

切角措施对串列方柱气动性能影响的大涡模拟研究

刘帅永¹, 祝志文¹, 郑德乾², 祝瑜哲³, MOHAMMED Elhassan⁴

(1. 汕头大学土木与智慧建设工程系 广东 汕头 515063; 2. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 4. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 串列双方柱的干扰效应受方柱气动外形的影响显著, 方柱角部形状的变化将导致周边流场的改变, 进而影响上、下游方柱的气动性能, 串列双方柱的风荷载干扰效应及相关机理还有待进一步研究。本文采用基于空间平均的大涡模拟方法, 以亚临界间距比和超临界间距比的串列方柱为对象, 分别对上、下游方柱考虑有、无切角(切角率均为 10%)两种情况, 研究两类典型间距比下不同切角措施对串列方柱风荷载的影响及其机理。将标准串列方柱风压系数与风洞试验结果对比, 验证本文模拟方法及参数设置的有效性; 从气动力系数统计值及自谱、平均和脉动风压系数分布等角度, 对比分析了两种典型间距比下不同切角措施对串列双方柱气动性能的影响, 着重从时均和瞬态流场角度进行机理分析。结果表明, 两种典型间距比下, 不同位置的切角措施均会影响方柱周围流动分离, 从而引起流态变化, 其中上、下游方柱均采取切角措施, 可以更有效地减弱方柱的平均和脉动风荷载。

关键词: 高层建筑; 串列方柱; 切角措施; 大涡模拟; 气动性能; 流场机理

中图分类号: TU973.2⁺13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)01-0214-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.01.023

Study of the corner cutting effect on the aerodynamic performance of two tandem square cylinders by LES

LIU Shuaiyong¹, ZHU Zhiwen¹, ZHENG Deqian², ZHU Yuzhe³, MOHAMMED Elhassan⁴

(1. Department of Civil and Intelligent Construction Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China;
2. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
3. College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
4. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China)

Abstract: The aerodynamic interference between tandem square cylinders is strongly influenced by their geometric shape. The change of corner shape of square cylinders will lead to the change of flow field, which will affect the aerodynamic performance of square cylinders. The influence and mechanism of wind load interference effect of tandem square cylinders need to be further studied. In this paper, the large eddy simulation method is used to investigate the impact and mechanism of corner cutting measures on the wind load of tandem square cylinders with subcritical spacing ratio and supercritical spacing ratio under two typical spacing ratios. The upstream and downstream cylinders are considered with or without corner cutting (the corner cutting rate is 10%). The wind pressure coefficient of standard tandem square cylinders is compared with the wind tunnel test results in literature to verify the effectiveness of the simulation method and parameter setting. Effects of different corner cutting measures on the aerodynamic performance of tandem square cylinders under two typical spacing ratios are compared and analyzed from the perspectives of aerodynamic coefficient statistics and auto-spectrum, average and fluctuating wind pressure coefficient distribution. The mechanism analysis is carried out from the perspective of time-average and transient flow field. The results show that under the two typical spacing ratios, the corner cutting measures at different positions will affect the flow separation around the square cylinder, resulting in the change of flow pattern. The average and fluctuating wind loads of the square cylinder can be reduced more effectively by the corner cutting measures at both upstream and downstream square cylinders. Under the subcritical spacing, the shielding effect is significant, and the corner cutting measures change the separation and reattachment position of the separation vortex, and reduce the lift and drag of the downstream square cylinder significantly.

收稿日期: 2022-12-09; **修订日期:** 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408196); 河南工业大学青年骨干教师培养计划资助项目

Keywords: high-rise buildings; tandem square cylinders; corner cutting; large eddy simulation; aerodynamic performance; flow mechanism

从 20 世纪 70 年代起,高层建筑风荷载干扰效应已受到广泛关注^[1-3],不同于单体建筑,建筑结构串列布置会因上游建筑干扰作用,导致下游建筑周围流场更加复杂,对结构气动性能的影响更加难以明晰^[4]。作为典型钝体模型,串列双方柱结构同样受到广泛关注^[5-7],SAKAMOTO 等^[8]、陈素琴等^[9]研究不同间距下串列双方柱绕流现象,表明当两方柱的距离小于某特定间距时,上游方柱尾涡脱落受到抑制,而大于该间距时,上、下游方柱均能产生旋涡脱落,同时引起气动力突变,该特定间距称为临界间距;随后,SOHANKAR^[10]进行深入分析,在不同间距比下,依据方柱周围流场形态变化将其分为如下三种流态,单一钝体、剪切层再附、双涡脱流态;与此同时,丁林等^[11]也通过串列双方柱涡量云图,逐步明晰上游方柱尾涡形态由受抑制到形成完整旋涡脱落的过程;为进一步研究双方柱周围流态变化,杜晓庆等^[12]对高雷诺数下串列双方柱流态和风压特性进行详细分析,表明随着间距比增加,风压特性随流场形态变化而呈现不同类型。

气动外形对串列双方柱的干扰效应也有显著影响,为减小结构风致响应,学者们进行了气动措施研究^[13-15]。其中,切角处理作为一种简单且效果显著的气动措施,受到广泛应用。王新荣等^[16]通过风洞试验研究了单体方柱表面风压受切角率变化的影响,发现 10% 和 15% 切角率方柱表面风压低于标准方柱;郑德乾等^[15]以角部修正率取 10% 的单方柱为基础,采用大涡模拟方法研究了气动措施对方柱气动性能的影响,表明切角措施使剪切层更加贴近方柱壁面,减弱了方柱表面平均风压;杜晓庆等^[14]对切角方柱在不同风向角下的风压特性变化进行了研究,明确了切角方柱小风向角下流态发生变化和极

值风压及风压非高斯特性进一步减弱的相关结论。针对切角措施在串列方柱气动性能方面的应用,SHANG 等^[17]对切角率分别为 5%,10% 和 15%,间距比为 4 的串列方柱进行大涡模拟计算,结合流场变化,分析不同切角率对串列方柱气动性能的影响。郑德乾等^[18-19]通过对不同间距比下串列双方柱进行数值模拟,确定了标准双方柱和切角方柱的临界间距范围,并对小间距比方柱进行数值模拟研究。

1 计算模型及参数设置

本文选取亚临界和超临界间距比 $S=2.0$ 和 5.0 ($S=L/D$, L 为方柱中心距, D 为方柱边长) 的串列方柱进行数值模拟计算,串列方柱边长均为 0.1 m ,结合文献^[15-19]研究结果,本文选取影响相对较大的中等切角率 10%,并分别考虑对上、下游方柱采取切角措施,如图 1 所示。

在确保流场充分发展的同时兼顾计算效率,参照文献^[20]研究结果,计算域大小设置为:展向宽度为 $15D$,上游方柱距入流面 $10D$,下游方柱距出流面 $28D$,竖向高度 $H=4D$,具体尺寸见图 1。计算域整体采用非均匀结构化网格,不同工况下计算域网格总数通过控制网格伸展率来实现,伸展率均不超过 1.2;对近壁面区域网格进行加密处理,网格最小尺寸为 $0.0005D$, y^+ 均小于 1.0。

计算域入口采用速度入口边界条件,均匀来流不考虑湍流度的影响,以来流平均风速和方柱边长定义雷诺数为 22000;出流面采用压力出口边界条件,计算域两侧采用对称边界条件,方柱表面为固壁无滑移边界条件。压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法,时间离散采用二阶隐式,时间步长为 0.0005 s ,经计算,超过 94% 的网格单元的柯朗数 (Cell Cou-

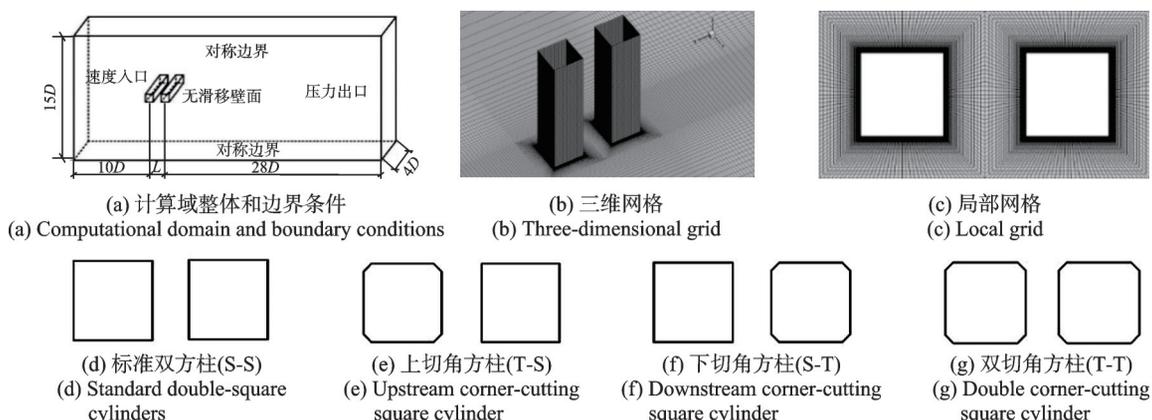


图 1 计算域边界条件和网格及工况示意图

Fig. 1 Sketches of the boundary condition and computational model and the case scheme

rant Number)不超过 1.0,满足 CFL 准则要求;空间离散为具有二阶精度的 Bounded Central Differencing 格式,亚格子模型采用标准 Smagorinsky-Lilly 模型。大涡模拟共计算 13000 步,其中后 10000 步用于流场及气动力统计分析。

2 结果与讨论

风压系数和气动力系数分别定义如下:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho_a U_0^2} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho_a U_0^2 DH} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho_a U_0^2 DH} \quad (3)$$

$$U_0 = \frac{Re\mu}{\rho_a D} \quad (4)$$

式中, C_p 为方柱表面风压系数; C_L, C_D 分别为升、阻力系数; ρ_a 为空气密度; P 为方柱表面风压; U_0 为来流风速; F_L, F_D 分别为方柱升、阻力; Re 为雷诺数; μ 为动力黏性系数。下文中,平均风压系数和脉动升力系数及平均阻力系数分别用 $C_{p,mean}, C_{L,rms}, C_{D,mean}$ 表示。

斯托罗哈数定义为:

$$St = fD/U_0 \quad (5)$$

式中, f 为旋涡脱落频率。

2.1 数值模拟结果验证

为验证本文湍流模型和参数设置的有效性以及计算结果的精度,首先以亚临界间距比 $S=2.0$ 标准方柱为算例,依据网格数量划分为 G1、G2 和 G3 三个工况,对应网格数量分别为 90 万、135 万和 232 万左右,对以上工况进行数值模拟计算,并将数值模拟结果与风洞试验结果^[7-8,21-24]进行对比分析,表 1 为气动力系数对比结果,其中 G1~G3 为本文数值模拟结果,表中数据分别表示上、下游方柱气动力系数,图 2 为串联标准方柱表面风压系数,分析可知:

(1)由表 1 中气动力系数对比结果可知,在三种不同网格数量下,上、下游方柱对应的气动力系数统计值均相差不大,且与文献试验结果也均具有较好的一致性;G1 工况上游方柱的脉动升力系数相对较大,G3 工况下游方柱的脉动升力系数则较小,G2 工况上、下游方柱的平均阻力系数和脉动升力系数与试验结果更为吻合,旋涡脱落频率略高于试验值。

(2)在风压分布方面,在不同网格情况下,大涡模拟所得标准方柱表面的平均风压系数与试验结果均较为吻合;脉动风压系数与大涡模拟及风洞试验结果之间均存在着一定的离散性,但随测点位置改变,其变化趋势较为一致,相较其余工况,G2 工况下大涡模拟结果与文献试验结果的一致性更好。

表 1 间距比 $S=2.0$ 时的串联标准方柱气动力系数

Tab. 1 The aerodynamic coefficient of tandem standard square cylinders ($S=2.0$)

| 工况 | Re | 网格总数/万 | $C_{D,mean}$ | $C_{L,rms}$ | St |
|--------|-------|--------|--------------|-------------|--------------|
| G1 | 22000 | 90 | 1.90, -0.43 | 0.16, 0.48 | 0.124, 0.124 |
| G2 | 22000 | 135 | 1.96, -0.55 | 0.10, 0.48 | 0.129, 0.135 |
| G3 | 22000 | 232 | 1.95, -0.58 | 0.08, 0.41 | 0.128, 0.128 |
| 文献[21] | 56000 | — | 2.03, -0.54 | 0.11, 0.49 | 0.126, 0.126 |
| 文献[8] | 20000 | — | 1.99, -0.53 | 0.09, 0.48 | 0.120, 0.120 |
| 文献[7] | 16000 | — | 1.85, -0.61 | — | 0.111, 0.125 |

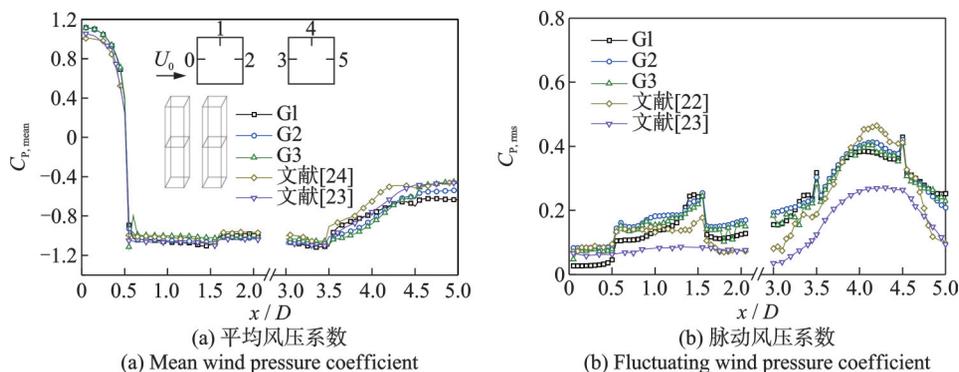


图 2 串联标准方柱表面风压系数

Fig. 2 Surface wind pressure coefficients of tandem standard square cylinders

综合分析,本文数值模拟方法及参数设置能够较好地预测串列方柱表面的平均和脉动风压,下文大涡模拟均基于G2工况进行计算。

2.2 气动特性分析

为方便起见,下文分析中,标准串列双方柱、上游切角方柱、下游切角方柱、双切角方柱分别用“S-S”“T-S”“S-T”“T-T”表示。气动系数对比结果如表2所示,分析可知:

(1)间距比 $S=2.0$ 时,工况S-S-2和S-T-2上游方柱的气动外形一致,对应的上游方柱平均阻力系数十分接近,工况T-S-2和T-T-2与上述情况一致;由于上游方柱的“遮挡效应”,下游方柱的平均阻力系数均为负值,工况S-T-2的绝对值最大,T-S-2最小;分别以工况T-T-2和T-S-2为标准,S-T-2和S-S-2下游方柱的平均阻力系数绝对值增幅分别为29%,32%,均说明上游为标准方柱时,“遮挡效应”最为显著,可能导致下游方柱迎风面处的负风压形成更大的风吸力,这也解释了S-T-2平均阻力系数绝对值最大。关于脉动升力系数,所有工况中上游方柱值均较小,下游方柱值偏大;其中,工况S-T-2中,上、下游方柱脉动升力系数分别出现最大值和最小值。

(2)间距比 $S=5.0$ 时,相较工况S-S-5,工况T-S-5和T-T-5上游方柱由于采取了切角措施,平均阻力系数均明显降低,降幅均达35%左右;下游方柱平均阻力系数均由负转正,表明下游方柱迎风面整体受正压力,但与上游方柱仍有较大差别,因此,下游方柱依旧受到上游方柱的影响,其中工况T-S-5和S-T-5下游方柱平均阻力系数分别为最大和最小值,与 $S=2.0$ 时下游方柱出现最值的原因一致。关于脉动升力系数,四种工况的上游方柱中,切角方柱脉动升力系数值均较小,尤其是双切角串列方柱。工况S-S-5和T-T-5中上、下游方柱气动外形一致,分别以各自工况上游方柱为基准,两种

工况下游方柱脉动升力系数分别增大12%和20%,原因可能是上游方柱侧面旋涡脱落作用于下游方柱,使其周围涡量增加,对壁面作用力增强,湍流脉动性增加,致使下游方柱脉动升力系数值增大;随后,分别以工况S-S-5和T-S-5的下游方柱为基准,对应S-T-5和T-T-5的下游方柱脉动升力系数分别降低12%和19%,证明在下游方柱受到上游方柱遮挡的情况下,切角措施对降低升力脉动性仍有显著效果。

相比间距比 $S=2.0$,超临界间距比 $S=5.0$ 下游方柱的升、阻力系数均有明显的“跃升”效应,下文会从风压系数和流场的角度进行解释。

(3)图3为串列方柱气动系数功率谱,对于方柱的升力系数谱来说,同一间距比下,相对标准方柱,采取气动措施工况的功率谱谱峰均发生了偏移,这是由于切角措施通过改变方柱气动外形影响流场形态,改变旋涡脱落的频率,其中双切角措施对提高涡脱频率效果最明显;同一工况,下游方柱升力系数谱曲线对应面积较大,也表明其蕴含能量较多,表明方柱侧面分离涡对其做功更多。间距比 $S=2.0$ 时,相较上游方柱,同一工况下游方柱功率谱曲线对应面积更大,与表2升力系数变化一致;间距比 $S=5.0$ 时,上、下游方柱功率谱曲线更加接近,表2中对应升力系数也相差较小。对比四种工况上游方柱,切角方柱功率谱曲线对应面积更小,尤其双切角方柱效果最为显著。

对于方柱的阻力系数谱,当间距比 $S=2.0$ 时,对比同一工况上、下游方柱,其中,下游方柱阻力系数功率谱存在较明显的波峰,结合文献[23]可知,由于两方柱间距较小,下游方柱处于上游方柱的尾流区,尾流旋涡脱落导致下游产生“来流”脉动,故而产生明显峰值现象;间距比 $S=5.0$ 时下游方柱均无明显峰值出现,也表明超临界间距下,下游方柱受上游方柱影响减弱。

表2 串列方柱气动系数对比

Tab. 2 Comparison of the aerodynamic coefficients for tandem square cylinders

| 间距比 | 工况 | $C_{D,mean}$ | $C_{L,rms}$ | St |
|---------|-------|--------------|-------------|--------------|
| $S=2.0$ | S-S-2 | 1.94, -0.54 | 0.16, 0.52 | 0.137, 0.137 |
| | T-S-2 | 1.32, -0.41 | 0.10, 0.41 | 0.198, 0.198 |
| | S-T-2 | 1.94, -0.71 | 0.24, 0.34 | 0.122, 0.122 |
| | T-T-2 | 1.35, -0.55 | 0.11, 0.40 | 0.213, 0.213 |
| $S=5.0$ | S-S-5 | 2.28, 0.78 | 1.32, 1.48 | 0.124, 0.124 |
| | T-S-5 | 1.53, 1.02 | 0.92, 1.29 | 0.137, 0.137 |
| | S-T-5 | 2.38, 0.64 | 1.41, 1.30 | 0.122, 0.122 |
| | T-T-5 | 1.55, 0.71 | 0.87, 1.04 | 0.151, 0.151 |

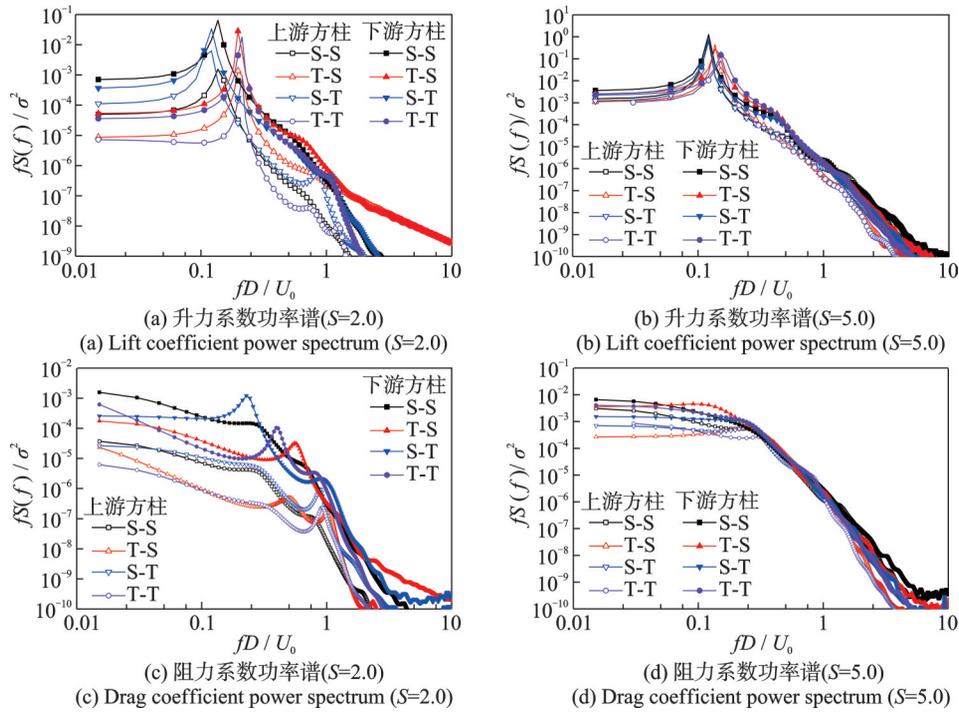


图 3 串联方柱气动系数功率谱

Fig. 3 Power spectrum of the aerodynamic coefficient of tandem square cylinders

2.3 方柱表面风压分布

图 4 为串联方柱表面风压系数的对比图, 总体来说, 方柱表面风压系数变化趋势一致, 但随气动外形的改变, 局部风压系数也发生变化, 为进一步明晰切角措施和间距对方柱表面风压分布的影响, 对比测点平均和脉动风压系数, 由图 4 可知:

(1) $S=2.0$ 时, 对于平均风压系数, 四种工况中, 上游方柱迎风面为正压, 侧面和背风面为负压, 下游方柱由于受到上游方柱遮挡, 其平均风压均为负值; 方柱表面风压变化趋势较一致, 切角措施均在一定程度上减弱了方柱平均风压, 尤其是下游方柱侧面负压明显整体减小。其中, 风压系数的差异点主要集中在上游方柱角部区域, 工况 T-T-2 上游方柱角

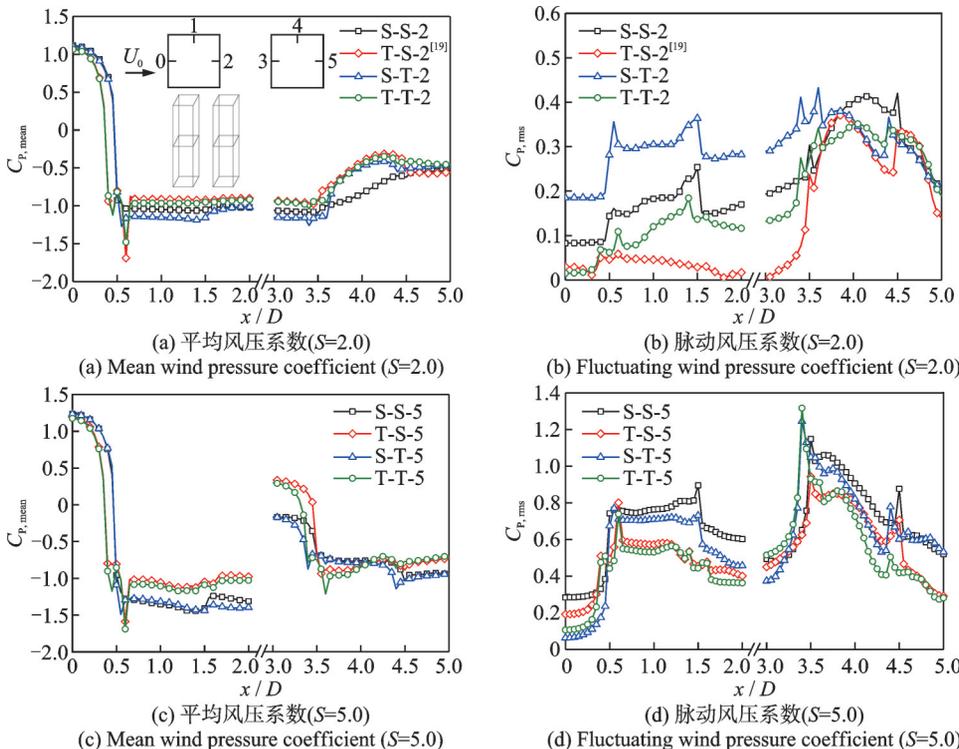


图 4 串联方柱表面风压系数对比

Fig. 4 Comparison of surface wind pressure coefficients of tandem square cylinders

部前缘处($x/D=0.6$)出现平均风压系数极大值 -1.48 ,工况S-T-2则在更靠前位置($x/D=0.55$)出现极大值 -1.27 ,该突变现象是上游方柱角部形状变化和气流分离所致。对于脉动风压系数,工况S-T-2上游方柱数值明显较大,可能受到下游切角方柱周围流场影响而导致此现象;而工况T-S-2数值整体均较小,可能由于上游切角措施起到降低脉动风压的作用。

(2)当间距比 $S=5.0$ 时,上游方柱表面平均风压系数变化趋势一致,且相同气动外形方柱表面风压系数十分接近,其中,切角方柱侧面和背风面负压较小;下游方柱的区别主要集中在迎风面,其中工况S-S-5和S-T-5为负压,工况T-S-5和T-T-5迎风面出现正压,可能是由于上游为切角方柱而造成的。脉动风压变化趋势整体一致,较间距比取2.0时,脉动风压系数明显增大。相比其余工况,工况T-S-5

和T-T-5脉动性相对较弱,尤其是方柱的侧面和背风面区域。总体来说,三种切角措施均起到了降低升力脉动性的效果,其中双切角方柱效果更显著。

(3)迎风面和背风面是阻力主要贡献区, $S=2.0$ 时,下游方柱表面均为负压,迎风面处产生逆风向力,背风面是顺风向力,迎风面整体负压较大,形成的逆风向力更大,解释了下游方柱阻力系数为负值的主要原因,同时解释了 $S=5.0$ 时下游方柱阻力系数为正值的原因;工况T-S-5、T-T-5迎风面为正压,明显大于工况S-S-5、S-T-5对应区域压力,也使其阻力系数更大。

2.4 时均流场分析

本节从时均流场角度分析间距比和切角措施对方柱表面风荷载的作用机理。图5为串列方柱时均流场图,背景为平均风压系数云图。

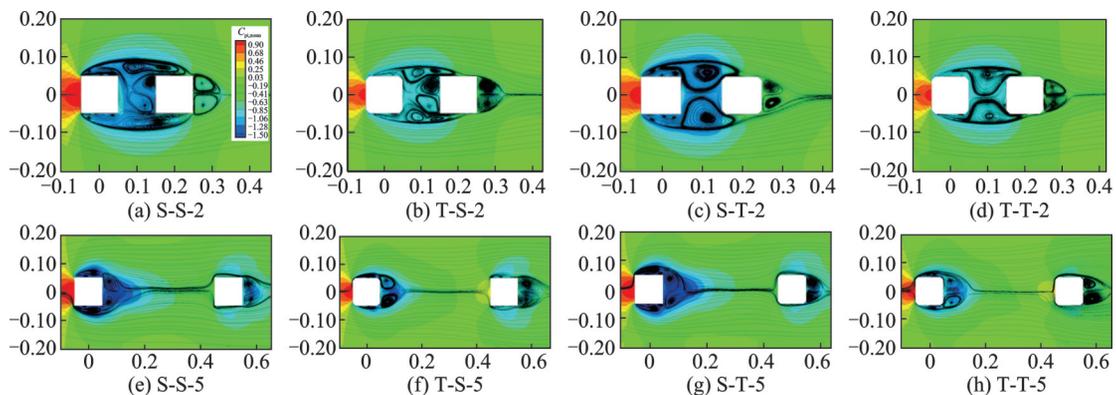


图5 方柱周围时均流线图($z=0.5H$ 截面)

Fig. 5 Time-averaged streamlines diagram around cylinders (longitudinal section of $z=0.5H$)

(1)整体上,间距比为2.0时,尚未达到临界间距,上游方柱涡脱受到抑制,分离涡自上游方柱前角处发展形成大尺度的分离涡,作用于下游方柱后,产生不同程度的流动再附现象。具体分析,工况S-S-2和T-S-2下游方柱迎风面处均存在两个大尺寸对称涡,并在该对称涡外侧形成两个更大尺寸的多核心分离涡,覆盖上、下游方柱侧面区域,而S-T-2和T-T-2中仅在两方柱中间区域形成大尺寸对称分离涡,对比四种工况结果,出现这种差异的原因可能为下游方柱采取切角措施,气动外形发生变化,改变了下游方柱迎风面的流场,促使两个方柱之间的对称涡与侧面分离涡融合,与上游方柱采取切角措施是否有关还有待进一步研究。工况S-S-2和S-T-2中上游为标准方柱,旋涡自迎风面两端角点开始出现分离,其中,工况S-S-2下游方柱两侧被分离涡完全覆盖,且其在流动分离的过程中会形成更加丰富的涡,增强风压脉动性,使其脉动升力系数值最大;下游方柱阻力系数均为负值,其中工况S-T-2的负值

最大,结合图4分析,该间距下,下游方柱迎风面均为负压,且强度显著高于背风面,使其受到逆风向力的主导作用,这是下游方柱阻力系数均为负值的主要原因,工况S-T-2下游方柱受遮挡作用更加明显,迎风面区域负风压值更大,使其阻力系数更大。

(2)间距比增大至5.0时,由于已达到临界间距,上游产生的剪切层分离涡在一定距离内不受下游方柱阻碍,方柱两侧均有大尺寸分离涡出现,背风侧有对称涡形成,其中,经切角处理的方柱,两侧面分离涡更贴近壁面,尾流对称涡核心距更小,其尺寸也相对较小。相比上游方柱,各工况的下游方柱仍受上游方柱尾流影响,侧面均未出现大尺寸分离涡,仅在下游标准方柱的迎风面角部的气流发生分离,导致侧面靠近上游角点处出现很小尺寸的分离涡,下文结合瞬态流场对其侧面未出现大尺寸分离涡进行分析;相比来说,下游方柱背风面区域受尾流影响稍小,但对比同一工况上游方柱尾流对称涡可知,下游方柱背风面分离涡核心距显著减小,其中工况

S-S-5 和 T-T-5 上、下游方柱背风面对称涡核心距分别为 $0.72D/0.54D$ 和 $0.72D/0.56D$, 减小幅值分别为 25% 和 22%, 这是下游方柱阻力系数减小的主要原因。

2.5 瞬态流场分析

为进一步分析切角措施对串联方柱周围的流场演化规律和风压分布及气动力的影响, 以上游方柱升力系数时程图为例, 标识出一个周期 (T) 中四个典型时刻的漩涡脱落图, 分别用“□”“◇”“○”“△”表示 $0.25T$ 、 $0.5T$ 、 $0.75T$ 、 T 时刻, 如图 6 所示。限于篇幅, 图 7 仅以工况 S-S-2, T-T-2, S-S-5 和 T-T-5 为例, 分析切角措施对方柱周围瞬态涡结构

演化的影响。

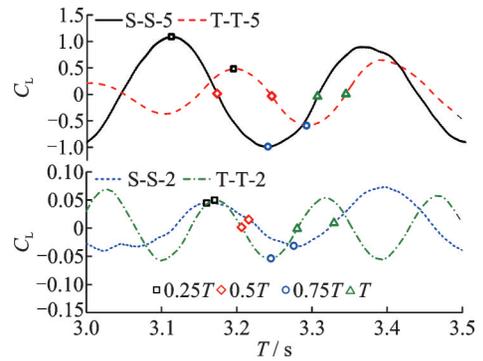


图 6 典型位置升力系数时程图
Fig. 6 Lift coefficient time history diagram at typical position

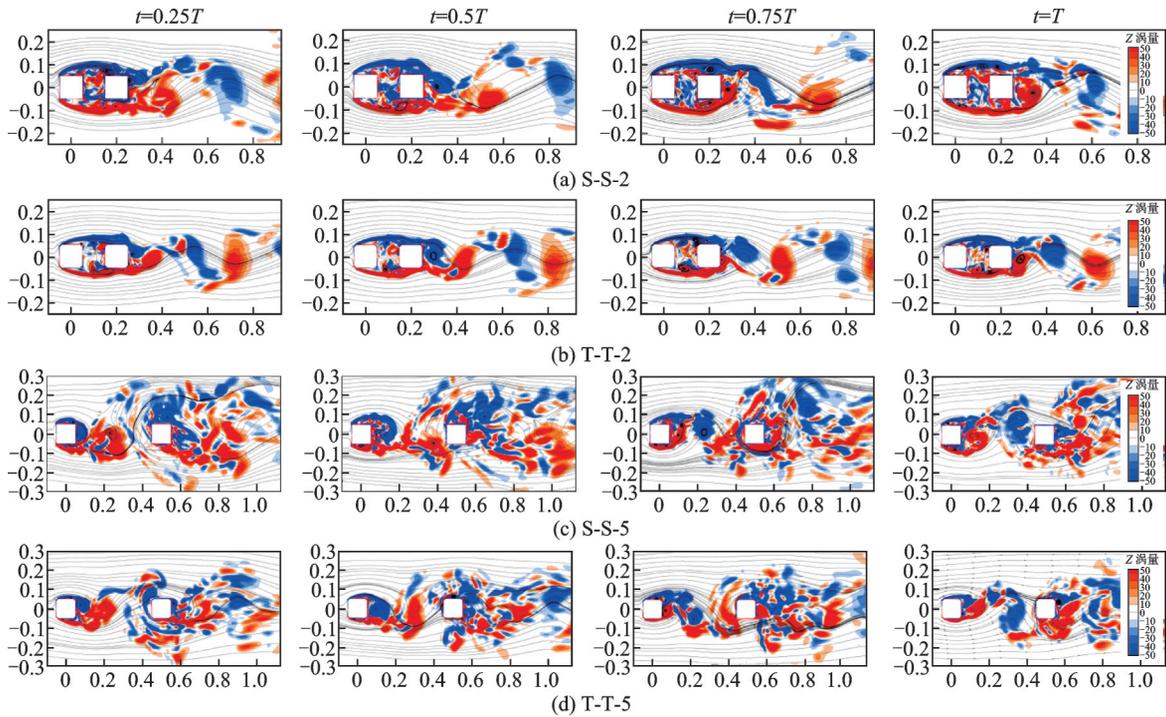


图 7 方柱周围瞬态涡量图 ($z=0.5H$ 截面)
Fig. 7 Instantaneous vorticity diagram around cylinders (longitudinal section of $z=0.5H$)

(1) 总体上, 不同间距比下, 方柱周围均存在丰富的涡结构, 发展过程主要有涡形成、融合、再附、脱落、消失等过程, 其中负涡多集中在方柱上侧, 正涡则在下侧; 对比整个漩涡脱落周期, 间距比 $S=2.0$ 时, 上、下游方柱两侧的旋涡状态较稳定, 侧面未出现明显的旋涡脱落, 而间距比 $S=5.0$ 时, 上游方柱侧面则出现明显的旋涡脱落, 与单体方柱流场变化一致, 随后其尾涡以不同的形态作用于下游方柱, 并在其侧面开始出现流动分离, 这可能是超临界间距时脉动升力系数出现“跃升”的原因。

(2) 间距比 $S=2.0$ 时, 串联方柱处于亚临界间距状态, 由于两方柱间距相对较小, 受下游方柱阻挡, 上游方柱旋涡脱落受到抑制, 分离涡脱离上游方柱在下游方柱侧面进行再附, 其旋涡脱落呈现剪切

层再附流态, 尾流涡道比较明显, 相较间距比 $S=5.0$ 工况, 剪切流扩散角显著减小。其中, 工况 T-T-2 中切角措施使得下游方柱侧面分离涡更加贴近壁面, 剪切层扩散角减小, 涡道宽度变窄, 尾流涡尺寸变小, 影响范围缩减, 背风面负压强度降低, 平均阻力减小; 尾流涡道相邻涡核心距减小, 涡脱频率增加, 斯托罗哈数增大。旋涡脱落不规则性增强是降低倒角化柱体整体升力的诱因^[25], 相比下游方柱, 上游方柱背风面未出现明显规则性旋涡脱落, 因此其脉动升力系数较小, 同时从侧面解释了表 2 中下游方柱升力系数明显较大的原因; 对比工况 S-S 和 T-T, 小间距能很好降低上游方柱脉动升力, 而在该间距下切角措施对降低升力系数脉动性效果相对有限。

(3) $S=5.0$ 时, 串联方柱处于超临界间距状态,

周围流场呈现出双涡脱流态。随着方柱间距增大,阻挡效应明显减弱,上游方柱在尾流区已经出现明显旋涡脱落,在旋涡向下游演化的过程中受到下游方柱阻挡而未形成明显的发展中涡道;由于上游方柱尾流区周期性旋涡脱落并作用于下游方柱,出现更加丰富的小尺寸涡结构,致使旋涡脱落现象不明显,并增加了下游方柱周围紊流度,结合风速流线图,可观察到主涡大致脱落位置。上游方柱尾涡发展过程中,以不同角度作用于下游方柱,避免直接作用于下游方柱表面,因此,相比上游方柱,减弱了其迎风面正压;同时,下游方柱背风面未形成大尺寸的分离涡,也是减小下游方柱阻力的部分影响因素;相比之下,上游方柱尾涡作用于下游方柱后,周围形成更加丰富的小尺寸涡结构,致使周围涡量快速增加,并且在侧面区域出现了明显的旋涡脱落,对方柱侧面影响较大,促使下游方柱脉动升力系数稍有增加。

3 结 论

本文通过对亚临界和超临界间距比下的串列方柱进行了大涡模拟,考察了切角措施对方柱气动力特性及流场变化的影响机理。所得结论如下:

(1) 在亚临界间距和超临界间距比下,串列方柱不同位置采取切角措施会对串列方柱的气动干扰效应造成不同程度的影响,同时使串列方柱气动力系数产生很大差异,这种敏感性也为改善双方柱气动干扰提供了参考。

(2) 在亚临界间距比下,遮挡效应显著,出现剪切流再附流态,切角措施改变流体分离点位置,影响剪切流扩散角和分离涡再附位置,促使分离涡更加贴近壁面,背风面处涡距变窄;对比超临界间距比,明显削弱升力脉动性,降低上游方柱阻力大小,并有效降低表面平均与脉动风压系数。

(3) 在超临界间距比下,方柱干扰作用减弱,呈现双涡脱流态,上游方柱尾涡作用于下游方柱迎风面,避免来流直接作用迎风面,下游方柱周围涡量快速增多,导致下游方柱阻力系数降低,升力系数增大,其中,双切角措施降低升、阻力效果更为显著。

参考文献:

[1] 楼文娟,李恒,魏开重,等. 典型体型高层建筑双层幕墙风压分布试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(2): 296-301.
LOU Wenjuan, LI Heng, WEI Kaizhong, et al. Wind tunnel test study on wind pressure distribution on double-skin facades of high-rise buildings with typical shapes

[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(2): 296-301.

[2] PAPAIOANNOU G V, YUE D K P, TRIANTAFYLLOU M S, et al. On the effect of spacing on the vortex-induced vibrations of two tandem cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(6): 833-854.

[3] 徐枫,欧进萍,肖仪清. 不同截面形状柱体流致振动的CFD数值模拟[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 7-15.
XU Feng, OU Jinping, XIAO Yiqing. CFD numerical simulation of flow-induced vibration with different cross-section cylinder[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 7-15.

[4] 樊晓羽,秦浩,商敬森,等. 串列双方柱干扰效应流动机理研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(8): 230-238.
FAN Xiaoyu, QIN Hao, SHANG Jingmiao, et al. Flow mechanism investigation on interference effect of two square cylinders in tandem arrangement[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(8): 230-238.

[5] 韩宁,顾明. 两串列方柱局部脉动风压干扰研究: 第1部分 迎风面效应[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 188-192.
HAN Ning, GU Ming. Interference effects on local fluctuating pressure on two square tall buildings in tandem arrangement: part 1 windward side effects[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 188-192.

[6] SOHANKAR A. A LES study of the flow interference between tandem square cylinder pairs[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2014, 28(5): 531-548.

[7] LIU C H, CHEN J M. Observations of hysteresis in flow around two square cylinders in a tandem arrangement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2002, 90(9): 1019-1050.

[8] SAKAMOTO H, HAINU H, OBATA Y. Fluctuating forces acting on two square prisms in a tandem arrangement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1987, 26(1): 85-103.

[9] 陈素琴,黄自萍,沈剑华,等. 两串列方柱绕流的干扰数值研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(3): 320-325.
CHEN Suqin, HUANG Ziping, SHEN Jianhua, et al. Numerical computation of the flow around two square cylinders in tandem arrangement[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2001, 29(3): 320-325.

[10] SOHANKAR A. A numerical investigation of the flow over a pair of identical square cylinders in a tandem arrangement[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(10): 1244-1257.

[11] 丁林,叶倩云,王海博,等. 不同间距串列双方柱流致振动运动特性分析[J]. 振动工程学报, 2019, 32(2): 331-339.

- DING Lin, YE Qianyun, WANG Haibo, et al. Analysis on flow-induced motion characteristics of two square cylinders in tandem with different gap space[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2019, 32(2): 331-339.
- [12] 杜晓庆,陈丽萍,董浩天,等. 串联双方柱的风压特性及其流场机理[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(3): 109-118.
- DU Xiaoqing, CHEN Liping, DONG Haotian, et al. Wind pressure characteristics and flow mechanism of two tandem square columns[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2021, 48(3): 109-118.
- [13] 杜晓庆,田新新,马文勇,等. 圆角化对方柱气动性能影响的流场机理[J]. *力学学报*, 2018, 50(5): 1013-1023.
- DU Xiaoqing, TIAN Xinxin, MA Wenyong, et al. Effects of rounded corner on aerodynamic of square cylinders and its flow mechanisms[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(5): 1013-1023.
- [14] 杜晓庆,方立文,张永平,等. 切角措施对方柱风压非高斯特性的影响机理[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(4): 142-150.
- DU Xiaoqing, FANG Liwen, ZHANG Yongping, et al. Effect of chamfer modification on mechanisms of non-Gaussian features of wind pressure on square cylinder[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(4): 142-150.
- [15] 郑德乾,刘帅永,马文勇,等. 倒角切对方柱气动性能影响的大涡模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(1): 8-14.
- ZHENG Deqian, LIU Shuaiyong, MA Wenyong, et al. Large eddy simulation for effects of chamfering and corner cut on aerodynamic performance of square cylinder[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(1): 8-14.
- [16] 王新荣,顾明. 角部处理的二维方柱风压分布特性的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(7): 79-88.
- WANG Xinrong, GU Ming. Experimental study on wind pressure distributions of 2-D square prisms with various corner treatments[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(7): 79-88.
- [17] SHANG J M, ZHOU Q, ALAM M M, et al. Numerical studies of the flow structure and aerodynamic forces on two tandem square cylinders with different chamfered-corner ratios[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(7): 075102.
- [18] 郑德乾,祝瑜哲,刘帅永,等. 上游切角对串联双方柱气动性能影响研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(15): 216-223.
- ZHENG Deqian, ZHU Yuzhe, LIU Shuaiyong, et al. Effects of upstream corner cut on aerodynamic performance of two tandem square cylinders[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(15): 216-223.
- [19] 郑德乾,祝瑜哲,马文勇,等. 上游切角倒角小间距比串列方柱大涡模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(7): 37-45.
- ZHENG Deqian, ZHU Yuzhe, MA Wenyong, et al. Large eddy simulation for small spacing ratio tandem two square cylinders with upstream column corner cutting and chamfering[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(7): 37-45.
- [20] 郜阳,全涌,顾明. 二维方柱绕流阻塞效应的大涡模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(8): 1018-1025.
- GAO Yang, QUAN Yong, GU Ming. Large eddy simulation of blockage effect on flow past a two dimensional square cylinder[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2018, 46(8): 1018-1025.
- [21] ALAM M M, MORIYA M, TAKAI K, et al. Suppression of fluid forces acting on two square prisms in a tandem arrangement by passive control of flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2002, 16(8): 1073-1092.
- [22] 杨群,赵会涛,刘小兵,等. 串列双方柱绕流的脉动压力分布与气动力研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(1): 140-144.
- YANG Qun, ZHAO Huitao, LIU Xiaobing, et al. Study on fluctuating pressure distribution and aerodynamic force of flows around two square cylinders in tandem arrangement[J]. *Building Structure*, 2020, 50(1): 140-144.
- [23] 杜晓庆,许汉林,马文勇,等. 串列双方柱气动干扰效应试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(11): 27-34.
- DU Xiaoqing, XU Hanlin, MA Wenyong, et al. Experimental study on aerodynamic interference effect of two square cylinders in a tandem arrangement[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(11): 27-34.
- [24] 刘小兵,陈帅,赵会涛. 串列双方柱绕流的时均压力分布特性研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(1): 135-139.
- LIU Xiaobing, CHEN Shuai, ZHAO Huitao. Study on time average pressure distribution features of flow around two square cylinders in tandem arrangement[J]. *Building Structure*, 2020, 50(1): 135-139.
- [25] 董欣,丁洁民,邹云峰,等. 倒角化处理对于矩形高层建筑风荷载特性的影响机理研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(6): 151-162.
- DONG Xin, DING Jiemin, ZOU Yunfeng, et al. Effect of rounded corners on wind load characteristics of rectangular tall buildings[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(6): 151-162.

第一作者: 刘帅永(1991—),男,博士研究生。

E-mail: shuaiyongliu@163.com

通信作者: 郑德乾(1981—),男,博士,副教授。

E-mail: deqianzheng@haut.edu.cn