文章编号：1674-2974（2026）01-0160-13 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026015

基于动力学模态分解的小厚宽比矩形截面的风压场研究

陈伏彬，祝瑜哲，左小伟†
（长沙理工大学 土木与环境工程学院，长沙 410114）

摘 要：为探究小厚宽比（D/B<1.0）矩形截面的风荷载特性，选择了截面面积固定、厚宽比在0.25~1.00范围内变化的三维模型.利用基于空间平均的大涡模拟方法，首先得到4种厚宽比模型的气动力系数，以及模型不同立面的水平脉动风压相关系数，随后对比分析了厚宽比对模型侧面测点风压的乘积时程峰值及相位的影响.最后基于动力学模态分解（dynamic mode decomposition，DMD）方法建立了能够提取主要模态并重构风压场的降阶模型，对不同厚宽比模型的风压场进行分析.结果表明：厚宽比的降低会影响模型侧面的分离再附，改变风荷载作用机制，显著降低脉动风压的水平相关性，其中0.25厚宽比模型效果最为显著，在侧面再附长度约0.6B位置处为风压脉动特性的转捩点，转捩点上、下游风压时程呈现反相位且负相关特征.DMD方法提取的前4阶模态能够准确重构流场，阐明小厚宽比模型的随机风压场.本研究为相关流动控制和结构设计提供参考.

关键词：动力学模态分解；厚宽比；矩形截面；脉动风压相关性；大涡模拟；气动性能
中图分类号：O353.1 **文献标志码**：A

Analysis of wind pressure field on rectangular cross-section with small side ratio based on dynamic mode decomposition

CHEN Fubin，ZHU Yuzhe，ZUO Xiaowei†
（School of Civil and Environmental Engineering，Changsha University of Science & Technology，Changsha 410114，China）

Abstract：To investigate the wind load characteristics of rectangular sections with a small side ratio（D/B<1.0），a series of three-dimensional models（with fixed cross-sectional area and side ratios ranging from 0.25 to 1.00）were adopted. First，the space-averaged large eddy simulation（LES）method was used to obtain the aerodynamic coefficients of four models with distinct side ratios，as well as the correlation coefficients of horizontal fluctuating wind pressure across different facades of the models. Subsequently，the influence of the side ratio on the product time-history peaks and phases of wind pressure at the side-surface measurement points was compared and analyzed. Finally，based on the dynamic mode decomposition（DMD）method，a reduced-order model capable of extracting dominant modes and reconstructing the wind pressure field was established，and the wind pressure fields of models

* **收稿日期**：2024-11-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52278479，52578550），National Natural Science Foundation of China（52278479，52578550）；湖南省自然科学基金资助项目（2023JJ30016），Natural Science Foundation of Hunan Province（2023JJ30016）；长沙理工大学研究生科研创新项目（CSLGCX23144），Research Innovation Project for Graduate students in CSUST（CSLGCX23144）
作者简介：陈伏彬（1981—），男，福建宁德人，长沙理工大学教授，博士
† 通信联系人，E-mail：389227655@qq.com

with different side ratios were analyzed. The results indicate that a decrease in the side ratio affects the separation and reattachment of flow on the model's side surfaces, altering the wind load action mechanism and significantly reducing the horizontal correlation of fluctuating wind pressure (with the 0.25 side ratio model exhibiting the most pronounced effect). The transition point of wind pressure fluctuation characteristics is located approximately 0.6*B* from the side-surface reattachment region; the wind pressure time histories at the upstream and downstream of this transition point show opposite phases and negative correlation. The first four modes extracted via the DMD method can accurately reconstruct the flow field, thereby clarifying the random wind pressure field of small side ratio models. This study provides a reference for relevant flow control and structural design.

Key words: dynamic mode decomposition (DMD); side ratio (SR); rectangular cross-section; pulsating wind pressure correlation; large eddy simulation (LES); aerodynamic characteristic

作为最常见的建筑截面形式,矩形截面的风荷载效应在超高层建筑抗风设计中具有极其重要的地位,不同形式的矩形截面绕流在近年来受到了人们的普遍关注,并被广泛研究[1-3].庄翔等[4]调整矩形截面建筑的圆角率,通过风洞试验手段探究0~20%圆角率范围内,高层建筑表面风荷载特性的变化规律,发现在建筑表面风压得到减弱的同时,圆角率的增大也导致了横向风压相关性的增强.Chen等[5]对正方形、三角形、八边形等8种不同截面形状的超高层建筑进行了计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟,探究了建筑周边风环境的变化,明晰了截面形状对影响建筑表面风荷载的重要性.

除截面形状外,矩形厚宽比(*D*/*B*)的变化同样是影响钝体绕流特征及表面风压分布的重要因素.随着城市基建的发展及人们对生活环境要求的提高,大量的小厚宽比建筑应运而生,其较大的宽度促进了来流在前缘尖角的分离再附,表面风压较之标准矩形(*D*/*B*=1)发生显著变化,研究者针对小厚宽比建筑开展了大量研究[6-9].韩振等[10]针对厚宽比为1∶5的超高层建筑进行刚性模型风洞试验,发现模型在侧面的分离再附会改变侧面风压作用机制,导致其风压相关性明显低于标准方柱.Zhou等[11]发现横风力密度功率谱的幅值和带宽主要取决于厚宽比,且通常情况下,曲线的峰值越大,功率谱越窄.

在众多小厚宽比模型中,王新荣等[12-13]发现当矩形截面厚宽比达到1∶4时,表面旋涡分离与再附现象更加稳定.针对1∶4矩形截面模型的研究非常多,于春放等[14]对不同雷诺数下的1∶4圆角矩形方柱进行大涡模拟,探究其气动性能与流场机理的雷诺数效应;刘志文等[15]、Matsumoto等[16]分别通过数值模拟及风洞试验,探究了1∶4矩形截面竖向涡激振动问题.然而,当前针对小厚宽比矩形截面模型的研究多数集中在对以表面风压为代表的直接分析,流场机理方面仍以传统的时均、瞬态流场分析手段为主.随着计算机技术的精进及面对非定常流动的复杂性,传统方法已不能满足深入研究的需要.为了提高流场动力学的分析效率,有效识别众多流场机理,研究者提出了流场降阶模型(reduced-order model, ROM),即基于特征提取技术的模态分解方法.通过流场降阶技术,可更为直观地展现流场随时间和空间流动的演化规律.动力学模态分解(dynamic mode decomposition, DMD)是一种典型的降阶模型方法,在数值模拟领域得到了广泛应用[17-21].寇家庆等[22]综述了DMD方法针对流体力学问题的一系列改进以及在不同流动现象中的应用,讨论了DMD的现状和未来发展方向.冯帅等[23]通过对比DMD方法与本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)法对大跨屋盖结构的随机风压场分析,证明了DMD比POD方法更善于揭示随机风压场的演化特征.洪泽宇等[24]、刘士杰等[25]也分别通过DMD技术成功分析并重构了矩形截面涡激振动与方柱绕流现象.

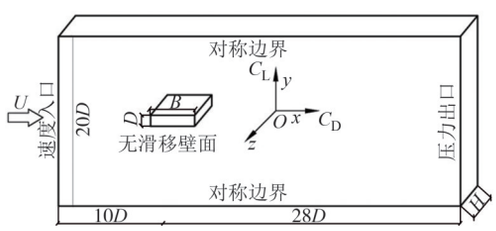
因此,本文以截面面积固定、厚宽比为0.25~1.00的三维矩形截面模型为研究对象,通过大涡模拟方法,探究厚宽比对模型表面风荷载的影响,并利用DMD方法对模型风压场进行模态分解,基于能量占比的大小,建立降阶模型,并重构了矩形截面的风

压场.

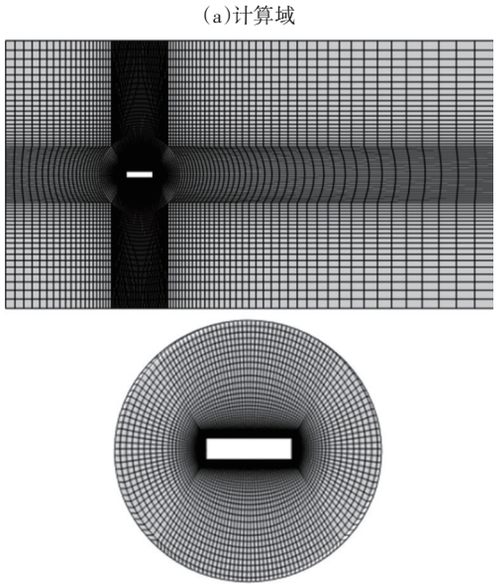
1 大涡模拟

1.1 计算区域与网格划分

大涡模拟计算采用速度入口边界条件,均匀来流且不考虑湍流强度,采用准三维模型,出流面采用压力出口边界条件,计算域尺寸设置如图1所示.模型迎风面厚度为D,宽度为B,高度H在z向上保持H=4D,满足阻塞率不超过5%的要求[26].计算域两侧采用对称边界,方柱表面为无滑移壁面.计算残差设置为0.000 1,为了满足Courant-Friedrichs-Lewy条件即CFL=$U\times\Delta t/\Delta x$<1.0,时间步长Δt取0.000 5 s.压力-速度耦合采用SIMPLEC求解算法;时间离散采用二阶隐式格式;空间离散采用具有二阶精度的Bounded central differencing格式;亚格子模型采用动态Smagorinsky-Lilly模型.为了更好地捕捉近壁面流场结构,计算域的离散采用非均匀结构化网格,近壁面网格加密,首层网格高度Δx选择0.000 5D,确保y^+<5,其中网格无关性已在文献[27]中得到了详细验证,这里不再赘述.



(a)计算域



(b)网格划分

图1 计算域与网格划分

Fig.1 Computation domain and mesh discretization

1.2 结果验证

首先对模型M1进行大涡模拟计算,将其气动力系数与相关文献结果进行对比,模型的雷诺数及风压系数定义分别如下:

$$Re = \rho UD/\mu \tag{1}$$

$$C_{pi} = p_i/0.5\rho U^2 \tag{2}$$

式中:Re为雷诺数;C_{pi}为模型表面测点风压系数;ρ为空气密度,取1.225 kg/m^3;来流风速U定为10 m/s;μ为黏性系数,取1.789 4×10^{-5} kg/m·s.模型表面的平均风压系数和脉动风压系数分别用$C_{pi,\mathrm{mean}}$和$C_{pi,\mathrm{rms}}$来表示.

模型的斯特劳哈尔数及升力、阻力系数计算公式如下:

$$Sr = f_{st}D/U \tag{3}$$

$$C_L = F_L/0.5\rho U^2 DH \tag{4}$$

$$C_D = F_D/0.5\rho U^2 DH \tag{5}$$

式中:f_{st}为旋涡脱落频率,Hz;C_L、C_D分别为升力、阻力系数,方向如图1所示;F_L、F_D分别为模型升力、阻力.下文中分别用$C_{L,\mathrm{rms}}$和$C_{D,\mathrm{mean}}$表示模型的脉动升力系数和平均阻力系数.

经计算,85%以上的网格单元柯朗数不大于1.0,证明了Δt=0.000 5 s和0.000 5D的近壁面网格布置能够满足CFL准则.由表1可知,本文模拟得到的M1的平均阻力系数、脉动升力系数及斯特劳哈尔数(Sr)与以往试验和模拟结果[14,28-29]基本吻合.图2是M1表面平均风压系数与Guissart等[30]的二维非定常数值模拟(URANS)和风洞试验(EXP)作对比,可见风压系数的分布与走势基本一致,证明了本文的大涡模拟方法能够较好地预测矩形截面模型的表面风荷载,下文模型M2~M4的计算设置均与M1一致.

2 结果与讨论

2.1 气动性能

表1展示了M1~M4在同一来流风速作用下的气动力系数.不同厚宽比模型中,$C_{D,\mathrm{mean}}$随着厚宽比(D/B)的增大而升高;斯特劳哈尔数(Sr)方面,M1的Sr明显高于M2~M4,且M2~M4的Sr与厚宽比未呈现线性关系.可以看出,阻力系数随厚宽比增大而升高,但升力系数、斯特劳哈尔数与厚宽比均无明显线

表 1　不同厚宽比模型气动力系数对比

Tab.1　Comparison of aerodynamic coefficients for model with different side ratios

模型	*Re*	厚度 *D*/m	宽度 *B*/m	厚宽比 *D*/*B*	网格总量/万	网格伸展率	$C_{D,mean}$	$C_{L,rms}$	*Sr*
M1	5.5×10^4	0.080	0.320	0.25	58.8	1.08	1.180	0.480	0.136
M2	6.3×10^4	0.092	0.276	0.33	60.6	1.08	1.340	0.410	0.035
M3	7.7×10^4	0.113	0.226	0.50	59.6	1.08	1.650	0.520	0.085
M4	1.1×10^5	0.160	0.160	1.00	69.6	1.08	2.440	1.470	0.124
Nakaguchi 等[28](EXP)	2×10^4~6×10^4	—	—	0.25	—	—	1.100	—	0.130
于春放等[14](LES)	5×10^3	0.075	0.300	0.25	88.0	—	1.123	0.228	0.146
Álvarez 等[29](LES)	5.9×10^4	—	—	0.25	705.0	1.32	1.031	0.313	0.142

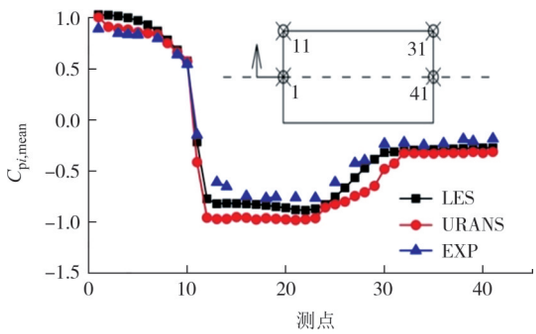


图 2　平均风压系数对比

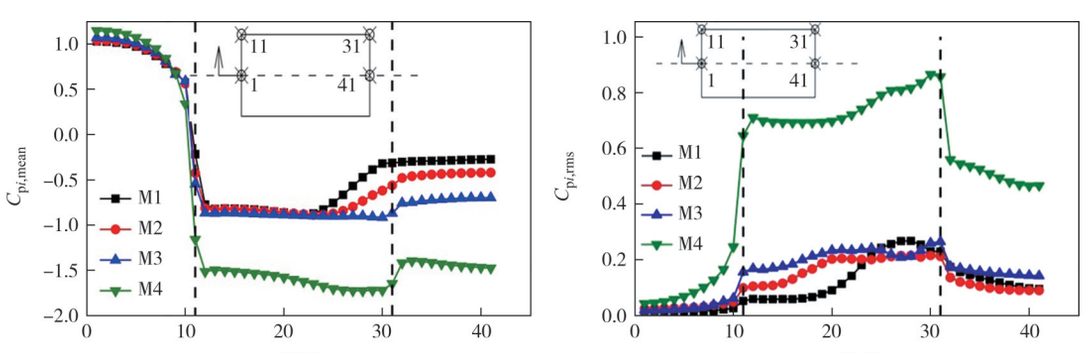
Fig.2　Comparisons of time-averaged pressure coefficients of models

性关联.

根据矩形截面模型的对称性,图 3 给出了 0.5*H* 高度处模型上半部分的测点风压系数结果,由图 3 可见:

1)无论是平均风压系数还是脉动风压系数,模型在迎风面(测点 1~11)的大小与分布趋势基本一致,差异体现在侧面(测点 11~31)及背风面(测点 31~41).M4 作为标准方柱(*D*/*B*=1.0),在侧面和背风面的平均风压系数与脉动风压系数均显著高于 M1~M3.

2)在平均风压系数方面,M1~M3 在侧面大小相近,差异出现在下游(测点 25~31)及背风面,平均风压系数在下游开始下降,在背风面趋于稳定,大小关系为 M3>M2>M1,与厚宽比变化一致.在脉动风压系数方面,M1~M3 的风压系数稳定在 0~0.2 之间,不同于 M2、M3,M1 的风压系数在下游测点 22 附近开始迅速提高,该位置的脉动风压系数变化与平均风压系数的变化趋势基本同步,在后缘附近(测点 27、28)取得极值后开始下降,变化较为复杂,可以推断 M1 在测点 22 附近发生了分离再附,导致风压作用机制发生改变,相关性大幅降低.



(a)平均风压系数　　(b)脉动风压系数

图 3　各模型表面风压系数对比

Fig.3　Comparisons of surface wind pressure coefficients of models

2.2　脉动风压相关性

在时域中,用相关性来描述脉动风压的不均匀性,两测点 *i*、*j* 的相关系数公式为:

$$\mathrm{Cor}_{ij}=\sigma_{ij}/\left(\sigma_i\times\sigma_j\right) \tag{6}$$

式中:σ_{ij}为测点 *i*、*j* 脉动风压的协方差;σ_i和σ_j分别为测点 *i*、*j* 的脉动风压标准差.

通过数值仿真模拟获取模型 4 个立面 0.5*H* 高度处的测点风压,均以测点 *P* 为参考点,对比分析同一立面其余测点与参考点 *P* 的相关系数随距离的变化规律,结果如图 4 所示.

由图 4 可见:随着厚宽比的增大,迎风面风压相

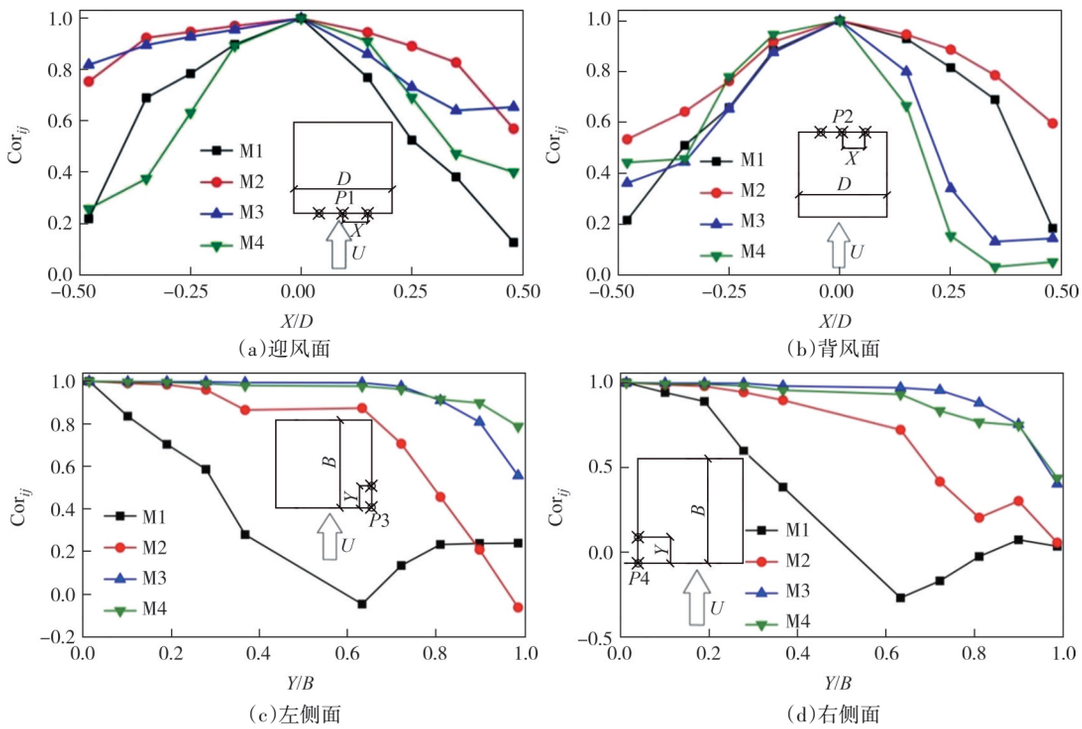


图4 不同立面的脉动风压水平相关系数

Fig.4 Horizontal correlation coefficients of fluctuating wind pressure for different facades

关性逐渐减弱,M2、M3的相关系数保持在0.8左右,体现出极强的相关性.相比之下,背风面由于受到尾涡作用,对称相关性较迎风面有所下降,4种模型的相关系数趋势也更为复杂,无明显规律可循.在侧面,随着厚宽比的变化,模型风压相关性的差异愈发显著.M3、M4作为较大厚宽比模型,侧面脉动风压相关系数接近1.0,在后缘(Y/B>0.8)虽有所下降,仍能保持高于0.5. M2的相关性趋势起初与M3、M4保持一致,在Y/B=0.6附近开始由0.8迅速下降,至尾缘(Y/B=1.0)基本为0.而M1作为最小厚宽比模型,侧面风压相关性明显弱于M2、M3,相关系数随参考点距离下降趋势也最为显著,还出现了负相关系数,在左侧面Y/B=0.6附近(对应图3测点22位置)达到谷底后又开始上升,右侧面相关系数的发展趋势与左侧面基本一致,最终都稳定在0.2左右.

根据文献[31-32],通过风压时程p_i、p_j乘积中的尖峰可以体现出瞬时风压的较强相关性.因此,选择右侧面上测点1、5和6这三个典型测点(图5),并给出4种模型下的风压系数时程(图6)及其乘积时程(图7).

由图6可知,随着模型厚宽比的增大,测点5、6的风压系数时程曲线由M1时的分离且异相逐渐过渡到M3、M4的基本重合,并且在M3、M4这类较大厚宽比模型中,测点1、5、6的风压时程曲线形状类似,

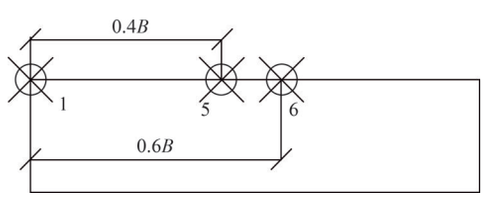


图5 模型测点示意图

Fig.5 Sketch of points for model

均呈现出正弦曲线的趋势.再结合风压系数乘积时程(图7),M2的测点1和测点5、6的相关性较强,乘积时程在t=4.15 s和4.25 s附近出现尖峰,M3和M4的乘积时程更是趋于重合,尖峰位置也比M2出现更早,相比之下,M1中测点1和测点6的风压时程呈反相位特征,表现为负相关性质,对应了该位置的负相关系数(图4),而测点1和测点5相位差异相对较小,同时测点1、5风压乘积时程的幅值远远高于其他模型,表明测点6为M1的转捩点.图中,$C_{pi}(t)$表示测点风压时程,而σ_i则是对应测点脉动风压的标准差.

2.3 流场机理

为更好地分析气动性能及脉动风压相关性,图8给出了4种模型的时均流线图,背景云图为平均风压系数等值线,由图8可见:

1)整体来看,厚宽比的变化并未改变模型的流场形态,4种模型均在迎风面前缘生成剪切层而在背风面生成一对尺度相等、涡旋方向相反的涡结构,因此

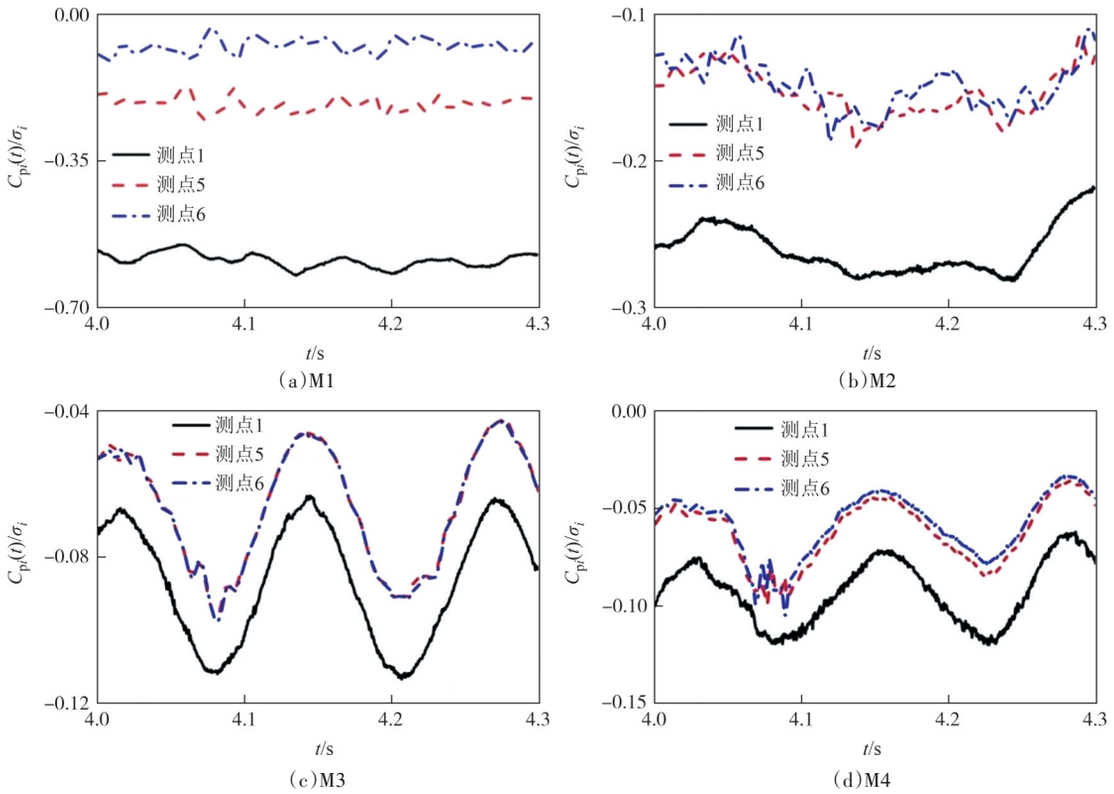


图 6　模型测点风压系数时程

Fig.6　Time history of wind pressure coefficient at the point of the model

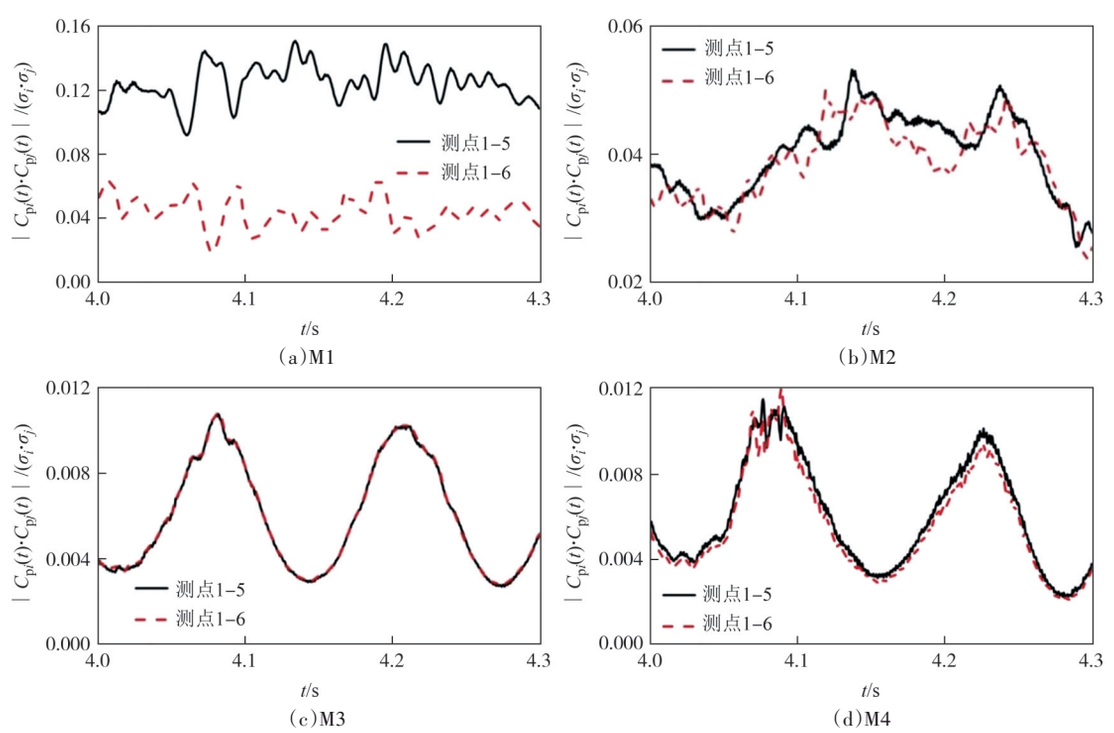


图 7　模型测点风压系数乘积时程

Fig.7　Time history of wind pressure coefficient product at the point of the model

模型的平均风压系数变化趋势基本一致[图3(a)],结合风压系数图还可以看出,差异主要体现在侧面及背风面.作为标准方柱,M4的背风面尾涡尺度明显大于M1~M3,且更加贴近背风面.从M4到M1,厚宽比的降低导致尾涡尺度及尾涡核心间距缩小,而背风面尾涡是平均风压的主要贡献者,因此模型的平

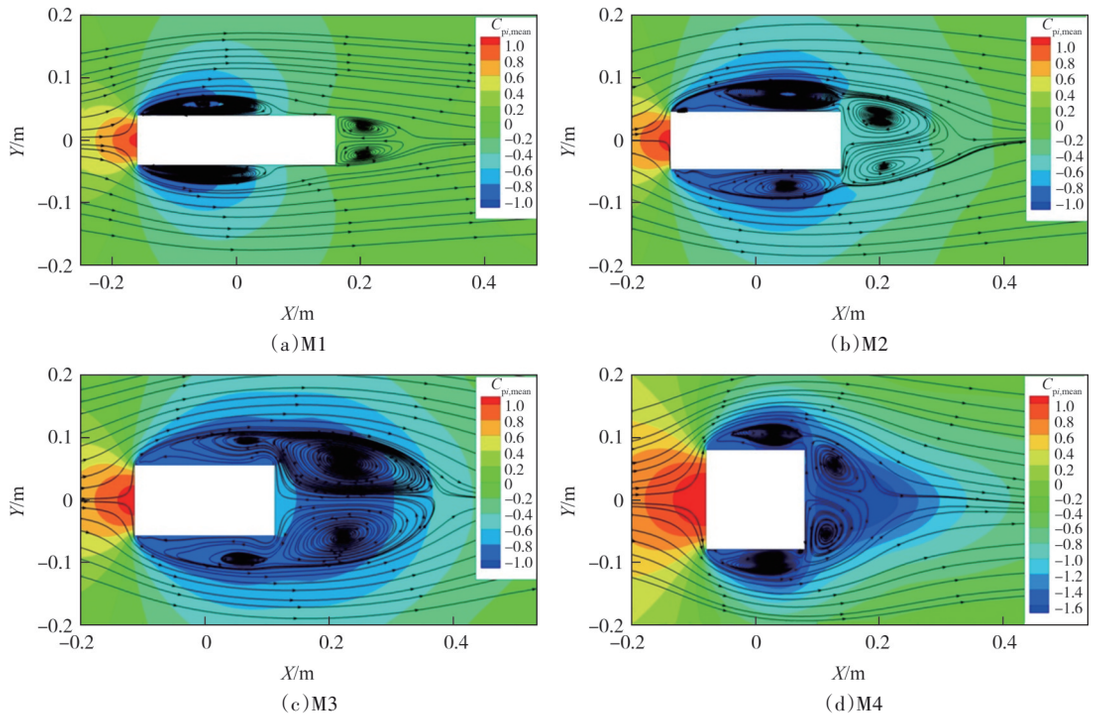


图 8 模型周边时均流场图(z=1/2H)

Fig.8 Comparisons of time-averaged streamlines around models(z=1/2H)

均风压差异在背风面体现得尤为突出,也对应了小厚宽比模型的平均阻力系数较低的情况(表 1).但同时,当来流风速固定时,涡脱频率主要受尾涡间距的影响,过小的尾涡间距在降低平均阻力的同时,也会增强其相互作用,导致涡脱频率升高.

2)剪切层的流动分离再附对模型表面风压脉动有显著影响,并进一步影响脉动风压的空间相关性.作为最小厚宽比模型,M1 侧面生成的分离泡再附发生于约 0.6B 位置处,其平均风压系数与脉动风压系数也在该位置发生突变(图 3).与 M1 相比,M2~M4 模型侧面的风压变化相对较小.M3、M4 侧面整体处于分离泡作用区域,风压作用机制相同,因此其侧面测点的风压相关性显著强于小厚宽比的模型[图 4(c)(d)].

3 动力学模态分解

3.1 DMD 方法

通过数值模拟得到 N 个时刻的流场快照信息,即$[x_1,x_2,\cdots,x_N]$,其中第 i 个时刻的流场快照即为列向量 $\boldsymbol{x}_i$,任意两个快照间的时间间隔为 Δt,根据 Koopman[33]算子理论假设,流场 $\boldsymbol{x}_i$ 和流场 $\boldsymbol{x}_{i+1}$ 存在如下关系,即:

$$\boldsymbol{x}_{i+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{A}$ 为高维流场的系统矩阵,能够反映系统的动态特征.因此构建快照 $\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_{N-1}]$ 和 $\boldsymbol{Y}=[x_2,x_3,\cdots,x_N]$,可得:

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X} \tag{8}$$

当确定了矩阵 $\boldsymbol{A}$ 或者获得了该矩阵的特征值和特征向量,就可获悉该系统的主要特征和演变规律,而 DMD 的核心就是对上述快照进行处理,提取出系统主导的特征值和主要模态.

对矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行奇异值分解:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{S}\boldsymbol{V}^{*} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{S}$ 为包含 r 个奇异值组成的对角矩阵;$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 为酉矩阵,见式(10)、式(11).

$$\boldsymbol{U}^{*}\times\boldsymbol{U}=\boldsymbol{I} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{V}^{*}\times\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I} \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{U}^{*}$、$\boldsymbol{V}^{*}$分别为 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 的复共轭转置矩阵.将式(9)代入 $\boldsymbol{Y}$=$\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}$,得:

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{Y}\boldsymbol{V}\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{U}^{*} \tag{12}$$

求得 $\boldsymbol{A}$ 的特征值与特征向量即可对目标流场进行动态模态分解,但由于此时 $\boldsymbol{A}$ 矩阵维度较高,直接求解计算量很大,因此可以提供相似矩阵 $\check{\boldsymbol{A}}$ 来代替高维矩阵 $\boldsymbol{A}$.通过 $\check{\boldsymbol{A}}$ 的特征值和特征向量来近似估计 $\boldsymbol{A}$,达到简化运算的目的.结合上式,可得相似矩阵 $\check{\boldsymbol{A}}$:

$$\check{\boldsymbol{A}} = \boldsymbol{U}^{*}\boldsymbol{A}\boldsymbol{U} = \boldsymbol{U}^{*}\boldsymbol{Y}\boldsymbol{V}\boldsymbol{S}^{-1} \tag{13}$$

记的第 j 个特征值为 μ_j,特征向量为 $\boldsymbol{A}_j$,第 j 阶 DMD 模态为:

$$\boldsymbol{\Phi}_j = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Lambda}_j \tag{14}$$

各阶 DMD 模态的流动增长(衰减)率 g_j 和频率 f_j 为:

$$g_j = \mathrm{Real}(\lg\mu_j)/\Delta t \tag{15}$$

$$f_j = \mathrm{Imag}(\lg\mu_j)/(2\pi\Delta t) \tag{16}$$

任意时刻流场可表示为:

$$\boldsymbol{x}_i = \boldsymbol{\Phi}_j\boldsymbol{\Lambda}^{i-1}\alpha = \sum_{j=1}^{r}\boldsymbol{\Phi}_j\,(\mu_j)^{i-1}\alpha_j \tag{17}$$

式中:α_i 为第 i 个模态的振幅,代表了该模态对初始快照 x_1 的贡献.因此,流场快照序列为:

$$\boldsymbol{X} = \left[x_1, x_2, \cdots, x_{N-1}\right] = \left[\boldsymbol{\Phi}_1, \boldsymbol{\Phi}_2, \cdots, \boldsymbol{\Phi}_r\right]\cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & \\ & \alpha_2 & & \\ & & \cdots & \\ & & & \alpha_r \end{bmatrix}\cdot \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 & \cdots & \mu_r^{N-2} \\ 1 & \mu_2 & \cdots & \mu_r^{N-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \mu_r & \cdots & \mu_r^{N-2} \end{bmatrix} \tag{18}$$

3.2　计算结果与分析

以 M1 为例,选择 3.0~3.4 s 范围内流场升力系数时程,如图 9 所示,选择截面高度 H_1=0.5H 即 2D,得到 81 个流场快照,其中 Δt=0.005 s.对所提取的流场快照进行模态分解,并按能量占比大小排序,选择的模态数量及能量占比如图 10 所示.可见 4 种不同厚宽比模型中,大部分能量均被前 4 阶模态占据,因此下文将提取前 4 阶模态用于流场分析.

各阶模态的幅值与频率关系如图 11 所示.在 4 种模型中,1 阶模态在振幅上均远高于其他模态,且频率保持为 0,基本不随流场变化,为静态模态.M2 的 2~4 阶模态均为共轭模态,振幅相等且频率相反,而 M1、M3 和 M4 中,2 阶模态为单一模态且频率为 0.

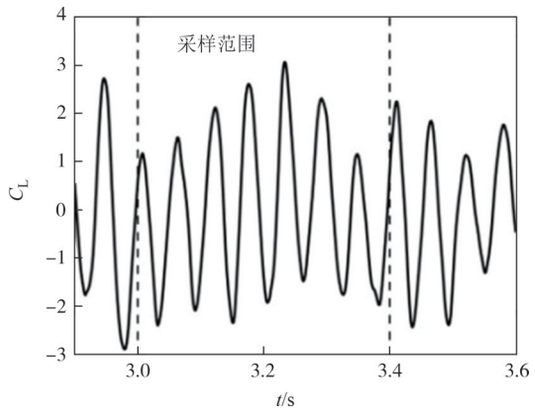


图 9　升力系数时程(M1)

Fig.9　Time history of lift coefficient (M1)

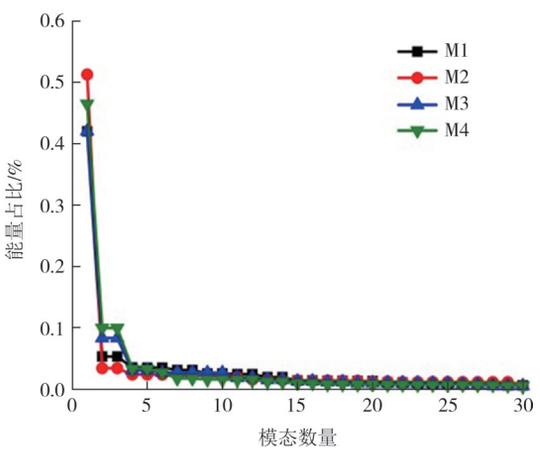
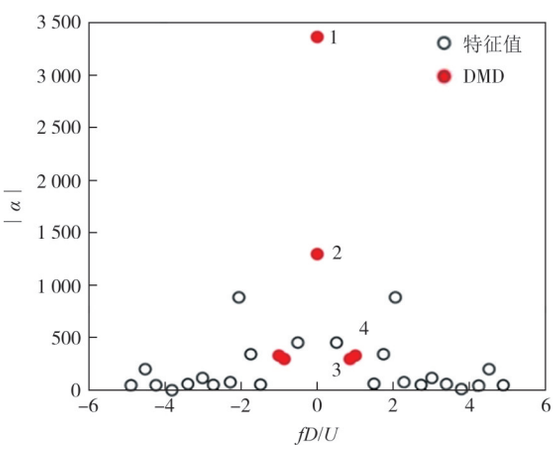


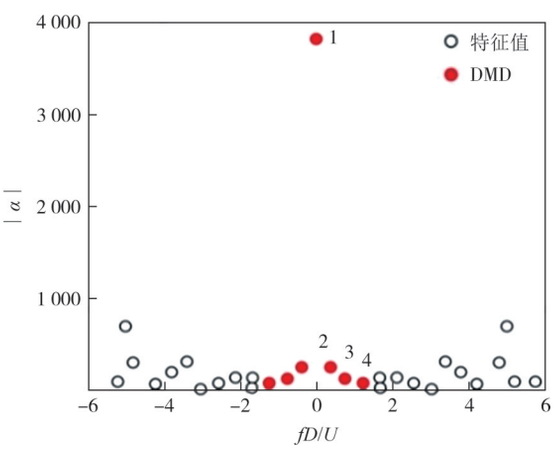
图 10　不同模态能量占比

Fig.10　Energy proportion for different modes

结合 4 种模型的模态特征值分布情况(图 12),可见选择的 30 阶模态大部分接近单位圆,但仅有 1 阶模态(静态模态)在单位圆上.提取的共轭模态均为不稳定模态,因此特征值位于单位圆外.M1、M3 和 M4 的第 2 阶模态为漂移模态,虚部为 0,体现了流场均值随时间的变化情况,因此虽然位于单位圆内部,但频率也为 0.



(a)M1



(b)M2

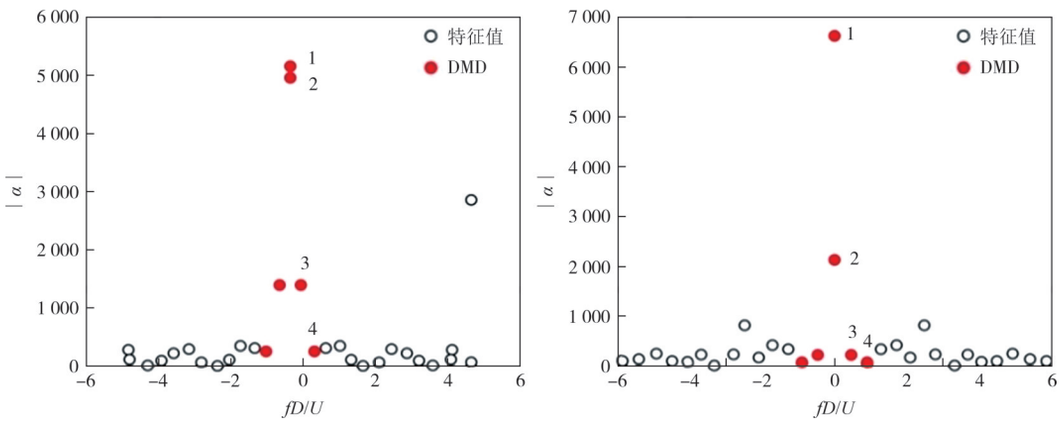


图 11 DMD 模态振幅与折减频率的关系

Fig.11 The relationship between the amplitude of DMD mode and the reduced frequency

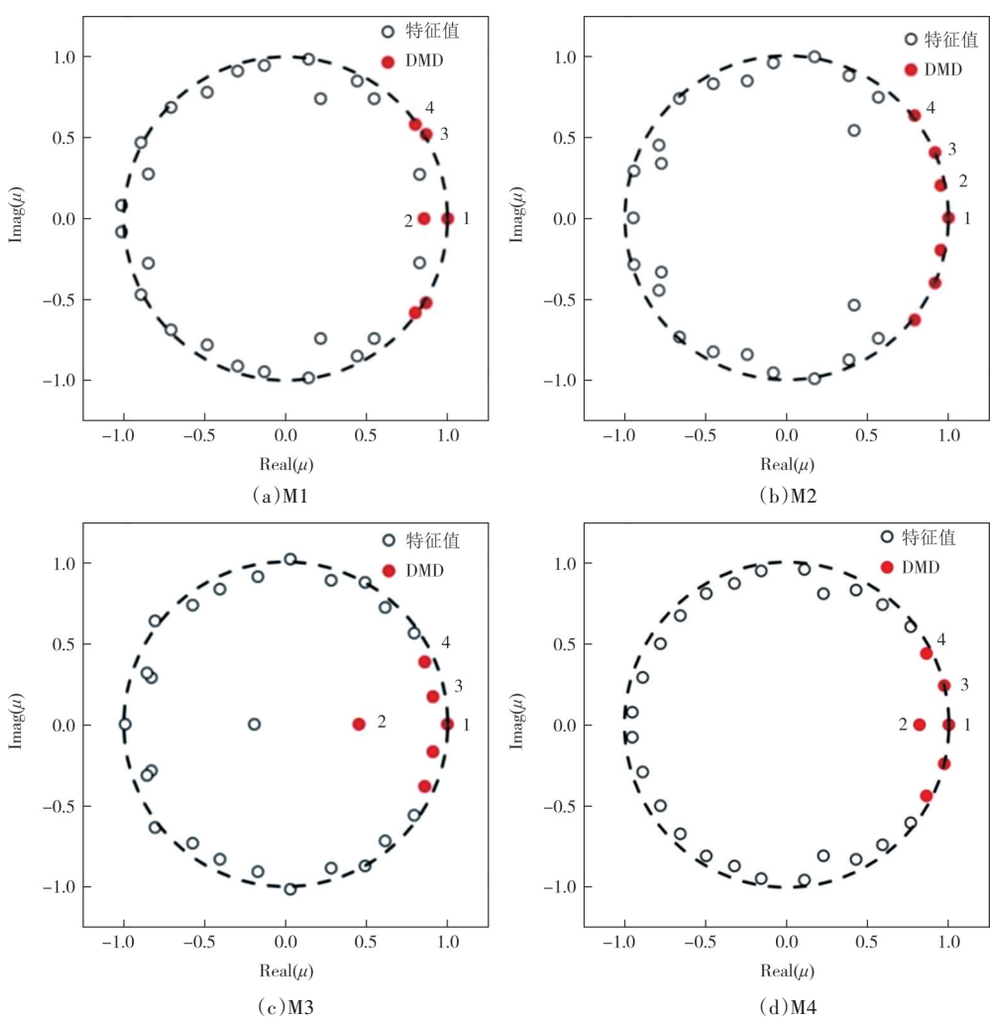
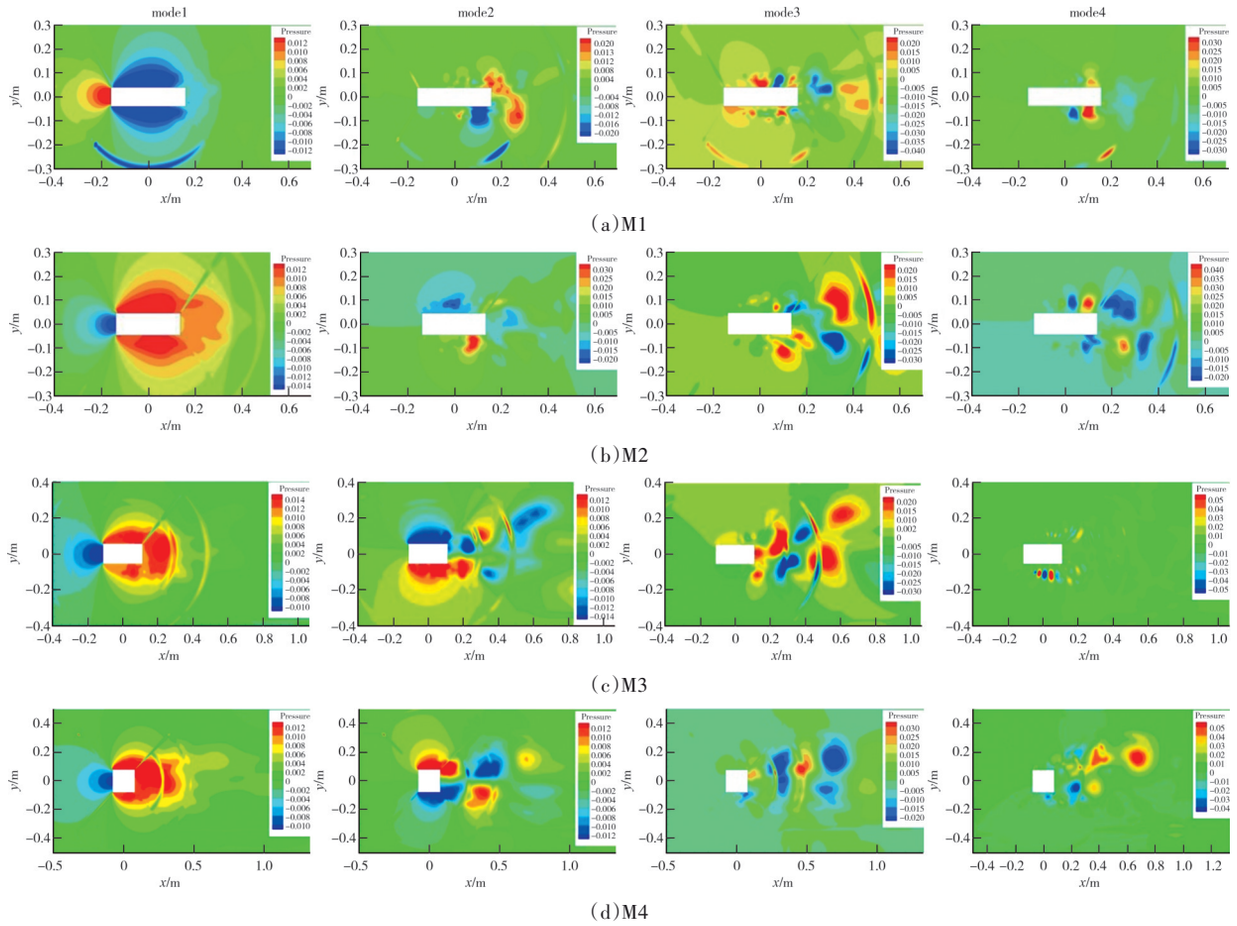


图 12 DMD 模态特征值分布

Fig.12 Eigenvalue distribution of DMD modes

图 13 展示了 DMD 方法提取的 M1~M4 的前 4 阶模态的风压云图.1 阶模态为静态模态,反映风压的平均流场,大体呈现对称态势;2、3、4 阶模态反映出旋涡脱落现象.从整体来看,随着模态阶数的增加,模型周边旋涡的尺度也在逐渐降低.随着厚宽比的变化,同阶模态的风压云图也有所不同,M3、M4 模型的 2 阶模态云图体现出明显的反对称特征,结合模态振幅(图 11),可以看出较大厚宽比模型(M3、M4)

的1、2阶模态能量明显高于较小厚宽比模型(M1、M2),而到了4阶模态,M3、M4模型旋涡尺度迅速减小,而M1、M2模型的2~4阶模态云图相似,变化较为平缓.



(a)M1

(b)M2

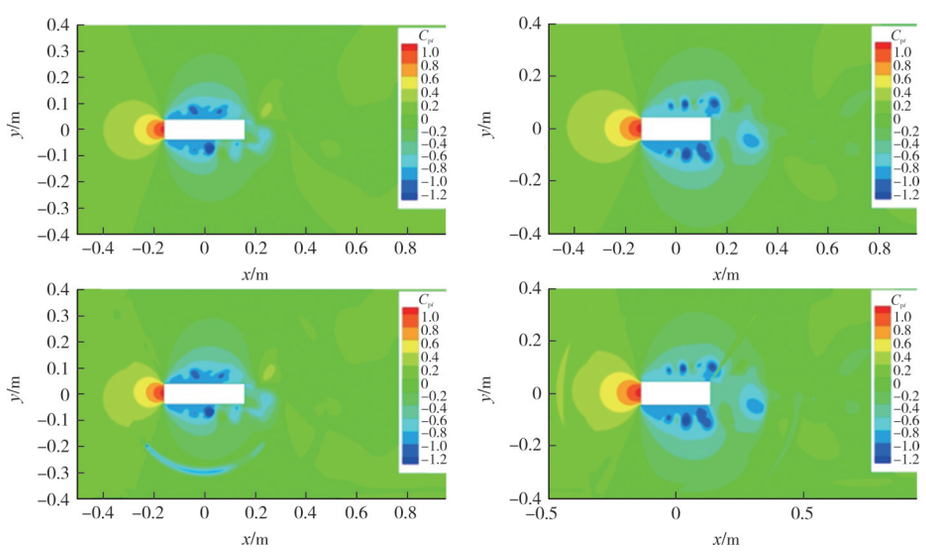
(c)M3

(d)M4

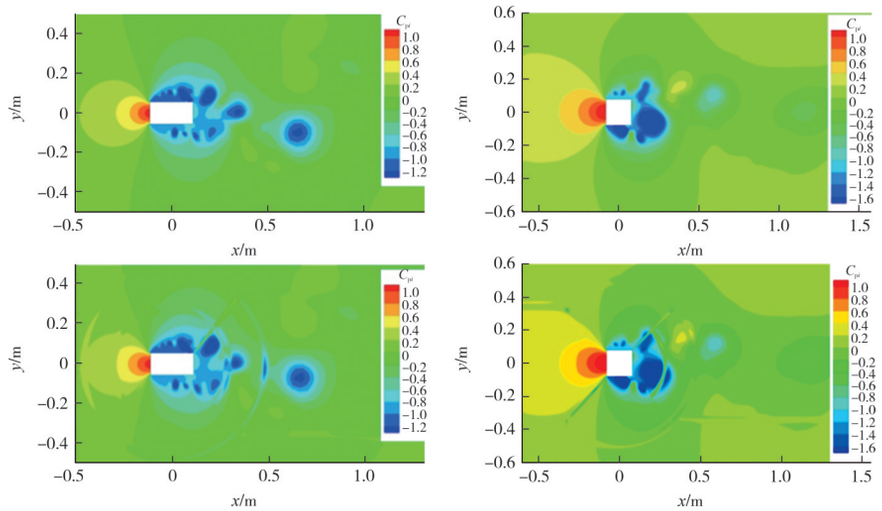
图 13　DMD提取的前4阶模态的风压云图(z=1/2H)

Fig.13　The pressure contour plot of the first four modes extracted by DMD (z=1/2H)

为进一步观察DMD方法对流场特征的提取并验证其准确性,选择t=3 s时刻,使用提取的模态进行流场重构(图14),并给出了同一时刻内重构流场的流线图,如图15所示.通过对比发现,同一模型的原始流场与重构流场的风压云图和流线图均无显著差异,证明了重构流场模型能够捕捉到流场的大部分



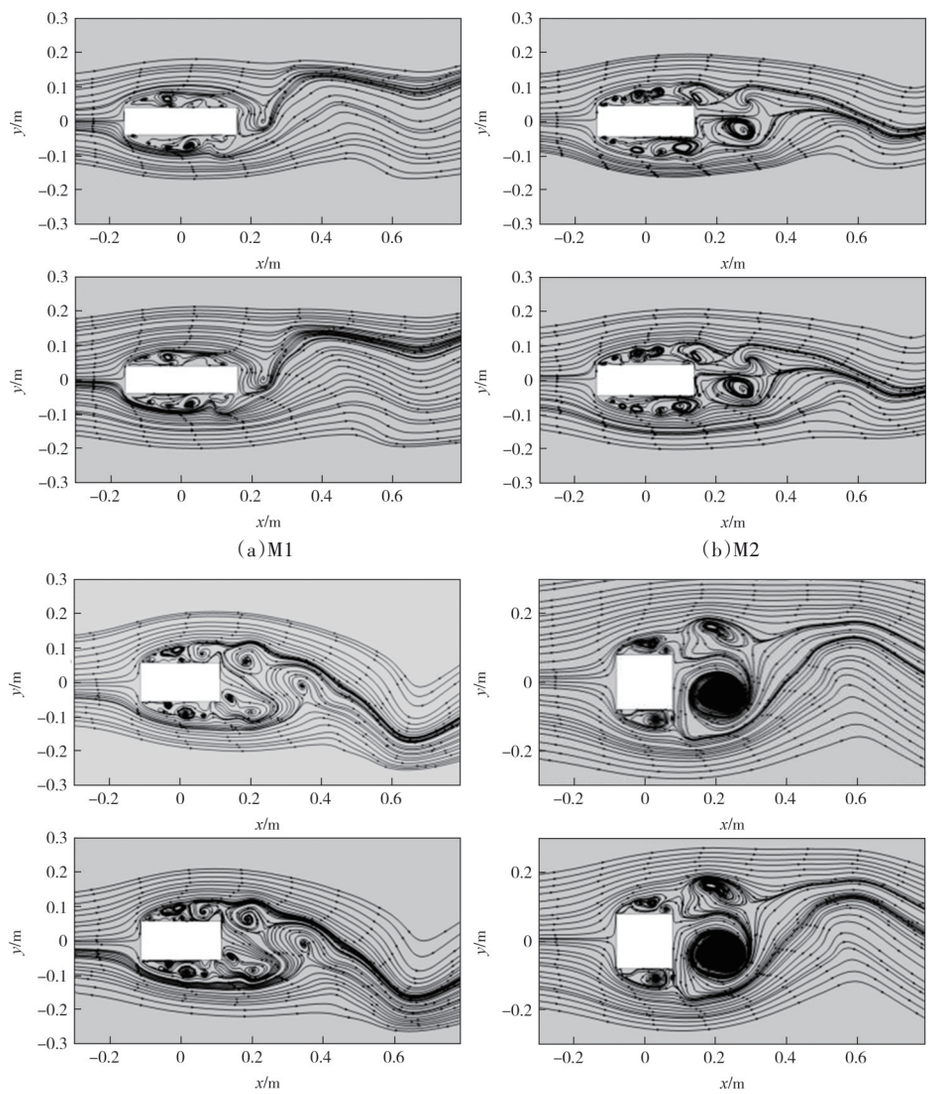
(a)M1　　(b)M2



(c)M3 (d)M4

图 14 原始流场(上)与重构流场(下)的对比(t=3 s)

Fig.14 Comparison of original flow field (upper) and reconstructed flow field (down) at t=3 s



(a)M1 (b)M2

(c)M3 (d)M4

图 15 原始流线(上)与重构流线(下)的对比(t=3 s)

Fig.15 Comparison of original streamlines (upper) and reconstructed streamlines (down) at t=3 s

微观和宏观特征,准确重构出矩形截面的表面风压与流场,且重构精度不受厚宽比变化的影响.4种模型的流线图中,M2、M3在侧面及尾流区分布着大量小尺度涡,尾涡脱落更加复杂,能量分散,导致气动力脉动强度降低,在同一来流下涡脱频率显著低于M1和M4.

4 结 论

通过大涡模拟方法,研究了不同厚宽比矩形截面表面风荷载,并结合DMD方法,建立降阶模型,从低维模态空间角度研究了小厚宽比矩形截面的风压场,得到如下结论:

1)气动特性方面,$C_{\mathrm{D,mean}}$随厚宽比的增大而升高,$C_{\mathrm{L,rms}}$未呈现明显的单调变化趋势;而旋涡脱落频率方面,最大斯特劳哈尔数(Sr)出现在最小厚宽比M1上,随着厚宽比先减小后增大.标准方柱的平均与脉动风压系数在侧面及背风面上远高于小厚宽比模型,但风压的变化趋势不受厚宽比的影响.

2)均匀来流作用下,脉动风压及其相关性在迎风前端并无明显差别.侧面上,小厚宽比模型的分离剪切层再附会显著影响其风压作用机制,导致风压变化梯度明显,在转捩点发生二次分离,使得水平与竖向脉动风压相关性比起标准方柱大大降低,甚至出现负相关现象.

3)DMD方法能够准确捕捉到非定常流场的流动特征,明晰各阶模态流场存在的差异,较之传统时均、瞬态流场分析手段有了一定的突破.对于小厚宽比模型,DMD提取前4阶模态已足以高度还原原始风压场.1阶模态为近似平均流场的静态流场,不同于M1、M2和M4,M3模型除1阶静态模态外均为共轭模态,无漂移模态出现.较大厚宽比模型(M3、M4)在各阶模态的能量贡献存在梯度,而小厚宽比模型(M1、M2)除静态模态外,各阶模态云图差异并不显著.

参考文献

[1] 丁洁民,吴宏磊,赵昕. 我国高度250 m以上超高层建筑结构现状与分析进展[J]. 建筑结构学报, 2014,35(3):1-7.
DING J M, WU H L, ZHAO X. Current situation and discussion of structural design for super high-rise buildings above 250 m in China[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 1-7. (in Chinese)

[2] 闫渤文, 魏民, 鄢乔, 等. 高层建筑形状及布局对城市街区行人风环境影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(11): 61-71.
YAN B W, WEI M, YAN Q, et al. Study on effects of tall building shape and layout on pedestrian-level wind environment in the urban area[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(11): 61-71. (in Chinese)

[3] 邵远航, 崔会敏, 刘庆宽, 等. 某超高层建筑表面风压分布研究[J]. 工程力学, 2021, 38(增刊1): 26-30.
SHAO Y H, CUI H M, LIU Q K, et al. Experimental research on wind tunnel pressure measurement of a super high-rise building[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(Sup.1): 26-30. (in Chinese)

[4] 庄翔, 郑毅敏, 郑晓芬, 等. 不同圆角率下矩形高层建筑风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊1): 1-8.
ZHUANG X, ZHENG Y M, ZHENG X F, et al. Wind load characteristics of rectangular high-rise buildings with various rounded corner ratios[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Sup.1): 1-8. (in Chinese)

[5] CHEN K Y, MO Z W, HANG J. The recirculation flow after different cross-section shaped high-rise buildings with applications to ventilation assessment and drag parameterization [J]. Building Simulation, 2024, 17(4): 509-524.

[6] 沈国辉, 钱涛, 罗蒋皓, 等. 不同长宽比矩形截面高层建筑的风荷载研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(3): 77-83.
SHEN G H, QIAN T, LUO J H, et al. Study of wind loading on rectangular high-rise buildings with various length-to-width ratios[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(3): 77-83. (in Chinese)

[7] JIANG G Y, YOSHIE R. Side ratio effects on flow and pollutant dispersion around an isolated high-rise building in a turbulent boundary layer [J]. Building and Environment, 2020, 180: 107078.

[8] GAO G Z, ZHU L D, LI J W, et al. Modelling nonlinear aerodynamic damping during transverse aerodynamic instabilities for slender rectangular prisms with typical side ratios[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 197: 104064.

[9] ZENG J D, ZHANG Z T, LI M S, et al. Across-wind fluctuating aerodynamic force acting on large aspect-ratio rectangular prisms [J]. Journal of Fluids and Structures, 2023, 121: 103935.

[10] 韩振, 李波, 甄伟, 等. 宽厚比为5的超高层建筑风荷载特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(2): 196-202.
HAN Z, LI B, ZHEN W, et al. Wind load characteristics of the super-tall buildings with a side ratio of 5[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(2): 196-202. (in Chinese)

[11] ZHOU Y, KIJEWSKI T, KAREEM A. Aerodynamic loads on tall buildings: interactive database [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(3): 394-404.

[12] 王新荣, 顾明, 全涌. 圆角处理的断面宽厚比为2:1的二维矩形柱体气动力系数的雷诺数效应研究[J]. 工程力学, 2016,

33(1): 64-71.
WANG X R, GU M, QUAN Y. Experimental study of Reynolds number effects on aerodynamic forces for 2∶1 rectangular prisms with various rounded corners[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 64-71.(in Chinese)

[13] 王新荣, 顾明, 全涌. 二维矩形柱体表面风压频域特性的雷诺数效应研究[J]. 工程力学, 2016, 33(7): 100-107.
WANG X R, GU M, QUAN Y. Reynolds number effects on frequency domain characteristics of wind pressures on 2d rectangular prisms[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(7): 100-107.(in Chinese)

[14] 于春放, 靖洪淼, 张记涛, 等. 不同雷诺数下4∶1圆角矩形柱气动力特性及流场数值模拟研究[J]. 工程力学, 2024, 41(增刊1): 332-338.
YU C F, JING H M, ZHANG J T, et al. Les study on aerodynamic characteristics and flow field of a 4∶1 rectangular cylinder with different Reynolds numbers[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(Sup.1): 332-338.(in Chinese)

[15] 刘志文, 周帅, 陈政清. 宽高比为4的矩形断面涡激振动响应数值模拟[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 153-156.
LIU Z W, ZHOU S, CHEN Z Q. Numerical simulation of vortex induced vibration of rectangular cylinder with aspect ratio 4[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 153-156.(in Chinese)

[16] MATSUMOTO M, YAGI T, TAMAKI H, et al. Vortex-induced vibration and its effect on torsional flutter instability in the case of *B*/*D*=4 rectangular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/7): 971-983.

[17] ROWLEY C W, MEZIĆ I, BAGHERI S, et al. Spectral analysis of nonlinear flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 641: 115-127.

[18] ZHANG Z, WANG J Z, HUANG R F, et al. Data-driven turbulence model for unsteady cavitating flow[J]. Physics of Fluids, 2023, 35: 015134.

[19] SCHMID P J. Dynamic mode decomposition and its variants[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2022, 54: 225-254.

[20] LI C Y, TSE T K T, HU G. Dynamic Mode Decomposition on pressure flow field analysis: flow field reconstruction, accuracy, and practical significance[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 205: 104278.

[21] XU L C, LIU Z X, LI X J, et al. An improved mode time coefficient for dynamic mode decomposition[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(10): 105106.

[22] 寇家庆, 张伟伟. 动力学模态分解及其在流体力学中的应用[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(2): 163-179.
KOU J Q, ZHANG W W. Dynamic mode decomposition and its applications in fluid dynamics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(2): 163-179.(in Chinese)

[23] 冯帅, 谢壮宁. 基于动力学模态分解的大跨度平屋盖风压场研究[J]. 工程力学, 2022, 39(7): 109-119.
FENG S, XIE Z N. Research on wind pressure field of large-span flat roof based on dynamic mode decomposition[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(7): 109-119.(in Chinese)

[24] 洪泽宇, 董国朝, 韩艳, 等. 基于DMD方法的矩形断面涡振模态分析[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(4): 48-58.
HONG Z Y, DONG G C, HAN Y, et al. Modal analysis of vortex-induced vibration in rectangular section based on DMD method[J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(4): 48-58.(in Chinese)

[25] 刘士杰, 张珍, 刘庆宽. 基于动力学模态分解的方柱绕流非定常流场分析[J]. 工程力学, 2024, 41(增刊1): 326-331.
LIU S J, ZHANG Z, LIU Q K. Unsteady flow field analysis for flow around square cylinder upon dynamic mode decomposition[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(Sup.1): 326-331.(in Chinese)

[26] 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.(in Chinese)

[27] 郑德乾, 祝瑜哲, 刘帅永, 等. 上游切角对串列双方柱气动性能影响研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 216-223.
ZHENG D Q, ZHU Y Z, LIU S Y, 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.(in Chinese)

[28] NAKAGUCHI H, HASHIMOTO K, MUTO S. An experimental study on aerodynamic drag of rectangular cylinders[J]. The Journal of the Japan Society of Aeronautical Engineering, 1968, 16(168): 1-5.

[29] ÁLVAREZ A J, NIETO F, NGUYEN D T, et al. 3D LES simulations of a static and vertically free-to-oscillate 4∶1 rectangular cylinder: effects of the grid resolution[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 192: 31-44.

[30] GUISSART A, ANDRIANNE T, DIMITRIADIS G, et al. Numerical and experimental study of the flow around a 4∶1 rectangular cylinder at moderate Reynolds number[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 189: 289-303.

[31] 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 X, DING J M, ZOU Y F, et al. Effect of rounded corners on wind load characteristics of rectangular tall buildings[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 151-162.(in Chinese)

[32] SAATHOFF P J, MELBOURNE W H. Effects of free-stream turbulence on surface pressure fluctuations in a separation bubble[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 337: 1-24.

[33] KOOPMAN B O. Hamiltonian systems and transformation in Hilbert space[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1931, 17(5): 315-318.