

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.105



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



随机车载下悬索桥梁端位移时频特征与振动控制

顾海伦¹, 过超², 易小年³, 杨东辉¹, 伊廷华^{1,4}, 苑洁艺²

(1. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100120; 3. 广州珠江黄埔大桥建设有限公司, 广州 511498; 4. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 102616)

摘要:在役大跨悬索桥普遍存在因车致梁端纵向累积位移过大而导致的伸缩缝和支座提前磨损问题,为有效应对日常高频次车辆荷载对悬索桥约束装置的不利影响,本文从时-频域角度出发,系统研究随机车载下的大跨悬索桥梁端纵向位移的响应特征、影响机制及振动控制措施。通过时频域特征识别与解耦分析,揭示了车致梁端纵向位移的组成成分及其振动特征;探讨了交通流参数变化对不同位移成分的作用规律,从频域角度明确了车辆参数与梁端位移之间的动力关系;评估了液体黏滞阻尼器对车致梁端位移不同模态成分的控制效果及其参数敏感性。结果表明:梁端纵向位移主要由车辆强迫激励产生的准静态成分和结构纵飘模态主导的动态成分构成,沿纵向均呈近似“单摆”的刚体运动特征;车重、车速与车辆空间分布对梁端位移均有显著影响,且作用机制各异;黏滞阻尼器对动态位移具有稳定显著的抑制能力,最小控制率可达 81.4%,对准静态位移的控制性能更依赖参数配置,特别是对速度指数 α 更加敏感。

关键词:悬索桥;梁端位移;时频特征;黏滞阻尼器;振动控制

中图分类号:TU441 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Time-frequency characteristics and vibration control of girder-end displacement in suspension bridges under stochastic vehicle loads

GU Hailun¹, GUO Chao², YI XiaoNian³, YANG Donghui¹, YI Tinghua^{1,4}, YUAN Jieyi²

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning P. R. China; 2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100120, P. R. China; 3. Guangzhou Pearl River Huangpu Bridge Construction Co., Ltd., Guangzhou 511498, P. R. China; 4. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, P. R. China)

Abstract: It is common for in-service long-span suspension bridges to suffer from premature wear of expansion joints and bearings due to excessive vehicle-induced girder-end longitudinal cumulative displacements. To effectively mitigate the adverse effects of frequent vehicle loads on the restraint systems of suspension bridges, this study systematically investigates the response characteristics, influencing mechanisms, and vibration mitigation strategies of longitudinal girder-end displacements in long-span suspension bridges under stochastic

收稿日期:2025-06-27

基金项目:国家自然科学基金(52478303、52322807、52438003)

作者简介:顾海伦(1998-),男,博士生,主要从事桥梁健康监测研究, E-mail: guhlbridge@163.com。

杨东辉(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: dhyang@dlut.edu.cn。

Received: 2025-06-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52478303, 52322807, 52438003)

Author brief: GU Hailun (1998-), PhD Candidate, main research interest: bridge health monitoring, E-mail: guhlbridge@163.com.

YANG Donghui (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: dhyang@dlut.edu.cn.

vehicular loads from a time-frequency domain perspective. First, through time-frequency domain feature identification and decoupling analysis, the composition and vibrational characteristics of vehicle-induced girder-end longitudinal displacements were revealed. Second, the influence of traffic flow parameter variations on different displacement components was investigated, clarifying the dynamic relationship between vehicle parameters and girder-end displacements from a frequency-domain perspective. Finally, the control effectiveness and parameter sensitivity of fluid viscous dampers on different modal components of girder-end displacements were evaluated. The results indicate that the girder-end displacement is primarily composed of quasi-static components induced by vehicle-induced forced excitations and dynamic components dominated by the longitudinal-sway mode of the structure, both exhibiting a rigid-body “pendulum-like” motion along the longitudinal direction. Vehicle weight, speed, and spatial distribution all have significant influences on the displacement response, with distinct underlying mechanisms. Viscous dampers demonstrate stable and effective suppression of dynamic components, with the minimum reduction rate reaching up to 81.4%. In contrast, their control effectiveness on quasi-static components is more sensitive to parameter configurations, especially the velocity exponent α .

Keywords: suspension bridge; girder-end displacement; time-frequency characteristics; viscous damper; vibration control

大跨悬索桥通常采用漂浮或半漂浮体系以减小加劲梁产生的过大结构内力,但这也导致加劲梁显著的纵向振动问题^[1-4]。近年来的工程实践表明^[5-6],在日常运营过程中,大跨悬索桥的加劲梁在温度、风及车辆荷载等因素作用下,会产生频繁的纵向往复运动。这种运动会造成梁端纵向累积位移显著,严重影响约束装置以及吊索等构件的使用寿命,进而影响桥梁正常运营。例如,主跨 1385 m 的江阴大桥和主跨 1490 m 的润扬大桥主梁的日平均累积位移分别达到 93.0 m 和 81.0 m,这也导致伸缩缝、支座提前磨损以及短吊杆疲劳破坏^[7-8]。因此,深入研究车辆荷载作用下大跨悬索桥梁端位移的特征、运动机理及振动控制策略,对提升约束构件耐久性具有重要意义。

针对大跨度悬索桥加劲梁纵向运动机理和响应特征,万田保等^[9]定性分析了悬索桥的纵向位移特征,初步阐明了其产生机制。Huang 等^[10]基于主缆变形理论,指出非对称竖向荷载作用下主缆与吊杆的几何变形是引起主梁纵向运动的主要原因。Guo 等^[11]对 3 座大跨钢桥的纵向位移监测数据进行分析发现,车辆与风荷载诱发的高频振动是梁端累积位移的主要来源,温致位移对梁端累积行程贡献微小。此外,Hu 等^[12]和 Qu 等^[13]分别对矮寨大桥和澜沧江大桥的实测数据进行分析,得到了同样的结论。Sun 等^[14]借助机器学习 SHapley 加性解释对不同荷载对累积位移的影响进行量化,结果显示,由车辆荷载和环境激励引起的高频梁端位移占主要成分。Liang 等^[15]基于江阴大桥实测数据发现,车致准静态位移在梁端日均累积行程中占比超 70%。

Li 等^[16]构建了风-车-桥耦合分析系统,进一步揭示了梁端纵向累积位移与交通流总重量之间存在显著相关性。

为抑制悬索桥梁端位移,常在塔梁间设置纵向阻尼器等约束装置。Feng 等^[17]指出,非线性液体黏滞阻尼器在地震作用下可有效降低桥梁位移响应及塔柱内力。马长飞等^[18]以武汉杨泗港长江大桥为背景,研究了地震作用、风荷载和车辆制动力下黏滞阻尼器对主梁纵向振动的影响。张宇峰等^[7]通过对比加装阻尼器前后的梁端累积位移发现,设置液体黏滞阻尼器可有效减小伸缩缝的累积位移,减弱了车辆冲击力的影响。Guo 等^[19]研究了单车和多车荷载工况下的阻尼器控制效果,发现黏滞阻尼器对于梁端位移控制作用明显。Yang 等^[20]和龙关旭等^[21]进一步验证了黏滞阻尼器对车辆制动激励作用下梁端伸缩缝变形的约束作用。

综上所述,日常高频次的随机车辆荷载是梁端产生过量累积位移的主导因素。尽管已有研究揭示了车辆荷载对梁端累积位移的显著作用,但对于车速、车重与车辆空间分布等随机车流特性对位移响应的具体作用规律与机理仍缺乏系统认识。同时,现有阻尼器参数设计多聚焦于抗震需求,针对随机车流下振动控制性能的评估研究相对不足。因此,笔者针对随机车载作用下悬索桥梁端位移的响应特性与振动控制进行研究。首先,通过时频特征识别揭示车致梁端位移响应的组成成分、形成机理与振动特征;其次,探讨交通流参数变化对不同模态位移成分的作用规律,明确交通荷载参数与梁端位移响应之间的动力关系;最后,评估黏滞阻尼

器的耗能性能对不同频段位移成分的抑制效果及参数敏感性,为参数优化与制定控制策略提供参考。

1 桥梁介绍

1.1 主体结构概况

研究桥梁为主跨 1108 m 的双塔单跨钢箱梁悬

索桥,跨径布置为 290 m+1108 m+350 m。主缆矢跨比为 1:10,横桥向主缆中心间距为 36.5 m。全桥共设吊索 170 根,吊索沿桥向标准间距为 12.8 m。主梁采用扁平钢箱梁结构,梁宽 41.69 m,梁高 3.5 m,按双向六车道设计。大桥采用半漂浮体系,在北塔和南塔处分别设置一对竖向支座和纵向阻尼器,跨中未设置中央扣。桥型总体布置如图 1 所示。

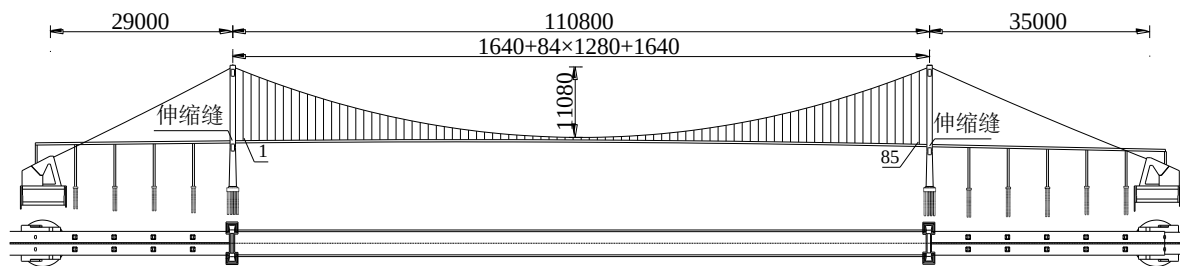


图 1 悬索桥桥型布置图(单位:cm)

Fig.1 General arrangement of the suspension bridge (unit: cm)

1.2 有限元模型建立

基于 ANSYS 有限元软件建立了该悬索桥的三维计算模型,全桥模型如图 2 所示。主体结构采用三维梁单元建模,其中主梁、主塔及横梁使用 Beam4 单元模拟,主梁沿吊杆间距进行离散,并采用鱼骨刺形式表示桥面系统。主缆与吊索采用 Link10 单元建模。桥面系的二期恒载及附属设施以集中质量形式施加,质量及其惯性矩集中于主梁节点。边缆锚碇及主塔底部设为固结边界,主梁端部在竖向与横向自由度方向通过主从约束与桥塔横梁连接;伸缩缝的纵向约束作用采用 Combin14 单元模拟,从而形成半漂浮体系。阻尼比采用 Rayleigh 阻尼方法设定,取值为 0.3%。相关研究表明^[22],路面不平顺对大跨悬索桥纵向整体位移响应影响较小,故未考虑路面粗糙度,以兼顾建模精度与计算效率。

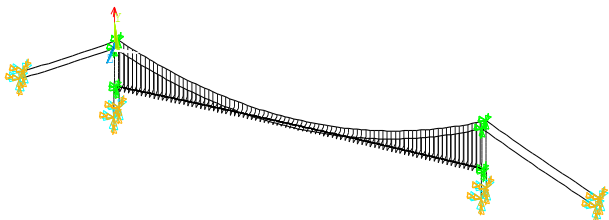


图 2 悬索桥有限元模型

Fig.2 Finite element model of the suspension bridge

鉴于大跨悬索桥结构具有明显的几何非线性特征,缆索索力对成桥线形、内力分布及重力刚度具有显著影响。为确保有限元模型与实际结构状态一致,采用基于索力调整与线形控制的自动迭代算法修正主缆及吊索初始张拉力^[3],使最终误差控

制在 2% 以内。在 ANSYS 瞬态分析中,开启大变形分析选项(NLGEOM, ON),以考虑缆索类构件受力过程中的几何非线性;同时,启用“SSTIF, ON”命令,引入应力刚度项,以模拟悬索结构在恒载下的重力刚化效应。

为便于分析车致梁端位移的频域特性,进一步提取该悬索桥前 5 阶自振频率和振型,结果如表 1 所示。结果表明,悬索桥的振型呈现加劲梁反对称竖弯与纵飘振型耦合特征,而在加劲梁正对称竖弯振型中未发现明显纵飘振型,在后文将重点研究该频域特点对于车载作用下梁端位移的影响机理。

2 随机车载下的梁端位移响应特征

2.1 基于 WIMs 的随机车流模拟

为保证模拟结果的代表性与工程适用性,基于桥址区 WIMs 采集的实测交通流数据,选取典型时段进行统计分析,以构建随机车流样本。主要包括 3 个步骤^[2, 23-24]。

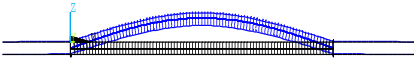
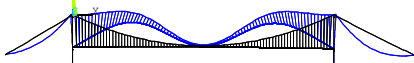
步骤 1:建立车辆荷载参数的概率分布模型。分别统计上游和下游侧的车型占比、车重、车速以及车间距等数据,确定其最优的概率分布模型。

步骤 2:随机车流模拟重构。确定分析时段的交通总量 N ,依据车型占比计算不同类型车辆所对应的交通量 n ,根据步骤 1 构建的车辆参数概率分布模型,采用蒙特卡罗方法进行逐辆抽样,生成符合指定分布的车辆参数样本。

步骤 3:生成有限元加载所需的车辆荷载信息矩阵。结合每辆车的车速、车重和车间距,确定其在各荷载步中的空间位置,直至完成所有车辆的转

表 1 悬索桥频率与振型

Table 1 Frequencies and mode shapes of the suspension bridge

阶次	频率/Hz	振型描述	振型曲线
1	0.073	一阶正对称侧弯	
2	0.112	一阶反对称竖弯+纵飘	
3	0.149	一阶正对称竖弯	
4	0.192	二阶反对称竖弯+纵飘	
5	0.205	二阶正对称竖弯	

换,最终按时间顺序构建车辆位置与荷载信息矩阵,作为有限元分析输入。

2.2 车致梁端位移时-频域特征

采用模拟方法生成 2 h 交通流样本,在 ANSYS 中进行有限元瞬态动力分析,提取所得梁端纵向位移时程曲线如图 3(a)所示。首先从频域角度对车辆荷载作用下的梁端纵向位移进行分析。从图 3(b)的频谱可以看出,梁端位移响应主要由两类成分组成:其一为频率集中在 0.04 Hz 以内的响应成分,对应于车辆荷载所激发的纵向强迫振动。该响

应频率受车速 v 与桥梁跨度 L 的影响(可近似估算为 v/L),具有显著的低频特性,可近似等效为车辆以低速通过桥梁时梁端产生的缓变位移,通常定义为准静态响应。其二为频率集中于 0.110 Hz 附近的响应成分,该频率与有限元模型中一阶反对称竖向弯曲耦合纵飘振型的频率基本一致,表明其主要来源于结构在车辆荷载激励下的纵飘模态响应,反映了桥梁结构本身的动力特性,属于纵向动态响应。

采用低通滤波方法对加劲梁纵向位移进行成分解耦,设定截断频率为 0.04 Hz,分离结果如图 4 所示。从图 4(a)观察可知,对于车致准静态成分,呈现振动幅值大、振动频率低的特点,而对于动态成分,其振动幅值较低,但振动频率高。具体来看,准静态位移时程范围在 $[-23\text{ mm}, 16\text{ mm}]$,纵向动态位移时程范围在 $[-4.4\text{ mm}, 5.0\text{ mm}]$ 。进一步对比了悬索桥加劲梁两侧梁端准静态和动态位移时程,图 4(b)、(c)表明,对于梁端两种位移成分,南塔侧和北塔具有相似的运动趋势,这表明车辆荷载作用下加劲梁沿纵向呈类似“单摆”的刚体运动特征。上述分析表明,动态位移成分主要与车辆激励的纵飘振型相关;而已有研究则指出^[10],准静态成分来源于非对称车辆荷载引起主缆几何变形,进而导致加劲梁整体向荷载侧发生纵向位移,上述机理解释了加劲梁两侧准静态与动态位移在运动趋势和幅度上表现一致的原因。此外,需要指出的是,对于大跨悬索桥普遍采用的速度型黏滞阻尼器,其减振机制主要依赖阻尼力实现能量耗散,仅影响结构的阻尼比而不引入附加刚度。因此,阻尼器的设置不会显著改变结构的固有频率及时域运动特征,主要体现在梁端位移幅值和频谱幅值的降低。

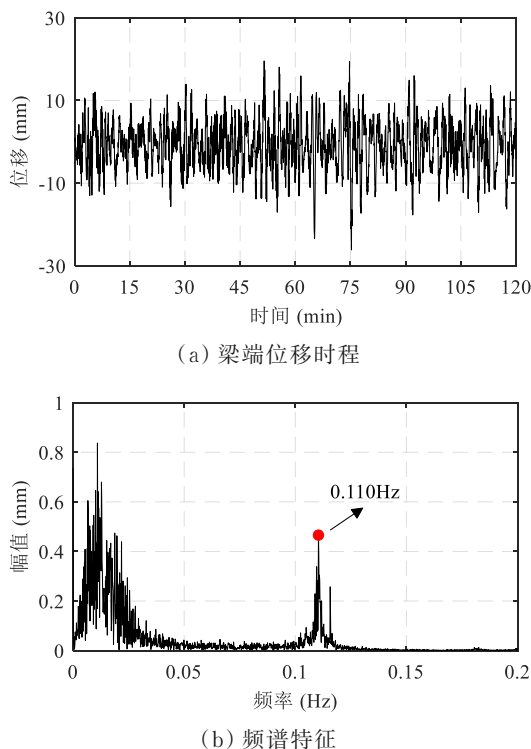


图 3 梁端位移时域响应及频域特征
Fig.3 Time-domain response and frequency characteristics of girder-end displacement

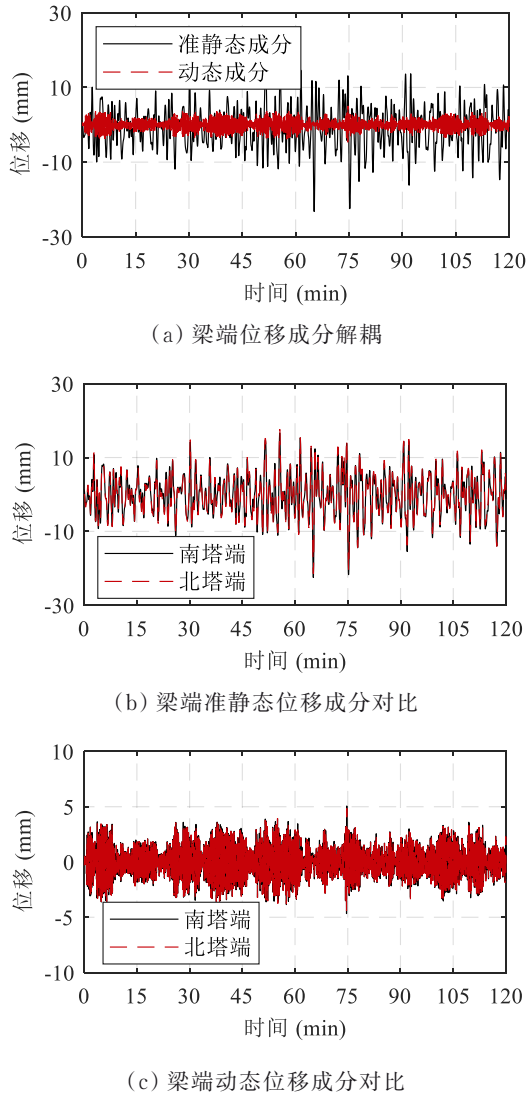


图4 加劲梁梁端位移解耦及响应对比

Fig.4 Decoupling and response comparison of girder-end displacement in the stiffening girder

3 交通流特性对梁端位移特征的影响

3.1 车重对梁端位移的影响

为了分析车重对加劲梁梁端纵向位移的影响,在初始交通流基础上,将所有车辆的车重乘以不同权重系数,共设置6种加载工况,分别为1.0、1.1、1.2、1.3、1.4和1.5,其他条件保持不变。针对各工况,进行了有限元瞬态动力分析,提取对应的梁端纵向位移时程。在悬索桥的运营维护中,为保证梁端约束装置的耐久性,主要关注加劲梁梁端的最大纵向位移和纵向累积位移指标。研究表明^[16, 25-26],伸缩缝或支座中的PTFE滑板累计滑动距离超过设计值,是导致悬索桥约束装置损坏的主要原因;而梁端最大位移则决定约束装置在运营状态下是否会发生位移超限,是保障伸缩缝和阻尼器正常工作的关键指标。其中,梁端累积位移可由式(1)计算。

$$D = \sum_{i=0}^n |d_{i+1} - d_i| \quad (1)$$

式中: D 为梁端累积位移; d_i 为第*i*时刻梁端位移; n 为统计时段的时长。

由于加劲梁两端位移时程具有对称性,仅对北塔侧梁端位移进行研究。图5(a)、(b)的分析结果显示,在车流量以及车辆空间分布相同的情况下,随着车重权重系数由1.0增至1.5,梁端最大位移由14 mm增至21 mm,增幅约为50%;累积位移也由5.07 m增至7.37 m,增长约45%(图5(c)),表明车重与梁端位移幅值及累积位移呈显著正相关关系。

频域分析结果(图5(d))显示,车重的变化并未改变位移响应频域分布特征,即准静态成分分布在0~0.04 Hz,动态成分则集中在一阶纵飘频率附近,车重的增加主要影响不同频率成分的幅值,即车重的增大会同时导致梁端位移准静态成分和动态成分的增加。因此,为延长桥梁约束装置使用寿命,宜加强过桥重车监控,避免因车重偏大导致伸缩缝或支座滑板过早磨损。

3.2 车速对梁端位移的影响

为分析车速对梁端纵向位移的影响,采用对随机车流中车速施加重系数的方式进行参数调控。然而,车速的提升会引起同一时段内交通量的增加,使梁端纵向位移同时受到车速与车流量耦合作用影响,难以单独识别车速因素。因此,进一步将研究时段内的过桥车辆总数固定,使车速变化仅影响车流通过桥梁所需的总时间,从而实现对车速变量的独立分析。

图6(a)、(b)展示了不同车速下梁端位移时程。从图中可以明显发现,在相同车流量条件下,车速的增加会缩短随机车流过桥时间,这符合预期的假设,表明随机车流模拟的合理性。此外,车速的变化也会导致梁端位移时程的差异,这主要是因为车速变化会影响不同荷载步下随机车流的空间分布。图6(c)的频谱分析结果表明,随着车速的增加,梁端准静态位移成分在频率分布范围呈现出整体增大的趋势,而相应的频域幅值降低,这主要是由于车致梁端准静态位移成分主要与荷载激励频率有关,当车速增加时,随机车流平均过桥时间变短,相应的激励频率增大。而动态位移成分主要与车辆激励的悬索桥纵飘频率有关,它仅与悬索桥的自振频率相关,荷载激励频率的变化(即车速增加)不会对该部分频率范围产生影响。但可以明显发现,车速的增加会导致动态成分频域幅值增大,即车速增加会导致梁端位移中动态成分比重增加,这对桥梁结构疲劳性能和约束装置耐久性提出更高要求。

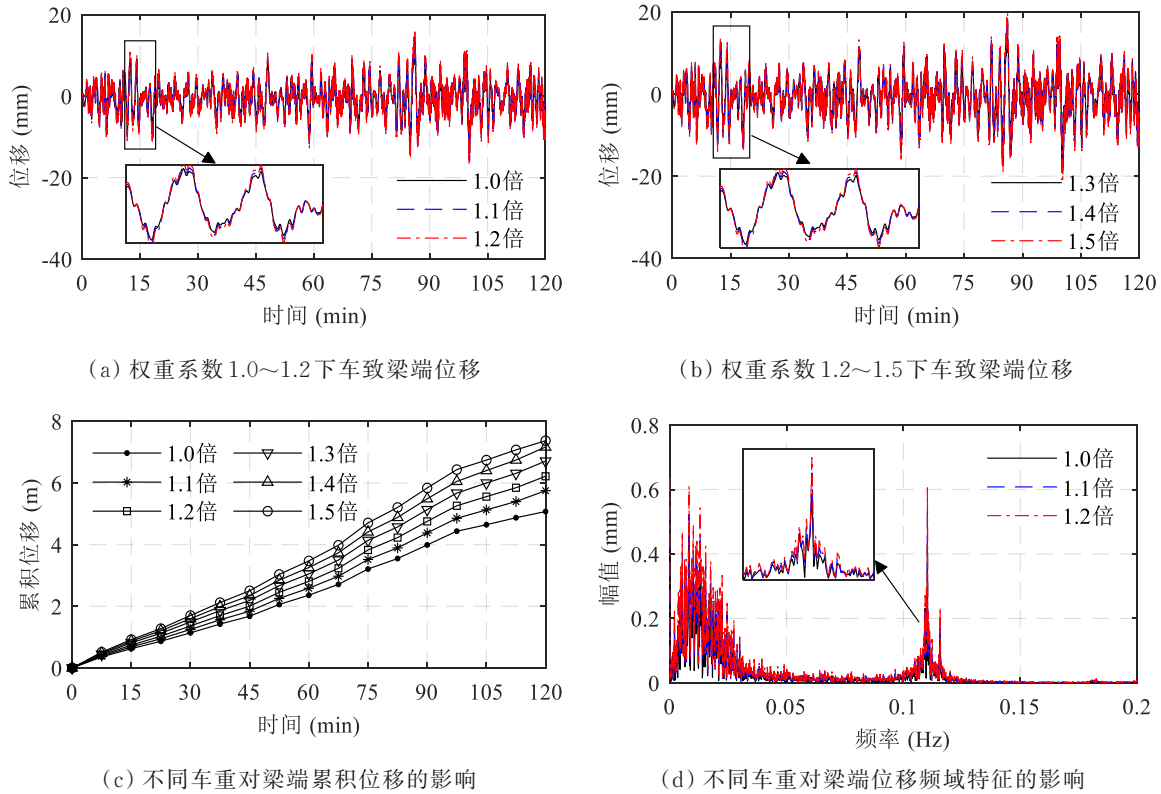


图5 车重对梁端位移时频特征的影响

Fig.5 Influence of vehicle weight on the time-frequency characteristics of girder-end displacement

3.3 空间分布对梁端位移的影响

为考虑车辆空间分布对车致梁端纵向运动的影响,分别模拟了悬索桥上、下游车流量相等但行驶方向相反与相同的两种工况,结果如图7所示。由图7(a)可见,在同向车流工况下,梁端位移的幅值和累积位移均显著大于反向车流工况下的响应。进一步从图7(b)的频谱分析结果可知,两种工况在频域特性上主要体现在准静态成分频谱幅值的差异,且同向车流工况下梁端响应的频谱幅值显著高于反向车流工况。该差异可能源于车辆荷载在加劲梁上的不对称分布所引发的准静态效应。相比之下,反向车流在荷载分布更趋对称,在纵向上形成抵消效应,从而降低了车辆荷载引起的梁端准静态运动幅度。

4 随机车流下阻尼器的振动控制分析

若桥梁未设置纵向阻尼器,车辆荷载作用将导致梁端产生显著的累积位移,严重威胁伸缩缝和支座的服役安全。因此,设置合理的纵向减振装置以提升结构耐久性具有重要意义。

4.1 阻尼器模型的建立

目前,在桥梁振动控制领域广泛应用的液体黏滞阻尼器属于速度相关型减振装置,通常安装在主塔横梁和加劲梁连接处。黏滞阻尼器的力学本构

关系如式(2)所示。

$$F = C|v|^{\alpha} \operatorname{sgn}(v) \quad (2)$$

式中: F 为阻尼器输出的阻尼力; v 为阻尼器两端的相对速度; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示阻尼器运动方向; C 为阻尼系数; α 为速度指数,通常设置为0.2~1.0,当 $\alpha=1$ 时为线性阻尼器, $\alpha<1$ 为非线性黏滞阻尼器。

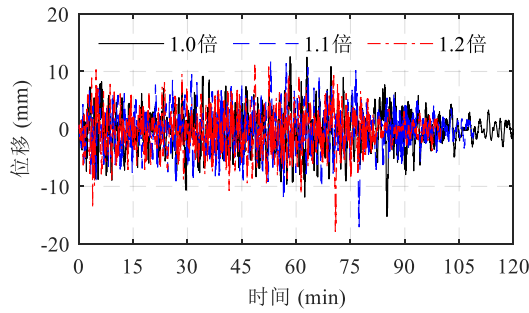
在ANSYS中可采用Combin37单元通过设置单元实常数可实现黏滞阻尼器的本构关系的准确模拟,其设置的原理如式(3)所示。

$$F = C_1|v|^{1+C_2} \operatorname{sgn}(v) \quad (3)$$

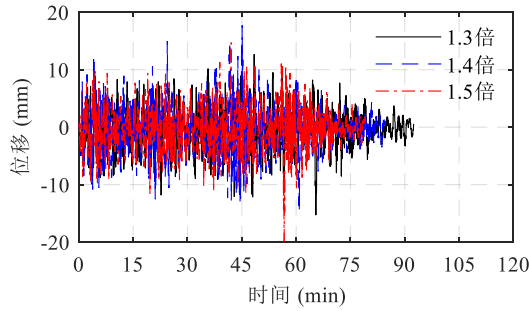
式中: C_1 和 C_2 为Combin37单元的9号和10号实常数,分别用于定义阻尼系数和速度指数,其他实常数均取为0,需要注意的是实常数 $C_2 = \alpha - 1$,即速度指数 $\alpha=0.3$ 时, $C_2=-0.7$ 。

4.2 黏滞阻尼器参数敏感性分析

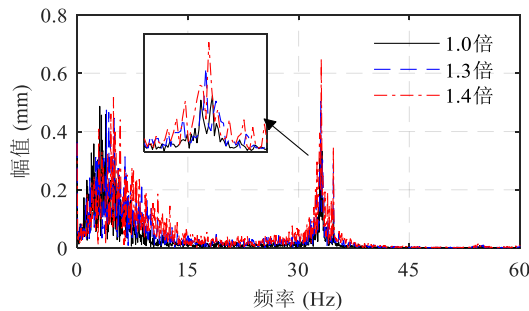
在已通车运营的大跨悬索桥中,通常共设置4个黏滞阻尼器。这类阻尼器的速度指数一般取0.3、0.4或0.5三种,阻尼系数的取值范围多介于1 000~2 000 kN/(m/s)之间。基于此,共设置18种阻尼器参数工况,如表2所示,分别计算无阻尼器和设置不同参数阻尼器工况下车致梁端位移响应,详细分析阻尼器参数对梁端不同频段位移成分的幅值和累积位移的影响,结果如图8和图9所示。



(a) 权重系数 1.0~1.2 下车致梁端位移



(b) 权重系数 1.3~1.5 下车致梁端位移

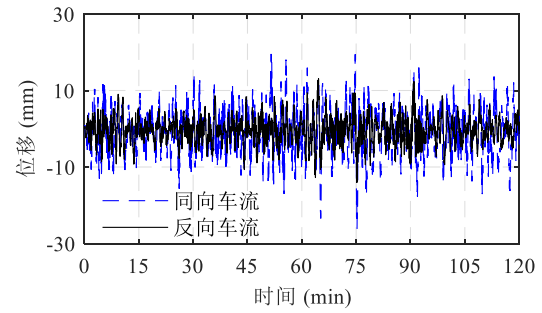


(c) 不同车速对梁端位移频域特征的影响

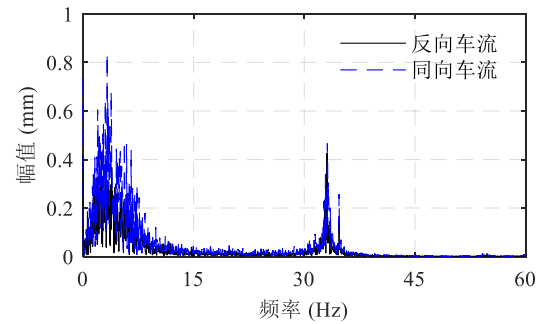
图 6 车速对梁端位移时频特征的影响

Fig.6 Influence of vehicle speed on the time-frequency characteristics of girder-end displacement

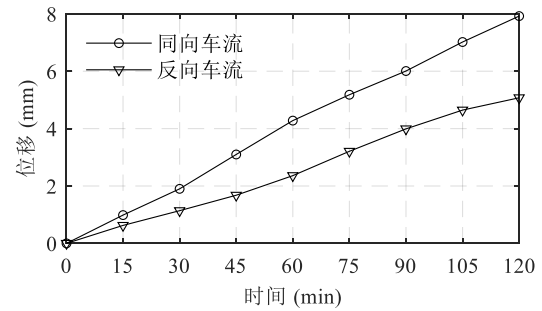
从图 8 可知,设置黏滞阻尼器后,车辆荷载引起的梁端纵向往复运动的位移幅值及累积位移均显著减小。因此,通过选取合适的阻尼器参数,可有效抑制车致纵向位移响应。在表 2 设置的工况中,梁端位移幅值最大降低达 79%,累积位移最大降低可达 97%。此外,阻尼器的控制效果随参数变化呈现规律性特征:当阻尼系数 C 固定时,梁端位移幅值与累积位移均随速度指数 α 的增加而增大;而当速度指数 α 固定时,指标随阻尼系数 C 的增加而减小。总体来看,速度指数对梁端纵向位移响应的影响更为显著。图 9 进一步分析了黏滞阻尼器对梁端位移不同模态成分的控制效果。由图 9(a)、(b) 可见,在悬索桥常用的参数范围内,作为典型的速度型阻尼器,黏滞阻尼器对高频、低幅动态成分展现出稳定且显著的控制效果,其累积动态位移大幅下降,最小抑制率已达到 81.4%。同时,阻尼器对准静态位



(a) 不同行车方向下的梁端位移



(b) 行车方向不同对梁端位移频域特征的影响



(c) 行车方向不同对梁端累积位移的影响

图 7 行车方向不同对梁端位移时频特征的影响

Fig.7 Influence of different travel directions on the time-frequency characteristics of girder-end displacement

表 2 黏滞阻尼器的工况设置

Table 2 Case settings for viscous dampers

工况编号	阻尼系数/(kN/(m/s))	速度指数
1~6	1 000~1 500	0.3
7~12	1 000~1 500	0.4
13~18	1 000~1 500	0.5

移亦展现出一定的抑制能力。如图 9(c)、(d) 所示,当阻尼系数由 1 000 kN/(m/s) 增加至 1 500 kN/(m/s) 时,准静态位移的控制效果略有提升,但整体幅度有限,其中最大改善出现在速度指数 $\alpha=0.4$ 时,控制率提升约 20.6%。相比之下,速度指数的变化对控制效果影响更为显著。以阻尼系数 1 000 kN/(m/s) 为例,当速度指数由 0.5 降至 0.3 时,准静态累积位移的控制率分别为 14.6%、45.6% 和 85.0%,表现出强烈的非线性增强趋势。因此,鉴于黏滞阻

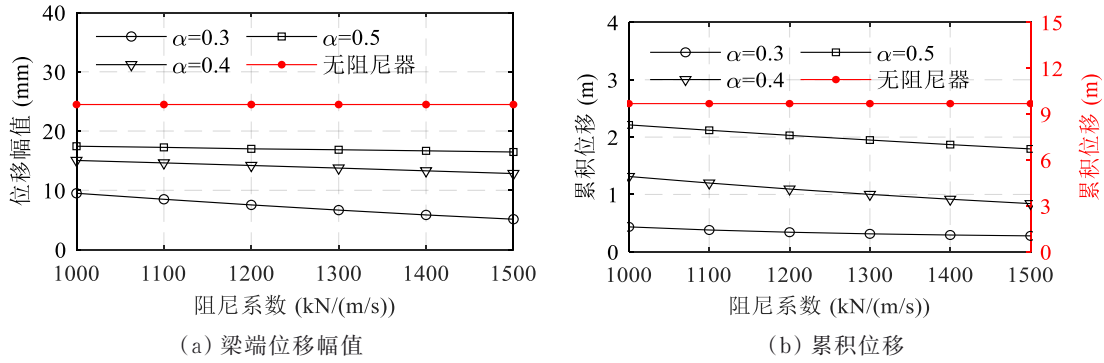


图8 阻尼器对梁端位移幅值和累积位移的影响

Fig.8 Influence of dampers on displacement amplitude and cumulative displacement at girder ends

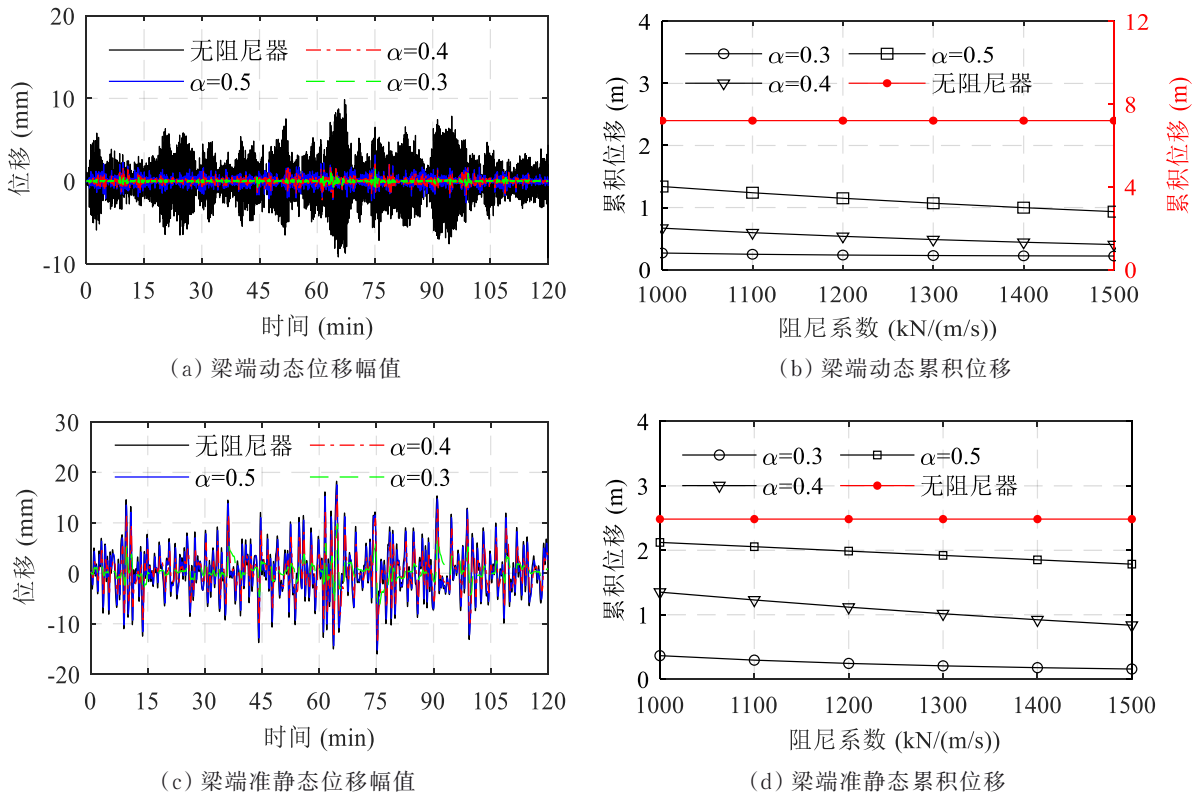


图9 阻尼器对梁端不同位移成分的幅值和累积位移的影响

Fig.9 Influence of dampers on the magnitude and cumulative displacement of different displacement components at girder ends

尼器在抑制动态位移方面效果显著,在车致振动控制实践中,应特别评估其对准静态位移的控制性能,并据此优化阻尼器参数配置策略。具体而言,建议优先确定速度指数,以确保足够的准静态响应抑制能力,再据此调整阻尼系数以实现整体抑振效率最优。此外,考虑到大跨悬索桥中黏滞阻尼器主要用于地震防控,其参数设计需兼顾常遇车辆荷载与偶发地震荷载的响应控制,以确保阻尼器具备足够的抗震-减振双重控制能力与安全储备。

5 结论

为有效应对日常高频次车辆荷载对悬索桥约

束装置服役寿命的显著影响,结合随机车流模型与有限元分析,从时-频域角度系统研究了随机车载作用下大跨悬索桥梁端纵向运动的响应特征、影响规律及振动控制措施,得出以下主要结论:

1) 车致梁端纵向位移频域解耦分析表明:梁端位移可分为准静态成分和动态成分两类。前者源于车辆荷载在主梁上的不对称分布所激发的低频纵向强迫振动,其特征频率一般小于 0.04 Hz;后者主要与车辆激励下桥梁一阶反对称竖弯耦合纵飘模态(约 0.110 Hz)相关,反映了结构固有动力特性。此外,车辆荷载作用下加劲梁沿纵向呈近似“单摆”的刚体运动特征,主梁两侧梁端位移时程表现出高度一致性。

2) 随机交通流中车重、车速以及车辆空间分布对车致梁端纵向运动均有显著影响,且作用机理存在差异。车重的增加主要影响不同频率成分的幅值,导致梁端位移中准静态成分和动态成分的同步增加。车速升高主要导致梁端动态成分频域幅值的增大,进而引起小幅、高频动态成分比重的增加,对准静态成分影响有限。车辆空间分布则显著影响梁端准静态位移成分,表现为同向车流工况下准静态频域幅值显著高于反向车流,后者由于荷载分布更趋对称,在纵向上形成抵消效应,从而有效降低梁端响应幅值。

3) 黏滞阻尼器对不同模态位移成分的控制效果随阻尼器参数变化存在显著差异。阻尼系数 C 越大,速度指数 α 越小,阻尼器对车致梁端运动的控制效果越突出。在悬索桥常用的阻尼器参数范围内,黏滞阻尼器对动态成分展现出稳定且显著的控制效果,最小抑制率也可达 81.4%。而对低频、高幅的准静态成分,控制性能则更依赖参数配置,特别是对速度指数 α 更加敏感。在相同阻尼系数条件下,速度指数由 0.5 降至 0.3 时,准静态位移控制率从 14.6% 提升至 85.0%,呈现出明显的非线性增强趋势。

需要指出的是,该研究是基于典型单跨悬索桥,相关结论在多跨、多塔悬索桥中的适用性尚待进一步研究与验证。

参考文献

- [1] GUO T, HUANG L Y, LIU J, et al. Damage mechanism of control springs in modular expansion joints of long-span bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(7): 04018038.
- [2] YANG D H, GU H L, YI T H, et al. Girder quasi-static cumulative displacement-based suspension bridge non-linear damper leakage diagnosis by eliminating stochastic traffic effects [J]. Engineering Structures, 2024, 314: 118391.
- [3] 周鸿,李冲,杨东辉,等.滑动支座磨损对斜拉桥静动力性能的影响[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024: 1-9. (2024-12-30). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20241227002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. ZHOU H, LI C, YANG D H, et al. Effects of sliding bearing wear on the static and dynamic performance of cable-stayed bridges [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024: 1-9. (2024-12-30). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20241227002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [4] 黄旭,朱金,钱逸哲,等.基于地区温度实测数据的大跨度钢箱梁悬索桥的温致效应研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 67-76. HUANG X, ZHU J, QIAN Y Z, et al. Temperature effects on long-span steel box girder suspension bridge based on regional measured data [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4): 67-76. (in Chinese)
- [5] 刘玉静,王志强,高岩渊,等.大跨径悬索桥退役黏滞阻尼器性能研究[J]. 公路, 2023, 68(11): 121-127. LIU Y J, WANG Z Q, GAO Y Y, et al. Study on performance of retired viscous dampers for long-span suspension bridges [J]. Highway, 2023, 68(11): 121-127. (in Chinese)
- [6] SUN Z, SIRINGORINGO D M, CHEN S Z, et al. Cumulative displacement-based detection of damper malfunction in bridges using data-driven isolation forest algorithm [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143: 106849.
- [7] 张宇峰,陈雄飞,张立涛,等.大跨悬索桥伸缩缝状态分析与处理措施[J]. 桥梁建设, 2013, 43(5): 49-54. ZHANG Y F, CHEN X F, ZHANG L T, et al. Condition analysis and handling measures for expansion joints of long span suspension bridges [J]. Bridge Construction, 2013, 43(5): 49-54. (in Chinese)
- [8] GUO T, LIU J, HUANG L Y. Investigation and control of excessive cumulative girder movements of long-span steel suspension bridges [J]. Engineering Structures, 2016, 125: 217-226.
- [9] 万田保,李松林.大跨度铁路悬索桥纵向位移特征及纵向支承要求[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 29-35. WAN T B, LI S L. Longitudinal displacement characteristics and longitudinal supporting requirements for long-span railway suspension bridge [J]. Bridge Construction, 2020, 50(4): 29-35. (in Chinese)
- [10] HUANG G P, HU J H, HUA X G, et al. Analytic solution to longitudinal deformation of suspension bridges under live loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28(2): 04022147.
- [11] GUO T, LIU J, ZHANG Y F, et al. Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(9): 04014099.
- [12] HU J H, WANG L H, SONG X P, et al. Field monitoring and response characteristics of longitudinal movements of expansion joints in long-span suspension bridges [J]. Measurement, 2020, 162: 107933.
- [13] QU F X, DENG X D, DONG J, et al. Field monitoring and analysis for cumulative longitudinal movements of girder ends for the medium-span suspension bridges [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2023, 13

- (2): 505-522.
- [14] SUN Z, SANTOS J, CAETANO E, et al. Interpreting cumulative displacement in a suspension bridge with a physics-based characterization of environment and roadway/railway loads [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2023, 13(2): 387-397.
- [15] LIANG L T, FENG Z Q, XU Y Q, et al. A parallel scheme of friction dampers and viscous dampers for girder-end longitudinal displacement control of a long-span suspension bridge under operational and seismic conditions [J]. *Buildings*, 2023, 13(2): 412.
- [16] LI G L, HAN W S, CHEN X, et al. Wear evaluation on slide bearings in expansion joints based on cumulative displacement for long-span suspension bridge under monitored traffic flow [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34: 04019106.
- [17] FENG D M, WANG J Q. Seismic control of a self-anchored suspension bridge using fluid viscous dampers [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2021, 21(2): 2150025.
- [18] 马长飞, 汪正兴, 王波, 等. 武汉杨泗港长江大桥变参数粘滞阻尼约束体系研究[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(增刊 1): 45-50.
- MA C F, WANG Z X, WANG B, et al. Study of viscous damping system with variable parameters for Yangsigang Changjiang River bridge in Wuhan [J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(Sup 1): 45-50. (in Chinese)
- [19] GUO T, LIU J, HUANG L Y. Investigation and control of excessive cumulative girder movements of long-span steel suspension bridges [J]. *Engineering Structures*, 2016, 125: 217-226.
- [20] YANG M G, YANG Z Q. Longitudinal vibration control of floating system bridge subject to vehicle braking force with viscous dampers [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 446/447/448/449: 1256-1260.
- [21] 龙关旭, 韩万水, 徐传昶, 等. 随机车流制动状态下斜拉桥黏滞阻尼器振动控制研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11): 78-85.
- LONG G X, HAN W S, XU C C, et al. Vibration control of cable stayed bridge with viscous damper under braking state of random traffic flow [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11): 78-85. (in Chinese)
- [22] 封周权, 井昊坤, 陈政清, 等. 列车作用下大跨径悬索桥纵向运动响应分析方法对比研究[J]. *土木工程学报*, 2024, 57(3): 69-80.
- FENG Z Q, JING H K, CHEN Z Q, et al. Comparison of analysis methods for longitudinal motion response of a long-span suspension bridge caused by a running train [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(3): 69-80. (in Chinese)
- [23] 杨东辉, 管泽鑫, 伊廷华, 等. 考虑区分车辆运行状态的桥梁车载统计分析及模拟[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022(6): 85-93.
- YANG D H, GUAN Z X, YI T H, et al. Statistical analysis and simulation of vehicle load considering traffic states division [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022(6): 85-93. (in Chinese)
- [24] GU H L, YANG D H, YI T H, et al. Surrogate model driving rapid transient analysis of vehicle induced girder-end displacement for suspension bridges [J]. *Structural Health Monitoring*, 2025: 14759217251336978.
- [25] WEI Y T, YI T H, YANG D H, et al. Wear life prediction of sliding bearings based on multitype monitoring data of bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2024, 29(1): 04023102.
- [26] 杨东辉, 顾海伦, 伊廷华, 等. 大跨悬索桥加劲梁纵向约束性能诊断与评估进展[J/OL]. *中国公路学报*, 2025: 1-23. (2025-06-16). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGGL20250613001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- YANG D H, GU H L, YI T H, et al. Research advances on diagnosis and evaluation of longitudinal restraint performance of stiffening girders for long-span suspension bridges [J/OL]. *China Journal of Highway and Transport*, 2025: 1-23. (2025-06-16). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGGL20250613001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)

(编辑 XXX)