

矩形断面涡激振动多模态响应数值研究

董国朝, 王煜州

长沙理工大学土木与环境工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年4月27日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

为研究宽高比5:1柔性矩形断面的涡激振动特性, 采用双向流固耦合与大涡模拟方法, 对结构多模态振动响应、时空能量分布及尾流涡结构开展数值分析。结果表明, 柔性矩形断面涡激振动存在显著多模态竞争特征, 振幅沿展向呈波峰波谷交替分布; 波峰处能量集中、振动强度高, 以2S涡脱为主; 波谷处能量分布宽泛、强度低, 以2P涡脱为主。随风速提高, 主导模态阶数上升, 高阶模态振幅降低。研究结论可为桥梁钝体断面抗风设计与涡振机理分析提供参考。

关键词

涡激振动, 流固耦合, 多模态竞争, 数值模拟

Numerical Study on Multi-Modal Response of Vortex-Induced Vibration for Rectangular Cross-Section

Guochao Dong, Yuzhou Wang

School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

Received: April 15, 2026; accepted: April 27, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

To investigate the vortex-induced vibration (VIV) characteristics of a flexible rectangular section with an aspect ratio of 5:1, numerical analyses were conducted on the multi-modal vibration response, spatial-temporal energy distribution, and wake vortex structure of the structure using the bidirectional fluid-structure interaction (FSI) and large eddy simulation (LES) methods. The results show that the VIV of the flexible rectangular section exhibits significant multi-modal competition characteristics, and the amplitude presents an alternating distribution of peaks and troughs along

the spanwise direction. At the amplitude peaks, the energy is concentrated with high vibration intensity, dominated by the 2S vortex shedding mode. At the amplitude troughs, the energy is widely distributed with low vibration intensity, dominated by the 2P vortex shedding mode. With the increase of wind speed, the order of the dominant mode rises, and the amplitude of higher-order modes decreases. The conclusions can provide a reference for the wind-resistant design and VIV mechanism analysis of bridge bluff sections.

Keywords

Vortex-Induced Vibration, Fluid-Structure Interaction, Multi-Modal Competition, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,大跨度桥梁飞速发展,主梁日趋轻柔化,对风荷载的敏感性显著增强[1]。涡激振动(VIV)易在较低风速下发生且出现频率高,已成为影响桥梁安全性的重要因素之一[2]。与颤振不同,涡激振动虽为有限幅值共振,但其持续振动会加剧结构疲劳损伤,影响行车安全与附属设施。

矩形断面因力学性能与施工便捷性被广泛应用于桥梁主梁,其中宽高比为 2.8~6.0 的断面尤为典型[3]。该类断面具有“分离-再附着”的流场特征:气流在前缘分离后形成分离泡,再附着于壁面,尾流区形成复杂涡系。与流线型断面不同,矩形断面属于钝体结构,涡激振动机理更为复杂[4]。

已有研究表明,矩形截面的涡激振动是流体和结构互相影响的过程。尾流中同时存在大尺度涡与小尺度涡[5],而结构振动又会反过来改变流场特性。对于宽高比 2.8~6.0 的矩形截面,其振动驱动机制在学术界尚存争议: Mannini 等[6]主张主旋涡脱落起主导作用,而汤源彦等[7]则认为尾涡脱落更为关键。这说明,引起振动的源头较为复杂。

当前,双向流固耦合数值模拟方法已被广泛应用于柔性结构涡激振动的研究中[8]。学者们逐渐关注柔性断面的三维振动特性,发现结构变形会引起流场变化,并导致多模态耦合振动。祝瑜哲等人[9]研究了高宽比对涡振的影响;华旭刚等[10]则通过实验观察到结构在多模态振动时沿长度方向的相关性。然而,目前多数研究仍局限于刚性或低柔性结构[11],对于柔性矩形断面在变形过程中的气动力演化、模态间相互作用及能量传递机制,尤其是多尺度涡结构的协同作用机理,尚缺乏深入认识。

为此,本文采用双向流固耦合数值模拟方法,对宽高比为 5:1 的柔性矩形断面涡激振动进行系统研究,重点分析其多模态响应特征、时空能量演化规律及尾流涡结构与振动的关联,以期能为柔性桥梁断面的抗风设计提供理论参考。

2. 流固耦合数值方法

2.1. 控制方程与求解策略

本研究采用双向流固耦合方法,流场基于大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)求解滤波后的不可压缩 Navier-Stokes 方程。滤波后的连续性方程和动量方程如下:

$$\partial \bar{u}_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

其中, \bar{u}_i 和 p 分别为滤波后的速度和压力, ρ 为流体密度, ν 为运动粘度, 采用动态 Smagorinsky-Lilly 模型进行封闭。结构体则是基于有限元法求解柔性断面的振动响应, 其运动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 y(z,t)}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left[T(z) \frac{\partial y(z,t)}{\partial z} \right] + m \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial y(z,t)}{\partial t} = f_y(z,t) \quad (3)$$

其中, $y(z,t)$ 为展向位置 z 处的横向位移, EI 为抗弯刚度, m 为单位长度质量, c 为结构阻尼系数, $f_y(z,t)$ 为气动升力分布。

流体与结构之间的数据交互通过动网格技术实现, 每时间步内进行迭代直至收敛。图 1 为计算流程图。

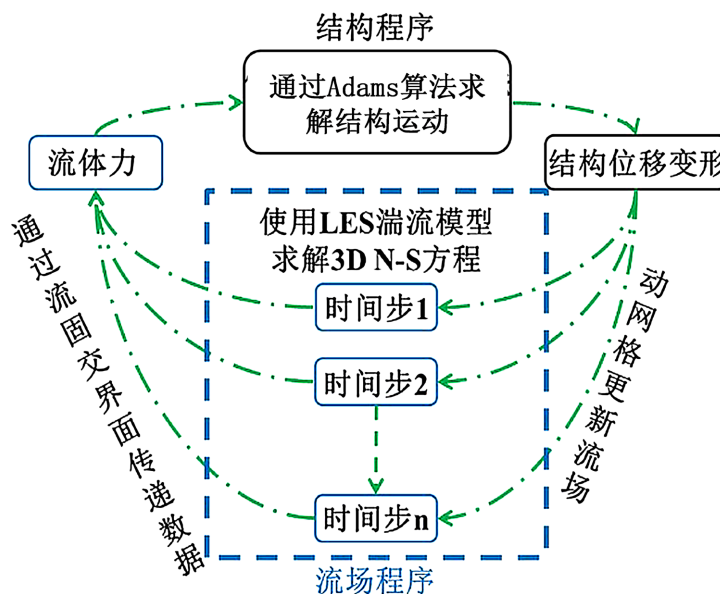


Figure 1. Fluid-structure interaction calculation flowchart
图 1. 流固耦合计算流程

2.2. 计算模型与边界条件

研究对象为宽高比 5:1 的矩形断面, 宽度 $B = 0.3$ m, 深度 $D = 0.06$ m, 展向长度 $L = 100 D = 6$ m。

计算域为圆柱形, 半径 $15 B$, 入口设为速度入口, 出口为压力出口, 壁面采用无滑移条件。结构两端施加约束, 以模拟简支边界。图 2 为计算域及边界条件设置图。

2.3. 网格与验证

网格划分主要采用的是分块结构化六面体网格(见图 3), 近壁面网格高度进行了加密, 确保 $y^+ \approx 1$ 。为验证网格无关性, 设计了三种不同密度的网格方案进行对比测试, 结果如表 1 所示。

为了兼顾计算效率与计算精度, 选取网格数约 621 万的第 2 套方案进行后续计算。然后将数值模拟结果与华旭刚等[10]的风洞试验结果进行对比, 发现对比结果十分接近, 验证了数值方法的可靠性, 数值结果与实验结果吻合良好。

结构方面利用 ANSYS 的模态分析模块, 计算气弹模型在空气中的前五阶固有频率、阻尼比、广义质量, 结果如表 2 所示, 为后面的流固耦合分析提供了可靠的结构动力学基础。计算得到的数据与华旭刚

等[10]针对相同宽高比 5:1 矩形断面开展的风洞试验实测值十分接近, 验证数值方法的准确性。

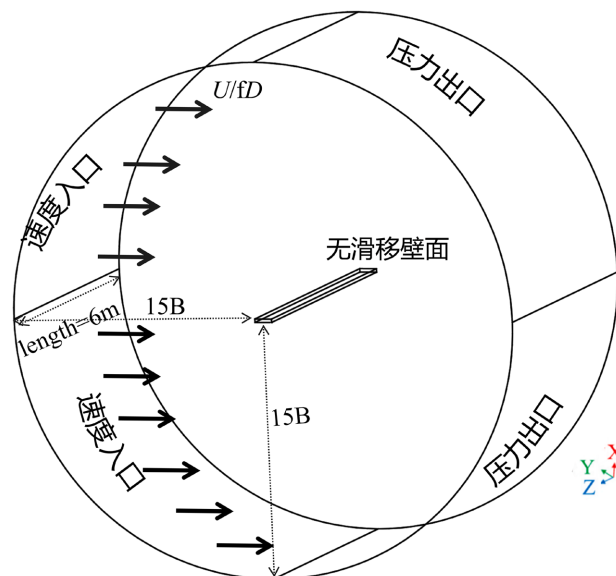


Figure 2. Computational domain and boundary conditions

图 2. 计算域与边界条件

Table 1. Grid independence verification

表 1. 网格无关性验证

Case No.	Grid	Step	Clrms	St
1	303×10^4	2.5×10^{-4}	0.161	0.282
2	621×10^4	2.5×10^{-4}	0.170	0.278
3	807×10^4	2.5×10^{-4}	0.169	0.281

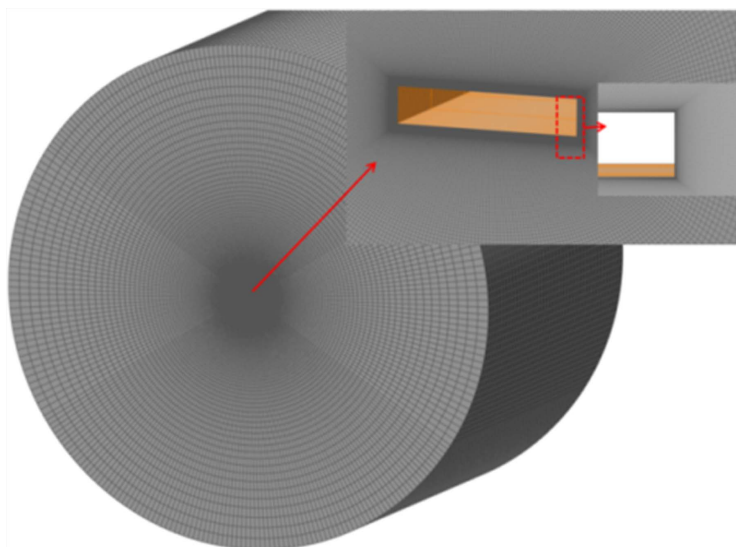


Figure 3. Computational mesh configuration

图 3. 计算网格划分

Table 2. Modal parameters of the aeroelastic model for the rectangular cross-section
表 2. 矩形断面气弹模型模态参数

序号	振型	频率 Hz	阻尼比	广义质量(kg)
1	一阶	4.75	0.092	6.6344
2	二阶	5.15	0.058	6.4201
3	三阶	6.61	0.103	6.7188
4	四阶	9.45	0.305	6.5388
5	五阶	13.52	0.542	6.1051

3. 多模态振型分析

3.1. 多模态振型特征

为研究柔性矩形断面在不同风速下的涡激振动响应, 选取了 3 个典型工况进行数值模拟, 如表 3 所示。这些工况覆盖了以第 2、3 阶为主导模态的涡振锁定区间。Case-1 为 2 阶模态为主导, Case-2 和 Case-3 为 3 阶模态为主导。

Table 3. Numerical simulation cases for different vibration modes

表 3. 数值模拟的各阶模态案例

Serial No.	Mode	A/D	U (m/s)
Case-1	2	0.03059	3.21
Case-2	3	0.01488	3.4
Case-3	3	0.02099	3.78

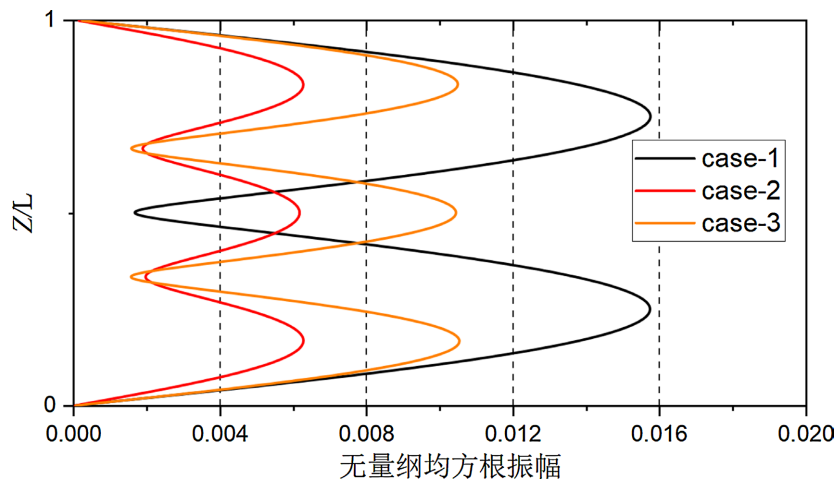


Figure 4. Spanwise distribution of RMS amplitude at different wind speeds

图 4. 不同风速下沿展向的均方根振幅分布

图 4 为不同来流风速下结构沿展向的均方根振幅分布。风速为 3.21 m/s 时, 结构振型达到 2 阶, 最大均方根振幅为 0.0158 D ; 风速为 3.83 m/s 时, 结构振型达到 3 阶, 最大均方根振幅为 0.0104 D ; 风速为 5.25 m/s 时, 结构振型达到 4 阶, 最大均方根振幅为 0.0062 D 。该结果说明, 随着风速的逐渐增大, 结构容易展现出更高阶的模态, 但各阶模态涡振的振幅随模态阶次增加而降低。这一现象可以从能量角

度进行解释：高阶模态具有更高的频率和更大的阻尼比(如表 2 所示, 3 阶模态阻尼比为 0.103), 这意味着需要更多的能量输入才能维持同等幅值的振动, 而涡激振动的能量输入主要来源于流场, 其输入能量有限, 因此高阶模态的振幅自然受到限制。

计算模型各阶频率发现结果比较接近, 说明模态之间存在模态竞争现象。在 Case-1 工况中, 振型显示出 2 阶频率为主导。2、3 阶模态耦合的混合模态特征, 具体表现为第一个波峰($z = 1.04 \text{ m}$)和第三个波峰($z = 4.95 \text{ m}$)的振幅明显大于第二个波峰($z = 2.92 \text{ m}$), 其中 3 阶为主导模态, 2 阶为次要模态。比较算例 2、3、4 的振型图, 发现随着风速从 3.25 m/s 增加到 3.78 m/s, 3 阶模态的振动强度逐渐增强, 在风速为 3.78 m/s 时达到 3 阶模态振幅的最大值 $0.02099 D$ 。此外, 由于计算模型 2 至 4 阶频率比较接近, 各模态之间存在模态竞争现象, 各涡振锁定区间存在相互抑制, 导致涡振响应未能充分发展。在 Case-2 中, 振型显示 2、3 阶混合的模态振型, 其中 2 阶为次要模态, 3 阶为主导模态。

3.2. 时空模态切换

为了探究柔性矩形断面在不同风速下如何表现出多模态振动, 选取了两个典型工况来进行分析: Case-1 (风速 3.21 m/s, 主要是 2 阶模态)、Case-3 (风速 3.78 m/s, 3 阶模态的峰值点)。每个工况都用三张图来展示: 图中(a)和(b)是振动响应频率和对应的三维 PFE 能量谱, (c)是沿展向的 RMS 振幅分布。通过对比这些图, 可以看出模态之间如何竞争、切换, 以及随流速变化的规律。

从图 5(c)的 RMS 振幅沿展向分布可以看出, 沿展向有两个明显的波峰, 节点位置的振幅不为零且比较大, 说明这个工况下振动有明显的空间模式竞争, 是多模态振动的典型表现。这两个波峰与 2 阶模态的振型吻合, 说明 2 阶模态在振动中占主导。

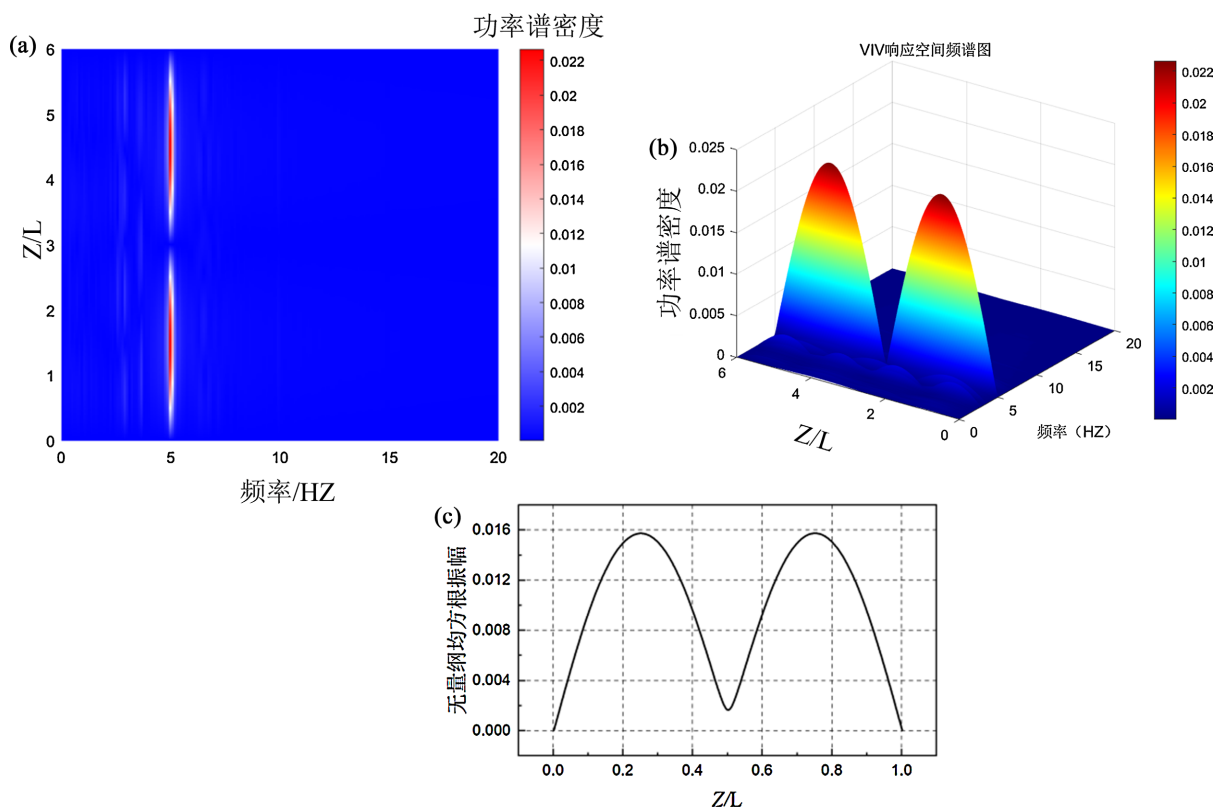


Figure 5. Spatio-temporal multi-modal response for Case-1

图 5. Case-1 时 - 空多模态响应

再看图 5(a)和图 5(b)的振动响应频率与 3D-PFE 谱,可以发现振动能量主要集中在结构的 2 阶固有频率附近(大约 5.15 Hz)。值得注意的是,在 RMS 振幅波谷对应的展向位置(可以从图 5(c)中看出波谷位置),能量谱的峰比较宽,除了 2 阶频率附近能量集中之外,其他频率也有贡献,说明波谷处多个模态共存和竞争。而在 RMS 振幅波峰对应的展向位置,能量更集中地聚集在 2 阶固有频率附近,由单一模态主导。此外,由图 5(a)和图 5(b)可知,部分频率成分中亦存在 1 阶模态的间歇性参与,表明该工况下模态间存在时域竞争,但 2 阶模态始终占据主导地位。

图 6 中 Case-3 工况对应的是 3 阶模态涡振区间的振幅峰值点,风速 3.78 m/s。图 6(c)显示, RMS 振幅沿展向存在三个明显波腹,幅值远高于 Case-2,说明 3 阶模态已被充分激发;且振幅分布对称性良好,节点处振幅趋近于零,表明 3 阶模态在该工况下占据绝对主导,空间模态竞争不明显。

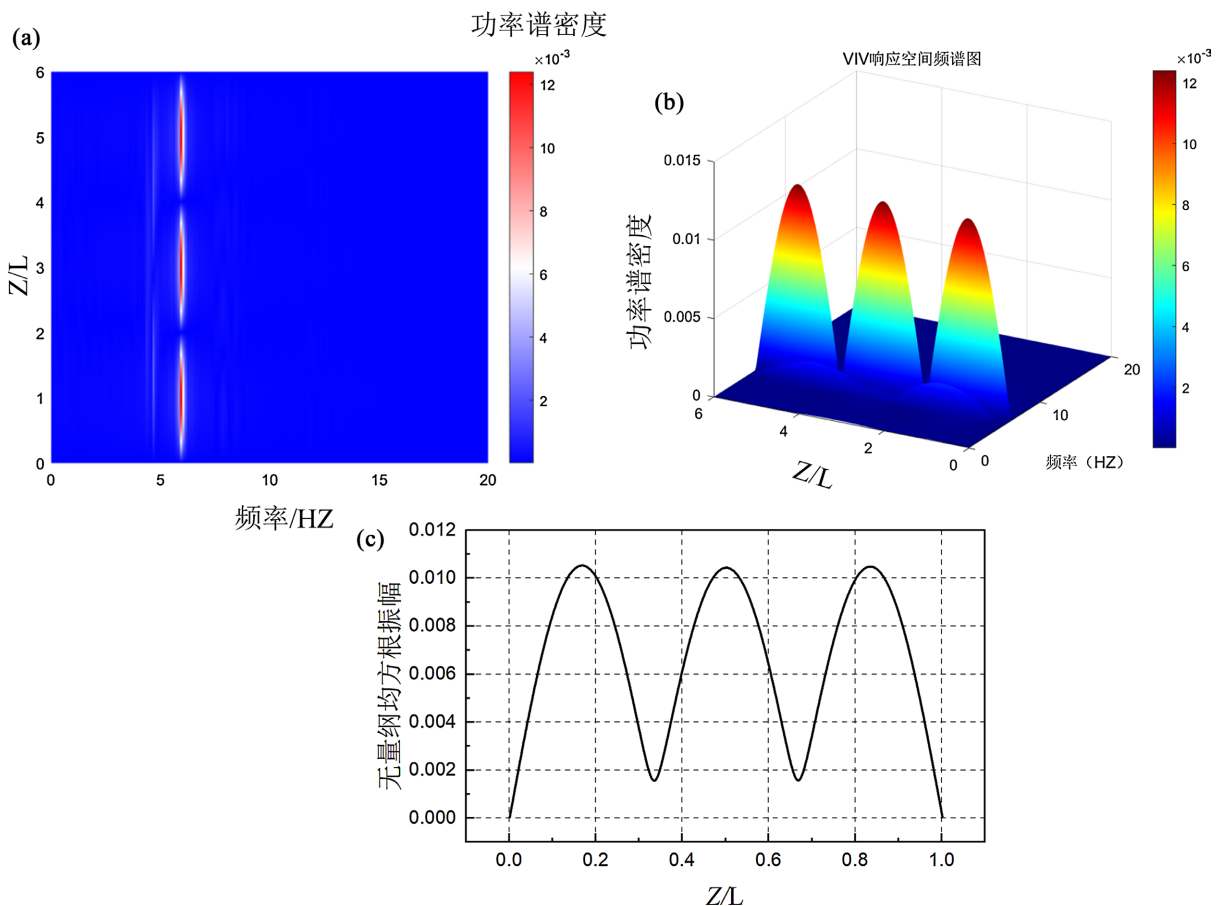


Figure 6. Spatio-temporal multi-modal response for Case-3

图 6. Case-3 时 - 空多模态响应

图 6(a)和图 6(b)中的 3D-PFE 谱进一步印证了该结论。振动能量高度集中在 3 阶固有频率附近,峰值尖锐且集中,2 阶和 4 阶频率附近能量几乎为零。这说明在 Case-4 工况下,柔性矩形断面的振动基本实现了锁频,能量输入和结构振动高度同步。无论是 RMS 振幅波峰还是波谷位置(见图 6(c)),振动能量均由 3 阶模态主导;波谷处亦未出现 Case-1 和 Case-2 中多模态能量共存的现象。这说明在涡振峰值点,能量从流体到结构的传递效率最高,且集中作用在单一主导模态上,抑制了其他模态的参与。

4. 时空能量演化及尾流涡量分析

4.1. 时空能量演化

图 7 是 Case-1 工况下涡激振动的时空多模态竞争情况。图中(a)为沿着长度方向的振幅变化；(b)和(c)分别是波峰和波谷位置的时频图；(d)是第 1~2 秒的频谱图；(e)是第 5~6 秒的频谱图。

从图 7(e)可以看出，在振幅波谷附近，振动频率主要靠近 2 阶模态的基频，但能量分布较为分散，呈现多模态耦合振动特征。而在振幅波峰处(图 7(d))，则以 2 阶与 3 阶模态耦合为主，能量高度集中，频谱峰值尖锐陡峭。换言之，波谷处多模态竞争导致能量分散于不同频率，波峰处主导模态明确、能量高度集中。

图 7(f)的三维图展示了不同时间、频率下的能量分布，能更清楚地看到模态竞争的过程。比如在第 1~2 秒之间，2 阶和 3 阶模态混在一起振动；到了第 5~6 秒，则主要由 2 阶模态主导。这说明，模态随时间切换是柔性结构涡激振动的一个特点，能量会随着时间在不同的振动模式之间转移。

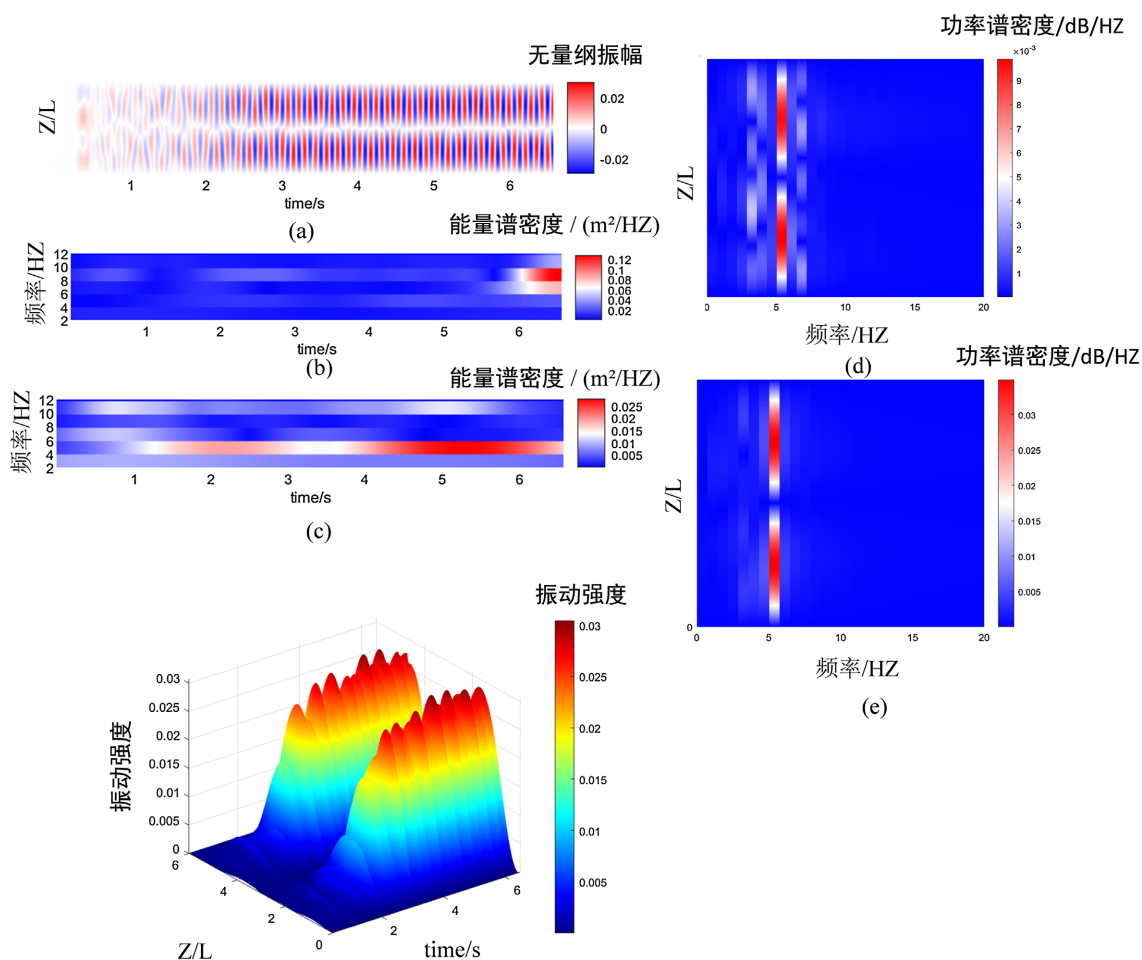


Figure 7. Spatio-temporal multi-modal competition for Case-1

图 7. Case-1 时空多模态竞争

4.2. 尾流涡量分布

选取 Case-3 作为一个示例，来介绍升力系数与断面振幅和涡量分布，从而深入了解与柔性矩形相关

的尾流扰动的内在机制, 并解释振幅波峰和波谷处的具体涡激振动现象。绘制了与 Case-3 相关的两处位置——波峰-1 ($L = 1.02 \text{ m}$)、波谷-1 ($L = 2 \text{ m}$)——相应的尾流涡量图(图 8), 以研究局部振动与涡脱落模式之间的关系。这里选择了一个稳定的振动过程段进行说明。图 8 的子图 a 和 b 显示了 A/D 和升力系数 C_L 的时程曲线, 子图 c 和 d 则说明了一个振幅周期内四个典型时刻尾流中涡脱落模式的瞬态分布。在矩形的后壁面产生了交替脱落的旋涡, 红色的是正涡, 蓝色则为负涡。在波峰-1 的横截面处观察到“S”涡脱落模式(S 表示单个旋涡脱落), 类似于与振荡刚性圆柱体相关的涡脱落模式。可以发现, 沿展向中段(即波谷-1、波谷-2)有利于形成“2P”涡脱落模式(P 表示一对同向旋转的旋涡脱落)。“S”涡脱落模式通常具有显著的振动强度, 由图可见, Peak-1 尾流中逐渐脱落的旋涡均为 S 型离散小涡, 正、负涡交替脱落, 且前一涡脱落随即诱发后一涡生成, 表明其能量耗散较小, 因而在模态竞争中产生的振幅更大; 同时, 该类涡脱落亦是沿展向中段振动的主要激励源。而“2P”型涡脱落模式主要产生于波谷处, 在波谷处产生了一对同向旋转的正负涡量, 这表明能量的耗散较大, 使得其产生的振幅更小。

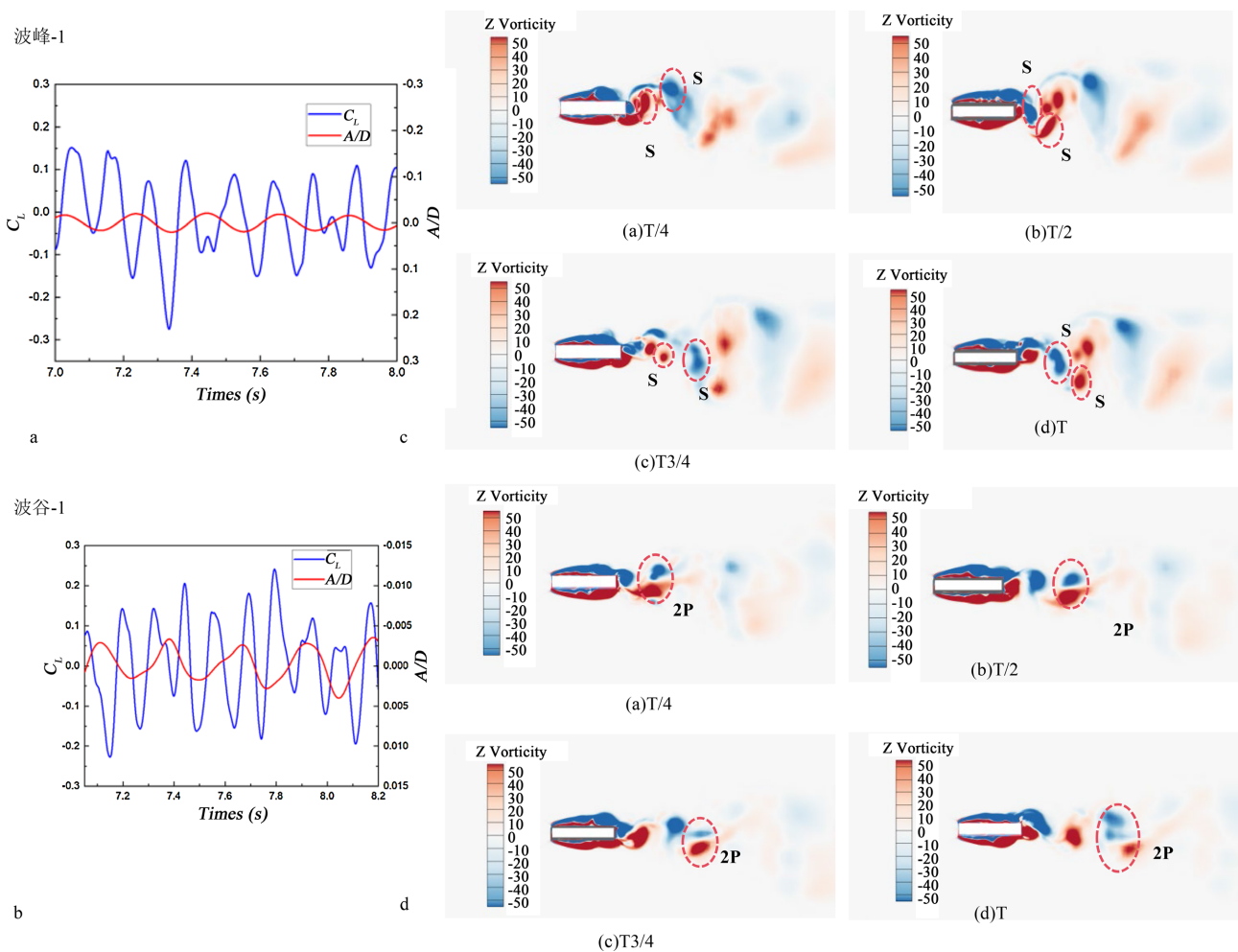


Figure 8. Wake vorticity and time-history of lift coefficient for Case-3

图 8. Case-3 尾流涡量与升力系数时程曲线

为进一步定量解释“2S 模式振幅大、2P 模式振幅小”的现象, 本文引入气动力功 W_a 的概念, 分析不同展向位置(波峰与波谷)在一个振动周期内流场对结构输入的能量。定义在一个完整振动周期 T 内,

作用于单位长度断面的气动升力对结构做的功为:

$$W_a(z) = \int_{t_0}^{t_0+T} C_L(z, t) \cdot \dot{y}(z, t) dt \quad (4)$$

其中, $C_L(z, t)$ 为升力系数, $\dot{y}(z, t)$ 为振动速度。计算得到 Case-3 工况下, 波峰-1 ($z = 1.02 \text{ m}$) 位置处四个周期内的净气动力功为 0.065, 表明流体持续向结构输入能量, 维持大幅振动。相比之下, 波谷-1 ($z = 2 \text{ m}$) 处的净功明显减小, 在同样的时间周期内出现负值为 -0.015, 反映出“2P”涡脱模式会加剧能量耗散, 限制了振幅增长。同时, 结合升力系数 C_L 与位移的相位关系可以辅助判定涡脱模式。当升力与位移接近同相位(相位差 $\varphi \approx 0$) 时, 流体对结构做正功, 能量集中输入, 对应“2S”模式下的集中涡脱落; 当两者反相位或接近 $\pi/2$ 时, 升力不再有效驱动结构, 对应“2P”模式下能量分散、振动减弱的特征。由于展向长度和振动幅度有限, 振动过程与升力是不同步的, 即空气产生的动力与结构变形处在不同的相位。该相位差的存在表明, 流体对结构的做功在一个振动周期内并非恒为正(能量输入)或恒为负(能量耗散), 而是呈现出交替变化的特征, 这正是涡激振动能够形成的内在能量平衡机制。

5. 结语

本文采用双向流固耦合数值模拟方法, 结合时频谱与功率谱分析, 研究了宽高比 5:1 柔性矩形断面的涡激振动响应特性, 主要结论如下:

1) 宽高比 5:1 的柔性矩形断面涡激振动呈现明显的多模态竞争特征, 振幅波峰与波谷在时空域交替出现, 能量在不同模态间动态转移。风速提高导致振动的主导阶次升高, 振幅波谷转变为下一阶段的波峰, 在此过程中发生能量耗散, 导致振动强度减弱。

2) 模态切换和振动能量传递是柔性桥面多模态振动的核心机制。振幅波峰和波谷处的振动模式明显不一样。波峰处的高能量区域总是短暂出现但能量很高, 而波谷处的高能量区域持续时间更长, 但能量相对较低。

3) 振幅波峰和波谷处的旋涡脱落情况也不同。波峰处更容易出现“2S”涡脱模式——远离壁面的位置旋涡是单个小涡脱落, 这样能量耗散更小, 振动强度更高。波谷处“2P”模式更常见——一对同向旋转的正负涡同时脱离壁面, 另一对还未生成, 能量耗散较大, 振动强度更低。

需要指出的是, 本文结论是基于宽高比为 5:1、两端简支的柔性矩形断面这一特定模型得出的, 未考虑其他宽高比、不同雷诺数区间及非简支边界条件(如固支、弹性支承)等因素的影响。因此, 上述关于多模态竞争、能量传递及涡脱模式的结论在当前参数范围内有效, 其普适性尚需进一步验证。后续研究应扩展至不同宽高比、更高雷诺数及更复杂的边界条件, 以揭示矩形断面涡激振动的通用机理。

参考文献

- [1] Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1996) *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*. John Wiley & Sons, 120-125.
- [2] Liu, P., Chu, X.L., Cui, W., Zhao, L. and Ge, Y. (2022) Bayesian Inference Based Parametric Identification of Vortex-Excited Force Using On-Site Measured Vibration Data on a Long-Span Bridge. *Engineering Structures*, **266**, Article 114597. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114597>
- [3] Ricciardelli, F. (2010) Effects of the Vibration Regime on the Spanwise Correlation of the Aerodynamic Forces on a 5:1 Rectangular Cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98**, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.10.017>
- [4] Bruno, L., Salvetti, M.V. and Ricciardelli, F. (2014) Benchmark on the Aerodynamics of a Rectangular 5:1 Cylinder: An Overview after the First Four Years of Activity. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **126**, 87-106. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.01.005>
- [5] Fan, D.X., Wang, Z.C., Triantafyllou, M.S. and Karniadakis, G.E. (2019) Mapping the Properties of the Vortex-Induced

- Vibrations of Flexible Cylinders in Uniform Oncoming Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **881**, 815-858. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.738>
- [6] Mannini, C., Marra, A.M. and Bartoli, G. (2014) Viv-Galloping Instability of Rectangular Cylinders: Review and New Experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **132**, 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.06.021>
- [7] 汤源彦, 回忆. 一种预测宽高比为 4:1 的矩形截面结构涡激振动的双振子模型[J]. 振动工程学报, 2026, 39(4): 964-971.
- [8] de Boer, A., van der Schoot, M.S. and Bijl, H. (2007) Mesh Deformation Based on Radial Basis Function Interpolation. *Computers & Structures*, **85**, 784-795. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.01.013>
- [9] 祝瑜哲, 陈伏彬. 不同厚宽比矩形截面柱体涡激振动的数值研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(10): 73-81.
- [10] 华旭刚, 李龙龙, 陈政清, 等. 高阶模态涡振锁定区间气动力展向相关性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 1987-1995.
- [11] Chen, Z.S. and Wang, S. (2023) Temporal-Spatial Analysis on Multi-Mode Interaction of a Flexible Pipe Subject to External Current and Internal Flow. *Ocean Engineering*, **280**, Article 114671. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114671>