社会经济的发展,大跨度建筑(如体育馆、展览馆、科技馆)应用越来越多,因其跨度大、刚度小、阻尼小的特点,易受到强风作用破坏。近年来,极端气候频繁出现,其中因下击暴流引发的灾害事故频繁增多。下击暴流与常态风存在显著差别,下击暴流风速大、破坏力强且风速沿高度变化显著,最大可达 80 m/s^[1]。下击暴流一般为静止型,但某些下击暴流冲击到地面时,可能伴随有类似龙卷风的移动特性,移动范围可达数十公里,从而造成更大区域地面构筑物受灾^[2]。由于下击暴流具有独特的风场结构和风剖面特征,当其作用于大跨度屋盖时的风效应不仅与常态风效应存在区别,其本身也因是否移动而对地面构筑物存在风荷载作用上的差异。目前,我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)仅涉及大气边界层近地表良态风作用,下击暴流风荷载取值仍缺乏指导。因此,开展大跨度屋盖在下击暴流作用下的风荷载研究,对提高大跨度屋盖抗极端风作用性能有重要意义。

近些年,国内外学者大多数集中于大跨度屋盖在良态风作用下风荷载特性研究,而针对下击暴流作用情况研究相对较少^[3]。对于静止型下击暴流,文献[4]研究大跨度平屋盖结构受下击暴流作用的风荷载特性;文献[5]研究马鞍型屋面在距下击暴流下沉区域不同位置及不同风向角下屋面风压分布;文献[6]对雷暴冲击作用下球型大跨度顶板风压分布进行试验。对于移动型下击暴流对大跨度屋盖作用,相关研究则较为缺乏,仅文献[7]研究移动型下击暴流作用下圆形马鞍面屋盖风压特性。目前,复杂外形屋盖日益增多,相比于传统外形屋盖,在常态风作用下的风荷载分布更为复杂,而且受特异风作用时,由于风速剖面发生改变,其风荷载分布特性与常态风作用情况也存在差异,在遭受强风作用时极易出现破坏,因此针对复杂屋盖,深入研究特异风作用下的风荷载以及与常态风作用之间的差异性,将有利于揭示极端气候下特异风对复杂屋盖的作用特点,推动相关领域的研究与设计,有效提高大跨度屋盖抗极

端风作用的性能。

本文以某科技馆大跨度扇形屋盖为研究对象,考虑静止型和移动型下击暴流作用情况,模拟分析不同风向角下屋盖风压场,获得表面风压分布规律及风场之间风效应的差异特性,为复杂外形屋盖极端风效应研究与设计提供参考。

1 计算控制方程与风剖面模型

1.1 控制方程

基于 Reynolds 时均方法建立风场控制方程,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型封闭控制方程迭代求解,RNG $k-\epsilon$ 湍流模型提高了快速应变流的准确性和涡流的精度,且能够更好地处理弯曲程度大的流动^[8-9],因此在求解大跨复杂屋面风压时,能获得精确、可靠的计算结果。其控制方程为:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (3)$$

$$u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} \left[C_1 \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \epsilon \right] + R \quad (4)$$

其中: u_i, u_j 均为张量形式表示的平均速度分量($i, j=1, 2, 3$); k, ϵ 分别为湍动能、湍能耗散率; P 为平均压力; μ 为气流运动黏性系数; $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为 1.42、1.68、0.72、0.72; μ_t 为湍流涡黏性系数,且 $\mu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ 。

$$R = -\frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中: $\eta = Sk/\epsilon, S^2 = 2S_{ij}S_{ij}, S_{ij}$ 为平均应变张量大小; $\eta_0 = 4.38; \beta = 0.012; C_\mu = 0.085$ 。

1.2 风剖面模型

静止型下击暴流场可采用解析模型描述暴流风剖面,已有经验模型能应用于暴流场的数值计

算。本文采用文献[10]提出的优化模型,其风速分布为:

$$U_r(r, z) = \frac{\lambda r}{2} \left[\exp\left(-0.15 \frac{z}{z_{\max}}\right) - \exp\left(-3.2175 \frac{z}{z_{\max}}\right) \right] \exp\left[\left(2 - \left(\frac{r}{r_p}\right)^{2\alpha}\right) / 2\alpha\right] \quad (6)$$

其中: $\lambda = \frac{2u_{r, \max}}{r_p} \frac{1}{e^{2\alpha} (e^{-0.15} - e^{-3.2175})}$; $u_{r, \max}$ 为下击暴流风场中最大水平风速; z_{\max} 为下击暴流最大水平风速对应的高度; r_p 为下击暴流风场中最大水平风速的径向距离; α 为下击暴流经验模型的风场形函数变量, $\alpha=2$ 。

令 $r=r_p$, 代入式(6)化简可得最大径向水平风速位置下击暴流风剖面函数:

$$U_r(z) = \frac{u_{r, \max}}{e^{-0.15} - e^{-3.2175}} \times \left[\exp\left(-0.15 \frac{z}{z_{\max}}\right) - \exp\left(-3.2175 \frac{z}{z_{\max}}\right) \right] \quad (7)$$

对于移动型下击暴流, 文献[11]指出, 风场中任意一点风速 U_c 。由下击暴流射流中心的移动速度 U_t 和下击暴流本身产生的径向速度 U_r 的叠加构成, 相关风速分解如图 1 所示。

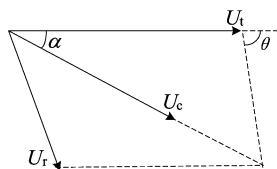


图 1 风暴风速分解图

采用文献[11]经验模型, 可获得当 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ, 0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 时, U_c, U_t, U_r 之间的关系为:

$$U_c = U_r^2 + U_t^2 + 2U_r U_t \cos \theta \quad (8)$$

最大水平风速当 $\theta=0^\circ$ 时, 获得移动型下击暴流风剖面函数:

$$U_c(z) = U_r(z) + U_t \quad (9)$$

其中, U_t 为水平移动速度。

2 工程概况和模型建立

某科技馆建筑效果图如图 2 所示。屋盖主体结构由 11 榀大跨度弧形桁架和人字形钢柱构成, 5 榀次桁架在中部交汇区截断, 形成屋盖交接区; 6 榀贯通的主桁架两两十字交叉, 形成上下 3 组桁架错层搭接; 桁架之间采用金属屋面进行覆盖, 形成折扇形屋盖, 外围四周均存在大尺度悬挑。

建筑剖面效果图如图 3 所示, 屋盖最大跨度为 200 m, 顶点高度为 26.50 m, 最低点位于屋盖交接处为 11.5 m。

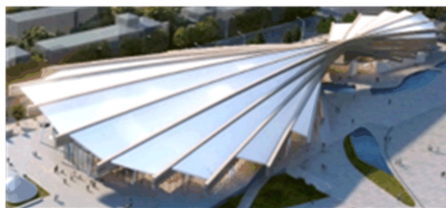


图 2 建筑效果图

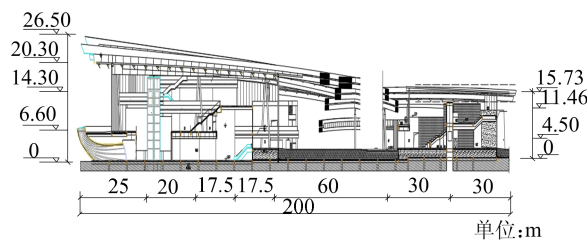


图 3 建筑剖面图

2.1 计算模型及边界

下击暴流喷射直径在 2 000~3 000 mm 之间, 屋盖最长 200 m, 屋盖在风场中比例在 0.06~0.10 之间。为简化模拟, 对最大水平风速暴流风剖面作出以下假设^[12]: ① 下击暴流冲击到地面后的最大径向风速在屋盖前 600 m 处完全发展且保持风速不变; ② 下击暴流非水平径向方向速度为 0。因此采用下击暴流最大径向水平风速风剖面作为入口, 文献[12]也采用相同方法。

考虑计算的精度和效率, 计算域尺寸 ($L_x \times L_y \times L_z$) 分别为 $12D \times 9D \times 5H$, 其中 $D=220$ m, $H=30$ m。风场入口边界选用 Velocity-inlet, 两侧面采用对称边界, 出口选用 outlet 边界, 建筑表面和地面采用无滑移壁面, 如图 4 所示。

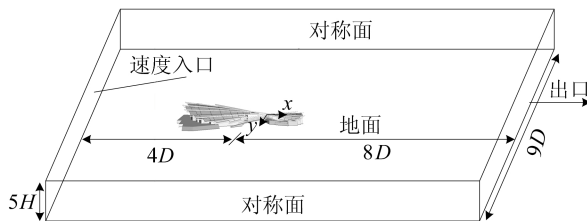


图 4 计算域及边界条件

由于建筑外形复杂, 选用马赛克和六面体混合网格对计算域进行划分, 经网格收敛性分析, 划分后其网格总数约为 260 万, 计算域网格示意图如图 5 所示。入口风速剖面分别选取静止型下击暴流及移动型下击暴流风剖面, 同时引入 B 类地貌常态风剖面进行风荷载对比, 结果如图 6 所示。

下击暴流湍流强度为 1%。静止型下击暴流和常态风 10 m 高处风速均为 27 m/s,移动下击暴流水平移动速度取 10 m/s。

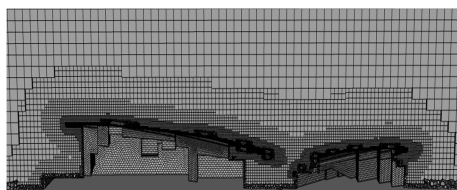


图 5 计算域网格示意图

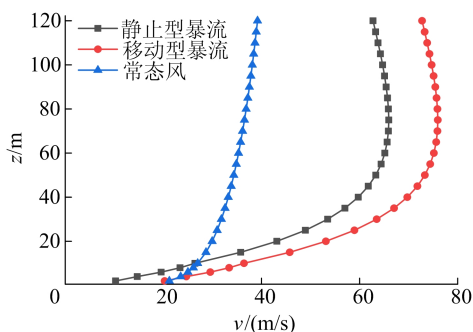


图 6 3 种风剖面图

2.2 网格无关性验证

为保证网格质量不会对计算结果造成影响,选取粗糙、适中、精细 3 类网格进行无关性验证,计算模型划分后网格数分别为 150×10^4 、 260×10^4 、 400×10^4 。分别提取屋盖正前方 5 m 处沿高度方向的 Y 向风速,以适中网格的风速作为参照,网格无关性验证结果如图 7 所示,粗糙网格与适中网格的风速最大偏离为 9%,而精细类网格与适中风速高度吻合。综合考虑计算精度和计算效率,选取适中类型网格模拟计算。

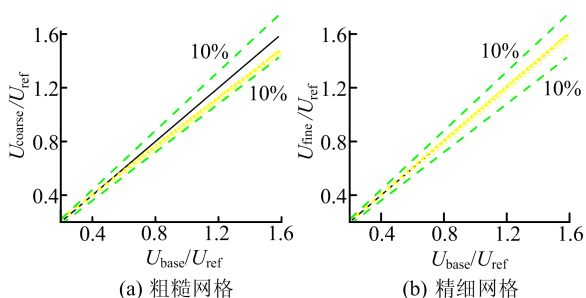


图 7 网格无关性验证

2.3 结果分析

屋面风压系数定义为:

$$C_p = \frac{\Delta P}{0.5\rho V^2} \quad (10)$$

其中: C_p 为屋面某点平均风压系数; ΔP 为建筑表面静压差; ρ 为空气质量密度; V 取离地 10 m 高度

处风速。

扇形屋盖是曲面型屋盖,其形态复杂,整体由大屋盖和小屋盖组成。屋盖在受风作用时,屋盖整体的气动荷载分布不均匀,为精细化分析屋盖的风压,对屋盖进行分区如图 8 所示。大、小屋盖分别定义为 A 区和 B 区,风向按 45° 间隔沿逆时针方向变化。



图 8 扇形屋盖表面分区及风向

2.3.1 3 类风对屋盖风压影响

限于文章篇幅,以风向角 $\theta=0^\circ$ 为典型风向条件,模拟静止型下击暴流(简称静止暴流)、移动型下击暴流(简称移动暴流)2 类暴流风和常态风场作用,分析各类风场下屋盖表面风压分布特性以及之间的差异。屋盖表面风压分布情况如图 9 所示。

由屋盖上表面风压可知,气流在撞击 A 区迎风面后,在屋盖上方产生再附着和回流现象,不同风场条件下迎风端位置均出现明显负压,悬挑区域 A19~A21 最为显著。在靠近来流端的悬挑区域, A20 区常态风场下负压系数为 -1.10,而在静止暴流下负压系数达到 -1.12,在移动暴流作用下负压系数进一步增大,达到了 -1.97,增大了 76%。常态风作用于 A20 区的风压系数与静止暴流接近,系数均为 -1.10 左右,移动暴流对屋盖悬挑区的作用更为显著。

对于远端 B 区屋盖,上表面主要呈现正压,这是由于 A 区与 B 区建筑高差所致。气流在经过 A 区屋盖后,气流方向发生改变,以斜向下的角度冲击 B 区屋盖,其中以移动暴流风场最为显著, B1、B2 区平均风压系数达到了 0.40 以上。

对于屋盖下表面风压,悬挑区域 A19~A21 下表面存在明显正压,出现“下顶上吸”的现象,此位置处结构受力较大,容易造成破坏,常态风作用下 A21 区风压系数为 1.01,静止暴流比常态风作用压力增大了约 10%,而移动暴流作用下该区域风压系数达到了 1.83,相比于常态风场增大了 80%。除迎风端, A 区其余区域均呈现负压,移动暴流作用下负压也明显增大。

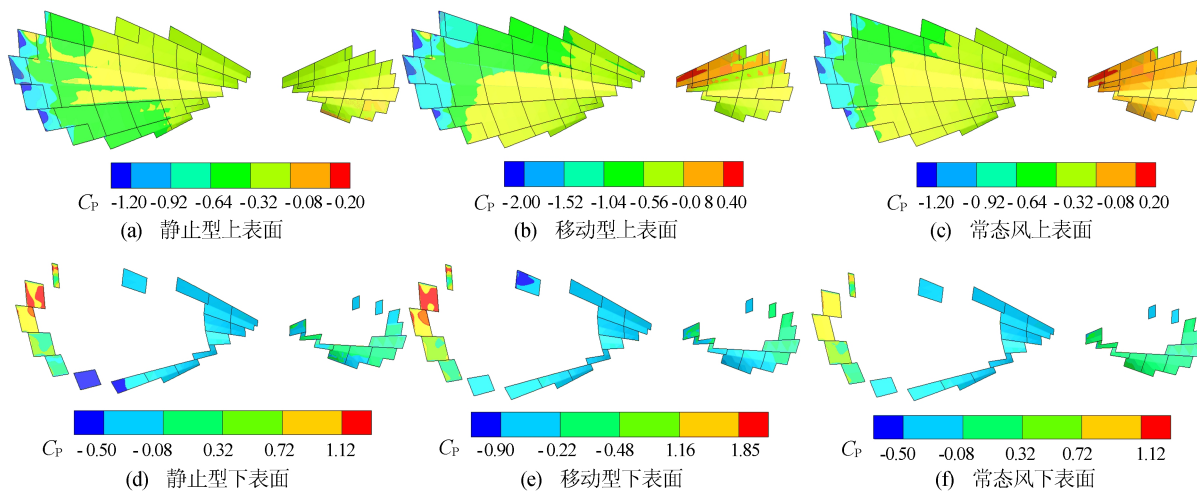


图 9 0°方向下 3 类风剖面屋盖、下表面风压值

屋盖 A1~A10 分区平均风压系数变化情况如图 10 所示。

从图 10 可以看出:静止暴流和移动暴流作用下该区域平均风压系数变化规律相似,但移动暴流作用时 A4~A10 区风压系数出现明显增大,2 种情况下整体波动变化较大;常态风作用下表现出的吸力最小,且波动程度较小,平均风压系数维持在一 0.22 左右;静止暴流作用吸力远大于常态风,在 A10 区达到 -0.54,常态风作用仅为 -0.31,增大 74%。

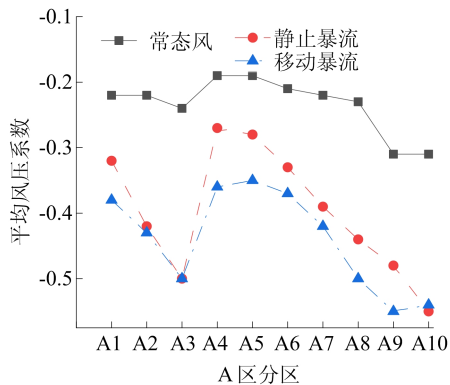


图 10 A 区部分分区平均风压系数

屋盖 B 区部分分区平均风压系数如图 11 所示。静止暴流和移动暴流出现不同的变化趋势,移动暴流在 B 区出现压力转变为吸力,而静止暴流作用并没出现压力。

从图 11 可以看出:在 B1~B3 区,移动暴流和常态风作用下对屋面产生的是压力,在 B1 区均达最大值,其值分别为 0.40、0.20;而静止型暴流 B1~B3 区域表现为吸力,在 B1 区达到最大吸力,其值为 -0.22。

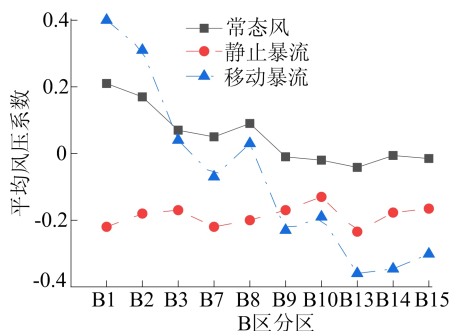


图 11 B 区部分分区平均风压系数

在 X=-12 m 时,屋面中轴偏下处竖直剖面风速流线如图 12 所示。

由图 12a 可知,静止暴流在气流穿过 A 区时,到达 A 区末端和 B 区交界处,此处屋面处于最低,风速偏小,气流撞击到 A31、A32、B1~B3 区,气流在此区域分离、回流,形成大量漩涡,气流运动形式紊乱。

由图 12b、图 12c 可知,对于移动暴流和常态风作用下的风场,当气流到达 A 区和 B 区交接处时,气流在此分离,少部分气流撞击到 B 区前端檐口,在 B 区前端檐口正下方 A 区末端檐口下方形成较小的漩涡,因此 B1~B3 受到压力。移动暴流与常态风类似,两者作用下均在 A 区和 B 区交接处下方形成较大的漩涡,导致区域出现较大吸力。

在 B9~B15 区域,常态风作用下屋面风压接近 0,气流到达交接处时大部分能量被耗散,此区域气流流速很小。静止暴流作用下 B 区屋面以吸力为主,移动暴流作用则表现为部分区域出现正压,部分区域受负压控制,而常态风作用下则表

现为正压。

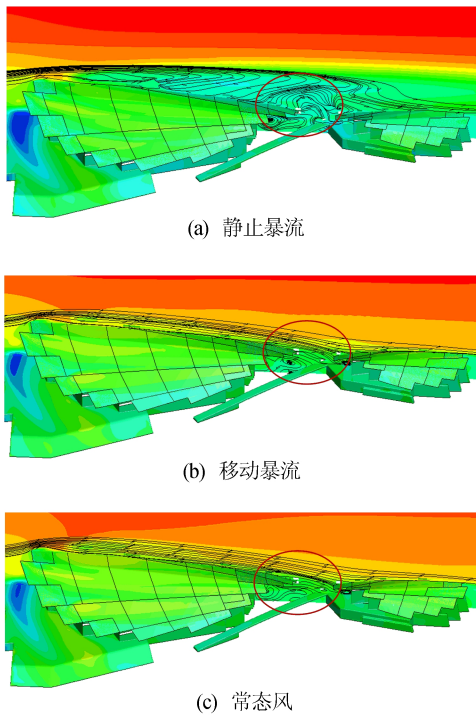


图 12 3 类风场下屋面垂直剖面风速流线图

2.3.2 风向及风剖面对屋面风压影响

为分析 3 类风作用下风向变化对屋面风压的影响特性,风向按 45°沿逆时针方向递增改变,限于篇幅,本文只给出静止暴流作用时各风向向下作用下屋面上表面风压分布,如图 13 所示。由

图 13 可知:风向角由 0°增大到 45°时,A 区屋面风压略微减小,B 区屋面风压基本不变;当进一步增大到 90°、135°时,屋面风压出现较大变化,风向角为 90°时,屋面整体风压减小,此时风场入口垂直于屋盖中轴,部分气流从 A 区和 B 区的交接区穿过,气流加速,首次在 A31 区出现压力;当风向角为 135°时,屋面吸力骤增,80% 区域的风压系数达到 -1.00,并在 B6 区域出现最大风压系数 -1.40;当风向角为 225°时,屋盖总体负压达到最大,多数区域的风压系数超过 -1.20,A22 和 A23 区甚至超过 -1.70,A22 区出现最大系数为 -1.87;当风向角增大为 270°时,A1~A11 和 B14~B16 区出现正压,在 A1 区正压系数达到最大 0.70,该区域处于屋盖高处,大部分气流撞击高点产生压力,屋盖 A22~A31 产生吸力,且越靠近屋檐处吸力越大;风向角为 315°时仅有 A 区存在正压区,且正压和负压均减小。

对屋盖边角区(A10、A20、B10、B15)、中部区(A16、B12)和交接区(A22、B15)分别进行分析,部分分区风压系数随风向角的变化分别如图 14、图 15 所示。

由图 14 可知,随风向变化,屋面风压变化趋势类似,静止暴流和常态风下风压系数接近,而移动暴流下风压系数有明显骤增现象。屋盖的边角区随风向角变化风压系数变化剧烈,且在 225°和 270°时屋面风压系数均出现显著的转折点。

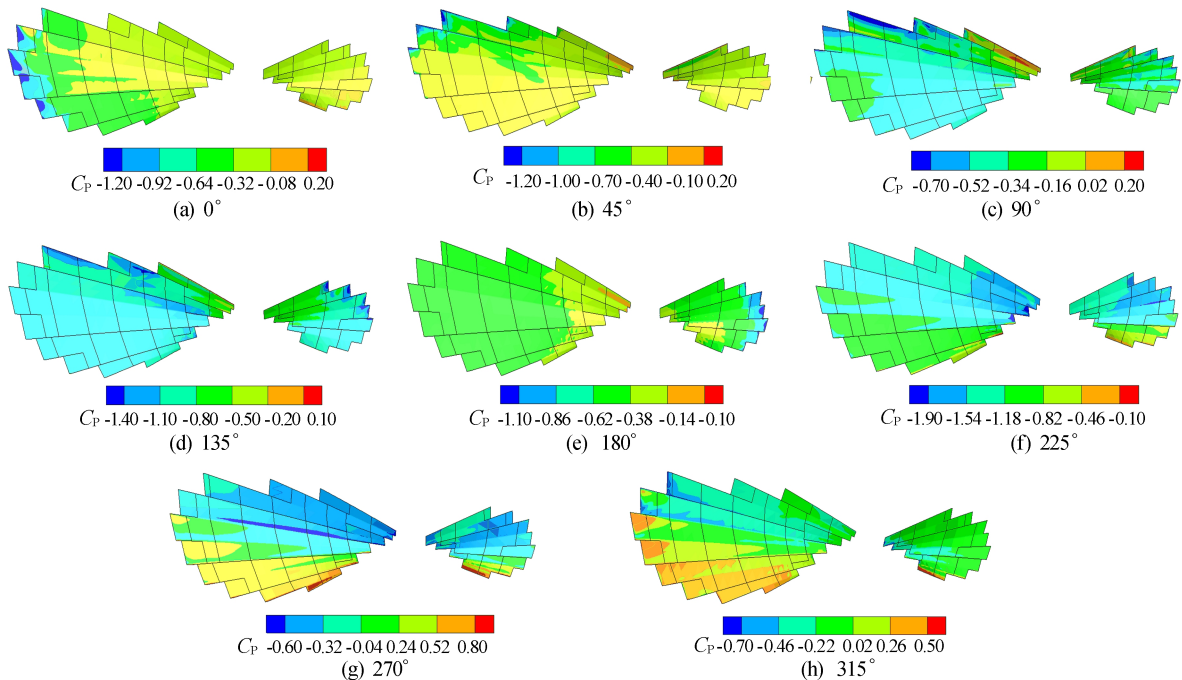


图 13 不同风向下屋盖上表面风压系数

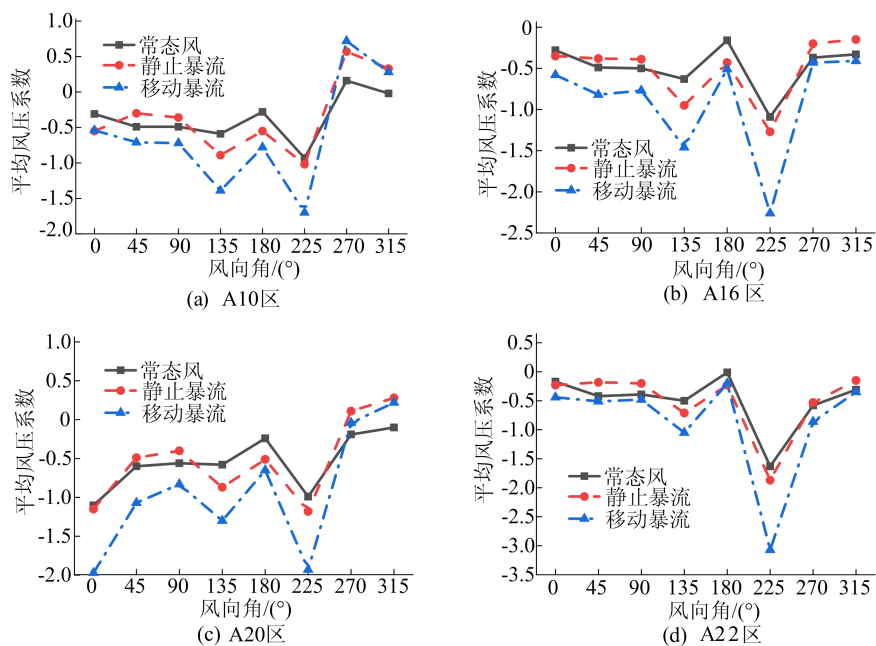


图 14 不同风向下 A 区平均风压系数

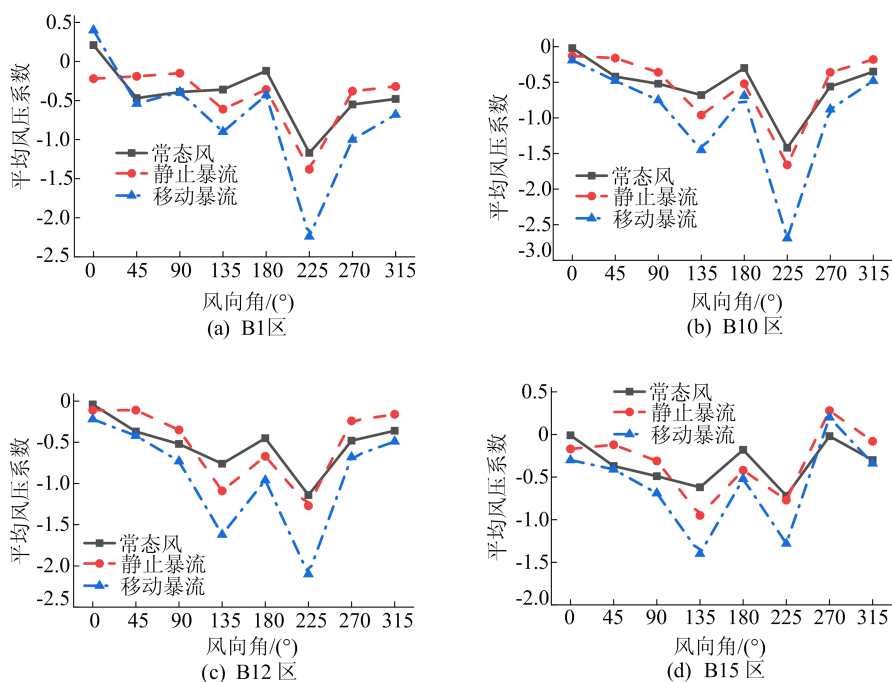


图 15 不同风向下 B 区平均风压系数

从图 14 可以看出:在角区 A10 中,风向角在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 逐次增大时,屋面风压系数波动平稳,移动暴风凸显吸力最大,常态风居中,静止暴风最小,风向角为 225° 时,风压系数均出现明显的增大,风向角为 270° 时,该区受力从吸力转变为压力;角区 A20 与 A10 变化趋势类似,但不同的是 A20 区风压系数波动变大。中部 A16 区在 135° 和 225° 时均出现转折点,风向角为 225° 时移动暴风下其风压系数比 180° 时扩大约 4 倍,表明风向

变化对 A16 区风压影响显著。风向角为 270° 时并没有出现从吸力到压力变化,由于 A16 处于中部区域处于高处,屋面比较平滑,依然受吸力作用。交接区 A22 在任意风向下表现都受吸力,且在风向角为 225° 时,出现最大平均风压系数,静止暴风作用下风压系数达到 -1.78 ,移动暴风高达 -3.00 ,常态风下风压系数为 -1.63 。

从图 15 可以看出:其整体变化趋势与 A 区相同,屋面风压系数随风向增大呈现先增大后减

小的趋势,中部区波动小于边角区;交接区 B1 与 A22 区略有不同,B1 区随风向增大,风压系数先由正压转为负压,且 B1 区压力远大于 A22 区。角区 B10 和 B15 区出现不同的变化,B10 区在任意方向角下均受吸力,而 B15 区在 270°时受压力,B15 区整体风向下风压系数波动小于 B10 区,且 B10 区在 225°风向角时风压系数达到最大,静止暴流和常态风作用下为-1.50 左右,而移动型下击暴流为-2.63,增大 76%。中部区 B12 表现和 A16 区类似,任意风向下均受吸力作用。

3 结 论

本文以某科技馆大跨度扇形屋盖为研究对象,考虑静止型和移动型下击暴流作用情况,模拟分析不同风向角下屋盖表面风压分布,并比较 2 类暴流场间及暴流场与常态风场之间风效应的差异特性,得到如下结论:

1) 静止暴流和移动暴流作用下扇形屋面风压分布趋势不同,移动暴流下多数区域风压显著增大,最大可达 1 倍;扇形屋面因存在明显高低落差,引起静止暴流下屋面气流流动轨迹改变,导致静止暴流与移动暴流下局部区域风压方向相反,移动暴流风速受高低落差影响小,与常态风下屋面气流运动轨迹类似,因此两者屋面风压分布大致相同。

2) 风向角对屋面风压分布影响显著,其中移动暴流作用时风向影响最大。相较于屋面中部区域,屋面的角区由于气流分离更容易产生较大负压;135°、225°风向角下,风压系数变化均出现明显转折。随风向角的改变,3 类风剖面下屋面区域平均风压系数变化趋势一致,均在风向 225°时扇形屋盖受最大吸力,且在移动暴流下屋盖交接区 A22 可达最大平均风压系数-3.00,故结构设计应考虑风向角对屋盖风载影响以及对于角区、交接区域构件抗风设计的加强。

3) 静止暴流和常态风下大跨度扇形屋盖风压接近,对于工程上大跨度屋盖(30 m 以下)考虑

静止暴流作用时可以参考良态风场的风压作用,而移动暴流下多数区域因风压骤增,在抗风研究时需重点关注。

[参 考 文 献]

- [1] 成文滔. 下击暴流作用下大跨度屋盖结构的风荷载分布特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [2] YAN B, MA C, YUAN Y, et al. Modeling of downburst outflows and wind pressures on a high-rise building under different terrain conditions[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 48: 103738.
- [3] HUANG D, CHEN G. Wind pressure distribution, non-gaussian characteristics, and conical vortices of a large-span roof with variable arc angles[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104929.
- [4] 谢壮宁,林韬略,成文滔. 下击暴流作用下大跨度平屋盖结构的风荷载分布特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 746-753.
- [5] 褚云朋,孙鑫晖,李明. 下击暴流作用下菱形马鞍面屋盖风压特性[J]. 工程力学, 2022, 39(3): 182-192.
- [6] CHEN Y, CUI B, YU S, et al. Experimental investigation of spherical roof subjected to thunderstorm downbursts[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8): 26-33.
- [7] 孙鑫晖. 移动型下击暴流作用下圆形马鞍面屋盖风压特性研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2021.
- [8] YAKHOT V, ORSZAG S A, THANGAM S. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1992, 4(7): 1510-1520.
- [9] 王猛. 不同风剖面对建筑物顶面风力机微观选址的影响研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2018.
- [10] VICROY D. Assessment of microburst models for down-draft estimation[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(6): 1043-1048.
- [11] HOLMES J, OLIVER S. An empirical model of a downburst[J]. Engineering Structures, 2000, 22(9): 1167-1172.
- [12] 李德顺,尉正斌,郭涛. 下击暴流对风力机尾流及转矩特性的影响研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 68-73.

(责任编辑 吴 亮)