

用于串列海豹胡须柱尾迹流场分析的 降阶模型方法

袁咏祎^{1,2}, 朱剑月^{2,3}, 方存与^{2,3}, 杨志刚³

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 同济大学交通学院, 201804, 上海;
3. 同济大学汽车学院, 201804, 上海)

摘要: 针对高雷诺数下串列海豹胡须柱杆件周围流场的高维特性导致流动结构识别困难的问题, 采用谱本征正交分解(SPOD)和基于聚类分析(CROM)的降阶模型方法, 通过数值仿真对其尾迹流场进行降阶分析, 采用模态分解与流场重构得到简化流场, 识别其主要流动特征, 并与具有相同特征长度的串列圆柱以及串列椭圆柱杆件周围流场进行对比。结果表明: 串列圆柱和串列椭圆柱尾迹中均存在能量占比较高的卡门涡街拟序结构, 主导着尾迹流场的发展与输运; 串列海豹胡须柱工况中各杆件上、下鞍面形成反相涡脱落结构, 上、下游杆件尾迹内未出现大尺度拟序结构, 模态分解中未出现能量占比较高的相干结构, 涡脱落不规则, 涡旋波动强度减弱, 尾迹稳定性增强; 不同于串列圆柱的单一方向循环回路, 串列海豹胡须柱流场中形成了从主回路发散出的次级回路, 上、下游杆件之间涡脱落存在同相与反相的相互转换, 尾迹振荡得到有效抑制。该研究结果可为串列海豹胡须柱杆件应用于工程领域气动减阻和气动噪声控制提供参考。

关键词: 串列海豹胡须柱; 尾迹流场; 流动结构; 降阶模型; 流场重构

中图分类号: O353 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202511016 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0164-13

A Reduced-Order Modelling Approach for Wake Flow Field Analysis of Tandem Seal-Vibrissa-Shaped Cylinders

YUAN Yongyi^{1,2}, ZHU Jianyue^{2,3}, FANG Cunyu^{2,3}, YANG Zhigang³

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To address the difficulty in identifying flow structures caused by the high-dimensional characteristics of the flow field around tandem seal-vibrissa-shaped cylinders at high Reynolds numbers, a reduced-order modeling approach combining spectral proper orthogonal decomposition (SPOD) and cluster-based reduced-order modeling (CROM) is employed for reduced-order analysis of the wake flow field through numerical simulations. Modal decomposition and flow field reconstruction are performed to obtain simplified flow fields and identify dominant flow features, with comparisons made against flow fields around tandem circular cylinders and tandem

收稿日期: 2025-02-13。 作者简介: 袁咏祎(1999—), 女, 博士生; 朱剑月(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52232013, 51875411); 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室资助项目(23DZ2229029)。

网络出版时间: 2025-08-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250814.1527.002>

elliptical cylinders of identical characteristic lengths. Results demonstrate that both tandem circular and elliptical cylinder wakes exhibit high-energy Kármán vortex street coherent structures that dominate wake development and transport. In contrast, the tandem seal-vibrissa-shaped cylinders exhibit anti-phase vortex shedding structures formed on the upper and lower saddle surfaces of each cylinder. No large-scale coherent structures emerge in the wakes of upstream and downstream cylinders, and modal decomposition reveals no dominant high-energy coherent structures. The vortex shedding appears irregular, with weakened vortex fluctuation intensity and enhanced wake stability. Unlike the unidirectional circulation loop observed in tandem circular cylinders, the flow field around tandem seal-vibrissa-shaped cylinders develops secondary loops diverging from the primary circulation. The vortex shedding between upstream and downstream cylinders undergoes in-phase and anti-phase transitions, effectively suppressing wake oscillations. These findings provide insights for engineering applications of tandem seal-vibrissa-shaped cylinders in aerodynamic drag reduction and noise control.

Keywords: tandem seal-vibrissa-shaped cylinders; wake flow; flow structures; reduced-order modelling; flow reconstruction

串列圆柱杆件在高速列车受电弓、飞机起落架与斜拉桥拉索等工程领域被广泛应用。刘松等^[1]针对间距比(两圆柱中心距离 L 与圆柱直径 D 之比)为 1.5~5.0 的串列双圆柱绕流问题进行了数值模拟,表明间距比对流动特征影响显著,当间距比在临界间隙附近变化时,下游圆柱阻力系数、串列圆柱升力系数与涡脱落频率等会产生突变。Papaioannou 等^[2]采用直接数值模拟法分析了间距比为 1.1~5.0 的串列圆柱周围流动特性,发现当两圆柱间距小于临界值时,流动的三维效应受到抑制;当间距比大于临界值时,上游圆柱周围流动与单圆柱工况相似,且流场三维效应增强。Kitagawa 等^[3]对雷诺数为 2.2×10^4 、间距比为 2~5 的串列圆柱流场进行数值模拟,发现临界间距比为 3.25,当间距比小于临界值 3.25 时,涡脱落仅发生于下游圆柱,上游圆柱两侧分离的剪切层交替再附着于下游圆柱表面;当间距比大于临界值时,涡脱落同时发生于上、下游圆柱,上游圆柱脱落涡沿流向传播并冲击下游圆柱,导致两圆柱脉动升力主频一致。Carmo 等^[4]基于数值模拟分析了间距比为 1.2~10.0 的串列圆柱尾迹二次失稳,识别出 4 种流动形态,并与单圆柱流动特性对比,确定了三维失稳起始点,分析了失稳分叉非线性特性与流动机制。Alam 等^[5]通过风洞试验研究了雷诺数为 6.5×10^4 时串列圆柱的气动特性,发现圆柱脉动力、时均压力分布及涡脱落形式显著受控于间距比:当间距比小于临界值 3 时,剪切层从上游圆柱分离后再附着于下游圆柱表面,下游圆柱脉动力与剪切层再附着位置相关;当间距比大于临

界值时,上游圆柱脉动升力受下游圆柱流动相位调制,同相位时脉动力最强,反相位时最弱。邵山等^[6]通过实验测试分析了雷诺数为 1.2×10^4 下串列圆柱时均流场特性,发现间距比较小时,下游圆柱自由剪切层向内偏移;随着间距比增大,上游圆柱尾迹干扰导致下游圆柱周围流场扰动加剧,湍流强度与最大速度衰减量显著增加。

针对串列类圆柱杆件的流动控制,仿生学的发展为其提供了新途径。海豹在黑暗海域中捕食和生存时,其胡须通过感知鱼群游动产生的尾迹振动进行探测,同时自身保持优异的振动稳定性^[7]。Zhu 等^[8]通过数值模拟分析了串列海豹胡须柱杆件的流场与气动噪声特性,发现其尾迹中剪切层相互作用减弱,相邻鞍面形成反相涡脱落结构,有效抑制了规律性涡脱落的形成,显著降低了几何体表面升力脉动,从而实现了气动噪声的有效控制。

串列类圆柱杆件周围湍流运动通常呈现高维特征,为深入理解其流动特性,流场降阶技术得到了广泛应用。Kaiser 等^[9]提出了一种基于聚类分析的降阶模型(CROM)方法,通过概率描述状态变量演化,可预测概率分布变化及系统长期行为,进而获得最优控制策略,为识别复杂动力系统的物理机制提供支持。Östh 等^[10]通过大涡模拟数值计算高速列车(ICE2)尾迹流场,结合 CROM 方法分析发现,高速列车尾迹中存在纵向拖曳涡和脱落涡两种流动结构,这些湍涡发展与列车阻力密切相关。Wei 等^[11]对雷诺数为 2×10^4 时扭转柱二维尾迹流场进行 CROM 分析,探明了尾迹内同相和反向涡脱落两种

流动机制。Zhao 等^[12]采用 CROM 方法分析了高速列车受电弓结构气动噪声特性,表明声压由底舱位置向上传播和以底舱为中心环形向外传播。另外,谱本征正交分解(SPOD)方法也被广泛应用于湍流相干结构识别^[13]。Sieber 等^[14]将 SPOD 方法应用于燃烧室稳定涡流流动分析,采用高速粒子图像测速技术获取不同工况下的燃烧室试验数据,实现了旋流火焰相干结构在时空上的分离,揭示了与相干结构密切相关的热量耗散脉动及其低频模态。郭婷等^[15]采用 SPOD 方法对采用不同转向架构型的高速列车非定常尾迹进行模态分解,发现列车尾迹均由一对反向旋转的半环形流向交替涡脱落占主导。杜晓庆等^[16]采用动力学模态分解方法对低雷诺数为 100 下不同间距比(1.1~5.0)的串联双圆柱绕流场进行模态分解,重构涡量场并分析流态演变机制,结果表明:串联双圆柱的单一钝体、剪切层再附和双涡脱流态 3 种流态呈现不同的子模态特征;随着间距比增大,圆柱涡脱频率对应的模态结构逐渐从下游圆柱尾流转移至上游圆柱尾流。

以往研究多集中于分析串联类圆柱杆件的气动力性能与周围流场特性,并探讨不同间距比对其影响。针对低雷诺数下普通串联圆柱杆件,已有研究采用模态分解与流场重构方法,但分析方法单一,限制了对不同类圆柱杆件尾迹内复杂湍流流动结构的深入理解。本文引入多种降阶模型,对串联海豹胡须柱杆件周围非定常流场进行分析,通过获取流场各阶模态实现高阶流场降维,提取主要模态重构流场,阐明尾迹流动结构特征,揭示流动机理,并与串联圆柱、串联椭圆柱杆件工况对比,为串联类圆柱杆件在工程领域的气动减阻与气动噪声控制策略研究提供参考。

1 计算模型与计算设置

1.1 串联类圆柱杆件模型

各类圆柱杆件的几何模型如图 1 所示,圆柱直径 $D=30\text{ mm}$,椭圆柱半长轴 $A=24.8\text{ mm}$ 、半短轴 $B=12.4\text{ mm}$;海豹胡须柱结构基于成年海豹胡须的尺寸特征设计^[17-18],其表面呈波形分布,截面为倾斜椭圆,波峰面与波谷面的椭圆截面尺寸及倾斜角不同,鞍面与相邻节点面的主轴呈 180° 相位差,如图 1(d)所示。所有杆件具有相同特征长度。实验工况设定为上、下游杆件中心距 $L=150\text{ mm}(5D)$,确保间距足够大以使得各杆件独自形成涡脱落。

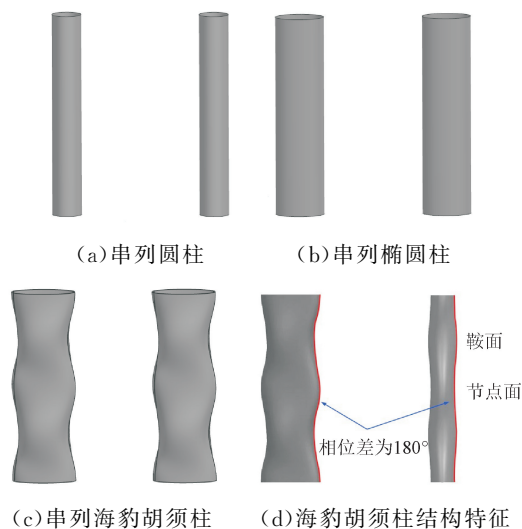


图 1 类圆柱杆件几何模型

Fig. 1 Geometric models of cylinder-like bars

1.2 计算设置

由于所研究类圆柱杆件周围为低雷诺数流动,故基于非定常不可压缩 Navier-Stokes 方程进行流场数值模拟。采用开源软件 OpenFOAM 求解控制方程,空间和时间离散采用二阶精度格式^[19-20]。采用基于 Spalart-Allmaras 湍流模型的延迟分离涡模型(DDES)进行流场模拟^[21-23]。计算域尺寸为: $L_x L_y L_z = 29D \times 16D \times 7D$,以避免受到计算域边界的影响,确保尾迹充分发展,体现出串联类圆柱杆件周围流动特征。如图 2(a)所示,灰色长方体区域($15D \times 6D \times 7D$)用来采集流场数据进行 SPOD 和 CROM 分析以减少内存,节约计算资源。根据网格无关性分析和基准网格划分方法^[19-20],采用六面体结构化网格划分计算域。边界层内第一层网格厚度为 $5 \times 10^{-6}\text{ m}$,沿壁面法向量方向以 1.1 的增长率向外延伸,使得壁面网格无量纲距离 $y^+ < 1$,确保边界层黏性底层内考虑低雷诺数效应。各个工况最终生成的网格数为 2 500 万左右,图 2(b)展示了整个计算域内的结构网格划分,网格在类圆柱展向平面上划分后沿其轴向均匀拉伸。计算域边界条件设置如下:入口处为均匀、恒定速度入口;出口为压力出口,压力与速度梯度为 0;柱体表面为无滑移壁面;轴向两侧为周期性循环边界条件,模拟无限长柱体而无需考虑端部效应;侧面两侧采用对称边界条件,相当于剪切力为 0 的无滑移表面。来流速度 U_0 为 30 m/s ,雷诺数为 6×10^4 。各工况数值仿真时,采用时间步长为 $5 \times 10^{-6}\text{ s}$,确保 Courant-Friedrichs-Lewy 数在整个计算区域内不超过 1。试验风速为 30 m/s 下,单根圆柱^[24]和串联圆柱^[8]的声学风洞测试结果间接验证了数值模拟的准确性。

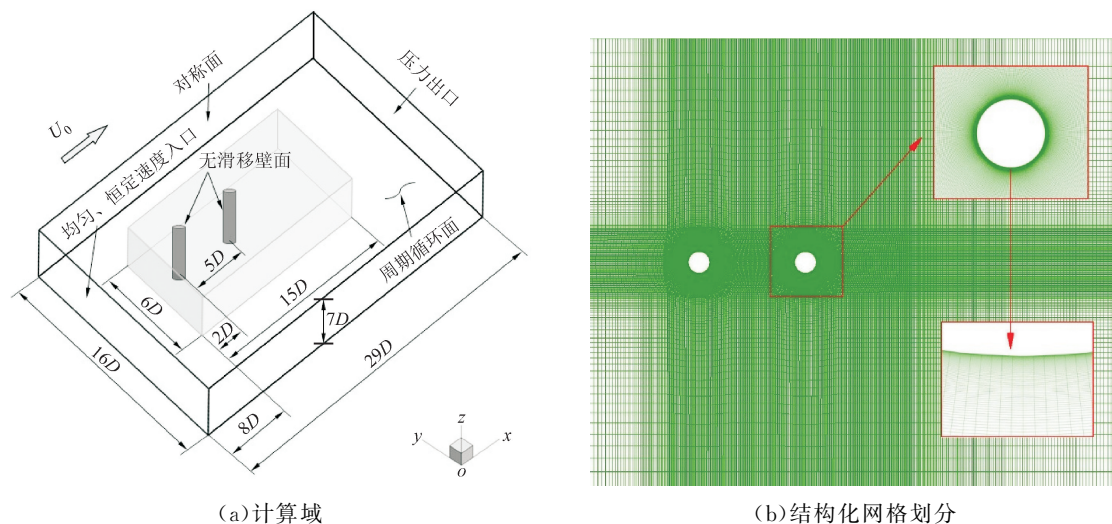


图 2 计算域设置和网格化划分

Fig. 2 Computational domain and mesh topology

1.3 降阶模型方法

SPOD 和 CROM 方法均可用于识别流场结构主要流动特征,分析非定常流场复杂的湍涡运动。SPOD 方法通过正交分解提取流动的主导模态,适合于分析流动全局特征;CROM 方法侧重于将相似流动状态归为一类,有效捕捉流动局部特征和变化,识别不同流动状态间的转变过程。

1.3.1 SPOD 方法

正交分解(POD)方法可确保分解得到的模态在空间上具有正交性,但相应的时间系数序列可能包含多个频率成分。SPOD 方法增加了额外的时间约束,可确保时间和空间上的正交性,从而得到以单一频率振荡且与其他同频模式正交的分解模式^[13,25]。

1.3.2 CROM 方法

CROM 方法用于简化复杂系统动力学行为,通过将速度快照分成少量组,使每组中快照具有相似速度场。CROM 方法分为两步骤:首先使用 k -means 聚类算法对快照进行分组,将相似快照置于同一组中,相似性采用标准欧氏距离衡量。然后,使用聚类分配结果确定簇转换矩阵(CTM)。矩阵元素表示一个时间步长内从当前状态移动到下一个状态的概率。

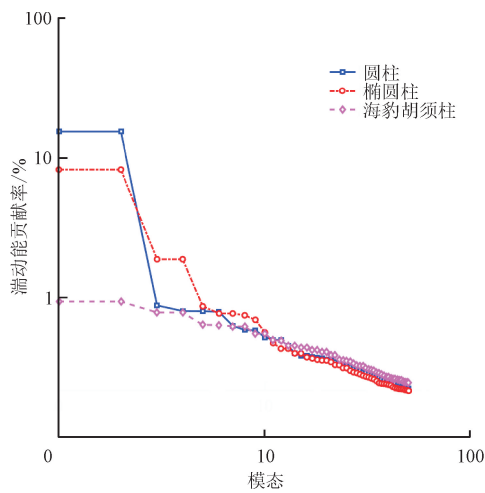
2 SPOD 分析

为阐明串联类圆柱周围流场特性,采用 SPOD 和 CROM 方法对串联类圆柱杆件的三维尾迹结构进行降阶分析,分辨出流场结构中大尺度拟序结构,揭示其动力学演化特性。采用 1 000 张三维流场快照,各快照时间间隔为 4×10^{-4} s。SPOD 分解时设

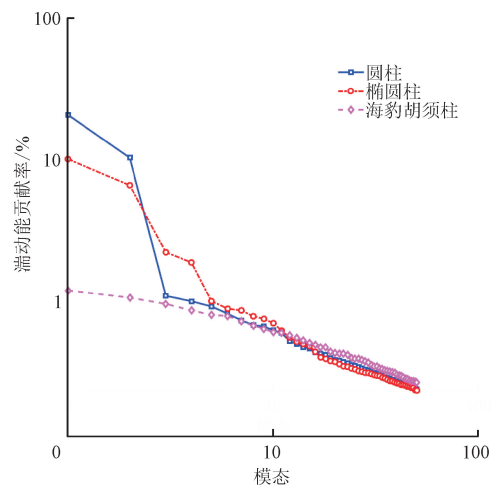
置滤波器尺寸 N_f 为 25。当 $N_f = 0$ 时, SPOD 方法转化为 POD 方法。

图 3 展示了 3 种串联类圆柱杆件尾迹速度场采用 POD($N_f=0$)和 SPOD($N_f=25$)方法进行模态分解得到的前 50 个模态能量对流场的贡献率。结果表明:串联圆柱第 1 对模态(第 1 个和第 2 个模态构成第 1 对模态)能量占比很大,达到 32%左右,第 2 对模态能量占比骤减,表明第 1 对模态对流场的贡献较大,代表着流场中主导动力学特性;与串联圆柱工况相比,串联椭圆柱工况呈现相似结果,但其第 1 对模态的优势地位明显减弱,第 2 对模态对流场贡献增加;串联海豹胡须柱第 1 对模态对流场总能量的贡献度显著降低,仅占约 2%的能量,不存在能量集中于某一模态的现象,各阶模态能量分布较均匀。另外,POD 方法得到的一对模态中的两个模态能量占比略有不同,而 SPOD 方法一对模态中的两个模态能量占比相同,匹配程度更高,相干性较强。

由于模态成对出现,图 4 和图 5 分别显示了 3 种串联类圆柱杆件前 3 对 POD 和 SPOD 模态中的一个结果(如 mode1-1, mode2-1, mode3-1), St 表示相对应的斯坦顿数, $St = fD/U_0$, 其中 f 为频率。串联圆柱一阶 POD 模态与一阶 SPOD 模态相同,横向速度沿流向正负交替分布,代表卡门涡街的特征模态;第二、三阶 POD 模态具有较小频率,相干性较差,流动结构难以识别;二阶与三阶 SPOD 模态为卡门涡的二次与三次谐波,频率分别为一阶模态的 2 倍与 3 倍。串联椭圆柱一阶 POD 模态和一阶 SPOD 模态也表示交替卡门涡模态,与串联圆柱不同



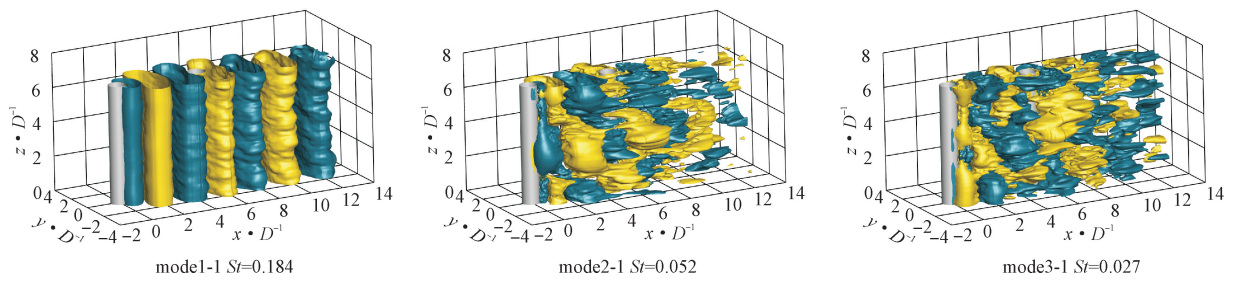
(a) POD 方法结果



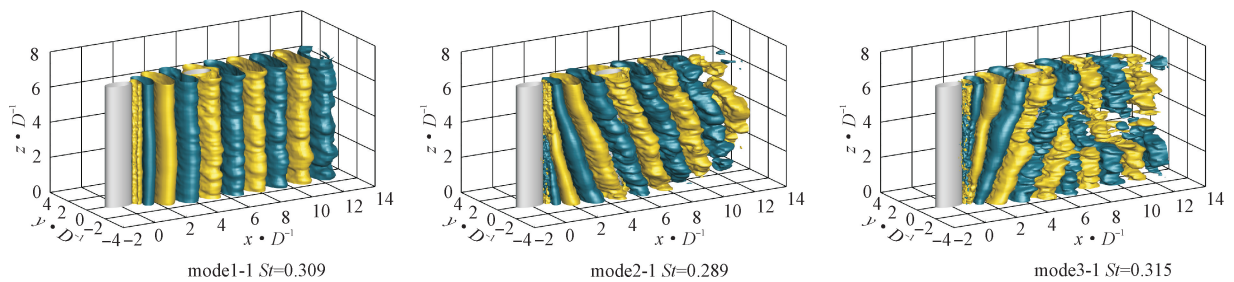
(b) SPOD 方法结果

图 3 串联类圆柱杆件前 50 个模态能量贡献率

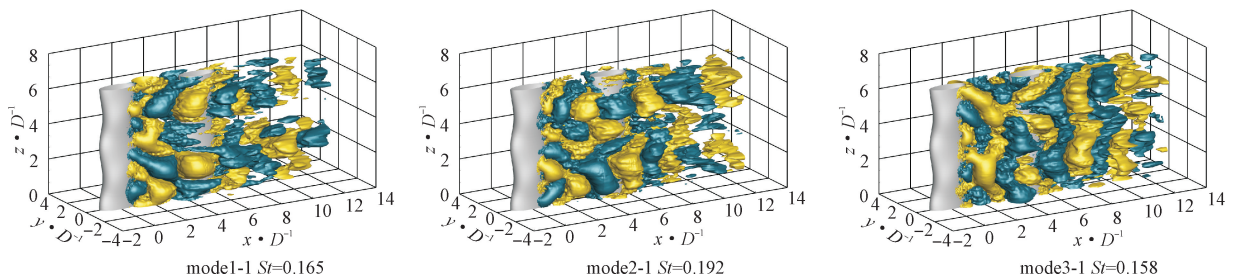
Fig. 3 Contribution of the first 50 modal energy of tandem cylinder-like bars



(a) 串联圆柱



(b) 串联椭圆柱



(c) 串联海豹胡须柱

图 4 串联类圆柱杆件 POD 模态速度等值面

Fig. 4 Isosurfaces of modal velocity of tandem cylinder-like bars based on POD

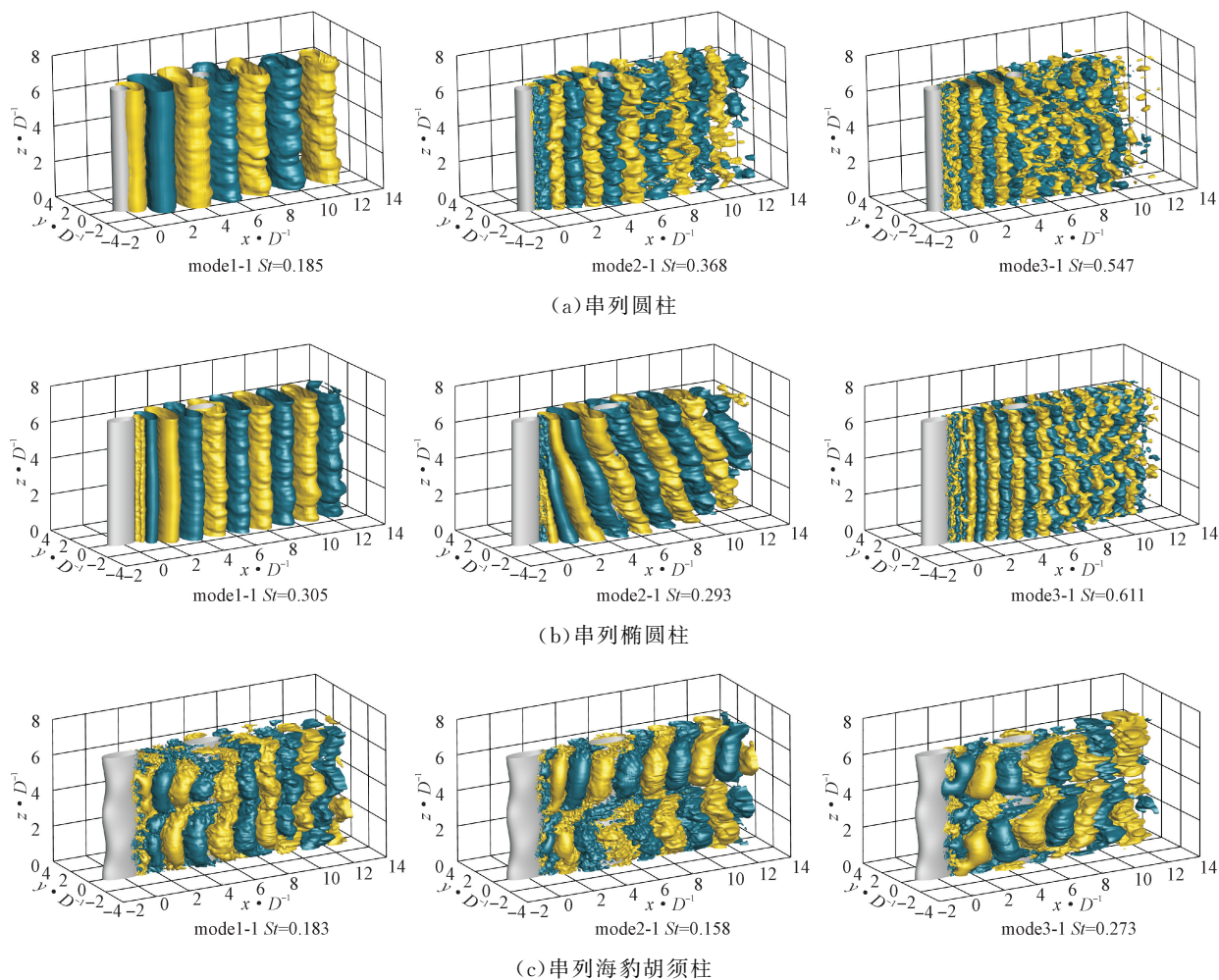


图 5 串列类圆柱杆件 SPOD 模态速度等值面

Fig. 5 Isosurfaces of modal velocity of tandem cylinder-like bars based on SPOD

的是,串列圆柱上、下游杆件涡脱落相位相反,而串列椭圆柱上、下游杆件涡脱落相位相同;两种算法得到的二阶模态均表现为倾斜的卡门涡结构;三阶 POD 模态在下游椭圆柱后方呈现沿展向断开的状态,而 SPOD 模态代表卡门涡的二次谐波,频率为基频模态的 2 倍。对于具有周期性流动特征的串列圆柱和串列椭圆柱,两种方法均能捕捉卡门涡脱落结构,并识别为主导模态,而 SPOD 方法捕捉到了主频模态的高次谐波结构,展现出能够识别高阶谐波的优势。串列海豹胡须柱在两种算法下的模态频率和模态特征差别较大,一阶 POD 模态代表上、下鞍面的同相涡脱落,高阶模态的配对不明显,流动结构较难识别;第一、二阶 SPOD 模态代表上、下鞍面的反相涡脱落,三阶 SPOD 模态代表上、下鞍面的同相涡脱落。显然,相比 POD, SPOD 方法可以捕获更多典型的模态。

3 流场重构

采用 N_t 为 25 时的 SPOD 模态对串列类圆柱杆件的流场进行重构,根据串列圆柱和串列海豹胡须柱结果进行比较分析。串列圆柱选取前 3 对模态进行重构,共包含约 33% 的能量;由于海豹胡须柱不存在占据主导地位的相干结构,需要较多模态来实现流场近似表达,故选取前 6 对模态进行流场重构,共包含约 8% 的能量。

为分析流场中相干结构随时间的演变过程,重构了串列类圆柱杆件前 100 个时刻 t (每张快照对应一个时刻) 的流场。采用 Q 准则显示 z 方向上的瞬时涡量 (ω_z) 等值面图,串列圆柱重构结果和实际流场的速度梯度张量第二不变量 Q 分别取 1.0×10^4 、 $5.0 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$,串列海豹胡须柱重构结果和实际流场 Q 分别取 3.0×10^3 、 $5.0 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$ 。模态分解将原始数据分解为多阶模态及其对应的时间演化系数 $\alpha(t)$,时间系数序列为滤波后的相关矩阵特征分解所得的特征向量,可反映每个模态在特定时间点的

强度或贡献。图 6 显示了串联圆柱前 3 对模态系数随时间的演化,可以发现第 1 对模态系数幅值显著高于其他两对模态,表明第 1 对模态代表的卡门涡结构在流场中起到主导作用。图 7 展示了第 12、21、30、38 个时刻串联圆柱流场的重构结果和原场结果, t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别对应于第 12、21、30、38 个时间快照。 $t_1 \sim t_4$ 展示了剪切层交替从柱体左、右表面脱落卷绕生成涡旋并向下游传播的过程,在这一过程中上、下游圆柱涡脱落始终保持同步。与重构结果相比,实际流场包含了较多小尺度湍涡结构。

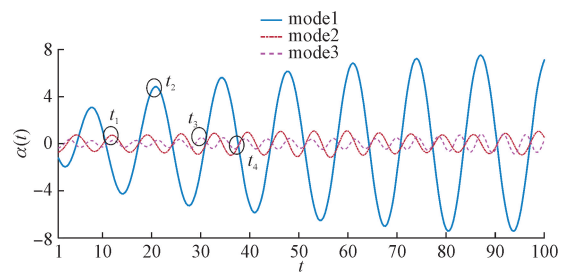


图 6 串联圆柱前 3 对模态系数

Fig. 6 Mode coefficients of first three modes from tandem circular cylinders

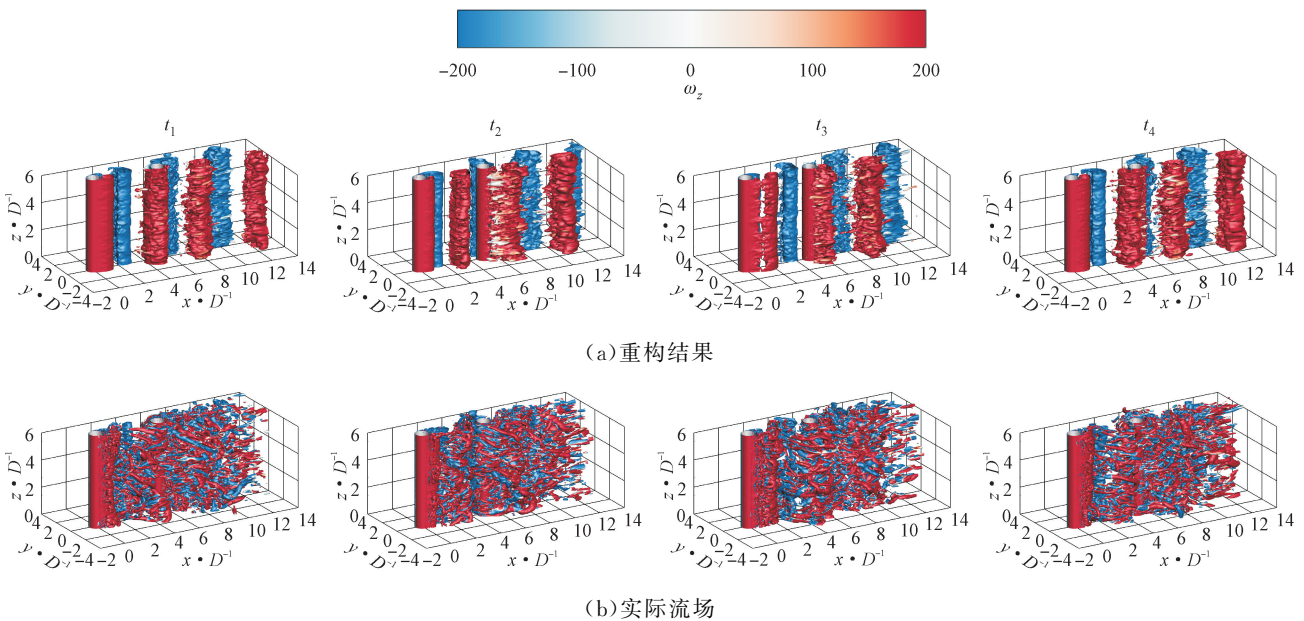


图 7 串联圆柱前 3 对模态重构

Fig. 7 Mode reconstruction of first three modes from tandem circular cylinders

串联海豹胡须柱结果选取 6 个时刻,分别对应第 6、17、34、40、64 与 70 个时间快照,如图 8 所示,可以发现各阶模态系数幅值差异较小,不存在串联圆柱结果中第 1 模态系数幅值明显大于其他模态的情况。流场重构结果和对应的实际流场结构分别如图 9 所示,相比于串联圆柱,串联海豹胡须柱的尾迹结构拟序性较差,相位差的存在使尾流呈现强三维特性。在 t_1 时刻,可以发现上游海豹胡须柱上、下鞍面后方形成相位相反的涡脱落,该时刻第 2 对模态处于峰值,因此第 2 对模态代表的上、下鞍面反相涡脱落结构较明显。 $t_2 \sim t_3$ 时刻,上游杆件两鞍面脱落涡由同相位演变成不同相位向下游移动,经过下游杆件后旋涡混合在一起沿流向发展。 t_4 时刻,第 1 对模态处于峰值,因此该时刻也表现出与一阶模态较为相似的特征,海豹胡须柱上、下鞍面同时产生脱落

涡。 t_5 时刻,上游杆件后方形成反相脱落涡,经过下游杆件后演变为同相脱落涡同步向后方移动。 t_6 时刻,海豹胡须柱尾迹上、下鞍面呈现相位相同的涡脱落。

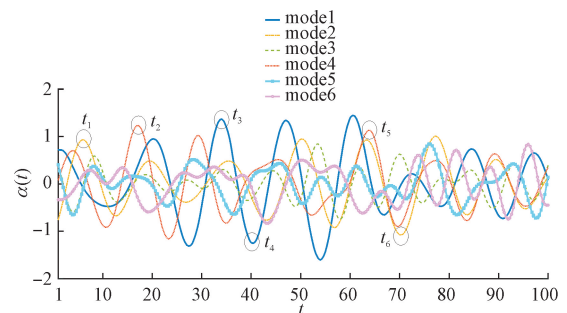


图 8 串联海豹胡须柱前 6 对模态系数

Fig. 8 Mode coefficients of first six modes from tandem seal-vibrissa-shaped cylinders

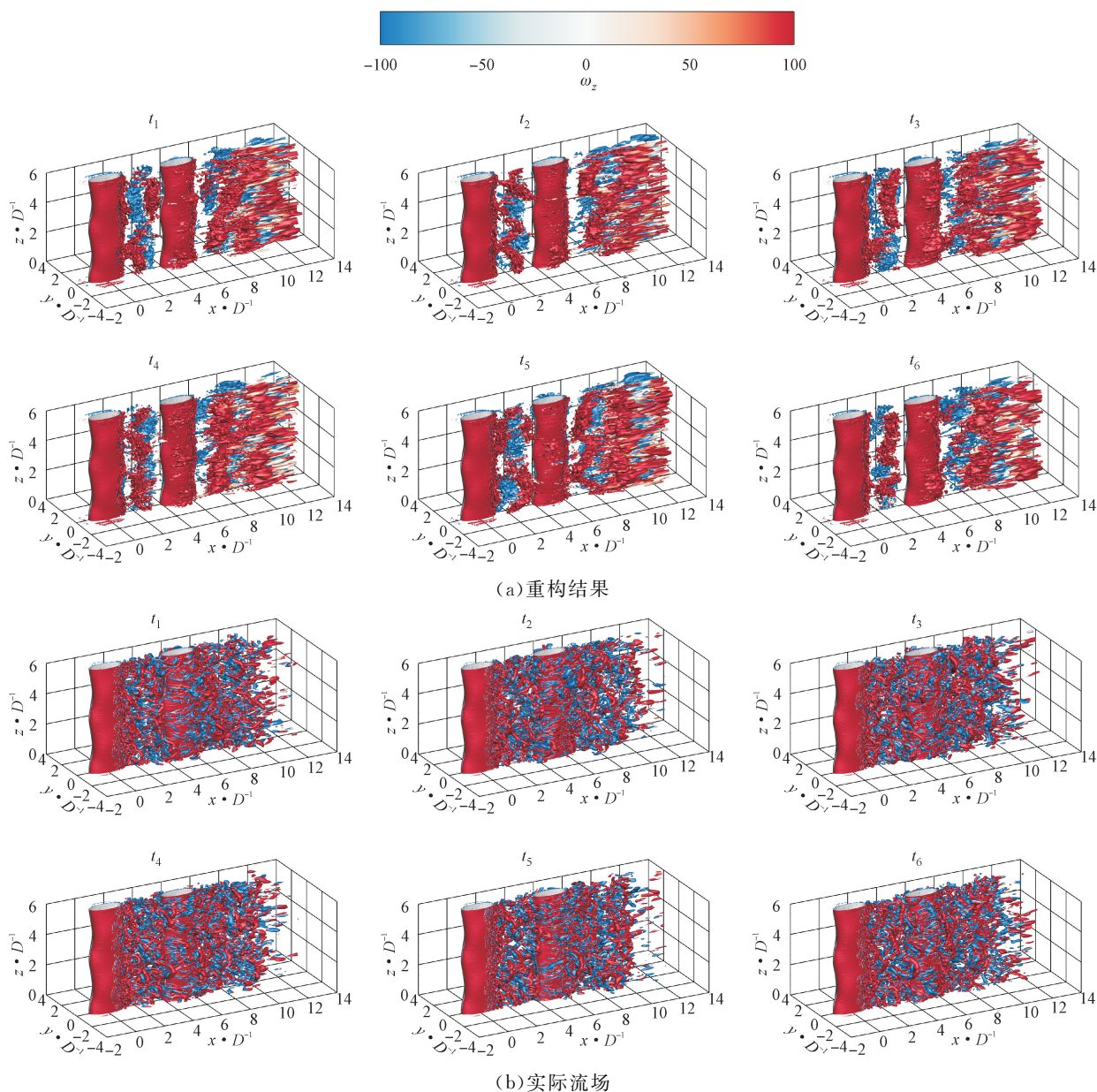


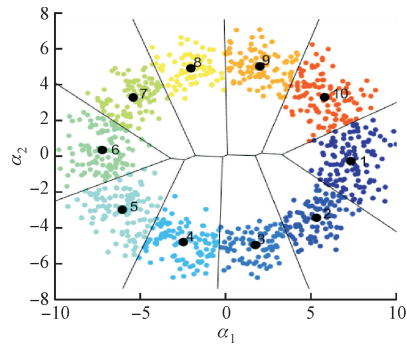
图 9 串列海豹胡须柱前 6 对模态重构

Fig. 9 Mode reconstruction of first six modes from tandem seal-vibrissa-shaped cylinders

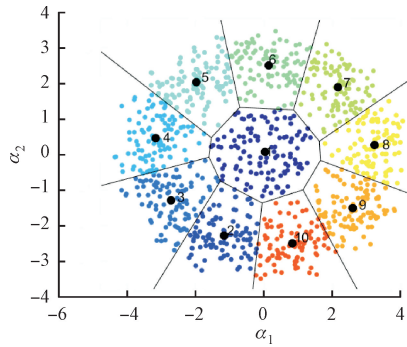
4 CROM 分析

以上对 3 种串列类圆柱杆件的尾迹速度场进行了本征正交分解,将前两阶模态系数 α_1 和 α_2 经 k -means 算法进行分簇,使得簇间数据点之间的距离最大,而簇内数据点之间的距离最小。串列圆柱和串列椭圆柱采用前两阶 POD 模态系数,由于 POD 方法用于串列海豹胡须柱模态提取的效果较差,串列海豹胡须柱采用 SPOD 模态系数进行分簇,以获取流场相关信息。考虑数据压缩和数值精度两方面因素,取质心数 $K=10$,即将所述 1 000 张快照划分为 10 个簇,既能求解主要簇间的转换过程,又能满

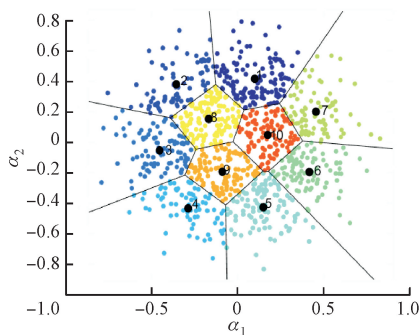
足所需计算精度。分簇的结果以 Voronoi 图呈现,如图 10 所示。黑色细实线对应从数据聚类获得的 Voronoi 单元边界,黑色大实心点表示相应簇的质心,彩色小点表示不同 Voronoi 单元内数据点。各串列类圆柱杆件簇分布呈现不同形态,其中串列圆柱中 10 个簇依次排列围绕形成一个闭合圆圈,各簇数据点分布较均匀。串列椭圆柱中心有 1 个簇(序号 $k=1$),其余 9 个簇($k=2,3,4,5,6,7,8,9,10$)依次排列呈环形将中心簇包围。串列海豹胡须柱呈现内外两环分布,外环包围着内环,其中内环有 3 簇($k=8,9,10$),外环有 7 簇($k=1,2,3,4,5,6,7$)。



(a) 串列圆柱



(b) 串列椭圆柱



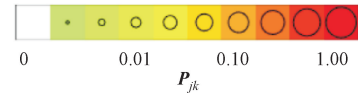
(c) 串列海豹胡须柱

图 10 尾迹分簇 Voronoi 图

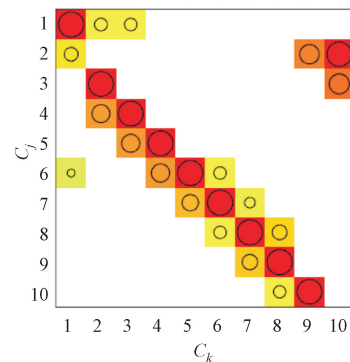
Fig. 10 Voronoi diagram of the clustered wake data

串列类圆柱杆件簇转换矩阵如图 11 所示。转移概率矩阵 P_{jk} 给出在一个时间步长中数据点从状态 C_k 移动到下一个状态 C_j 的概率。红色和大圆圈意味着这种特定转换的可能性较高。对于串列圆柱,转移概率几乎只分布在簇转换矩阵主对角线和次对角线上,表明数据点在下一时刻只能停留在当前簇或者沿着既定方向移动到与其相邻的下一簇中。并且次对角线的元素值大于主对角线,说明与停留在簇内相比,数据点更倾向于向相邻簇转换。由此可得到一条闭环转换路径: $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_5 \rightarrow C_6 \rightarrow C_7 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_1$ 。相较于串列圆柱,串列椭圆柱簇转换矩阵的数据点出现了更多转换可能性,但概率较小。根据转换可能性大小

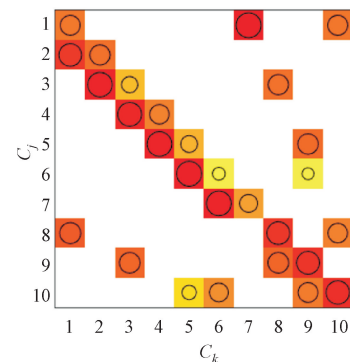
可以得到一条闭环转换路线: $C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_5 \rightarrow C_6 \rightarrow C_7 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_2$ 。另外, C_1 通过 C_2 与闭环路径连接起来, C_1 与 C_2 之间可以互相转换,但概率较低。串列海豹胡须柱形成了两条闭环转换路线,即转换路径 1: $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_5 \rightarrow C_6 \rightarrow C_7 \rightarrow C_1$, 和转换路径 2: $C_7 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_7$ 。



(a) 串列圆柱



(b) 串列椭圆柱



(c) 串列海豹胡须柱

图 11 串列类圆柱杆件簇转换矩阵

Fig. 11 Cluster transition matrix for tandem cylinder-like cases

根据簇转换矩阵,将分析所得最有可能的转换路径采用简化的马尔可夫链表示,如图 12 所示,其

中箭头表示转换方向。串列圆柱表现为单一方向的自循环模式,对应于周期性的涡脱落。串列椭圆柱分为 A 组($k=1$)和 B 组($k=2,3,4,5,6,7,8,9,10$),B 组内形成了单向循环模式。串列海豹胡须柱

分为 A 组($k=1,2,3,4,5,6,7$)、B 组($k=7,8,9,10$)和 T 组($k=7$),A、B 两组分别形成组内循环,同时这两条路径共用 C_7 ,因此 T 组可视为 A、B 两组之间的过渡。

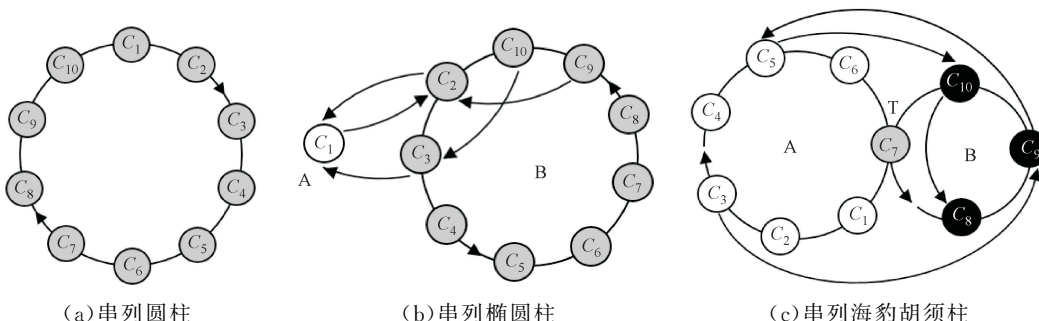


图 12 3 种圆柱的简化的马尔可夫链

Fig. 12 Simplified Markov chain for three cases

簇的质心表示所导出马尔可夫链模型状态,为簇中所有快照的平均值。3 种串列类圆柱杆件 10 个簇质心的横向速度 V 等值面如图 13~15 所示。串列圆柱各簇结构表现为卡门涡街特征,涡结构在

流向上正负交替排列。各簇均与尾流旋涡脱落密切相关,沿转移路径体现出相位的变化,在整个转换过程中上游圆柱和下游圆柱涡脱落相位始终相反。串列椭圆柱 A 组和 B 组呈现出完全不同的结构,A 组上游椭圆柱后方形成对称脱落涡,横向速度一正一负分布在 x 轴两侧,下游椭圆柱则没有明显涡结构;B 组中各簇质心流场结构与串列圆柱相似,表现为柱体两侧交替涡脱落,横向速度沿 x 轴正负交替,且上、下游杆件始终保持同相涡脱落。串列海豹胡须柱分为 3 组流态,A 组($k=1,2,3,4,5,6,7$)下游杆件尾迹流场表现为上、下鞍面的反相涡脱落,并且以上鞍面的涡脱落为主,两杆件之间涡脱落存在同相与反相的相互转换;B 组各簇质心流场涡结构不明显,速度分量较低;T 组则作为 A 组和 B 组之间的一种过渡状态, C_7 至 C_{10} 过程中海豹胡须柱下鞍面几乎没有涡脱落,从 C_{10} 到 C_7 时,下鞍面开始出现脱落涡。

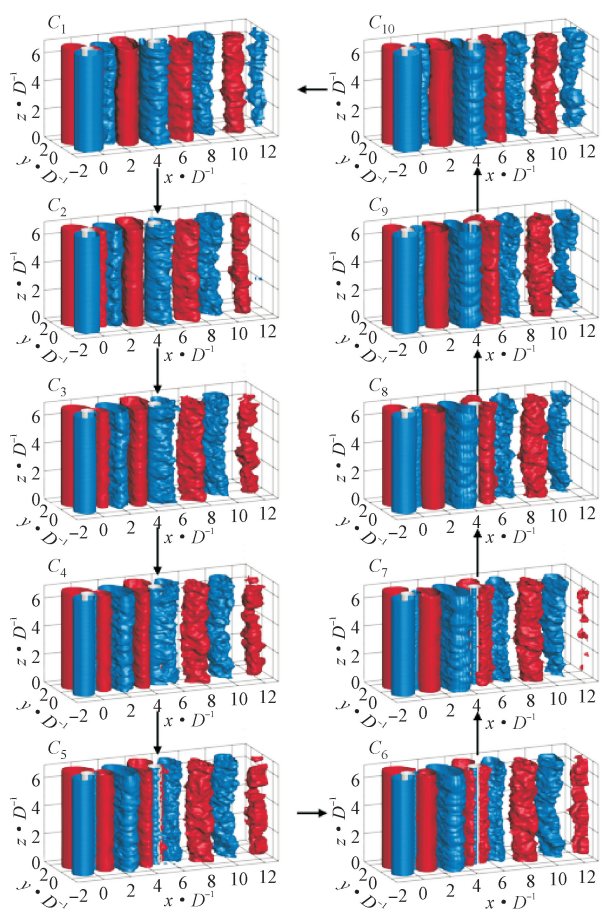


图 13 串列圆柱各簇质心横向速度等值面($V/U_0 = \pm 0.1$)

Fig. 13 Isosurfaces of transverse velocity of cluster centroids for tandem circular cylinders ($V/U_0 = \pm 0.1$)

CROM 分析结果表明:与串列圆柱单一方向的循环回路不同,串列海豹胡须柱从主回路中发散出来形成了次级回路。串列椭圆柱和串列海豹胡须柱下游杆件后方尾迹区域的旋涡脱落具有间歇性,形成较低的速度分量。串列圆柱和串列椭圆柱动态回路与 SPOD 一阶模态表示的卡门涡相匹配,串列海豹胡须柱 A 组循环回路与 SPOD 识别的鞍面反相涡脱落模态相匹配。串列椭圆柱 A 组和串列海豹胡须柱 B 组流态没有在 SPOD 的任何一对模态中被识别。次级回路和过渡质心状态仅被 CROM 方法捕捉到,因此该方法可以深入分析驱动该流场间歇性随机行为的物理特性。

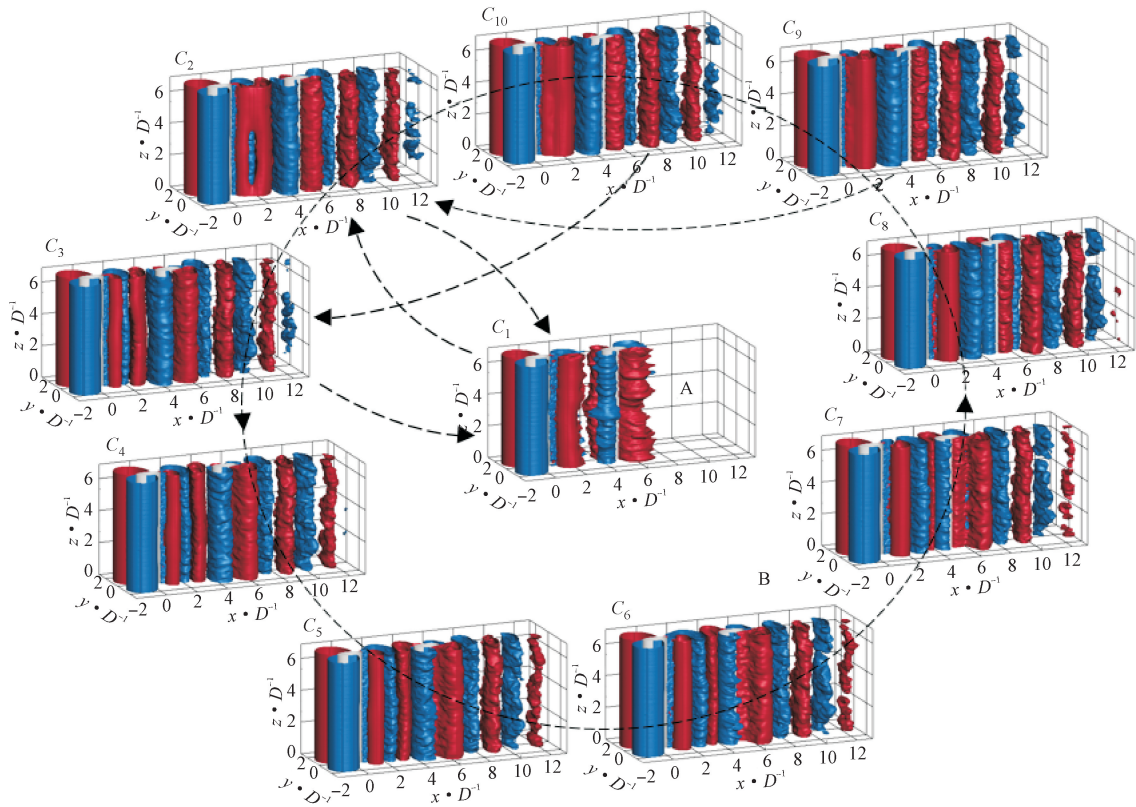


图 14 串联椭圆柱各簇质心横向速度等值面 ($V/U_0 = \pm 0.07$)

Fig. 14 Isosurfaces of transverse velocity of cluster centroids for tandem elliptical cylinders ($V/U_0 = \pm 0.07$)

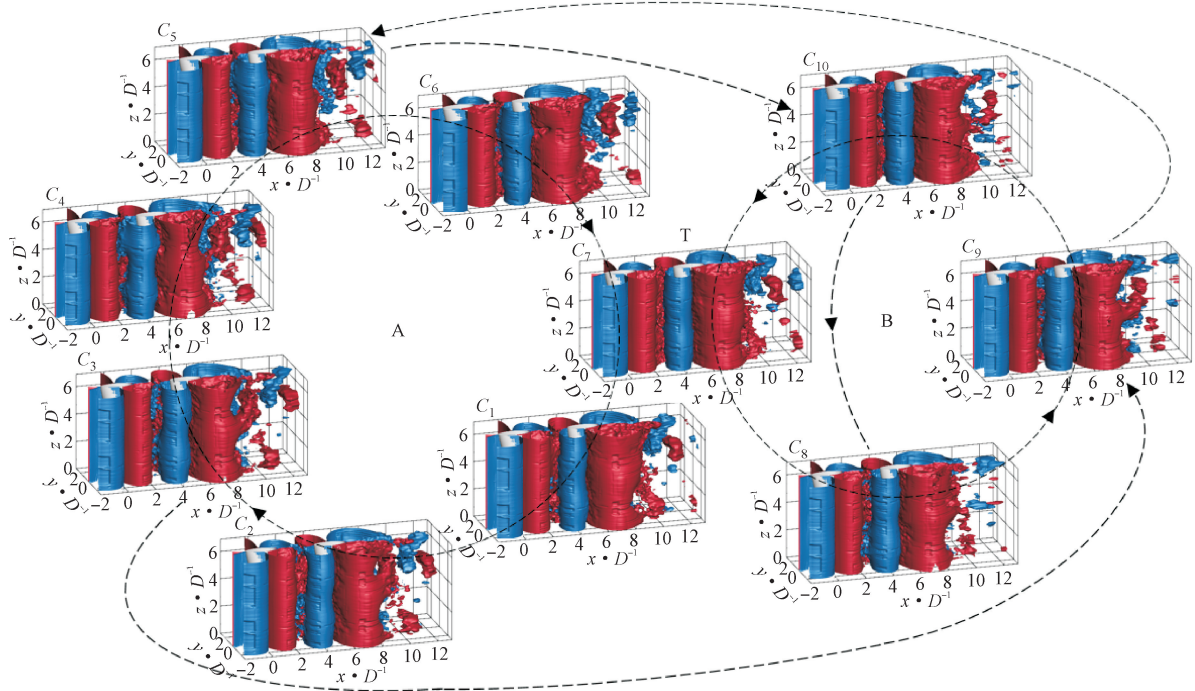


图 15 串联海豹胡须柱各簇质心横向速度等值面 ($V/U_0 = \pm 0.03$)

Fig. 15 Isosurfaces of transverse velocity of cluster centroids for tandem seal-vibrissa-shaped cylinders ($V/U_0 = \pm 0.03$)

5 结 论

基于延迟分离涡模型和不同降阶模型,分析雷诺数为 6×10^4 时串列海豹胡须柱杆件尾迹流场特性,并与串列圆柱以及串列椭圆柱杆件周围流动进行比较,以识别串列类圆柱杆件尾迹中主要流动结构,探明尾涡动力学演化特性,揭示流动发展机理,主要结论如下。

(1)串列圆柱和串列椭圆柱尾迹中均存在卡门涡街拟序结构,能量占比较高,主导尾迹流场的发展输运,串列椭圆柱的涡脱落强度较弱;海豹胡须柱结构使涡旋变形扭曲,抑制了大尺度卡门涡街的形成,涡脱落发展不规则;串列海豹胡须柱尾迹中不存在明显主导模态,各阶模态能量占比较均匀。

(2)通过谱本征正交分解相干结构和流场重构均可识别出串列海豹胡须柱上、下鞍面反相涡脱落结构,该结构一定程度上平衡了海豹胡须柱杆件所受横向力,有效降低了升力脉动。

(3)基于聚类分析的降阶模型方法,捕捉到串列圆柱和串列椭圆柱尾迹中交替脱落的卡门涡结构;串列海豹胡须柱流场中形成了从主回路中发散出来的次级回路,各杆件之间涡脱落存在同相与反相的相互转换。

参考文献:

- [1] 刘松,符松. 串列双圆柱绕流问题的数值模拟 [J]. 计算力学学报, 2000, 17(3): 260-266.
LIU Song, FU Song. Numerical simulation of flow past two cylinders in tandem arrangement [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2000, 17(3): 260-266.
- [2] PAPAIOANNOU G V, YUE D K P, TRIANTAFYLLOU M S, et al. Three-dimensionality effects in flow around two tandem cylinders [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 558: 387-413.
- [3] KITAGAWA T, OHTA H. Numerical investigation on flow around circular cylinders in tandem arrangement at a subcritical Reynolds number [J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(5): 680-699.
- [4] CARMO B S, MENEGHINI J R, SHERWIN S J. Secondary instabilities in the flow around two circular cylinders in tandem [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 644: 395-431.
- [5] ALAM M M, ELHIMER M, WANG Longjun, et al. Vortex shedding from tandem cylinders [J]. Experiments in Fluids, 2018, 59(3): 60.
- [6] 邵山,陈少松,魏恺,等. 串列双圆柱时均流场特性分析 [J]. 气体物理, 2021, 6(5): 62-66.
SHAO Shan, CHEN Shaosong, WEI Kai, et al. Characteristic of the mean wake field of two tandem circular cylinders [J]. Physics of Gases, 2021, 6(5): 62-66.
- [7] DEHNHARDT G, MAUCK B, HANKE W, et al. Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*) [J]. Science, 2001, 293(5527): 102-104.
- [8] ZHU Jianyue, LU Yanhong, JIA Qing, et al. Investigation on the behavior of flow and aerodynamic noise generated around the tandem seal-vibrissa-shaped cylinder [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(11): 117124.
- [9] KAISER E, NOACK B R, CORDIER L, et al. Cluster-based reduced-order modelling of a mixing layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 754: 365-414.
- [10] ÖSTH J, KAISER E, KRAJNOVIĆ S, et al. Cluster-based reduced-order modelling of the flow in the wake of a high speed train [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 145: 327-338.
- [11] WEI Zheng, YANG Zhigang, XIA Chao, et al. Cluster-based reduced-order modelling of the wake stabilization mechanism behind a twisted cylinder [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 288-303.
- [12] ZHAO Yueying, YANG Zhigang, LI Qiliang, et al. Analysis of the near-field and far-field sound pressure generated by high-speed trains pantograph system [J]. Applied Acoustics, 2020, 169: 107506.
- [13] SIEBER M, OLIVER PASCHEREIT C, OBERLEITHNER K. Spectral proper orthogonal decomposition [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 792: 798-828.
- [14] SIEBER M, OLIVER PASCHEREIT C, OBERLEITHNER K. Advanced identification of coherent structures in swirl-stabilized combustors [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(2): 021503.
- [15] 郭婷,夏超,储世俊,等. 不同转向架构型对高速列车列车风及非定常尾迹的影响 [J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 94-104.
GUO Ting, XIA Chao, CHU Shijun, et al. Impact of different bogie configurations on slipstream and unsteady wake of a high-speed train [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(2): 94-104.
- [16] 杜晓庆,林芝强,吴葛菲. 串列双圆柱绕流的模态特征及流场重构 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 49-57.
DU Xiaoqing, LIN Zhiqiang, WU Gefei. Mode charac-

- teristics and reconstruction of flow field around two tandem circular cylinders [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(10): 49-57.
- [17] HANKE W, WITTE M, MIERSCH L, et al. Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(15): 2665-2672.
- [18] CHU Shijun, XIA Chao, WANG Hanfeng, et al. Three-dimensional spectral proper orthogonal decomposition analyses of the turbulent flow around a seal-vibrissa-shaped cylinder [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(2): 025106.
- [19] ZHU Jianyue, HU Zhiwei, THOMPSON D J. Flow behaviour and aeroacoustic characteristics of a simplified high-speed train bogie [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(7): 1642-1658.
- [20] ZHU Jianyue. Aerodynamic noise of high-speed train bogies [D]. Southampton: University of Southampton, 2015.
- [21] SPALART P R, ALLMARAS S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows [C]//30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 1992: AIAA 1992-439.
- [22] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities [J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2006, 20(3): 181-195.
- [23] SPALART P R. Detached-eddy simulation [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, 41: 181-202.
- [24] ZHU Jianyue, YUAN Yongyi, HU Zhiwei, et al. Flow-induced noise from a seal-vibrissa-shaped cylinder [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 570: 118135.
- [25] SCHMIDT O T, TOWNE A, RIGAS G, et al. Spectral analysis of jet turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 855: 953-982.
- (编辑 武红江)