

引文格式:宋家满. 双竖向稳定板对分离式断面涡振流场的拟序结构研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(3): 147-157.

SONG Jiaman. Study on coherent structure of separated section vortex-induced vibration flow field using double vertical stabilizing plates[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(3): 147-157.

DOI:10.19815/j.jace.2024.12116

双竖向稳定板对分离式断面涡振流场的 拟序结构研究

宋家满

(中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

摘要:以某实际大跨分离式双箱梁桥为研究背景,结合风洞试验与数值模拟方法,研究了设置双竖向稳定板这一气动措施对主梁涡振响应的影响;在此基础上,引入动模态分解(DMD)技术与拉格朗日拟序结构(LCS)方法,从拉格朗日视角下对主梁断面周围流场结构及示踪粒子的输运行为进行了深入分析。结果表明:原始主梁断面在不同攻角条件下均表现出显著的涡振现象,当采用双竖向稳定板后,涡振幅值显著降低,结构响应得到有效控制;数值模拟结果表明,优化后的断面能有效将中央开槽处的大尺度涡旋打散为小尺度结构,耗散掉原大尺度涡结构能量,并显著减小作用于下游断面的表面压力;动模态分解显示优化后断面的平均流场在双竖板位置处存在着明显的涡结构,其流场主模态能量幅值和空间结构发生了明显改变,并改变了高阶流场结构;从拉格朗日视角下显示出优化后中央开槽处的示踪粒子将明显增加,周围拉格朗日结构数量增多,形状变得相对扭曲且模糊,对周围流体粒子的吸引程度降低,导致下游箱梁所受的气动力减弱,尾流难以形成周期性、规律性的涡脱落行为,从而有效抑制涡激振动的发生。

关键词:分离式双箱梁;涡振;风洞试验;数值模拟;逆序结构

中图分类号:TU311

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)03-0147-11

Study on coherent structure of separated section vortex-induced vibration flow field using double vertical stabilizing plates

SONG Jiaman

(China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: Taking the actual large-span separated double box bridge as the study background, combined with wind tunnel tests and numerical simulation methods, the influence of aerodynamic measure of setting double vertical stabilizing plates on the vortex-induced vibration response of the main beam was studied. On the basis, dynamic mode decomposition (DMD) technology and Lagrangian coherent structure (LCS) method were introduced to conduct in-depth analysis of the flow field structure around the main beam section and the transport behavior of tracer particles from Lagrangian perspective. The results show that the original main beam section exhibits significant vortex-induced vibration under different attack angles. When double vertical

stabilizing plates are used, the vortex-induced vibration amplitude is significantly reduced, and the structural response is effectively controlled. The numerical simulation results show that the optimized cross-section can effectively disperse the large-scale vortices at the central slot into small-scale structures, dissipate the energy of original large-scale vortex structure, and significantly reduce the surface pressure acting on the downstream cross-section. The dynamic mode decomposition shows that there is a significant vortex structure in the average flow field of the optimized section at the position of double vertical plate, and the main mode energy amplitude and spatial structure of the flow field have undergone significant changes, as well as the high-order flow field structure. From Lagrangian perspective, it is shown that the number of tracer particles at the optimized central slot will significantly increase, the number of surrounding Lagrangian structures will increase, and their shapes will become relatively distorted and blurred. The degree of attraction to surrounding fluid particles will decrease, resulting in a weakened aerodynamic force on the downstream box girder. The wake will be difficult to form periodic and regular vortex shedding behavior, effectively suppressing the occurrence of vortex-induced vibration.

Key words: separated double box girder; vortex vibration; wind tunnel test; numerical simulation; coherent order structure

Author resume: SONG Jiaman(1980-), male, senior engineer, E-mail: 20762214@qq.com.

0 引言

随着现代桥梁结构向着大跨度、纤柔化方向发展,其对风荷载的敏感性程度也越来越高^[1-2]。在各种风致振动中,涡振是发生频率较高的风致振动形式之一,其机理是源于气流流经结构断面时发生流动分离与漩涡脱落。在一定风速下,当涡脱频率接近结构自身频率时,会引起结构的涡激振动。涡激振动是一种同时具有强迫振动与自激振动特性的风致振动形式,通常发生在较低风速条件下,其机制与颤振引发的结构动力失稳破坏存在本质区别。涡振虽对应风速较低,但激发频率较高,若持续作用于结构,将可能导致桥梁构件发生疲劳损伤,进而引起局部裂纹,严重影响结构耐久性与安全性。因此,涡振控制已成为大跨度桥梁设计与施工过程中需重点关注的问题之一^[3]。

分离式双箱梁因具有良好的颤振稳定性,已广泛应用于大跨度桥梁的建设中。然而,该类结构断面在风作用下更易诱发涡激振动,因此需要在设计中通过合理的气动优化手段改善其抗涡振性能,以确保结构的整体安全与服役性能^[4-6]。针对上述问题,国内外学者已开展大量研究。Kwok 等^[7]通过同步测振与测压试验,研究了不同中央开槽率下分离式双箱梁断面表面的压力分布差异,当开槽率较大时,下游箱体基本不再受到上游箱体的干扰。

Laima 等^[8-9]结合节段模型风洞试验与计算流体力学(CFD)数值模拟方法,分析了分离式双箱梁在发生涡振时的表面压力分布与流场演变特征,结果指出,旋涡结构主要集中于下游箱梁的迎风腹板区域。郑天逸^[10]基于数值模拟方法研究了该类断面的涡激振动现象,认为中央开槽处涡团的交替脱落会产生周期性的吸附力,是涡振发生的主要诱因。王俊鑫等^[11]针对格栅的尺寸、间隙及布置方式对涡振的控制效果进行了分析,研究结果表明,合理布置的格栅结构能够有效削弱中央开槽区域的大尺度旋涡,从而实现对涡振的抑制。刘圣源等^[12]采用风洞试验方法,研究了分离式双箱梁扭转涡振的气动力演化特性,发现下游箱梁上下表面的气动力分布对涡激力具有显著贡献,是导致扭转型涡振的主要因素之一。朱长宇^[13]结合风洞试验与 CFD 模拟,研究了设置下中央稳定板对分离式双箱梁涡振控制的效果,尽管验证了其抑振作用,但尚未明确阐明其抑振机理。

在流场研究领域,随着计算机计算能力的持续提升以及高效数值算法的不断发展,流场的建模与分析工作变得日益高效与便捷。基于已有流场数据(如试验观测或数值模拟结果)而非控制方程本身的模态提取算法,因其更高的计算效率和更强的适应性得到了广泛应用^[14]。当前基于试验或数值计算所得样本数据,构建非定常流场的降阶模型(Re-

在风洞模型试验中,整个设计模型及所采用的

表 1 节段模型试验参数

Table 1 Test parameters of segment model

断面参数	实桥值	模型值
长度 L/m		1.8
高度 D/m	3.900	0.056
宽度 B/m	49.06	0.70
每延米质量 $M/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	3.7×10^4	7.551
质量惯性矩 $I_{\text{m}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	8.49×10^6	0.354
竖弯频率 f_{b}/Hz	0.143 2	3.780 0
扭转频率 f_{t}/Hz	0.629 5	9.400 0
竖弯阻尼比 $\xi_{\text{b}}/\%$		2.5
扭转阻尼比 $\xi_{\text{t}}/\%$		0.86

支撑系统满足风洞试验阻塞比小于 5% 的规范设计要求。在试验的内支架系统上安装节段模型,并通过模型侧面的法兰与刚性吊臂支架相连接,吊臂与内支架之间最后再通过弹簧连接来形成整个内支架系统^[28]。激光位移计被安装在吊臂的两端,测振试验采用 HL-G125-S-J 型的激光传感器,该仪器的测量精度为 $250\text{ mm} \pm 150\text{ mm}$,分辨率为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。在节段模型的两端安装椭圆形端板,来确保二维流动结构状态,防止模型在两端产生三维绕流效应的影响,整个风洞试验的弹簧悬挂系统如图 2 所示。

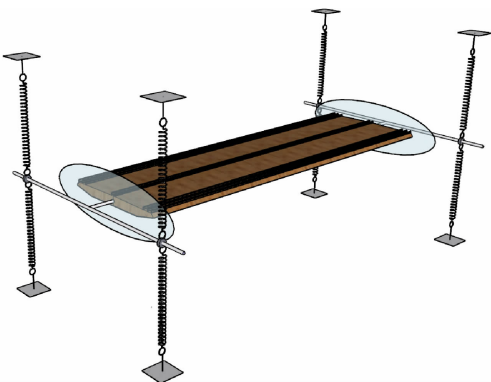


图 2 弹簧悬挂系统

Fig. 2 Spring suspension system

1.2 分离式断面涡振性能

本文风洞试验风速范围为 $1 \sim 10\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,按照风速比换算,实桥风速为 $3.2 \sim 32\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均在均匀流下进行试验,风攻角为 $0^\circ, \pm 3^\circ$,风洞试验结果如图 3 所示,其中断面涡振振幅响应数据已换算为实际结构响应。

由图 3(a)可知,该分离式双箱梁原断面在不同风攻角作用下会产生不同程度的扭转涡振现象。不同风攻角下,断面的最大振幅均超过了规范规定的允许值。在 $+3^\circ$ 风攻角下,断面扭转涡振的最大幅值达 0.75° 。因此,为保证该分离式断面在常遇风

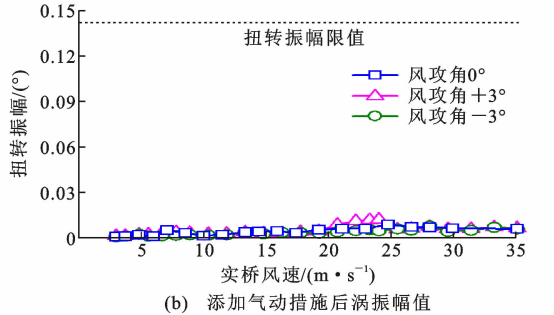
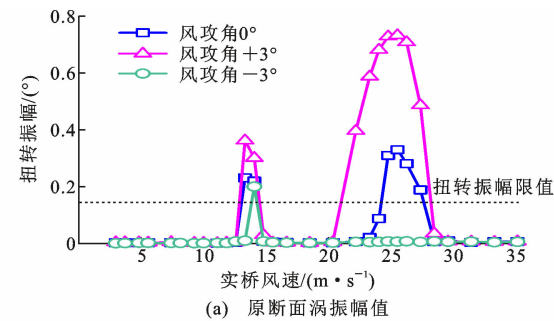


图 3 分离式断面涡振响应

Fig. 3 Vortex-induced vibration response of separate section
速期间下的正常状态,需要对该桥梁断面的涡振现象进行抑振措施研究。

针对分离式双箱梁的特点,本文进行了大量的气动措施试验,图 3(b)所示为添加气动措施后的涡振响应。结果表明,当采用双竖向板气动抑振措施时,该分离式断面在不同风攻角下的涡振幅值均大幅度减小且能满足抗风规范的相关要求。

2 数值模拟

目前,对于桥梁断面的涡振性能主要通过对断面进行一系列风洞试验来判断,但其花费巨大,存在一定的盲目性。此外,现有风洞试验难以表征断面周围流场旋涡的演化情况,尤其是对于一些细部结构比较复杂的区域,其结构周围流场的演化将会更加剧烈。因此,本文针对分离式双箱梁的结构特点,采用 CFD 研究方法对断面周围绕流场进行分析。

2.1 流体控制方程及离散方法

与流线型扁平箱梁不同,对于分离式双箱梁这种钝体断面而言,当气流经过桥梁结构时,会在中央开槽位置产生严重的分离流现象。本节数值模拟主要基于雷诺-平均(RANS)方法进行。采用 SST $k-\omega$ 湍流模型描述湍流特性,采用有限体积法对流体控制方程进行离散,采用二阶迎风格式对流项进行模拟,采用 SIMPLE 方法对速度-压力耦合项进行处理。

2.2 网格划分及边界条件

采用 ANSYS Fluent 软件,在静止状态下,对原

断面和添加双竖向向下稳定板断面进行非定常绕流场模拟计算,整个计算域的网格划分情况如图4所示。

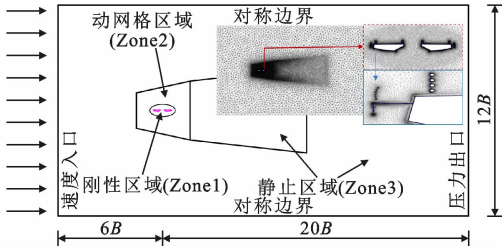


图4 计算域及网格划分

Fig. 4 Computing domain and grid division

流体域大小设置为 $14B \times 26B$, 由于分离式断面周围流场细部结构相对复杂, 对整个流体域进行分块划分网格, 将流体域分为3个主要区域 Zone1、Zone2 和 Zone3, 这样会使得网格划分更加标准、合理^[29]。Zone1 代表最内层断面流体域的网格加密区, 壁面最内层的网格厚度设置为 0.03 mm , 同时在壁面附近的网格进行结构化处理, 采用四边形网格, 这样能够满足壁面附近湍流黏性层要求, 并使得壁面函数 $y^+ < 1$ 。在其他区域主要采用非结构化网格。网格数量、质量以及时间步长对于模拟的结果具有极大的影响, 为了保证数值模拟的准确性和有效性, 在计算之前需要对网格和时间进行无关性检验, 本文经过无关性验证后, 最终选取整个计算区域的网格总数约为 3×10^5 。

数值模型的缩尺比与风洞试验保持一致, 为 $1:70$, 试验表明该分离式双箱梁断面在来流试验风速为 $3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 0° 风攻角下发生了严重的扭转涡振现象。在数值模拟参数设置中, 模型的湍流强度为 0.5% , 收敛残差设置为 1×10^{-5} , 时间模拟步长为 0.0005 s , 断面的 y^+ 值分布如图5所示。

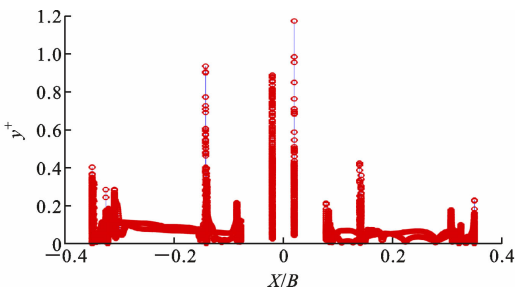


图5 断面 y^+ 值

Fig. 5 y^+ value of section

2.3 主梁断面绕流形态

当来流气流经过钝体断面表面时, 由于气流黏性效应, 会在壁面附近产生分离与再附现象, 使得断面周围流场产生一定的旋涡脱落结构。本节采用数

值模拟方法对分离式断面的流场分布特性展开研究, 其中来流入口风速为 $3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 通过对比原分离式断面和优化后断面的旋涡、流线特征以及表面压力分布情况, 揭示该分离式双箱梁断面形成涡振的主要因素。

图6(a)为原断面在 0° 风攻角下的涡量分布, 对断面周围的涡量采用 Q 准则方法识别, 流场中涡量值范围为 $-1000 \sim 1000$ 。气流经过断面前缘时, 上游断面前缘的倒 L 导流板和栏杆结构会使气流提前发生分离, 在倒 L 导流板内形成小型内卷涡; 随后沿着断面保持向后传播, 当气流在运动到中央开槽位置处时, 将交替产生较大尺度的旋涡结构。随着流动的持续发展, 旋涡将在中央开槽处发展壮大, 然后不断撞击下游断面的前缘和斜腹板, 使下游断面产生周期性的作用力。

以上分析表明, 在中央开槽处交替出现的大尺度旋涡结构会不断地碰撞下游断面, 从而导致整个断面产生周期性变化的气动力, 诱发该分离式断面产生扭转涡振现象。从图6(b)可以看出原始断面在中央开槽处存在明显的大尺度涡结构。图6(c)为主梁断面表面的压力分布曲线, 在该分离式断面的下游断面前缘部分存在局部正压区域, 说明中央开槽区域的气流涡团对下游箱梁产生了一定的作用。

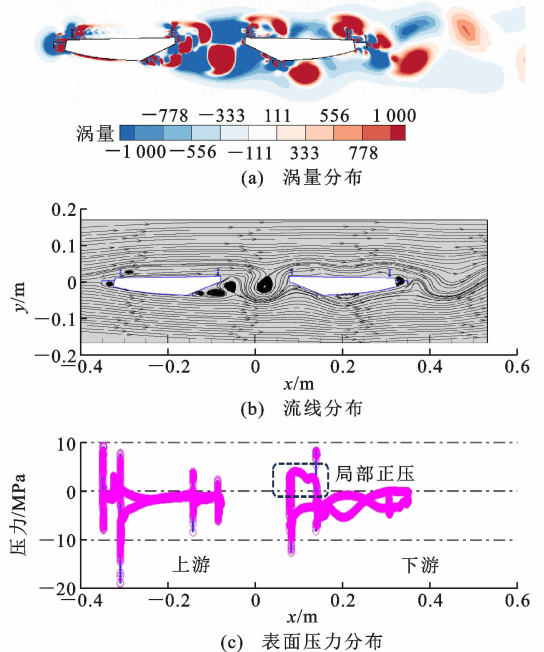


图6 原桥梁断面的绕流形态

Fig. 6 Flow form of original bridge section

图7(a)为采用双竖向向下稳定板后的主梁涡量分布云图。可以看出: 当气流经过上游断面时, 由于添加双竖向板, 气流在经过竖向板后产生分离现象,

并在开槽区域形成一系列小型旋涡结构;形成一定的回流区域,与原断面相比,优化后的断面在中央开槽处并未形成大尺度的旋涡结构。由此说明双竖向板的设置在中央开槽区域引入了显著的紊流成分[图 7(b)],其在来流作用下形成复杂的扰动结构,打破了原有流场中相对有序的大尺度涡结构,进而相互耗散为小型涡结构,极大地削弱了下游断面受到上游断面不断产生的交替作用力。

由图 7(c)可以看出:添加双竖向板改变了整个下游箱梁表面的压力分布特征。下游箱梁的迎风侧表面压力与原始断面相比产生了明显下降。说明双竖向板的存在改变了中央旋涡对于下游箱体的作用,使得下游箱梁所受到的压力大幅减小,减少了涡振发生的可能性。

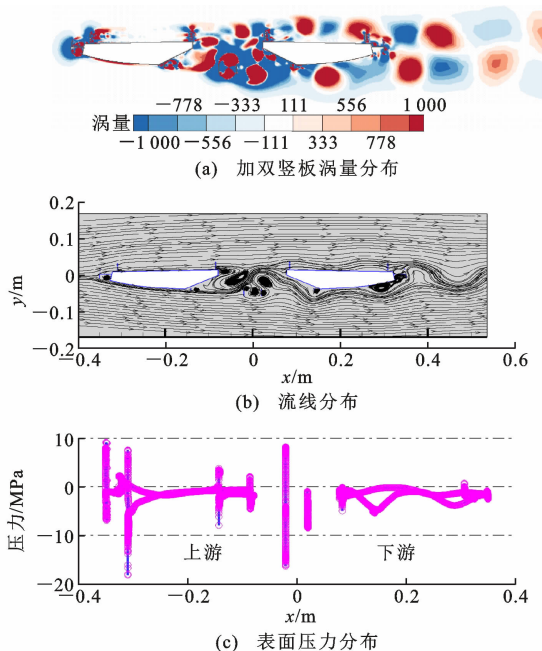


图 7 优化后桥梁断面的绕流形态

Fig. 7 Flow form of optimized bridge section

上述分析表明,添加双竖向板相当于在中央开槽处产生了一定的特征紊流,很大程度上改变了分离式断面中央开槽处的流场绕流结构,并且可以有效破坏中央开槽处的大尺度旋涡结构,使得作用于分离式断面下游箱梁的气动力大幅降低。

3 流场模态分解

为进一步明确分离式断面周围流场中旋涡漂移成分,通过 DMD 方法提取主要模态频率和能量,用来分析断面在发生涡振时其周围空域内流场的时空分布演化特性。

假设得到不同时刻下断面周围的流场快照矩

阵,该流场快照既可通过试验获得也可通过数值模拟方法得到,且不同流场快照的时间间隔均为 Δt ,快照序列由矩阵 \mathbf{X}, \mathbf{Y} 表示,即

$$\mathbf{X} = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_{N-1}] \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = [v_2, v_3, v_4, \dots, v_N] \quad (2)$$

式中: v_N 为第 N 个流场。

假设线性映射 \mathbf{A} 为快照 v_i 到 v_{i+1} 的映射,即

$$v_{i+1} = \mathbf{A}v_i \quad (3)$$

流场的矩阵 \mathbf{A} 代表在时间维度上将流场中的物理量进行平移 Δt 时间间隔,其反映了流场参数在一段时间内的演化,且在任何时间段内的流场快照都可满足,即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} = [\mathbf{A}v_1, \mathbf{A}v_2, \mathbf{A}v_3, \dots, \mathbf{A}v_{N-1}] \quad (4)$$

假设一个秩为 r 的矩阵 \mathbf{X} ,通过对流场矩阵 \mathbf{X} 进行奇异值分解,能够在复杂的流场中寻找出一种近似的矩阵 \mathbf{F} 来实现对系统矩阵 \mathbf{A} 的替代,因此有

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{W}^H \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{F}\mathbf{U}^H \quad (6)$$

式中: \mathbf{U}, \mathbf{W} 为正交变换的矩阵; $\mathbf{\Sigma}$ 为对角矩阵。

将(5)、(6)代入式(4),可得

$$\mathbf{A} \approx \mathbf{F} = \mathbf{U}^H \mathbf{Y} \mathbf{W} \mathbf{\Sigma}^{-1} \quad (7)$$

式中:矩阵 \mathbf{F} 为 \mathbf{A} 的最优低维估计矩阵。

要得到流场的模态分解结果即可对矩阵 \mathbf{F} 求特征值 u_j 和特征向量 \mathbf{y}_j ,进而得到流场中模态的放大率 g_j 和频率 ω_j ,即

$$g_j = \text{Re}[\lg(u_j)] / (2\pi\Delta t) \quad (8)$$

$$\omega_j = \text{Im}[\lg(u_j)] / \Delta t \quad (9)$$

流场模态放大率的符号是评估模态稳定性的关键指标。正的模态放大率往往预示着模态的不稳定,表明该模态在流场中可能经历显著的放大或增长;相反,负的模态放大率则暗示模态趋于稳定,意味着该模态在流场中的能量可能会逐渐衰减。通过以上 DMD 方法原理,可以提取出流场中主要模态特性,对流场的相干结构做进一步分析。

3.1 DMD 结果分析

对分离式断面进行数值模拟仿真分析的结果表明该分离式双箱梁断面在试验风速 $U = 3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时发生了明显的涡振现象。该断面升力系数响应随时间的变化如图 8 所示。

由升力系数的变化规律可以看出,在稳定阶段,当流场出现周期性旋涡脱落结构时,将造成断面所受到的升力系数出现正弦变化,保持为周期性函数。对图 8(a)进行傅里叶变换后,得到两种不同频率下能量的大小,如图 8(b)所示,说明结构的主频为

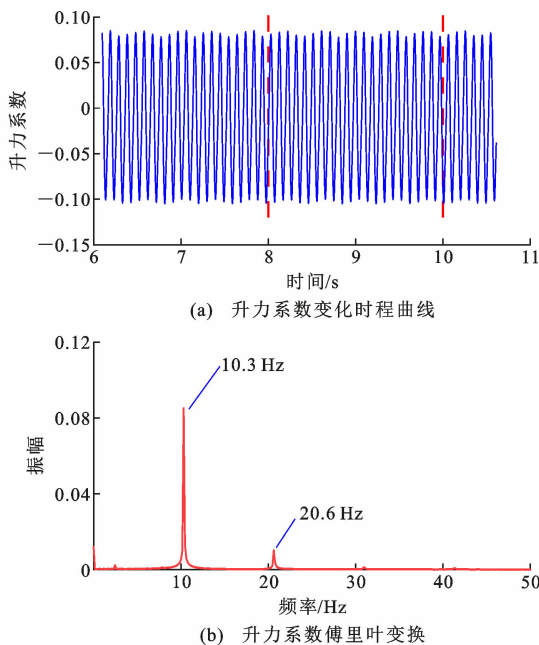


图 8 升力系数变化曲线
Fig. 8 Lift coefficient variation curve

10.3 Hz,在该频率下具有很强的能量,同时在升力曲线中存在有二阶高倍频频率成分。

3.2 模态分析结果

根据升力系数随时间的变化情况,选择图 8(a)中 10~12 s 范围内周期稳定阶段的总压矩阵进行 DMD 分析,提取前 5 阶模态的放大率及频率,如表 2 所示。

表 2 DMD 模态增长率与频率

Table 2 DMD modal increase rate and frequency

模态	增长率	频率/Hz
1	-4.76×10^{-7}	0.00
2	-3.43×10^{-5}	10.00
3	2.97×10^{-4}	20.60
4	4.13×10^{-4}	30.99
5	5.19×10^{-5}	41.33

由表 2 可以看出:第 1 阶模态的放大率远小于其他模态的放大率,其频率为 0,说明模态 1 对各个时刻流场的作用基本相同,其对应的是流场的平均状态,即静态模态。模态 2 的频率为 10 Hz,与升力系数变化中的主频基本吻合,同时升力系数中流场的倍频也都与流场中的模态基本吻合,说明动模态分解方法能在复杂的流场数据中识别出流场的各阶本质模态。

在对流场数据进行模态分解后,可以选择不同的排序方法对模态进行排序。本文采用模态范数 $\|\Phi\|$ 对该分离式断面流场中不同的模态进行排

序,在 DMD 算法中,除了第 1 阶模态表示为静止模态,其他流场模态的特征值将为共轭复数,其模态将会成对出现,因此可以取其实部进行分析。图 9 给出了不同模态下能量的分布,可以看出当选择前 5 阶模态时,其总能量已经大于 99%,即

$$\frac{\sum_{i=1}^5 e_i}{\sum_{i=1}^N e_i} \times 100\% > 99\% \quad (10)$$

式中: e_i 为每阶流场模态所含有的能量; N 为流场快照数。

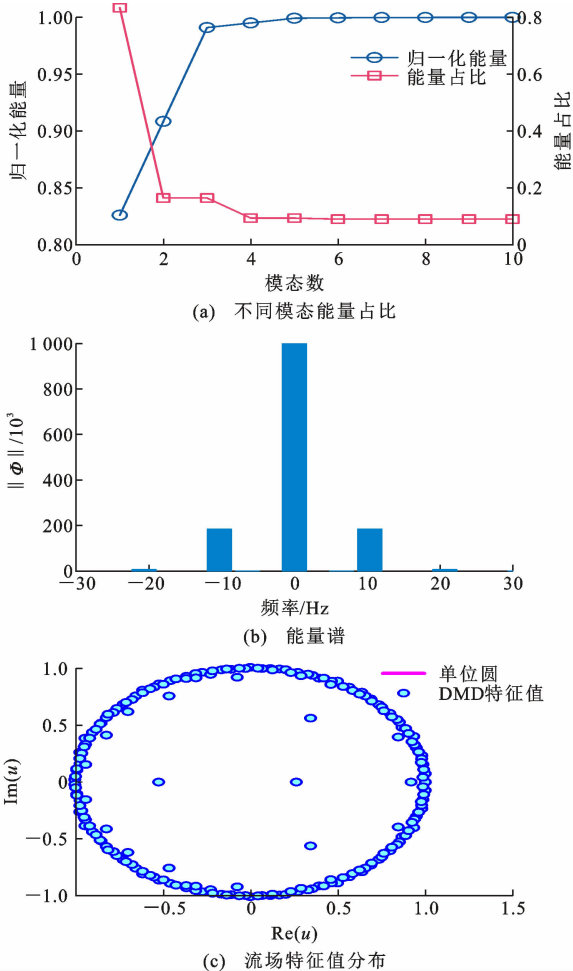


图 9 流场模态特征能量分布
Fig. 9 Energy distribution of flow field modal characteristics

对于该分离式断面周围流场模态而言,选择前 5 阶流场主要模态可基本反映出该断面绕流场的全部物理信息,同时也可以通过其重构出该分离式断面在整个空域内的流场特征。

3.3 模态压力云图

提取断面的压力场数据进行动模态分解,对前 3 阶模态的相干结构开展分析,从而获得该流场的

漩涡结构特征,分离式双箱梁断面周围流场在各个频率下流场的时空分布信息如图 10、11 所示。

图 10 为原分离式双箱梁断面的前 3 阶 DMD

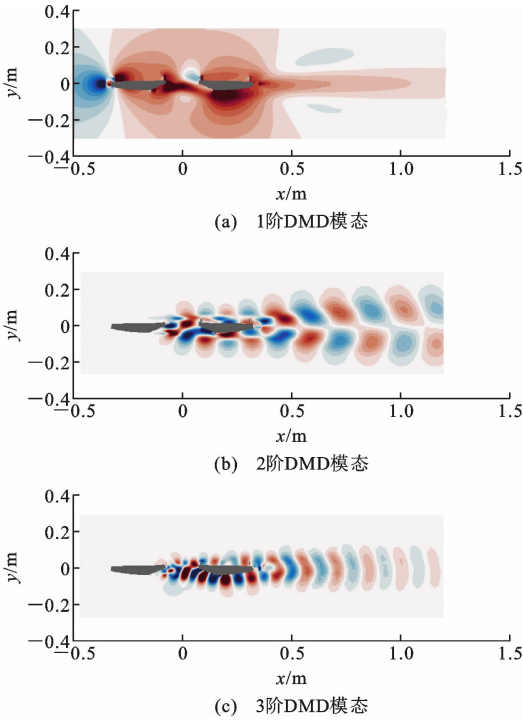


图 10 稳定阶段原断面 DMD 模态云图

Fig. 10 DMD modal nephogram of original section during stable phase

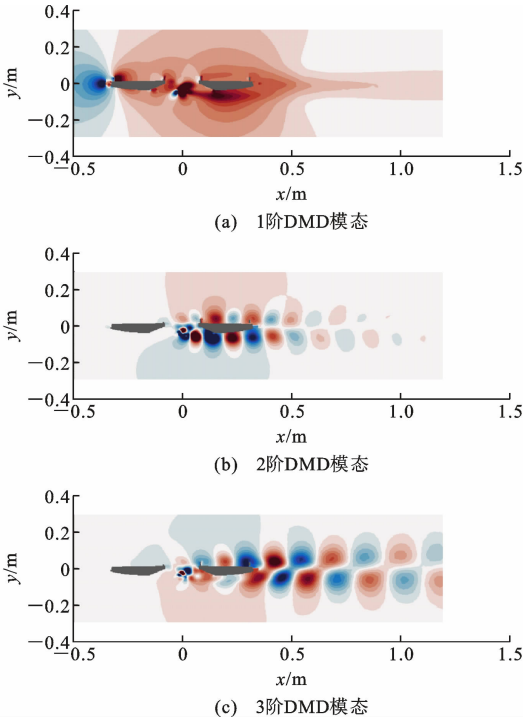


图 11 添加气动措施后 DMD 模态云图

Fig. 11 DMD modal nephogram after adding aerodynamic measures

模态流场空间分布云图,其中风速方向从左至右。1 阶 DMD 模态云图表示平均流场的演变,反映该分离式断面周围流场分布的整体发展趋势。在 2 阶流场模态中,中央开槽处成为断面产生旋涡的主导区域,产生了上下对称分布的涡结构。对于 3 阶以上的模态,模态频率表现为脱落涡主频的倍数,其流场结构随着模态阶数的增加而逐渐减小。

图 11 为添加双竖向稳定板后的 DMD 模态云图。对于 1 阶平均模态而言,下中央稳定板周围区域流场结构有明显的变化。在 2 阶模态中,模态云图沿着 x 轴近似出现对称的流场结构,但其分布的压力幅值较小,说明在中央开槽区域引入下中央双竖向稳定板可以大幅改变流场的模态分布特征。对于 3 阶以上模态,可以视为对流场的补充,尽管出现了反对称的流场结构,但是其能量相对降低,属于流场的高阶谐波模态,与原始断面相比,其高阶流场结构产生了极大的改变。

4 拉格朗日拟序结构分析

本文对于流场中逆序结构的提取采用有限时间李雅普诺夫指数 (FTLE),物理意义可解释为在有限的时间内流体中的某点与周围质点之间的平均分离程度。

在流体空间内的某一质点 $x(t_0)$ 和该质点周围存在的质点 $x(t_0) + \delta x(t_0)$,在流动映射 $F_{t_0}^{t_1}$ 的作用下,流体粒子的位置变为 $x(t_1)$, $x(t_1) + \delta x(t_1)$,可描述为

$$F_{t_0}^{t_1}(x) : x(t_0) \mapsto x(t_1; t_0, x(t_0)) \quad (11)$$

扰动量 $\delta x(t_1)$ 可描述为

$$\delta x(t_1) = F_{t_0}^{t_1}(t_1; t_0, x(t_0) + \delta x(t_0)) - F_{t_0}^{t_1}(t_1; t_0, x(t_0)) + O(\|\delta x(t_0)\|^2) \quad (12)$$

式中: $O(\|\delta x(t_0)\|^2)$ 为扰动量的高阶项。

可以利用范数来表达扰动量的大小,即

$$\|\delta x(t_1)\| = \sqrt{\langle \nabla F_{t_0}^{t_1} \delta x(t_0), \nabla F_{t_0}^{t_1} \delta x(t_0) \rangle} = \sqrt{\delta x(t_0) [C_{t_0}^{t_1}(x(t_0)) \delta x(t_0)]} \quad (13)$$

式中: $C_{t_0}^{t_1}(x_0)$ 代表柯西格林应变张量。

$C_{t_0}^{t_1}(x_0)$ 最大值可表示为

$$\max \|\delta x(t_1)\| = \sqrt{\delta x(t_0) \lambda_{\max}(C_{t_0}^{t_1} \delta x(t_0))} = \sqrt{\lambda_{\max}(C_{t_0}^{t_1}) \|\delta x(t_0)\|} \quad (14)$$

式中: $\delta x(t_0)$ 为 $C_{t_0}^{t_1}(x(t_0))$ 与其最大特征值对应的特征向量; λ_{\max} 为右柯西格林张量的最大特征值。

因此,可以引入 FTLE, FTLE 是一个重要的动力学指标,可以用于描述给定时间间隔内流体微团

经历的拉伸或压缩变形的程度。具体来说,FTLE 可以通过右柯西-格林张量的最大特征值来表示,是一个描述流体微团在流场中随时间变形的二阶张量。它的最大特征值反映了流体微团在某一特定方向上的最大拉伸或压缩程度,在有限时间 $[t_0, t_1]$ 的 FTLE 可表示为

$$\sigma_0^1(x_0) = \frac{1}{|T|} \ln(\sqrt{\lambda_{\max} \Delta}) \quad (15)$$

式中: Δ 为质点粒子在特定时间间隔 T 内其轨迹的空间导数矩阵与其转置矩阵相乘所得到的对称矩阵,这一对称矩阵的构造旨在求解其最大的特征值。

从式(15)可以明确观察到,时间间隔 T 被取了绝对值。这一处理方式源于时间 T 可能具有正负两种特性,其中正值代表轨迹线沿着时间轴正方向(向前)进行积分,而负值则代表轨迹线沿着时间轴负方向(向后)进行积分。通过取绝对值,可确保无论时间 T 的正负如何,都能得到一致的、具有物理意义的对称矩阵,并进而求解其最大的特征值。

本文使用 FTLE 方法来对流场质点的运动情况展开分析,其中积分时长 T 的选择对于准确捕捉 FTLE 场的特征至关重要。较长的积分时间可能平滑掉一些局部的小尺度结构,而较短的积分时间则可能突出瞬时效应,导致结果对噪声敏感。因此,在利用 FTLE 分析流体运动时,需要仔细选择积分时长 T ,以平衡对流体动态细节的捕捉与对噪声的鲁棒性。

图 12 为断面 FTLE 和示踪粒子分布情况。可以看出,FTLE 值在分离式断面的中间位置及其尾缘附近显著增大,形成明显的红色区域,它们代表了流场中的关键特征——“脊”结构。这些“脊”结构作为流场动力学的显著标志,精确地勾勒出了拉格朗日相干结构的轮廓。相比之下,在远离分离式断面的广阔区域,FTLE 值则呈现出相对较低的态势,反映了流场中不同区域动力学特性的显著差异,以及 LCS 结构对周围流体环境的强大影响。FTLE 值的增加,从动力学角度来看,意味着相关结构对周围流体粒子的吸引效应显著增强,这种吸引力促使来自不同动力学背景的流体向 LCS 结构靠拢,从而加剧了流场的复杂性和混沌性。图 12 所展示的 FTLE 分布不仅提供了流体流动模式,还深刻地揭示了流场中各区域流体的混合、输运以及涡旋动力学过程。

为使得 FTLE 中的“脊”结构能够准确捕捉到流场中 LCS 结构,取不同的积分时长计算结果进行对比,最终选择积分时长 $T=1$ s。图 12(a)、(b)分

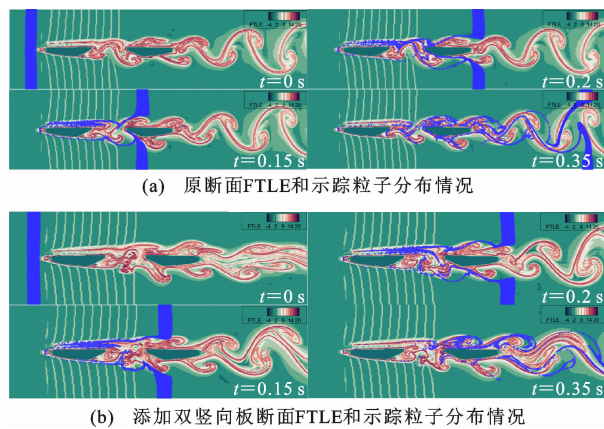


图 12 断面 FTLE 和示踪粒子分布情况

Fig. 12 Distribution of FTLE and tracer particles in cross-section

别为原断面与增设双竖向板分离式断面在特定典型时刻的 FTLE 和示踪粒子空间分布,其中示踪粒子的运动轨迹以蓝色轨迹线明确标识,可以直观展现流体动力学行为。

图 12 中 $t=0$ 时刻代表粒子尚未发生任何位移的初始时刻,以此为出发点记录后续各时刻粒子的位置变化。对比初始时刻与后续时刻的粒子分布,从中选取 4 个典型时刻下的粒子运动状态,直观揭示粒子的动态迁移过程及其随时间的演变规律。

对于分离式断面而言,断面周围的拉格朗日拟序结构主要存在于断面的中央区域以及整个下游区域,包括断面的尾流区。在初始时刻,来流在经过上游断面时,在中央开口区域存在明显交替变化的 LCS 结构,并且该 LCS 结构不断地撞击下游箱梁,吸引周围大量的示踪粒子贴附在下游箱梁的表面,并最终在断面的尾流区域形成明显的卡门涡脱现象,如图 12(a)所示。当添加双竖向板后,中央开槽区域的 LCS 结构数量增多,形状将会变得相对扭曲且模糊,如图 12(b)所示。从蓝色示踪粒子分布可知,粒子将会在该区域不断聚集并发生回流,极大地增加了该区域的湍流强度。当气流通过下游断面时,尾流区域将会产生多种大小不一的 LCS 结构,使得尾流无法形成规律的涡脱现象,从而避免了涡振的产生。

5 结 语

(1)在设计风速下,原分离式双箱梁断面存在较为严重的涡振现象,整体涡振性能较差,设置双竖向下稳定板后,分离式双箱梁的涡振得到了有效的抑制,涡振振幅明显降低。

(2)从流场的角度分析,原始断面在中央开槽位置处产生了大尺度、有规律的旋涡脱落,并不断地撞击下游断面,致使整个断面产生涡振现象。添加双竖向稳定板后,中央开槽处的大尺度旋涡结构被打散为小涡结构,相互内卷并极大耗散了大量涡结构的能量,大幅减少了下游断面所受的压力,有效抑制了断面的涡振现象。

(3)添加双竖向稳定板后,DMD 模态云图在中央开槽位置旋涡结构改变极大,同时使得主模态下流场模态幅值大幅降低,改变了高阶流场的模态结构。通过拉格朗日拟序结构可知,添加双竖向板后,粒子在中央开槽区域大量聚集,且使得断面的 LCS 结构数量增多,形状变得相对扭曲且模糊,尾流无法形成规律的涡脱现象,从而有效避免了涡振的产生。

参考文献:

References:

- [1] 项海帆,葛耀君,朱乐东,等.现代桥梁抗风理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005.
XIANG Haifan, GE Yaojun, ZHU Ledong, et al. Modern theory and practice on bridge wind resistance [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005.
CHEN Zhengqing. Bridge wind engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [3] 葛耀君,赵林,许坤.大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考[J].中国公路学报,2019,32(10):1-18.
GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Kun. Review and reflection on vortex-induced vibration of main girders of long-span bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10): 1-18.
- [4] 高东来,孟昊,陈文礼,等.分离式三箱梁涡激振动的风洞试验研究[J].工程力学,2025,42(6):228-233.
GAO Donglai, MENG Hao, CHEN Wenli, et al. wind tunnel study on the vortex-induced vibration of a separated triple-box girder[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(6): 228-233.
- [5] 李玲瑶,张敬怡,贺诗昌,等.不同风攻角下分离式双箱梁涡振气动力演化和局域相关性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(1):124-136.
LI Lingyao, ZHANG Jingyi, HE Shichang, et al. Study on the evolution and local correlation of the aerodynamic force for the separated twin-box girder during vortex-induced vibration at different wind at-
- tack angles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(1): 124-136.
- [6] 李永乐,陈科宇,汪斌,等.钝体分离式双箱梁涡振优化措施研究[J].振动与冲击,2018,37(7):116-122.
LI Yongle, CHEN Keyu, WANG Bin, et al. Optimal measures for vortex-induced vibration of a bluff girder with separated twin-box[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 116-122.
- [7] KWOK K C S, QIN X R, FOK C H, et al. Wind-induced pressures around a sectional twin-deck bridge model: effects of gap-width on the aerodynamic forces and vortex shedding mechanisms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 110: 50-61.
- [8] LAIMA S J, LI H, CHEN W L, et al. Investigation and control of vortex-induced vibration of twin box girders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 39: 205-221.
- [9] LI H, LAIMA S J, OU J P, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements[J]. Engineering Structures, 2011, 33(6): 1894-1907.
- [10] 郑天逸.基于CFD的分离式双箱梁悬索桥气动性能及涡激振动控制研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
ZHENG Tianyi. Study on aerodynamic performance and vortex-induced vibration control of long-span suspension bridge with separated double box girder based on CFD[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [11] 王俊鑫,马存明,廖海黎.抑涡格栅对宽幅分离式双箱梁涡振性能的影响研究[J].桥梁建设,2017,47(6):24-29.
WANG Junxin, MA Cunming, LIAO Haili. Influences of grid plates on vortex-induced vibration performance of separated wide twin box girders [J]. Bridge Construction, 2017, 47(6): 24-29.
- [12] 刘圣源,胡传新,赵林,等.中央开槽箱梁断面扭转涡振全过程气动力演化特性[J].工程力学,2020,37(6):196-205.
LIU Shengyuan, HU Chuanxin, ZHAO Lin, et al. Aerodynamic force evolution characteristics around the central-slotting box girder during the whole torsional vortex-induced vibration process[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(6): 196-205.
- [13] 朱长宇.分离式双箱梁涡振及抑制研究[D].西安:长

- 安大学, 2021.
- ZHU Changyu. Vortex-induced vibration performance and control of twin-box girder [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [14] EDWARDS W S, TUCKERMAN L S, FRIESNER R A, et al. Krylov methods for the incompressible Navier-Stokes equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 110(1): 82-102.
- [15] ROMANOWSKI M. Reduced order unsteady aerodynamic and aeroelastic models using Karhunen-Loeve eigenmodes[C]//AIAA. Proceedings of 6th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston: AIAA, 1996: 96-194.
- [16] HALL K, THOMAS J, DOWELL E. Reduced-order modelling of unsteady small-disturbance flows using a frequency-domain proper orthogonal decomposition technique [C]//AIAA. Proceedings of 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 1999: 1-12.
- [17] LIEU T, LESOINNE M. Parameter adaptation of reduced order models for three-dimensional flutter analysis[C]//AIAA. Proceedings of 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2004: 1-9.
- [18] DOWELL E H, HALL K. Modeling of fluid-structure interaction [M]. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [19] LUCIA D J, BERAN P S, SILVA W A. Reduced-order modeling: new approaches for computational physics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2004, 40(1/2): 51-117.
- [20] NOACK B R, AFANASIEV K, MORZYNSKI M, et al. A hierarchy of low-dimensional models for the transient and post-transient cylinder wake[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 497: 335-363.
- [21] ROWLEY C W. Model reduction for fluids, using balanced proper orthogonal decomposition[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, 15(3): 997-1013.
- [22] ROWLEY C W, MEZIC I, BAGHERI S, et al. Spectral analysis of nonlinear flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 641: 115-127.
- [23] SCHMID P J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 656: 5-28.
- [24] HALLER G, YUAN G. Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2000, 147(3/4): 352-370.
- [25] FRANCO E, PEKAREK D N, PENG J F, et al. Geometry of unsteady fluid transport during fluid-structure interactions[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 589: 125-145.
- [26] GREEN M A, ROWLEY C W, HALLER G. Detection of Lagrangian coherent structures in three-dimensional turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 572: 111-120.
- [27] 赵宇, 王国玉, 黄彪, 等. 基于拉格朗日方法的水翼尾缘非定常涡旋结构研究[J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(7): 666-670.
- ZHAO Yu, WANG Guoyu, HUANG Biao, et al. Lagrangian-based investigation of unsteady vortex structure near trailing edge of a hydrofoil[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(7): 666-670.
- [28] 黄森华. 双边箱钢-砼组合梁悬索桥气动抑振措施试验分析[J]. *广东公路交通*, 2024, 50(2): 33-40.
- HUANG Senhua. Experimental study on aerodynamic vibration suppression measures for suspension bridge with double-sided box steel-concrete composite beams[J]. *Guangdong Highway Communications*, 2024, 50(2): 33-40.
- [29] 马振兴. 基于流场特征的开口断面涡振机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2024.
- MA Zhenxing. Research on the mechanism of vortex-induced vibration in open section based on flow field characteristics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2024.