

高层建筑表面脉动风压场动力学模态分解^{*}

张建国, 颜 涛

(厦门大学建筑与土木工程学院 厦门, 361005)

摘要 脉动风压场作为高维度的复杂随机动力系统,如何提取其中的本质特征是结构抗风精细化研究的关键问题。首先,基于沿海地区某高层建筑刚性模型同步测压风洞试验数据,采用动力学模态分解(dynamic mode decomposition,简称DMD)算法对脉动风压场作用机理进行研究,揭示其空间分布特征与时间演化规律;其次,通过构造Hankel矩阵增加数据空间维度,解决了标准DMD算法在分析风洞数据中的挖掘不充分问题;然后,对2种常见的DMD模态排序原则进行对比,得到基于 I 值的模态排序准则,去除了大量的瞬时模态,有效识别出流场的主导结构;最后,对高层建筑的3个表面脉动风压场进行重构研究,发现DMD算法可使用少部分模态对复杂的随机系统进行线性表达,从而达到流场降阶的效果。结果表明:Hankel-DMD算法分解出高层建筑表面风压场的前几阶模态,可有效解释脉动风压的分布机理;重构风场时,采用前10%的模态数量即可控制误差在1%以内。

关键词 高层建筑;脉动风压场;动力学模态分解;风洞试验

中图分类号 TU312;TH113

0 引 言

随着社会经济的高速发展,高层建筑正朝着高耸化、轻质化的方向发展。高层建筑的柔度较大,导致结构的风荷载效应日益显著,且风荷载成为高层建筑设计中的控制性荷载^[1-2]。高层建筑表面的脉动风压场具有非定常空气动力特性,其中包括复杂的来流分离和再附等过程。由于建筑表面的脉动风压场为随机、高维的复杂动力系统,导致难以从大量风洞试验结果中直接发现其内在特征^[3-4]。因此,亟需寻找一种合适方法,挖掘随机风压场的内在规律,以指导工程实践。

近年来,计算机科学技术快速发展,对海量试验数据的处理能力明显提升,各行业开始应用数据驱动方法对海量庞杂的大数据进行深入挖掘,实现数据本质特征提取和模式发现,有效提高了对大数据的分析能力^[5-6]。为进一步明确复杂流场流动的动力学机制,相关学者提出了流场降阶模型(reduced-order model,简称ROM)作为复杂流场的特征提取方法,ROM的原理是以实验记录的大数据为样本,通过模态分解、截断等手段将混沌、高维的复杂系统转换成简单、低维的线性系统,从而直观展现流场的时空演化特性。目前,主流的流场降阶模

态分解方法可分为本征正交分解(proper orthogonal decomposition,简称POD)与DMD算法^[7-8]。POD算法将流场分解成正交的空间模态,按照模态能量的大小进行排序,在风场分析与重构上已有成熟的研究^[9-10]。然而,该算法仅可计算二阶的统计量特征,缺乏分析流场时空演化特性的能力。

Schmid^[11]基于Koopman分解提出了DMD算法,假设整个系统为线性动态过程,通过分析流场特征获得表征流场主要信息的低阶模态及相应特征值。该算法简单、易实现,且无需控制方程即可精确捕捉复杂随机系统的时空演化特性^[12],被广泛应用于诸多领域。寇家庆等^[13]针对DMD在流体力学中的详细应用展开了讨论,并给出了DMD算法的未来发展方向。Hua等^[14]采用DMD算法分析股票市场的时间序列,以此来预测经济循环的周期。Ducoin等^[15]采用DMD算法对数值模拟直接得到的SD700翼段进行转捩尾流分析。谢海润等^[16]基于POD与DMD算法分别分析了尾流激振现象瞬态过程,认为DMD算法更适合研究流场中脉动结构的特点。Li等^[17]采用数值模拟的方法将DMD算法应用于圆柱绕流的风工程问题,以此检验算法的准确性和实用性。

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0803303-02);建筑安全与环境国家重点实验室暨国家建筑工程技术中心开放课题资助项目(BSBE2017-02)

收稿日期:2023-10-04;修回日期:2023-12-15

在结构表面随机风压场的分解研究方面,冯帅等^[18]对比了 POD 与 DMD 在重构大跨度平屋盖结构随机风压场上的差异,并发现 DMD 算法更能有效揭示随机风压场时空演化特性。DMD 算法可在有限维度内分析流场的动态演化特征,从理论层面系统探究非线性脉动风场,揭示其内在物理机理,进而为结构抗风设计提供有效指导。然而,目前基于 DMD 算法在高层建筑表面风压方面的研究较少。此外,标准 DMD 算法在分析风场时仍存在以下问题。首先,风洞试验往往测点数量有限,且每个测点上的时程数据远大于测点数,难以提取稳定特征。其次,DMD 算法分解的模态数量过多,目前仍没有统一的排序方法,给研究者提取流场主要特征带来较大困扰。

综上,本研究以某栋实际高层建筑表面同步测压风洞试验数据为例,首先,采用 Hankel-DMD 方法对原始数据的空间维度进行补充,针对上述测点有限且难以提取稳定特征的问题提出解决方法;然后,对 DMD 算法分解的前 3 阶模态进行分析,揭示其中时空演化特征以及所对应的物理意义;最后,对比不同模态挑选准则的重构效果,对比分析重构的脉动风压场与原始风场的时空相关性。

1 DMD 算法

1.1 标准 DMD

高层建筑表面的脉动风压场是由不同频率成分组成的高维非线性系统,通过 DMD 算法可获得系统的时空演化特性。本小节简要介绍 DMD 算法的基本原理。

从风洞试验中获得 N 时刻的脉动风压场上所有测点的快照,并组装成数据矩阵,即

$$\mathbf{X}_1 = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{N-1}] \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_2 = [\mathbf{x}_2 \quad \mathbf{x}_3 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_N] \quad (2)$$

其中: $\mathbf{x}_i$ 为第 i 时刻所有测压点的风压系数列向量。

假设在较短的采样时间内,系统按照线性规律(用矩阵 $\mathbf{A}$ 表示)演化,则第 i 时刻与第 $i+1$ 时刻,系统存在如下关系,即

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{A} \mathbf{X}_1 \quad (3)$$

根据线性动力系统知识,矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值可提供模态的增长率及频率信息, $\mathbf{A}$ 的特征向量可提供模态信息。由于矩阵 $\mathbf{A}$ 的维度过大,直接构造出 $\mathbf{A}$ 过于困难,因此可通过奇异值分解方法构造出矩阵 $\mathbf{A}$ 的相似矩阵。

对数据矩阵进行分解,即

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^* \quad (4)$$

其中: $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$ 为正交矩阵,满足 $\mathbf{U} \mathbf{U}^* = \mathbf{I}$, $\mathbf{V} \mathbf{V}^* = \mathbf{I}$; $\mathbf{S}$ 为对角矩阵。

联立式(3)(4),可得 $\mathbf{A}$ 的相似矩阵,即

$$\mathbf{A} \approx \tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{U}^* \mathbf{A} \mathbf{U} = \mathbf{U}^* \mathbf{X}_2 \mathbf{V} \mathbf{S}^{-1} \quad (5)$$

通过对矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 进行特征值求解,进而利用相似关系获得 $\mathbf{A}$ 的特征值和特征向量,即

$$\tilde{\mathbf{A}} \mathbf{W} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{W} \quad (6)$$

其中: $\mathbf{W}$ 为 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的特征向量矩阵; $\mathbf{\Lambda}$ 为对应的特征值对角矩阵;对角线元素 λ_i 为特征值。

根据相似矩阵的关系,矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征向量可表示为

$$\Phi = \mathbf{U} \mathbf{W} \quad (7)$$

将特征值 λ_i 写成对数形式,其实部反映某个模态的增长率,虚部反映模态对应的频率信息。通常将第 j 个 DMD 模态的增长率与频率定义为

$$g_j = \text{Re}(\lg \lambda_j) / dt \quad (8)$$

$$f_j = \text{Im}(\lg \lambda_j) / dt \quad (9)$$

其中: dt 为采样时间间隔。

定义对角矩阵 α 为模态振幅矩阵,对角线元素为第 j 个模态对初始快照 $\mathbf{X}_1$ 的贡献,对于标准的 DMD 算法,DMD 模态按照振幅的大小排序,称为 α 准则,模态振幅矩阵的计算式为

$$\alpha = \Phi^{-1} \mathbf{X}_1 \quad (10)$$

脉动风压场的数据矩阵被分解成空间模态与幅值及时间演化规律相乘的形式,即

$$\mathbf{X} \approx [\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \cdots \quad \Phi_N] \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1 & \cdots & \lambda_1^{N-1} \\ 1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_2^{N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \lambda_N & \cdots & \lambda_N^{N-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:最右侧的 Vandermonde 矩阵记为 $\mathbf{V}_{\text{and}}$,反映了模态随时间演化特征。

经 DMD 分解后,原始高维度非线性的试验数据可写为空间模态、模态振幅与模态时间演化乘积的线性叠加,实现了对复杂流场的降阶。

1.2 Hankel-DMD

1.1 节所述过程即为标准 DMD 算法,当将该算法用于时间维度远大于空间维度的高维线性动力系

统时,会出现难以捕捉系统时空特征的现象,从而导致DMD算法失效。该现象由Tu等^[19]在使用标准DMD算法捕捉正弦波时所发现,当时间维度较长时,DMD不能返回共轭对复特征值,而是返回一个实特征值,导致标准DMD算法无法捕获正弦波的周期振荡。此后,Hankel-DMD技术被提出并用于丰富原始数据的观测值,通过嵌入时间延迟将 s 个时间维度的观测值添加在Hankel矩阵中,补充空间维度的信息,以此增加DMD算法对于非定常数据的捕捉能力。

构造Hankel矩阵为

$$X_{\text{Hankle}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{N+1-s} \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{N+2-s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_s & x_{s+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

以式(12)对观测数据进行分解,即可提升标准DMD算法的表现,以及获取时空特征的能力。

1.3 DMD模态排序

标准DMD方法在使用过程中,所得模态数量过多,导致研究者难以发现随机场运动的主模态。与POD算法可根据能量值排序不同,DMD算法的模态排序并无统一的方法。流场降阶的原则是选用尽量少的模态来捕捉最多的流动特点。在标准DMD算法框架下,常使用模态的振幅作为对模态进行排序的依据。

振幅 α_j 仅代表模态 j 对初始时刻流场的贡献,并未考虑全时间域的演化,可能挑选出振幅较大但在时间演化过程中迅速衰减的模态。Kou等^[20]综合几种方法的优缺点,提出了一种更为普适性的DMD模态排序方法。该方法兼顾初始振幅大小以及模态随时间的演化特性,对非线性不稳定流动具有较好的捕捉效果。经DMD算法分解后,流场可统一表示为

$$x_i = \sum_{j=1}^N b_j \lambda_j^{i-1} \Phi_j \quad (13)$$

其中: b_j 为第 j 阶归一化模态的时间系数。

改进模态挑选算法的核心思想是将归一化的时间系数在全时域内积分,以积分结果的大小对模态进行综合排序。第 j 阶模态对全流场的影响表示为

$$I_j = \sum_{i=1}^N |b_j \lambda_j^{i-1}| \|\Phi_j\|_F^2 dt \quad (14)$$

其中: $\|\cdot\|_F$ 为弗罗贝尼乌斯范数。

改进模态挑选算法以 I 值大小排序,称为 I 准则。排序大小选择前 M 阶模态进行截断,重构后任

意时刻的流场可表示为

$$x_i = \sum_{j=1}^M b_j \lambda_j^{i-1} \Phi_j \quad (15)$$

2 高层建筑模型风洞试验

2.1 试验简介

东南沿海某广场建筑群包括左右两栋对称塔楼、酒店塔楼、酒店裙房和商用裙房共5部分,其中左右塔楼的总高度均为194 m。实际建筑的效果图如图1所示。



图1 高层建筑效果图

Fig.1 Rendering of the tall building

风洞试验模型如图2所示,该模型为刚性模型,采用有机玻璃板制成,具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,且不出现明显振动现象,可保证压力测量的精度。考虑到实际结构和周边建筑情况,选择模型的几何缩尺比为1:200。模型与实物在外形上保持几何相似。

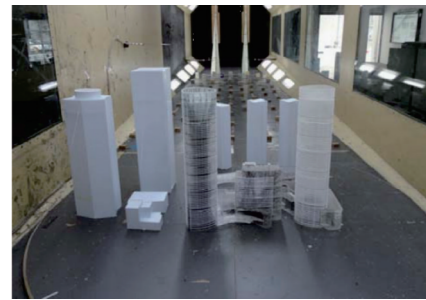


图2 风洞试验模型

Fig.2 Wind tunnel test model

试验在同济大学TJ-2大气边界层风洞中进行。流场模拟按照《建筑结构荷载规范》^[21]中的A类地貌进行模拟。平均风速和湍流度剖面如图3所示,横纵坐标单位均为比值(量纲一的量),由图可见风洞试验较好地模拟了A类地貌。试验参考点高度为1.2 m处,对应真实建筑高度为240 m。参考风速为10 m/s,测压信号频率为312.5 Hz。

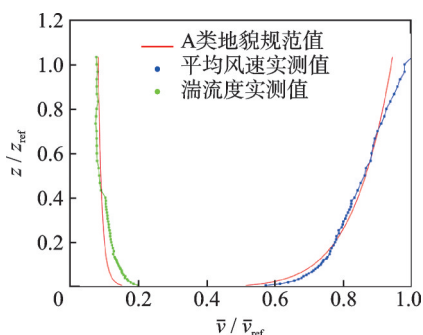


图3 平均风速和湍流度剖面

Fig.3 Average wind speed and turbulence profile

进一步对高层建筑模型塔楼的表面风洞测压结果进行分析。塔楼乙的平面可依次分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ面,每面宽度均为59 m,高度为194 m,风洞试验方位角如图4所示。

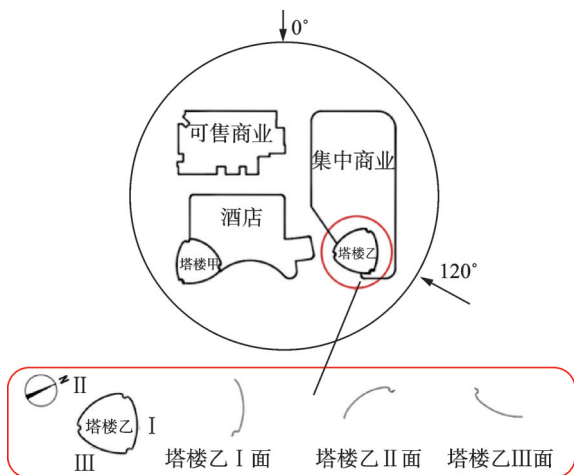


图4 风洞试验方位角

Fig.4 Azimuth angles of wind tunnel test

2.2 数据处理

在风工程研究中,物体表面的压力通常用压力系数(量纲一的量)表示为

$$C_{p,i}^k = \frac{P_i^k - P_s}{P_T - P_s} \quad (16)$$

其中: $C_{p,i}^k$ 为 k 点 i 时刻的压力系数; P_i^k 为 k 点 i 时刻的风压; P_T 、 P_s 分别为1.2 m高度处参考点的总压和静压。

将压力系数进行统计平均,获得各测点的平均风压系数。测得风压系数时程,减去平均风压系数,即可得到脉动风压系数时程。本研究使用所测得的脉动风压系数时程组装成数据矩阵,按照式(1)~(12)对表面风压的动力学模态进行分解。

3 脉动风压场分解

在高层建筑所在城市,图4所示的120°风向角

为主导方向,本研究选取该风向角的试验数据进行风压场分析。

3.1 风压场分析

平均风压场反映风荷载的平均分布特性,流场平均风压系数如图5所示,展示了塔楼乙在120°风向角下Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ面的平均风压场分布。由图5可以看出,塔楼乙迎风面(Ⅰ面)正面以风压力为主,往两侧逐渐变小。正风压的增加符合梯度风的变化规律,迎风面驻点发生在约0.75H高度处,最大值为0.71。驻点下方形成一股强烈的下切气流,导致近地面能量集中。Ⅰ面与Ⅱ面、Ⅲ面交界处的建筑形状凹入,导致了气流的分离与再附,使得Ⅱ、Ⅲ面以风吸力为主,靠近来流上侧边缘的风吸力较大,最大值分别约为-0.8、-1.09。

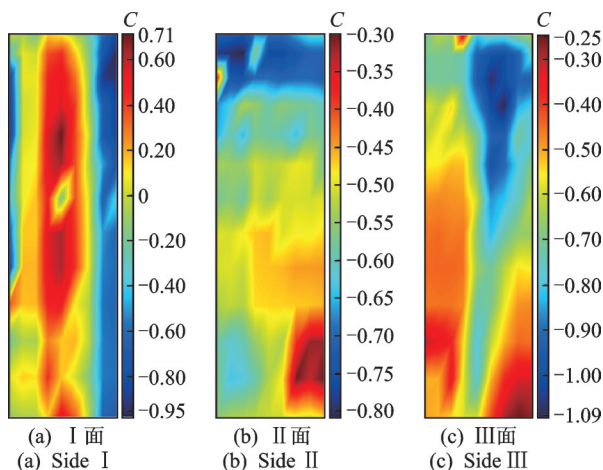


图5 流场平均风压系数

Fig.5 Average wind pressure coefficients of flow field

脉动风的均方差可反映脉动风的相对强度,流场均方差系数如图6所示,展示了塔楼乙在120°风向角下Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ立面的脉动风压场分布。由图6可知,脉动风在Ⅰ、Ⅲ面的交界处波动较为强烈,最大均方差达到0.28。从迎风面Ⅰ的均方差分布可知,Ⅰ面的脉动风能量主要集中在左侧边缘处,且有明显的竖向分布特征,这是由于入射角度偏左所导致。入射气流绕过钝体表面时,在两面分离的区域形成自由剪切层,剪切层在两面交界处交替滚动形成集中旋涡,导致能量聚集。Ⅱ面整体的均方差值较小,其结果与尾流在Ⅰ、Ⅱ面交界凹角处的削弱有关。Ⅱ面能量分布沿高度变化而变化,在近地面处形成能量聚集,这与建筑密集导致的狭管效应有关。Ⅲ面的能量在右侧交界处聚集,沿着左侧逐渐减小,反映了锥形涡的作用特征。

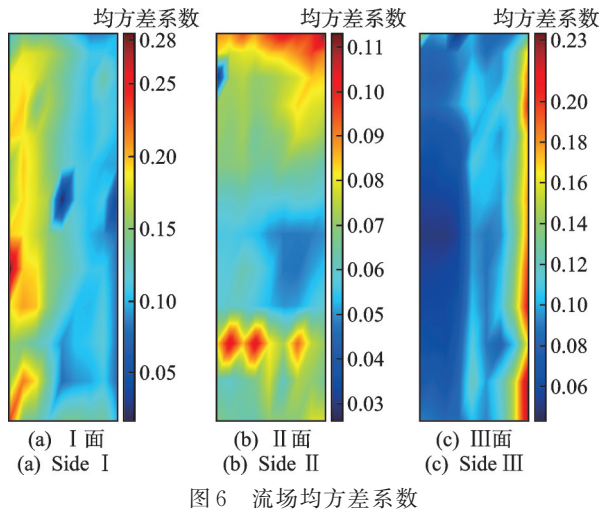


图6 流场均方差系数

3.2 Hankel-DMD 分解结果

采用DMD分别对I立面、II立面、III立面的脉动风压时程进行分解,每面流场数据组成的矩阵维度为 $117 \times 1\,500$ 。117个测点数组成了系统的空间维度,1 500个时间快照数组成了时间维度,未经嵌入前时间维度要远大于空间维度。

判断DMD分解的有效性需要将分解后的特征值实部和虚部投影到复平面上,与复平面上的单位圆相比较,存在以下3种情况:①特征值在单位圆内部时,证明模态为快速衰减模态,随着时间的演化,该阶模态的贡献将迅速减小。②特征值在单位圆上时(模态接近1),证明模态为准稳态,单位圆附近的模态时间系数具有简谐振动的准周期特性,模态发展较为稳定。模态对流场的贡献随着时间的演化而缓慢增加或缓慢减小,这主要取决于模态的增长率大小。③特征值在单位圆外时,证明模态为增长态,随着时间的演化,该阶模态的贡献逐渐增加,一般少见于以试验数据作为快照的动力系统中。

有效的DMD算法可提取复杂流场的稳定结构,此时大多数特征值应位于单位圆附近。I面嵌入前后的特征值分布如图7所示。在图7(a)中,未进行数据维度嵌入前,使用标准DMD分解的特征值主要分布在单位圆之内,这表明多数提取模态随着时间演化会逐渐衰减,高维度非线性系统无法分解成多个稳定的线性动力系统叠加的形式。如图7(b)所示,引入Hankel矩阵嵌入观测数据后,当嵌入维度 $s=7$,且进行DMD分解时,发现特征值分布逐渐靠近单位圆。这说明当补充一定量空间维度的数据后,DMD算法的有效性得到提升,但仍未满足数据的充分性要求。如图7(c)所示,

当嵌入维度继续增强至 $s=14$,空间维度补充至1 638($117 \times 14 = 1\,638$)时,已多于时间快照数量1 486($1\,500 - 14 = 1\,486$)。多数特征值已分布在单位圆上,仅有少数衰减模态零散分布于单位圆内,证明了增强后的DMD算法成功挖掘出高维脉动风压场的隐藏信息。

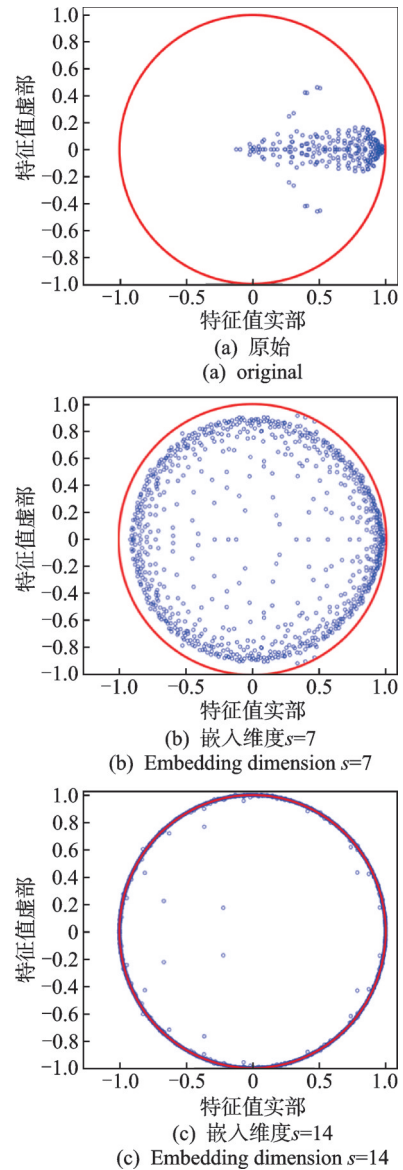


图7 I面嵌入前后的特征值分布

Fig.7 Eigenvalue distribution before and after side I embedding

3.3 模态挑选算法对比

采用I准则模态挑选算法对 120° 风向角下高层建筑脉动风压场进行模态挑选,并以标准DMD算法作为对照。标准DMD算法以振幅大小排序,I准则模态挑选算法则基于全域时间系数的积分I排

序。I 面前 10 阶模态振幅及稳定性如表 1 所示,给出了 I 面流场使用以 α 准则与 I 准则的前 10 对模态振幅(量纲一的量)与模态稳定性对比。

表 1 I 面前 10 阶模态振幅及稳定性
Tab.1 Amplitude and stability of the first 10 modes of the side I

模态 序号	I 准则			α 准则		
	振幅	$ \lambda_i $ 特征值	稳定性	振幅	$ \lambda_i $ 特征值	稳定性
1	1.13	1.004	稳态	84.48	0.561	衰减
2	0.51	1.003	稳态	73.22	0.159	衰减
3	1.81	0.999	稳态	54.80	0.582	衰减
4	0.48	0.999	稳态	8.06	0.971	稳态
5	2.02	0.999	稳态	7.04	0.825	衰减
6	0.79	1.003	稳态	5.75	0.907	衰减
7	0.66	0.999	稳态	4.57	0.925	衰减
8	1.11	0.998	稳态	3.94	0.988	稳态
9	2.98	0.999	稳态	3.80	0.996	稳态
10	1.81	0.999	稳态	3.27	0.951	稳态

由表可知,在按振幅大小排序的标准 DMD 算法的前 10 阶模态中,出现大量位于单位圆内的衰减模态,影响了流场重构的效率以及研究者对于流场气动力主要特征的物理理解。I 面流场的前 3 对模态为典型的瞬时模态,虽然幅值达到 84.48、73.22、54.80,但仅表达了模态对初始时刻流场的贡献。瞬时模态对全时间域流动的贡献不大,按振幅大小排序的模态筛选方法不能充分提取稳定的流场相干结构。 I 准则筛选的 3 面流场前 10 对模态均为位于单位圆上的稳定模态,模态特征值的模近似为 1.0,且随时间变化而缓慢增加或减小。该模态形成了准周期的流动结构,在全时间域内占比显著,可反映出高层建筑脉动风压场的主要气动力特征。

3.4 DMD 模态空间特征分析

前 3 阶模态空间分布如图 8 所示,给出了 I 准则排序后 I、II、III 面流场前 3 个模态的空间模态分布(模态以共轭出现)。图中数值为模态的实部,数值大小仅反映当前模态下空间各点压力的相对大小,数值正负号无具体意义。使用 DMD 算法对脉动风压场时间序列分析,解析出不同频率的运动模态,低频模态一般对应大尺度的空间流动特征,而高频率则一般对应小尺度的局部流动特征。

由图可知, I 面前 3 阶模态频率分别为 0.79、4.06、1.81 Hz,说明迎风面 I 面脉动风压场以低频模态作用为主。I 面 DMD 第 1 模态的作用轮

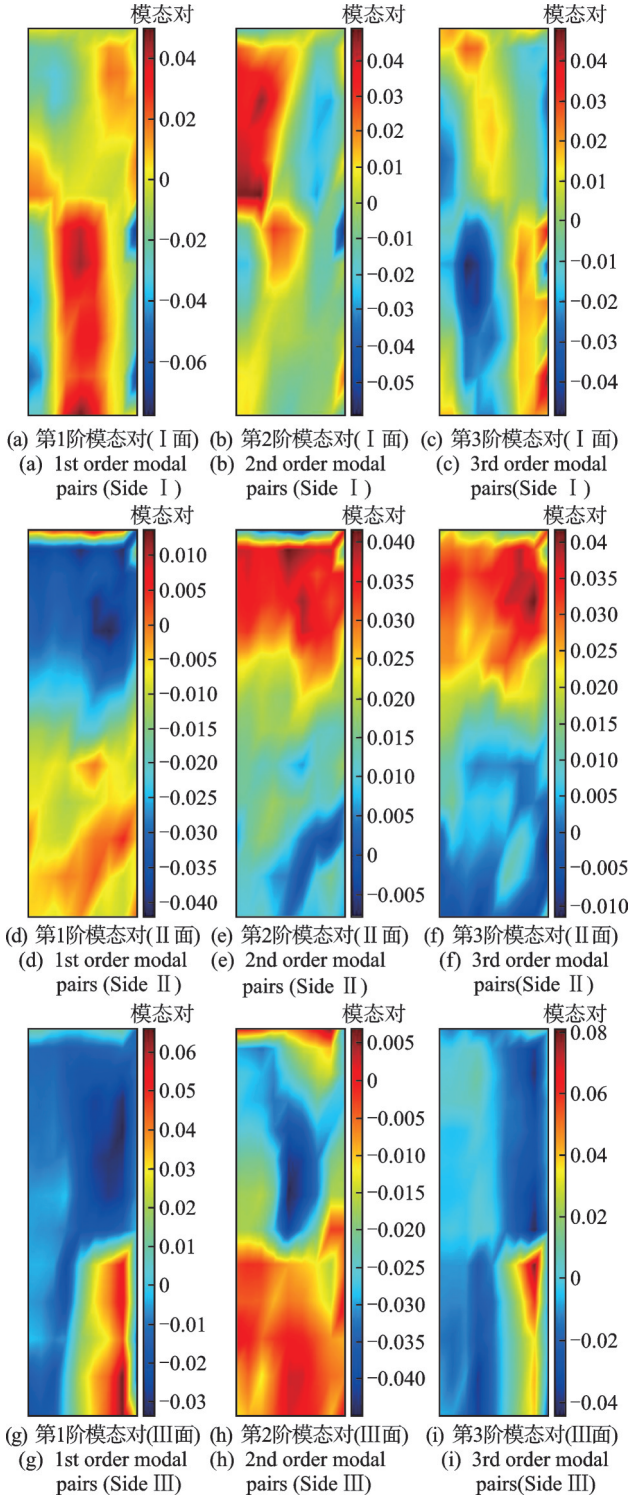


图 8 前 3 阶模态空间分布
Fig.8 Spatial distribution of the first 3 modes

廓与迎风面气流下沉、沿两侧分离的物理现象相吻合,第 2 阶 DMD 模态相较于第 1、第 3 模态频率较大,空间分布特征为小尺度的能量集中,对应了迎风面来流在左上侧建筑圆弧角发生分离,构成了迎风面上部脉动风压场的初始轮廓。I 面第 3 阶 DMD 模态对应迎风面下部的左右两侧脉动风相互交替,

以及气流穿越建筑物上部时脱落的尾流再附与迎风面之上的特征。

由图8(d)(e)(f)可知,Ⅱ面的前3个DMD模态较好地捕捉了脉动风场水平分层的特点,分别对应的频率为1.07、1.14、1.50 Hz。其中,DMD第1模态与第2模态呈现反对称模态,且频率基本接近,反映了尾流区域大尺度旋涡交替反复脱落的特征。DMD第1模态与第2模态在Ⅱ面顶部的空间分布与Ⅱ面均方值分布基本一致,DMD第3模态分布的极大值对应了Ⅱ面右上方的能量部分集中。

由图8(g)(h)(i)可知,Ⅲ面的前3对DMD模态频率分别为0.80、0.88、5.64 Hz,DMD第1模态与均方差图像在右下侧的分布情况相似。在DMD算法下,Ⅲ面的第1模态与Ⅰ面的第3模态较好地捕捉到高层建筑风场中锥形涡的主要空间分布特征。Ⅲ面第3阶模态作用主要集中在建筑物右下侧区域,且频率相较于前2阶模态较大,表现为建筑物尾流在Ⅲ面发生的小尺度旋涡脱落现象。

值得说明的是,基于风洞数据的DMD分解模态数目较多。前几阶模态虽是排序后对全时刻流场贡献最大的模态,但在全模态贡献中的占比并不显著。前几阶空间模态结构是对脉动风压场运动规律的提取,而无法直接从瞬态流场中体现,但这有助于理解高维度非线性系统背后的物理意义。

3.5 DMD算法时间特征分析

前3阶模态时间分布如图9所示,给出了3个立面流场DMD前3模态的归一化时间系数,DMD模态系数按照自身特定的频率呈现稳定的上下简谐振动。模态时间系数体现了模态随着时间演化的特征变化,模态增长率决定了模态随时间演化的增长与否则。Ⅰ面DMD模态前3个模态的增长率分别为-0.028、0.242、-0.288,第1、第3模态为准周期的衰减模态。流动前期对流场的贡献较大,随着时间的演化而逐渐减弱。其中,DMD第1模态的衰减速度要慢于第3模态,在全时间域内迎风面的运动主导模态仍是第1模态。Ⅰ面DMD第2模态的增长率大于零,为准周期的增长模态,在与Ⅲ面交界处的气流分离过程的气流涡中,模态能量不断发生消耗与补充。

同样地,Ⅱ面与Ⅲ面的DMD前3阶模态增长率分别为-0.608、-1.161、-0.247和0.009、-0.692、-0.213。Ⅱ面前3模态作用均随时间变化而减小,说明尾流区的流动脱落、再附现象随时间相对减

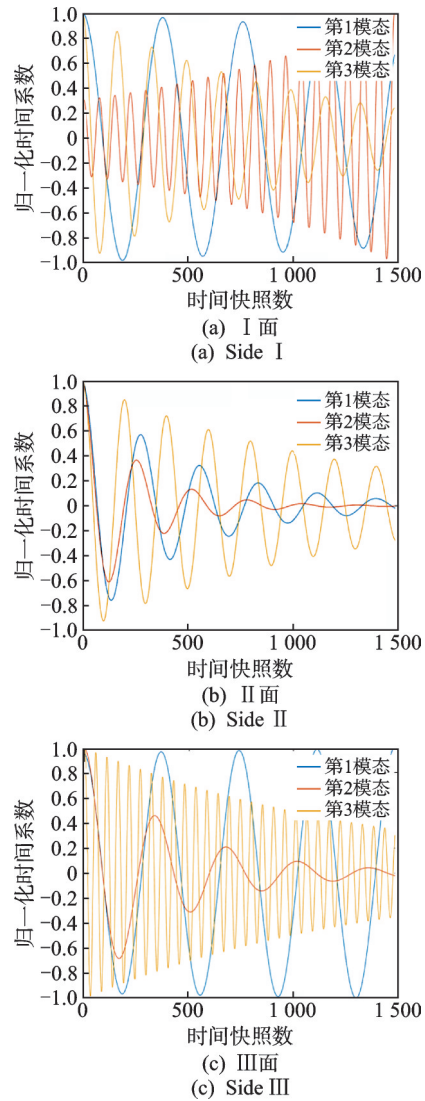


图9 前3阶模态时间分布

Fig.9 Time distribution of the first 3 modes

弱。Ⅲ面DMD第1模态具有较小的增长率,反映了流场的均匀特征。

4 脉动风压场重构

为验证DMD算法的流场降阶效果,对3面流场上共351个测点进行重构,重构模态数选择5%、10%。以测点原始脉动风压系数时程与重构脉动风压系数时程的均方误差形式检验重构准确度,即

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{P,i} - \hat{C}_{P,i})^2 \quad (17)$$

其中: N 为时间快照数; $C_{P,i}$ 为原信号的压力系数时程; $\hat{C}_{P,i}$ 为DMD重构信号的脉动风压系数时程。

DMD重构误差如图10所示,给出了2种挑选方法下前5%、10%模态重构时的流场误差。前5%模态重构时大多数测点重构误差小于0.04,当模态

数量增加至10%,测点重构误差下降。从测点位置上看, α 准则下I面的误差大于II面、III面,这说明 α 准则在迎风面筛选的模式中,存在诸多初始振幅较大、但对全时间影响较小的瞬时模式。以I准则排序的误差在0.01以内,整体上小于 α 准则排序的误差,这是因为I准则识别的模式均为流场稳定的主导模式。综上,流场重构结果验证了DMD算法能以少量模式数准确重构流场,可将高维的非线性系统转换成低维度的线性表达。

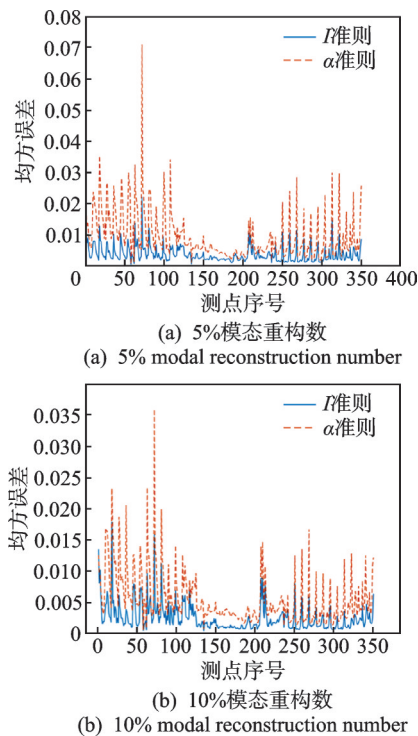


图10 DMD重构误差
Fig.10 DMD reconstruction error

5 结论

1) 风洞试验测压数据时间维度远大于空间维度,使用标准DMD算法易导致流场信息提取不充分,需要使用Hankel矩阵进行数据补充。当空间维度稍大于时间维度时,DMD算法方能保证有效性。

2) DMD算法分解出的前几阶模式,与来流在迎风面下沉、两面交界处分离等物理现象相吻合,可识别出锥形涡在高层建筑中的脉动特征,有助于解释建筑物脉动风压的形成原理。

3) 对于模式排序准则,相较于只考虑模式幅值的 α 准则,考虑时间演化信息的I准则在脉动风压场分析方面更具有优势。I准则挑选的模式为随时间稳定变化的主导模式,删除了大量瞬时模式,提高了

风场重构的效率。从重构误差看,采用前10%的模式数量重构的流场可实现流场降阶的目的,使非线性混沌系统获得稳定的线性演化表达。

参 考 文 献

- [1] HOLMES J D, PATON C, KERWIN R. Wind loading of structures[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 1-24.
- [2] 马文勇,黄铮汉,郑德乾,等.高层建筑顶部围挡结构风荷载试验研究[J].振动、测试与诊断,2022,42(5): 967-972.
MA Wenyong, HUANG Zhenghan, ZHENG Deqian, et al. Experimental study on wind loads on parapet wall for super high-rise buildings[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 967-972. (in Chinese)
- [3] KIM B, TSE K T, TAMURA Y. POD analysis for aerodynamic characteristics of tall linked buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 181: 126-140.
- [4] 卢春玲,巫敏,陈旭东,等.不同来流下超高层建筑流固耦合风效应特性研究[J].振动、测试与诊断,2025,45(5):991-1000.
LU Chunling, WU Min, CHEN Xudong, et al. Study on the characteristics of fluid-structure interaction wind effects in super high-rise buildings subject to various in-flow conditions[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(5): 991-1000. (in Chinese)
- [5] KUTZ J N, BRUNTON S L, BRUNTON B. W. Dynamic mode decomposition: data-driven modeling of complex systems[M]. Philadelphia, PA, United States: SIAM, 2016: 55-103.
- [6] 朱一凯,余哲帆,陈安妮,等.基于小波字典的风速数据重构的压缩感知方法[J].振动、测试与诊断,2024,44(4):684-689.
ZHU Yikai, YU Zhefan, CHEN Anni, et al. A wavelet dictionary-based compressive sensing method for reconstruction of wind speed data[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(4): 684-689. (in Chinese)
- [7] BELTRÁN V, CLAINCHE S L, VEGA J M. A data-driven ROM based on HODMD[C]//14th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2019). Cham: Springer International Publishing, 2020: 567-576.
- [8] 高梅,曹小群,刘柏年,等.基于动力学模式分解的200 hPa急流模式特征分析[J].大气科学学报,2020,

- 43(5): 824-833.
- GAO Mei, CAO Xiaoqun, LIU Bainian, et al. Analysis of the modes of 200 hPa jet based on dynamic mode decomposition[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(5): 824-833.(in Chinese)
- [9] 李方慧,倪振华,沈世钊. POD方法在双坡屋盖风压场预测中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 68-73, 79.
- LI Fanghui, NI Zhenhua, SHEN Shizhao. Application of pod to prediction of wind pressure fields of pitched roof[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 68-73, 79.(in Chinese)
- [10] 单文姗,杨庆山,田村幸雄,等. 基于POD方法的高层建筑表面脉动风压场分解与重构[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 47-57.
- SHAN Wenshan, YANG Qingshan, TAMURA Yukio, et al. Decomposition and reconstruction of fluctuating wind pressure fields on high-rise buildings based on POD method[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(5): 47-57.(in Chinese)
- [11] SCHMID P J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 656: 5-28.
- [12] SAITO A, KUNO T. Data-driven experimental modal analysis by dynamic mode decomposition[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 481: 115434.
- [13] 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 Jiaqing, ZHANG Weiwei. Dynamic mode decomposition and its applications in fluid dynamics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(2): 163-179.(in Chinese)
- [14] HUA J C, ROY S, MCCAULEY J L, et al. Using dynamic mode decomposition to extract cyclic behavior in the stock market[J]. Physica A-Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 448: 172-180.
- [15] DUCOIN A, LOISEAU J C, ROBINET J C. Numerical investigation of the interaction between laminar to turbulent transition and the wake of an airfoil[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2016, 57: 231-248.
- [16] 谢海润,吴亚东,欧阳华,等. 基于本征正交分解和动态模态分解的尾涡激振现象瞬态过程的模态分析[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(2): 176-185.
- XIE Hairun, WU Yadong, OUYANG Hua, et al. Modal analysis of wake induced vibration transient process based on POD and DMD[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(2): 176-185.(in Chinese)
- [17] LI C Y, TSE T K T, HU G. Dynamic mode decomposition on pressure flow field analysis: flow field reconstruction[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 205: 104278.
- [18] 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 Shuai, XIE Zhuangning. 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)
- [19] TU J H. Dynamic mode decomposition: theory and applications[D]. New Jersey: Princeton University, 2013.
- [20] KOU J Q, ZHANG W W. An improved criterion to select dominant modes from dynamic mode decomposition[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2017, 62: 109-129.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.



第一作者简介:张建国,男,1974年2月生,博士、副教授。主要研究方向为工程结构抗风。曾发表《高层建筑顺风向荷载气动导纳》(《建筑结构学报》2017年第38卷第10期)等论文。

E-mail: zjianguo@xmu.edu.cn