

杨丹青,陈伏彬,李毅,等.基于数值模拟的大跨悬挑屋盖风荷载气动优化[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(2):18-27.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.003

YANG D Q, CHEN F B, LI Y, et al. Aerodynamic Optimization of Wind Load on Large-span Cantilever Roof Based on Numerical Simulation[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(2): 18-27. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.003

基于数值模拟的大跨悬挑屋盖风荷载气动优化

杨丹青¹, 陈伏彬^{1,2*}, 李毅³, 舒臻孺⁴

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3.湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 4.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:为降低大跨悬挑屋盖风效应,通过计算流体动力学(CFD)方法寻求表面风荷载气动优化措施.研究3种不同孔参数的“吹-吸”式气动优化装置,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,建立包括未优化在内的4个大跨悬挑屋盖数值模拟模型,获得不同工况下的风压分布情况.对气动装置进行改进,分析不同形状的优化装置对屋盖风荷载分布特征的影响,对比评估得到最优气动措施.结果表明:对于悬挑屋盖,平均风压系数的最大值出现在来流前缘处;通过设置最佳气动参数,可以有效降低迎风前缘的风压系数,减缓气流对大跨屋盖的猛烈冲击;结构的优化性能在很大程度上与不同通气管的几何形状有关,具有八边形优化装置的屋盖前缘的抗风性能远优于其他形状截面,气流分离点的抬高使表面的平均风压系数降低20.9%.

关键词:大跨度悬挑屋盖;风效应;风压系数;气动优化;数值模拟

中图分类号:TU312.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2025)02-0018-10

Aerodynamic Optimization of Wind Load on Large-span Cantilever Roof Based on Numerical Simulation

YANG Danqing¹, CHEN Fubin^{1,2}, LI Yi³, SHU Zhenru⁴

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control, Ministry of Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
3. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
4. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Investigations of measures of aerodynamic optimization wind on large-span cantilever roof are conducted to reduce the wind load effect on the roof based on computational fluid dynamics (CFD) method. Three types of “blow-suction” pneumatic optimization devices with different hole parameters are invented, and four numerical simulation models of large-span cantilevered roof including unoptimized ones are established by using the standard $k-\varepsilon$ turbulence model, and the wind pressure distribution under different working conditions are obtained. Then the wind pressure characteristics with different shapes of optimal aerodynamic measures are analyzed by further designing the optimization device and the best optimization measure was proposed. The results show that the maximum value of the average wind pressure coefficient are occurred at the leading edge for the cantilevered roof. The wind pressure coefficient at the windward front edge can be reduced and the fierce impact

收稿日期:2023-02-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278479);长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金资助项目(13KB01)

*通信作者, E-mail: fbchen88@126.com

of airflow on the roof is slowed down by setting aerodynamic parameters. Optimized performance is largely related to the geometric shape, and the aerodynamic performance of the roof with octagonal vent device is much superior than that of other models, which reduces the average wind pressure coefficient by 20.9% due to the elevation of the separation point.

Keywords: large-span cantilevered roof; wind effect; wind pressure coefficient; aerodynamic optimization; numerical simulation

大跨结构具有高柔、低频率和小阻尼比的特性,对风荷载非常敏感^[1].湍流流动模式对作用于大跨度悬挑屋盖的风荷载有很大影响,会在屋盖前缘形成不同尺度的涡流,从而改变钝体上的风荷载分布^[2].因此,有必要开展通过改变空气动力学性能来改善大跨结构性能的研究.

国内外很多学者针对湍流对屋盖表面风压的影响进行了研究.LI 等^[3]研究湍流对具有矩形前缘的平板表面压力的影响,证明随着湍流强度的增加,湍流尺度对平均压力分布的影响更加明显;KAWAI 等^[4]研究大型悬臂式屋顶的空气动力学特性和各种参数对风致振动的影响,并得出非稳定风力的负阻尼效应是由于降低的固有频率与屋顶前缘的涡流脱落频率同步的结论;李秋胜等^[5]通过现场实测,研究强台风下低矮屋盖表面风压的变化规律,结果表明交替变化的气流会导致屋盖的屋檐及拐角处形成强吸力.

平屋面低矮建筑易受到高吸力的作用,有效地使用空气动力学缓解技术可以显著改善建筑在风荷载下的响应^[6].BLESSING 等^[7]应用 WoW 测试设备评估空气动力学边缘装置在减少风效应方面的有效性;LI 等^[8]提出一种新的气动控制方法,以减轻有限长方柱的气动力和涡激振动,结果表明:自由端开槽能有效控制悬臂方柱的涡激振动,并抑制结构的整体波动升力.很多学者推荐多种修改屋顶区域的方法以减少风荷载,如建筑拐角空气动力学优化^[9]和变形立面优化^[10]方法.ALY 等^[11]提出几种空气动力学缓解技术,包括障碍物、圆形边缘、倾斜边缘和翼型边缘;LI 等^[12]重点研究带有扰流器的屋顶区域的风压缓解效果,发现山墙处的扰流器对风压的缓解作用最大;甘石等^[13]提出在屋面加设扰流板的气动方法来提高低矮房屋的抗风性能.

数值模拟能够模拟真实风环境,具有模拟工况多变的特点,因此,越来越受到研究者的重视和认可.PERÉ^[14]提出采用计算流体动力学(CFD)模拟分析一般隔离建筑中的自然通风流,并验证 SST $k-\omega$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型与试验数据的一致性;何星星等^[15]采用 CFD 数值模拟方法研究阶梯形大跨屋盖结构的风荷载特性,对比风洞试验的结果表明:数值模拟技术在屋盖风压变化的规律上表现出较好的一致性.

本文以大跨悬挑屋盖为研究对象,檐口处设计 3 种“吹-吸”式通气管,利用计算流体动力学软件对不同通气管装置进行数值模拟,分析不同通气管优化装置对悬挑屋盖的影响,为此类结构的抗风设计提供参考.

1 数值模拟方法

1.1 结构参数

本文以大跨悬挑屋盖为研究对象,结构模型的几何尺寸为长 72 m,悬挑跨度为 32 m,模型比例为 1 : 100.模型示意图如图 1 所示.

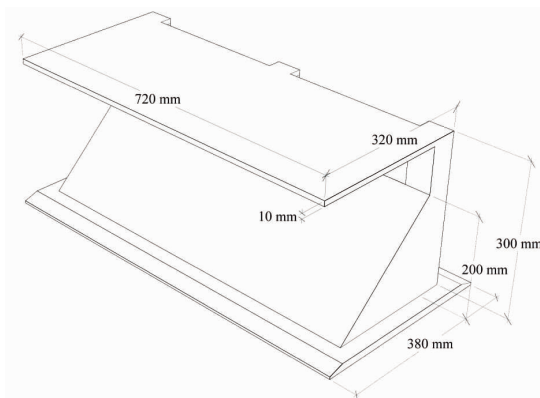


图 1 模型示意图

1.2 湍流模型

湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,当流动是不可压缩的且不考虑用户定义的源项时,湍流动能(k)和湍流耗散率(ε)的演化方程如式(1)和式(2)所示.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1s}}{k} G_k - C_{2s} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; k 为湍流动能; t 为时间; u_i 为流体在 i 方向的速度分量; x_i, x_j 为空间坐标; μ_t 为湍流黏度; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为湍流特朗普数, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能的产生项; ε 为湍流耗散率; μ 为动力黏度; C_{1s}, C_{2s} 为模型常数, $C_{1s} = 1.44, C_{2s} = 1.92$.

在结构风工程的应用中,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟的风压分布规律与真实环境接近,但标准 $k-\varepsilon$ 模型在模拟钝体周围流场方面存在一些问题,将直接导致钝体前缘产生局部流动能量.因此,使用与标准 $k-\varepsilon$ 模式相耦合的用户定义函数(UDF)重新定义光滑的固有边界条件,使其更适合于模拟大跨悬挑结构.

1.3 计算域和边界条件

为了充分发展尾流区域后的气流,出口边界与模型背风侧的距离应大于 $15H$ (H 为目标建筑高度)^[16].计算域的大小为 $3 \text{ m}(y) \times 15 \text{ m}(x) \times 2.5 \text{ m}(z)$,相应的最大阻塞率仅为 1.3% ,小于计算域要求的 3% .B 类地貌下粗糙度系数 $\alpha = 0.15$,来流的风速剖面、湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的计算公式为

$$V(z) = V_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha; \quad (3)$$

$$I(z) = 0.1 \left(\frac{z}{H} \right)^{-\alpha-0.05}; \quad (4)$$

$$k = \frac{3}{2} (u I_z)^2; \quad (5)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L_x}. \quad (6)$$

式中: $V(z)$ 为高度 z 处的平均风速; V_0 为参考高度 z_0 处的平均风速, $V_0 = 10 \text{ m/s}$; z 为垂直方向的空间坐标; z_0 为参考高度, $z_0 = 10 \text{ m}$; $I(z)$ 为高度 z 处的湍流强度; I_z 为湍流强度; u 为脉动速度的标准差; $C_\mu^{\frac{3}{4}}$ 为湍流模型常数; L_x 为 x 方向的湍流积分尺度; L 为湍流特征长度,即 $L = 100 \left(\frac{z}{30} \right)^{0.5}$.

采用对应的日本规范 II 类地貌条件,即

$$I_z = \begin{cases} 0.23, z \leq z_b; \\ 0.1(z/z_G)^{-\alpha-0.05}, z_b < z \leq z_G. \end{cases}$$

式中: z_G 为梯度风高度; z_b 为地面粗糙度影响的分界高度, $z_b = 5 \text{ m}$.

入口边界条件设置为速度入口,应用湍流强度分布和平均风速分布的气流.计算域的侧面、顶部和底部采用对称边界条件,用于模拟黏性流中的零剪切滑移壁.模型表面采用无滑移壁边界条件,并在流场出口使用压力流出边界条件.

1.4 网格划分和参数设置

为了确保精度并减少处理时间,生成用于结果分析的高质量网格至关重要.非结构化网格划分如图 2 所示.悬挑结构的网格划分采用结构化网格,网格总数约为 310 万.然而,具有通气孔的气动优化装置的结构非常复杂,以至于难以用结构化网格填充区域,因而计算域采用几何适应性强的非结构化网格.为了获得高质量的计算结果,在结构附近生成大量四面体网格,特别是在通气孔附近(图 2).在大跨度屋盖表面区域,边界层网格比率保持在 1.2 左右,在计算域中大约离散 330 万个节点.

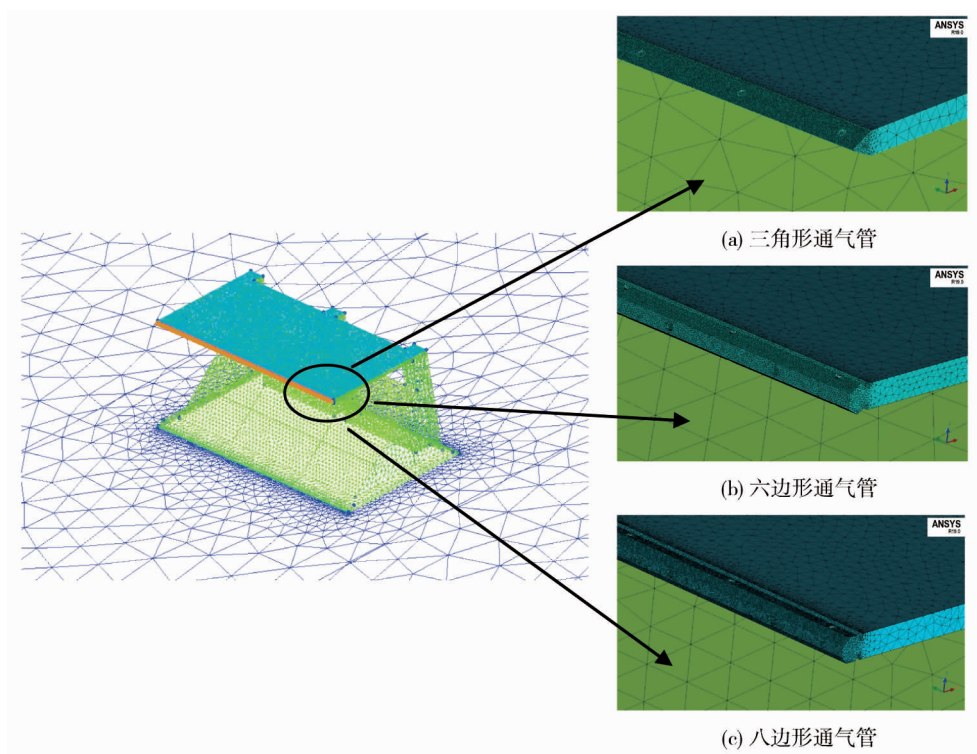


图2 非结构化网格划分

在数值模拟中,压力耦合方程组的半隐式算法(SIMPLE)用于耦合压力和速度,纳维-斯托克斯(N-S)方程的动量项和能量项采用二阶迎风算法,而压力项则采用二阶插值.将变量与连续性方程残差小于 10^{-6} 作为收敛标准.

2 风荷载特性分析

2.1 风压特性

为研究“吹-吸”式气动优化装置改善大跨悬挑屋盖风压分布的影响机理,选取未加设优化装置的悬挑结构作为参考进行数值模拟研究,分析屋盖表面的风荷载特性变化规律.图3和图4分别为 90° 风向角下大跨屋盖上、下表面的平均风压系数及脉动风压系数.

由图3可知:屋盖上表面前缘区域对称分布着一对柱状涡,并且前缘两端转角处的平均风压系数(C_p)的衰减较为迅速,中轴线上的逆压梯度较为缓慢,这是由于气流在迎风前缘分离,风与结构相互作用引起荷载,并使悬挑屋盖前缘部分的平均风压系数(C_p)为-2.35.屋盖下表面同样为对称分布,后缘尾流区域可以看到由于方柱引起的正压区域,两端区域有偏大的负压区域出现,最大正压为0.55,最大负压为-0.35.可见,此悬挑屋盖对风荷载十分敏感,迎风前缘在柱状涡的影响下形成了较大的负压区.

脉动风压系数可以反映气流分离、再附着和旋涡脱落的特征.由图4可知:屋顶前缘的脉动风压系数较大,表明迎风区域的风压脉动严重.风压脉动是由特征湍流产生的,这正好符合湍流的特征理论.

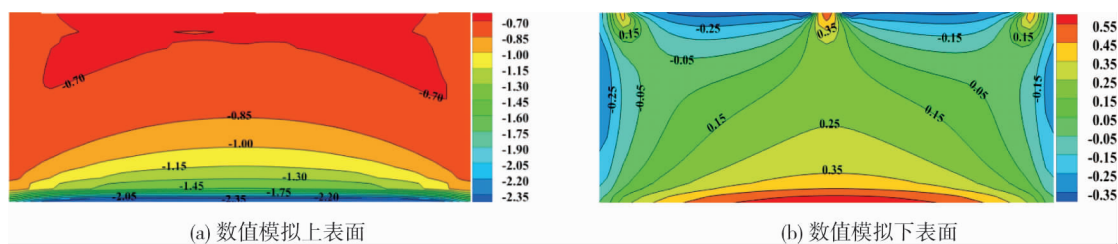


图3 屋盖表面平均风压系数

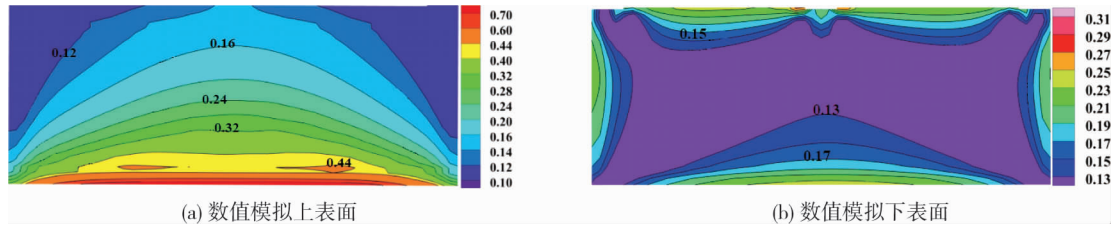


图4 屋盖表面脉动风压系数

2.2 最优孔参数

4种通气管工况如图5所示.针对悬挑屋盖表面的抗风性能问题,对该屋盖建立不同孔参数的气动优化措施模型,3种通气管的开孔参数如表1所示.通过数值模拟得到加设优化装置后屋盖表面的平均风压系数,探讨加设“吹-吸”式优化装置的作用.基于上述分析,在 90° 风向角下,迎风前缘直接承受来流的冲击,屋盖上表面受到风吸力,檐口处的风吸力达到最大值,这是由于发生气流分离引起的涡流模式,上表面较大的负压与下表面因看台的兜风效应,在迎风前缘上形成了叠加的向上力.

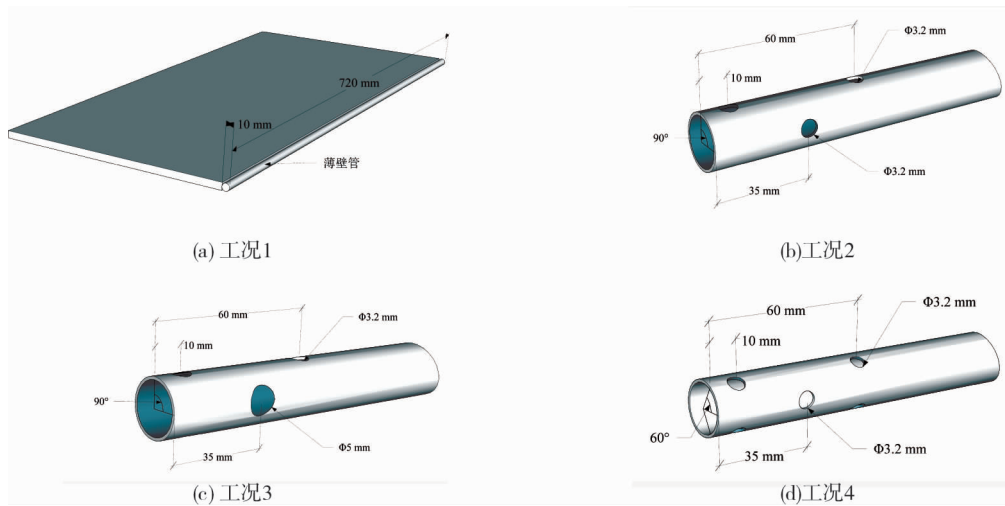


图5 4种通气管工况

表1 3种通气管开孔参数

工况	位置	直径/mm	间距/mm	通气孔总计
2	顶部、底部、前端	3.2	50	44
3	顶部、底部、前端	3.2;前端:5	50	
4	顶、底部与前端夹角呈 60°	3.2	50	

图6为 90° 风向角下,悬挑屋盖上、下表面的平均风压系数云图.对比图6和图3可知:有气动优化措施的悬挑屋盖,屋盖前缘来流产生的柱状涡要弱于未加设气动优化装置的悬挑屋盖,整个屋盖的上表面中部沿纵向的反向压力梯度的变化较慢,并且屋顶底面的檐口前缘处的压力减小, C_p 从最大值0.55减小到开孔后的0.25.

设置不同开孔参数的通气管装置可以改善屋盖的风压分布,对比不同工况下的屋盖平均风压系数云图可知:工况1和工况4屋盖上、下表面 C_p 的差异较小,工况4在屋盖后缘的风压略低于工况1,可见通气孔夹角设计对提升屋盖抗风的影响不明显;工况2与工况3优化装置的区别在于通气孔的直径不同,工况2上表面的 C_p 呈现对称分布的现象,并且整个区域的 C_p 相较于工况1得到了有效减少;工况3下表面的 C_p 略高于工况2的下表面,由于合力的产生是由上表面吸力和下表面压力引起的,表明工况2的气动措施可以在一定程度上减弱屋盖表面的风荷载效应.由此可见,未开孔的通气管装置的风压大于开孔的气动优化装置,通气孔能有效减少屋盖上的气流扰动,表明对通气管开孔有利于降低风压.

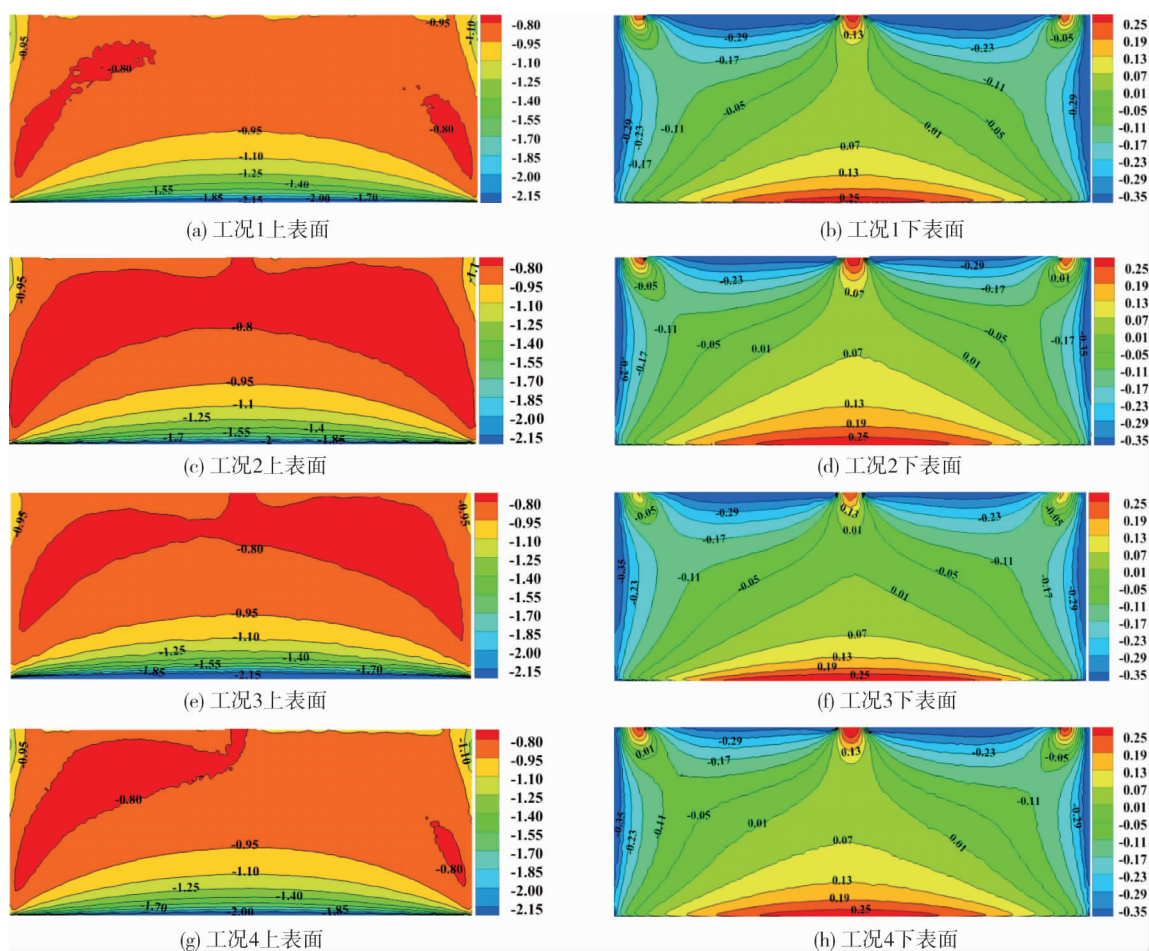


图6 4种工况下的平均风压系数

为进一步获得适合于悬挑屋盖的开孔参数,对4种不同工况下屋盖前缘A测点层的风荷载特性进行对比分析.如前所述,在迎风前缘加设开孔通气管时,屋盖表面风压变化的优化效果较显著.不同孔参数工况下,上表面A测点层平均风压系数如图7所示.由图7可知:数值模拟中的 C_p 曲线大致为U形,并且曲线基于 U_8 区域呈对称分布;开孔后 $U_7 \sim U_{10}$ 区域的平均风压系数相较于开孔前有明显改善.与工况4相比,工况3的 C_p 在 U_2 处与其最大差值为0.228,大致下降18.9%.工况3对比其他工况在A测点层两端区域的提升效果不明显,且在 $U_3 \sim U_{13}$ 区域的风压波动较弱.工况4的数值模拟曲线平滑,中间区域的优化效果不及工况2.工况2的 C_p 分布趋于均匀,这对改善迎风前缘的受力十分有利.可见,工况2的孔参数在A测点层的优化效果最佳.

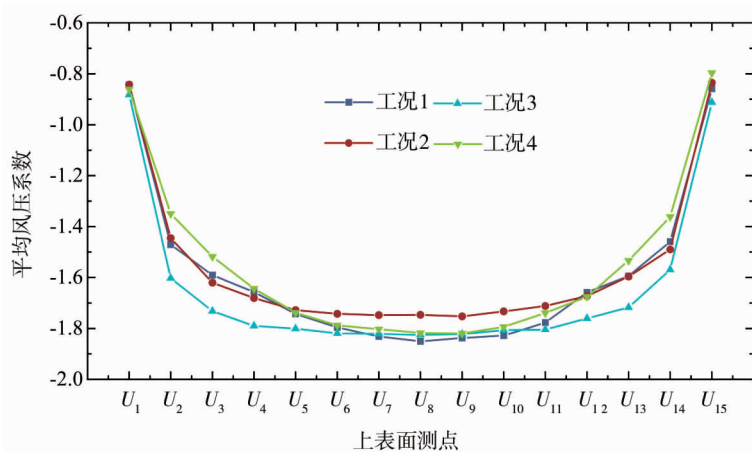


图7 A测点层的平均风压系数

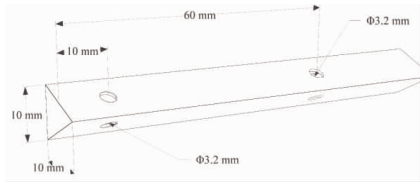
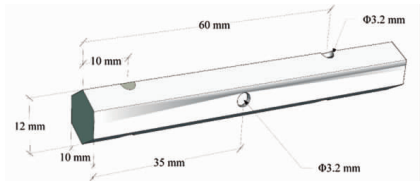
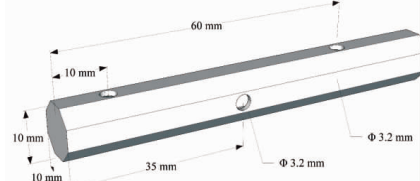
3 不同形状通气管的风效应分析

3.1 模型参数

为了研究通气管形状对悬挑屋盖气动性能的影响,提出 3 种不同形状的通气管优化装置,分别为三角形、六边形和八边形通气管.基于上文分析,在 4 种工况中,工况 2 的开孔参数是模型的最佳选择.因此,采用工况 2 的开孔参数来研究薄壁管形状对优化效果的影响.

表 2 为 3 种形状的气动优化模型.在悬挑屋盖檐口处设计不同形状的优化装置是为了改变气流的绕流形式,通过对比 3 种不同形状的通气管开孔前后的平均风压系数的变化情况,并将 A, B 测点层的气动优化进行比较,分析不同形状通气管周围的风效应特性,以评估迎风前缘的湍流改善效果.

表 2 3 种形状的气动优化模型

模型	形状样式	相关特点
1		前缘放置等腰三角形通气管,通气孔直径为 3.2 mm
2		六边形通气管的顶、底部和前侧通风孔直径为 3.2 mm
3		前缘安装八边形通气管,通气孔相隔 50 mm

3.2 不同形状通气管对屋盖风效应的影响

由 2.2 节的分析可知屋盖上表面的 C_p 变化相较于下表面较显著,因此,本节侧重于介绍大跨屋盖上表面的风荷载特性.不同优化措施下屋盖上表面的平均风压系数如图 8 所示.由图 8 可知:在不同气动优化装置下,模型上表面的 C_p 优化效果的差别较大.图 8(a)和图 8(b)为三角形通气管在有无通气孔条件下屋盖上表面 C_p 的数值模拟结果.由图 8(a)和图 8(b)可知:设置通气孔后, C_p 没有明显改善,迎风前缘的最大 C_p 从约-2.30 增加到约-2.15.相比之下,该装置的优化效果不如在迎风前缘安装圆形通气管,产生此现象的原因主要是由于三角形装置对气流的分离作用不大.

安装六边形通气管装置后, C_p 的整体效果要略优于圆管装置(图 8(c)和图 8(d)).采用开孔的六边形通气管模型后,迎风前缘顶部的通气孔位置开始出现半圆形风压区域,说明出气孔处的风压较大,附近区域风压的改善效果较明显.图 8(e)和 8(f)为使用八边形通气管优化屋盖风压的结果,与其他风压图相比,八边形通气管具有最佳的空气动力学缓解效果,屋盖前缘的风压差系数大大降低.对八边形通气管开孔后,整个屋盖风压系数的梯度随之下降,很大程度减少了悬挑部分受到的风吸力;屋盖前缘的圆形等值线比六边形通气管更明显,表明通气孔改变了气流流动,有效降低了两端的风压大小.由图 8 可知:悬挑前缘的 C_p 从-2.30 下降到加设八边形通气管的-1.65 左右.综上,通过安装八边形通气管来优化悬挑结构的气动性能十分有效.

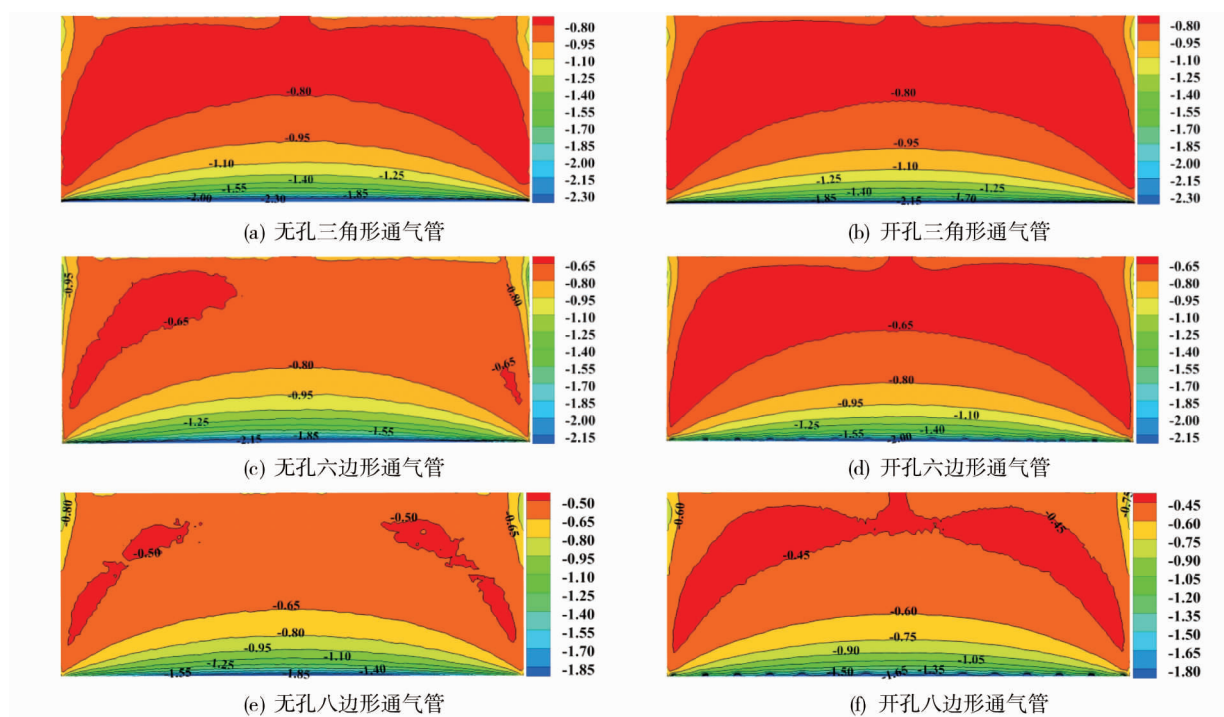


图8 不同优化措施下屋盖上表面平均风压系数

3.3 气动性能优化对比

图9为沿屋盖长边A, B测点层位置的平均风压系数.由图9(a)可知:A测点层曲线的总体变化一致.使用八边形通气管优化装置的风效应明显大于其他优化装置.对比可发现,三角形通气管和圆形通气管优化装置的性能相对接近,但圆形通气管 $U_5 \sim U_{11}$ 的中心区域比三角形通气管的平均风压系数值更稳定.

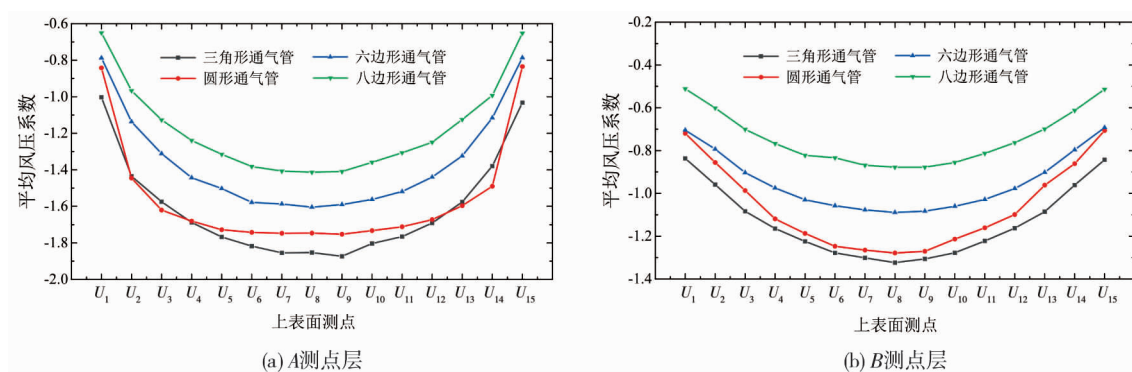


图9 不同测点层的平均风压系数

图10为A, B测点层在通气管有无气孔条件下的平均风压系数变化率.由图10(a)可知:在3种工况下,开孔八边形通气管在两端改善A测点层的风压更为明显,最大下降了16%,而中间区域则大致降低7%.由图10(b)可知:三角形通气管在B测点层中平均风压系数减小的幅度较小.相较于八边形通气管,六边形通气管的平均风压系数下降幅度的变化不大,在11%上下波动.然而,在八边形通气管上开孔可以使平均风压系数的变化率下降20.9%,并且幅度波动较大,呈现出抛物线形.说明优化装置从三角形到八边形,空气动力学缓解措施降低风压的效果非常明显.

3.4 结构周围风速矢量对比分析

减轻大跨结构的风激励有多种策略,不同形状的通气管优化装置提供了不同的空气动力学特性.基于上述的对比与分析,增加通气管的措施可以有效减少上表面的高压.因此,研究3种不同形状的开孔通气管对来流风的影响,以评估优化装置对建筑物顶部的流动分离.

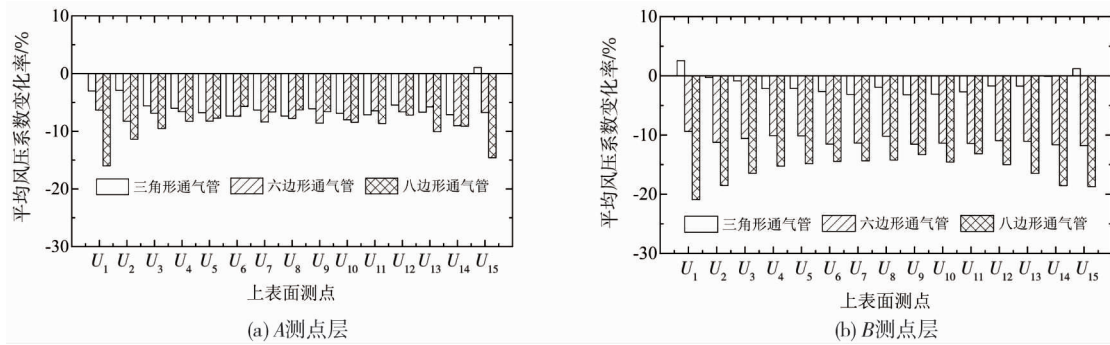
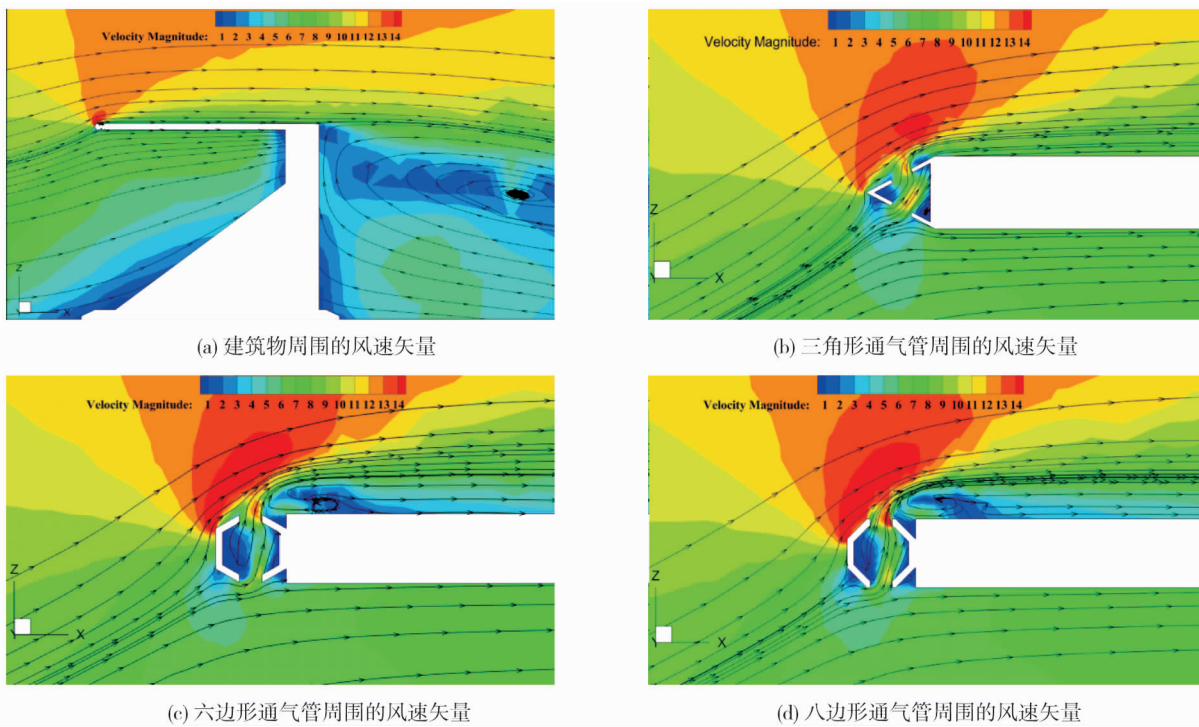


图 10 上表面平均风压系数变化率

加设不同形状的气动装置后, $y=1.5\text{ m}$ 平面上的风速矢量图如图 11 所示. 图 11(a) 为悬挑结构周围的流场分布, 通过数值模拟捕捉到迎风前檐的气流较不规则, 而屋盖尾流近地面附近形成次级环流. 相比之下, 在三角形通风管附近(图 11(b))的风速接近 0 的区域较少, 而六边形和八边形通风管(图 11(c) 和图 11(d))在前檐上表面的大部分为低风速区. 结果表明, 来流通过六边形和八边形通风管的开孔处扰动了前缘气流, 屋盖顶部区域的流动分离逐渐抬升, 使通气孔后方的风速降低. 可见, 由于八边形通风管斜边的倾斜度更大, 可以将剧烈的气流分离抬升到较高处, 因此, 分离点没有出现在屋盖上表面的最前端, 分离点的抬高对屋盖有利, 负压减小对屋盖周围的流场分布有较大影响.

图 11 $y=1.5\text{ m}$ 平面上的风速矢量

4 结论

1) 采用 CFD 中的 UDF 计算未加设优化装置的悬挑屋盖在风荷载作用下的平均风压系数和脉动风压系数, 分析屋盖表面的风压分布规律, 在迎风前缘区域出现风压最大值.

2) 采用气动措施的优化设计可以合理地提高大跨悬挑屋盖的气动性能. 通过对 4 种不同通气孔设计的对比分析, 发现在屋盖前缘加设直径为 3.2 mm 的通气管, 可以在迎风侧和顶侧有效减小屋盖前缘区域的风吸力.

3) 优化性能在很大程度上与通气管的几何形状有关. 在各条件相同的情况下, 与其他形状的通气管模

型相比,八边形通气管装置的空气动力学优化性能更为显著.八边形通气管优化装置能将气流分离提升到更高的位置并降低风压.

4)气动优化装置主要通过改变气孔与形状参数来研究其对结构的影响,多种气动措施组合的优化效果有待与风洞试验或现场实测进行进一步探究.

参考文献:

- [1] CHEN F B, ZHAN Z Y, ZHOU J F, et al. A fast partition method for wind pressure coefficient of large-span roof based on modified GK clustering[J]. Structures, 2021, 30: 518–530.
- [2] LIU Z X, YU Z X, CHEN X X, et al. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106583.
- [3] LI Q S, MELBOURNE W H. An experimental investigation of the effects of free-stream turbulence on streamwise surface pressures in separated and reattaching flows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54: 313–323.
- [4] KAWAI H, YOSHIE R, WEI R, et al. Wind-induced response of a large cantilevered roof[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/2/3): 263–275.
- [5] 李秋胜,戴益民,李正农.强台风“黑格比”作用下低矮房屋风压特性[J].建筑结构学报,2010,31(4):62–68.
- [6] ASGHARI MOONEGHI M, KARGARMOAKHAR R. Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings: review[J]. Journal of Building Engineering, 2016, 6: 225–235.
- [7] BLESSING C, CHOWDHURY A G, LIN J, et al. Full-scale validation of vortex suppression techniques for mitigation of roof uplift[J]. Engineering Structures, 2009, 31(12): 2936–2946.
- [8] LI Y, LI S Q, ZENG L W, et al. Control of the VIV of a cantilevered square cylinder with free-end suction[J]. Wind and Structures, 2019,29(1):77–86.
- [9] KOPP G A, MORRISON M J. Component and cladding wind loads for low-slope roofs on low-rise buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4): 04018019.
- [10] JAFARI M, ALIPOUR A. Aerodynamic shape optimization of rectangular and elliptical double-skin facades to mitigate wind-induced effects on tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 213: 104586.
- [11] ALY A M, BRESOWAR J. Aerodynamic mitigation of wind-induced uplift forces on low-rise buildings: a comparative study[J]. Journal of Building Engineering, 2016, 5: 267–276.
- [12] LI G, GAN S, LI H N. Wind pressure mitigation on gable roofs for low-rise buildings using spoilers[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(8): 04018104.
- [13] 甘石,李钢,李宏男.扰流板减小低矮房屋屋面风压试验研究[J].土木工程学报,2018,51(6):91–102.
- [14] PERÉZ J I, VAN HOOFF T, LEITE B C C, et al. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location[J]. Building and Environment, 2015, 85: 263–276.
- [15] 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.
- [16] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11): 1749–1761.