

随机车流下悬索桥加劲梁纵向运动 等效简化模型研究

黄国平^{1,2,4}, 胡建华^{2,3}, 华旭刚², 封周权², 陈政清²

(1. 湖南城市学院 绿色建筑与智能建造湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 益阳 413000; 2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 湖南省交通水利建设集团有限公司, 湖南 长沙 410008; 4. 湖南城市学院 陶粒混凝土技术研发与应用湖南省工程研究中心, 湖南 益阳 413000)

摘要:为研究大跨度悬索桥在随机车流作用下加劲梁纵向运动及纵向累计位移行程简化计算方法,基于移动荷载作用下加劲梁纵向运动特征,将悬挂加劲梁体系等效为单自由度(single-degree-of-freedom, SDOF)振动体系,推导了基于SDOF振动体系的移动荷载作用下悬索桥加劲梁纵向振动方程和随机车流作用下加劲梁纵向振动方程,提出了一种快速计算随机车流作用下加劲梁纵向振动响应的方法。以某单跨悬索桥为实例,基于实测车流数据,采用蒙特卡罗抽样方法生成随机车流样本,将其等效为SDOF体系下随机荷载时程,进行SDOF体系振动方程求解得到纵向响应位移时程,并与基于ANSYS的全桥模型瞬态分析结果进行对比。结果表明:随机车流作用下,加劲梁发生纵向运动并形成巨大累计位移行程,累计位移包括静态位移和动态位移,后者对累计位移贡献更大;与有限元瞬态动力分析相比,基于简化SDOF体系获得的位移响应结果中除累计位移差别稍大(约13%~19%)外,其幅值和均方根值(root mean square, RMS)均差别很小(小于5%),简化振动模型能反映随机车流下加劲梁纵向运动特征规律,所提计算方法可极大地简化随机车流作用下加劲梁纵向运动分析,可用于结构设计阶段随机车流作用下加劲梁纵向运动评估及振动控制参数优化。

关键词:随机车流;悬索桥;加劲梁;纵向运动;简化模型

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Equivalent simplified model for calculating longitudinal movement of the stiffening girder of a suspension bridge under random traffic flow

HUANG Guoping^{1,2,4}, HU Jianhua^{2,3}, HUA Xugang², FENG Zhouquan², CHEN Zhengqing²

(1. Key Laboratory of Green Building and Intelligent Construction in Higher Educational Institutions of Hunan Province, Hunan City University, Yiyang 413000, China; 2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Hunan Province Communications Planning, Survey and Design Institute, Changsha 410008, China; 4. Hunan Engineering Research Center of Development and Application of Ceramsite Concrete Technology, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: A simplified method for calculating the longitudinal movement and cumulative displacement of the stiffening girder in long-span suspension bridges under random traffic flow is proposed. In this method, the suspended stiffening girder system is equivalent to a single-degree-of-freedom (SDOF) vibration system. Based on this SDOF system, the longitudinal vibration equations of the suspension bridge's stiffening girder under moving loads and random traffic flow are derived. A rapid calculation method for the stiffening girder's longitudinal vibration response under random traffic flow is proposed. Taking an example of a long-span suspension bridge and

收稿日期:2024-05-15; 修回日期:2024-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52178284);湖南省教育厅科研项目(24A0566,24B0734,22A0558);湖南省科技人才托举工程项目(2019TJ-Y08);湖南省普通高等学校科技创新团队支持计划

作者简介:黄国平(1982—),男,副教授,博士研究生,主要从事大跨桥梁振动与控制研究。E-mail:gphuang@hnu.edu.cn

通信作者:封周权(1982—),男,教授,博士,主要从事大跨桥梁振动与控制研究。E-mail:zqfeng@hnu.edu.cn

using existing traffic measurement data, random traffic flow samples are generated based on the Monte Carlo method. These samples are then treated as random loads on the SDOF system. The SDOF vibration equation is solved, and the results are compared with ANSYS dynamic analysis results. The findings reveal that under random traffic flow, the stiffening girder undergoes longitudinal movement and accumulates a significant displacement. This cumulative displacement consists of both static and dynamic components, with the latter contributing more significantly. Compared to the finite element transient dynamic analysis, the displacement response results obtained from the simplified SDOF system show minimal differences in extreme values and root mean square (RMS) values (less than 5%), although there is a slightly larger difference in cumulative displacement (approximately 13% ~ 19%). This indicates that the simplified vibration model can capture the stiffening girder's longitudinal movement characteristics under random traffic flow. The proposed simplified method greatly simplifies the analysis of the stiffening girder's longitudinal movement under random traffic flow, enabling response evaluation and parameter optimization in the preliminary design stage.

Key words: random traffic flow; suspension bridge; stiffening girder; longitudinal movement; equivalent simplified model

0 引言

近年来,公路交通车流量迅速增加,严苛的交通荷载环境给长大轻柔、低阻尼的大跨悬索桥在运营中的工作性能及耐久性能带来了严峻挑战。在运营养护管理中发现大跨悬索桥梁端附属装置及吊杆的疲劳与耐久性能问题极为突出^[1-2]。大量研究表明,除恶劣的工作环境外,影响该类部件耐久性能最主要的因素均与加劲梁的纵向运动有关。在日常行车条件下,车流对桥梁进行不断的加载与卸载,导致加劲梁频繁地往复纵向运动,形成巨大的纵向累积位移,致使伸缩缝、支座磨损失效,液压黏滞阻尼器漏油^[3-6],以及因吊杆反复弯折而加速疲劳破坏^[7]。

大跨悬索桥的纵向力学行为及纵向振动等问题,引起相关研究人员广泛关注,并借助理论研究、现场实测及数值仿真等方法开展了系列研究。理论研究能从物理层面揭示悬索桥的力学行为,但由于悬索桥自身结构及荷载工况的复杂性,目前理论研究尚局限于静力、拟静力以及确定的移动荷载工况^[8-9]。针对复杂的随机车流作用,采用现场实测或数值仿真仍是主流研究手段,而现场实测虽可获得悬索桥服役条件下较为真实的变形行为,但存在信号成分不易剥离的问题,不利于分析单一荷载激励效应^[3,10-11]。

在结构设计及约束体系优化阶段,多采用数值计算的方法分析车流作用下的悬索桥纵向振动响应及预估加劲梁纵向累积位移,并进行振动控制优化设计。韩大章等^[12]建立了悬索桥有限元模型,模拟了随机车流下的纵向振动过程,分析了车流参数对加劲梁纵向位移的影响。李光玲等^[10]基于已有风-车-桥耦合振动分析系统研究了风和随机车流下悬索桥梁端伸缩缝纵向变形;李永乐等^[13]为研究风联合车流作用下的加劲梁纵向位移,利用 ANSYS 联合 MATLAB 混合编程技术建立了风-车-桥耦合振动分析平台,采用 4 台计算机,耗时 3 个月完成了设定计算工况。该类数值分析方法或是采用自编程序或是借助商业有限元软件或是二者联合运用,但车流数据庞大、计算工况繁多、计算过程繁琐、效率低下,不便于工程应用。

悬索桥因自身结构特征,在动力荷载作用下极易激发低阶纵飘振动模态,若此时仅关注加劲梁的纵向运动,可将悬索桥体系视作摆锤体系,赵国辉等^[14]、LIANG 等^[15]在研究地震作用下悬索桥纵向振动与控制时,即将加劲梁纵向运动简化为单自由度(single-degree-of-freedom, SDOF)振动系统;WU 等^[16]亦采用 SDOF 简化模型应用于铁路悬索桥加劲梁纵向运动及控制。黄国平等^[9]理论研究认为移动荷载作用下悬索桥纵向振动可视作摆锤体系振动,但仅针对确定的单个或多个移动荷载工况。梁龙腾等^[17-19]为避免正面求解随机车流下悬索桥纵向振动响应的困难,基于实测数据反演等效力时程,建立了简化的 SDOF 体系振动控制设计方法,但该方法仅适用于暂无耗能阻尼器的既有悬索桥的纵向约束体系优化设计,其适用性有待拓延。最为重要的是,上述基于 SDOF 简化模型的加劲梁纵向振动研究均未对简化的合理性及精确度进行验证研究,尚未将简化模型应用于解决随机车流作用下悬索桥的纵向振动问题。

鉴于此,以应用广泛的单跨悬索桥为研究对象,分析移动车辆下加劲梁纵向运动力学行为,明确加劲梁

纵向振动规律,最后将悬索桥系统等效为 SDOF 摆振体系,建立基于 SDOF 摆振体系的随机车流下悬索桥纵向振动的实用计算方法,为后续纵向振动控制及约束体系设计提供理论基础。

1 悬索桥纵向振动简化体系演变

单跨悬索桥典型的结构示意图见图 1。为释放加劲梁温度变形和避免地震及其他荷载作用下产生过大的结构内力,悬索桥多采用漂浮体系或半漂浮体系的结构形式,其纵向约束采用滑动支座或梁端附加设耗能阻尼器^[20]。

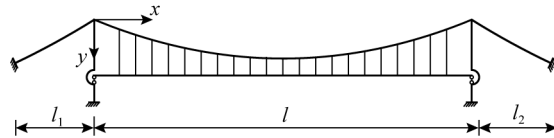


图 1 单跨悬索桥的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of a single-span suspension bridge

1.1 移动荷载下等效模型

悬索桥因自身结构特征,即主缆位移竖纵耦联的几何非线性特征以及加劲梁纵向无固定约束的特点,加劲梁易发生纵向位移和纵向振动。而实际工程中加劲梁梁端的纵向位移及加劲梁的纵向运动不仅关联伸缩缝、阻尼器等装置的设计,并且它还直接影响该类装置的耐久性能。另一方面,对于车致悬索桥纵向振动问题属于车桥耦合振动理论范畴,车桥耦合模型日趋精细和完善^[21],而文献[22]经深入对比研究表明,对于大跨度悬索桥而言,以高度简化的移动荷载模拟行驶车辆来分析悬索桥纵向振动问题足以满足工程精度要求。

因此,可基于移动荷载作用下悬索桥加劲梁纵向运动特征来探究车致加劲梁纵向振动简化分析模型。文献[9]研究表明,移动荷载以速度 v 移动过桥时,加劲梁主要以类似“摆锤体”纵向摆振运动,见图 2(a)。现将悬索桥在移动荷载作用下的加劲梁纵向振动问题,等效为 2 种简化振动体系模型:一是悬索桥体系不变,将移动的荷载等效为作用于梁端的纵向时程荷载激励,简称纵向荷载模型见图 2(b);二是将原振动体系转为 SDOF 摆振体系模型,见图 2(c)。需指出的是,纵向约束体系或支座类型对加劲梁纵向运动有重要影响,上述简化模型仅针对如图 1 所示梁端设有滑动支座的常规纵向约束体系悬索桥,对于其他纵向约束体系或支座类型,如需减隔震设计而采用双曲面球型支座的悬索桥^[23],其加劲梁纵向运动行为更为复杂,该类悬索桥模型简化时需进一步深入研究。

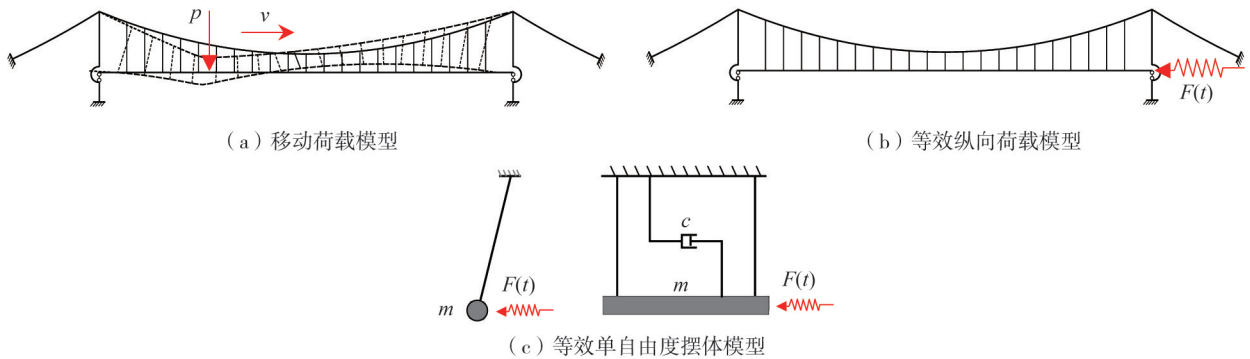


图 2 加劲梁纵向运动等效模型演变

Fig. 2 Evolution of equivalent model for the girder longitudinal movement

上述等效过程中,还需确定移动荷载 P 与纵向时程荷载激励 $F(t)$ 之间的等效关系。图 2 中的振动体系模型在激励荷载作用下加劲梁纵向位移响应需相等或相近;特别地,3 种振动体系下的加劲梁静态位移相等,移动荷载 P 作用下加劲梁静态纵向位移可由有限元软件求得,由此则可以反算出等效纵向荷载 $F(t)$ 。

对于等效的纵向荷载模型,考虑到一般车辆荷载作用下加劲梁纵向位移并不大,加劲梁纵向约束假设为线弹性,引入纵向等效刚度 k_{eq} ,则有:

$$F(t) = k_{eq} P \bar{u}(x) = k_{eq} P \bar{u}(vt) \tag{1}$$

式中: k_{eq} 为悬索桥等效纵向刚度,其值为梁端发生单位纵向位移需要施加的梁端纵向荷载; \bar{u} 为加劲梁纵向

位移影响函数,即单位移动荷载作用下加劲梁静态纵向位移。

对于 SDOF 模型,其激励荷载 $F(t)$ 任按式(1)计算,式中以 k_{SD} 代替 k_{eq} ,则式(1)改写为

$$F(t) = k_{SD} P \bar{u}(x) = k_{SD} P \bar{u}(vt) \quad (2)$$

式中:体系刚度 $k_{SD} = m\omega^2$, m 为摆体质量为加劲梁物理质量,频率 ω 为原体系 1 阶纵飘基频率。此时,移动荷载作用下 SDOF 体系的振动方程为

$$m\ddot{u} + c_{sd}\dot{u} + k_{sd}u = F(t) \quad (3)$$

式中: u 为加劲梁摆体纵向位移; m 为加劲梁物理质量; c_{sd} 为振动系统等效阻尼可取 1 阶纵飘模态阻尼。

需要说明的是,对于等效纵向荷载模型,仍需借助商业有限元模型获得加劲梁纵向位移响应,而对于 SDOF 摆振体系模型,可采用有限元或 MATLAB 程序获得位移的数值解,计算过程得到极大简化。

1.2 随机车流下 SDOF 体系等效纵向振动

普遍观点认为,车流作用下加劲梁往复振动形成的过大累计位移,是伸缩缝、支座磨损失效、液压黏滞阻尼器漏油最主要的原因。在结构设计及纵向约束优化阶段,亟待提出一种快速评估随机车流下加劲梁纵向响应及预估纵向累计位移的计算方法。如 1.1 节所述,车辆简化为移动荷载,则随机车流荷载可简化为随机的移动荷载流,鉴于 SDOF 体系的计算分析更为简便,现针对 SDOF 体系进行随机车流作用下的振动分析,建立一种基于 SDOF 体系的随机车流下悬索桥纵向振动计算分析方法。

对于 SDOF 系统下的随机车流作用下的振动分析,关键在于如何将实际的随机车流荷载等效为单自由度的随机激励时程,由前述 1.1 节可知,在 SDOF 体系下,作用于悬索桥单个移动荷载可等效为位移影响函数荷载,则将随机的集中荷载流等效为间距、周期、幅值均服从某种随机分布的荷载序列,依次输入 SDOF 系统,根据式(2)即可构造模拟出随机车流激励荷载 $\tilde{F}(t)$ 如式(4)所示:

$$\tilde{F}(t) = k_{SD} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} P_{ij} \bar{u}_j(X_{ij}) \quad (4)$$

式中: P_{ij} 为第 j 个车道第 i 辆车的总车重量; \bar{u}_j 为第 j 个车道的梁端纵向位移影响函数,根据有限元数值计算联合 MATLAB 拟合工具箱拟合得到; X_{ij} 为某时刻 t ,车流中的车辆在桥上的位置坐标,满足 $0 \leq X_{ij} \leq l$,并引入函数 S 来判断车辆是否作用在桥梁上(即满足 $0 \leq X_{ij} \leq l$),有:

$$X_{ij} = (x_{0ij} + v_j t) \times S(x_{0ij} + v_j t) \quad (5)$$

$$S(x) = S_0(x) \times S_0(l-x) \quad (6)$$

式中: S_0 为 Heaviside 阶跃函数; x_{0ij} 为 j 车道上第 i 辆车的初始位置,由 Monte-Carlo 抽样生成,并取同向行驶第 1 辆车初始位于驶离桥头; v_j 为 j 车道车流速度,当向上行驶时取正,反之则为负。

将式(4)中 $\tilde{F}(t)$ 代替式(3)中 $F(t)$,随机车流作用下,SDOF 体系的振动方程为

$$m\ddot{u} + c_{sd}\dot{u} + k_{sd}u = \tilde{F}(t) \quad (7)$$

同样,式(7)可借助有限元软件或 MATLAB 程序平台可方便获得振动方程的数值解,基于 SDOF 体系的随机车流下悬索桥加劲梁纵向振动计算分析流程图见图 3。

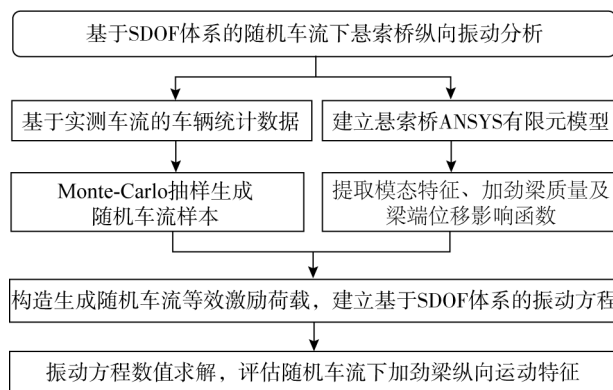


图 3 随机车流下悬索桥加劲梁纵向振动计算分析流程

Fig. 3 Flow of calculating the longitudinal vibration of the stiffening girder of a suspension bridge under random traffic flow

2 工程应用案例

以湘西矮寨悬索桥为工程背景,该桥位于湖南省湘西矮寨镇,横跨德夯大峡谷。矮寨大桥是一座双塔钢

桁加劲梁单跨悬索桥,采用塔梁分离式悬架结构,主缆孔跨布置为 242 m+1176 m+116 m,钢桁加劲梁全长 1 000.5 m,宽为 27 m。全桥采用 2 根主索进行平面索布置,垂跨比为 1:9.6;中跨主缆设有 69 对吊索,跨中设 3 对柔性中央扣。桥塔采用钢筋混凝土门式框架结构,茶洞岸及吉首岸高分别为 62、129 m;茶洞侧采用隧道锚,而吉首一侧为重力锚。矮寨大桥桥型总体布置见图 4。

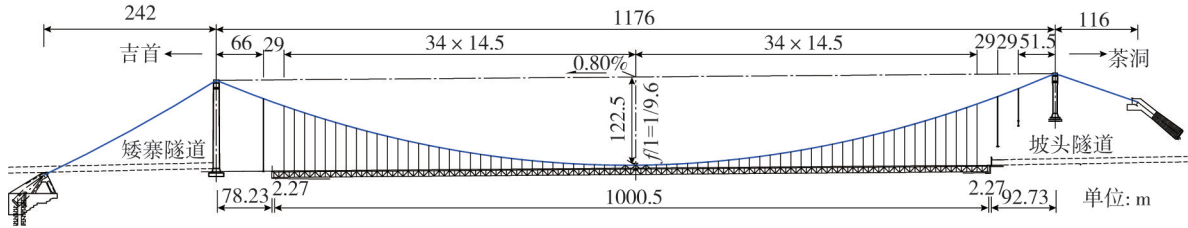


图 4 矮寨大桥桥型总体布置

Fig.4 Overall layout of the Aizhai Bridge

2.1 移动荷载作用下简化模型对比分析

以矮寨悬索桥为例,分别采用上述移动荷载模型、等效纵向荷载模型及等效 SDOF 模型,进行振动仿真计算,以验证悬索桥在移动荷载作用下加劲梁纵向振动简化模型的合理性及可靠性。同时为了明确中央扣对纵向振动以及简化模型的影响,考虑了不设中央扣和设 3 对柔性中央扣的 2 种情况,该算例中移动荷载 $P=462\text{ kN}$, $v=20\text{ m/s}$,其他计算参数见表 1。加劲梁纵向位移影响函数曲线见图 5。考虑到加劲梁纵向位移影响函数曲线形如正弦函数,且文献[9]推导出移动荷载作用下纵向振动在模态坐标下受正弦函数荷载激励,可认为正弦函数为位移影响函数的理论解(图 5)。值得注意的是,中央扣的存在影响了主梁的纵向位移行为,移动荷载作用于跨中位置附近范围时基本不产生纵向位移,梁端位移影响函数与正弦拟合函数偏差增大。

表 1 移动荷载作用下等效模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of the equivalent model under moving loads

等效模型	有无中央扣	质量/t	频率/Hz	刚度/ $(\times 10^7\text{ N/m})$	阻尼比
纵向荷载模型	有	28 166.9	—	$k_{eq} = 6.19$	0.005
	无	28 166.9	—	$k_{eq} = 1.32$	0.005
SDOF 模型	有	28 166.9	0.116	$k_{SD} = 1.50$	0.005
	无	28 166.9	0.103	$k_{SD} = 1.18$	0.005

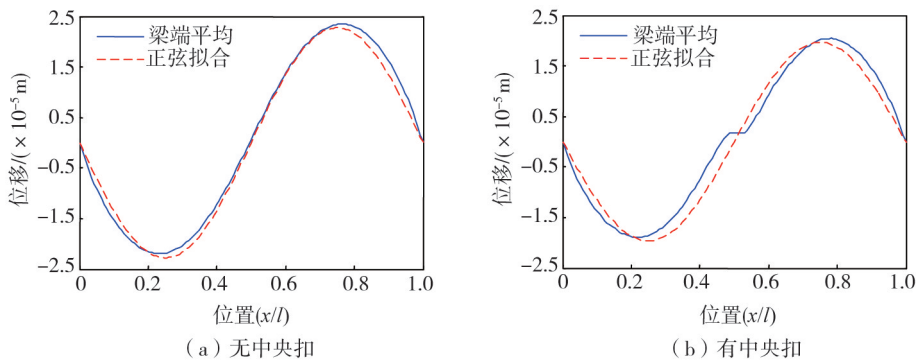


图 5 单跨悬索桥加劲梁纵向位移影响线

Fig.5 Influence line of the longitudinal displacement of the stiffening girder of a single-span suspension bridge

采用 ANSYS 有限元软件对上述 3 种计算模型的各种计算工况进行振动计算分析,基于不同计算模型的移动荷载作用下梁端纵向位移响应时程见图 6,其梁端响应统计值见表 2。计算结果表明:上述 2 种等效模型均基本能够体现移动荷载导致悬索桥主梁纵向振动响应规律,移动荷载过桥相当于对加劲梁纵向施加了一个类似谐波荷载激励。总体而言,基于 SDOF 体系并采用位移影响函数的等效荷载来模拟移动荷载作用下的加劲梁纵向振动,其计算结果与移动荷载作用下的全桥模型计算结果最为接近,其中累计位移误差相对较大,如设有中央扣的悬索桥梁端纵向位移累计值、极值及均方根值误差率分别为 8.2%、6.9%、0.0%。另外,中央扣的设置可有效降低加劲梁的纵向位移响应统计值,见表 2。

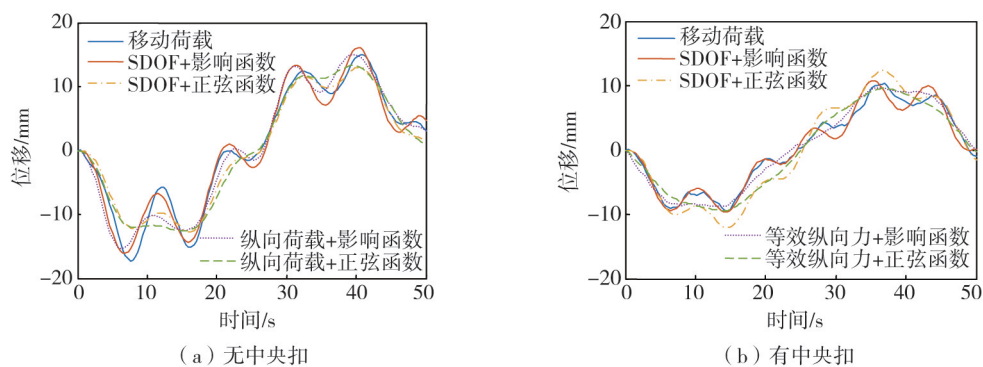


图6 移动荷载作用下梁端纵向位移时程

Fig. 6 Longitudinal displacement time history of at the beam end under moving loads

表2 移动荷载作用下梁端响应统计值

Table 2 Response statistics at the beam end under moving load

计算工况	位移/mm			速度/(mm/s)		
	累计值	幅值	均方根值	幅值	均方根值	
无中央扣	移动荷载	91.3	17.3	9.4	4.7	2.2
	SDOF+影响函数	99.5	16.1	9.4	4.3	2.3
	SDOF+正弦函数	58.0	13.0	8.6	2.7	1.4
	纵向荷载+影响函数	74.3	15.4	9.7	4.4	1.9
	纵向荷载+正弦函数	52.4	13.3	9.2	2.8	1.4
有中央扣	移动荷载	53.5	10.3	6.1	2.7	1.4
	SDOF+影响函数	59.9	10.7	6.2	2.8	1.4
	SDOF+正弦函数	54.3	12.4	7.7	2.6	1.3
	纵向荷载+影响函数	38.3	9.6	6.5	2.5	1.2
	纵向荷载+正弦函数	38.4	9.6	6.6	2.4	1.2

鉴于 SDOF 等效模型简单且具有较为可靠的计算精度,因此,SDOF 等效模型可为后续随机车流下的悬索桥纵向振动分析提供一个简单快捷的估算方法,同时也可车流下的悬索桥纵向振动控制及参数优化提供理论支持。

2.2 基于 SDOF 的随机车流作用下纵向振动分析

高速公路上的车流随机性强,车型、车道、车重、车速及车流密度等为车流中重要的参数,各自服从一定的概率分布。现根据文献[24]现场实测矮寨大桥的车流统计数据及有关研究^[25],得出各参数概率分布类型及分布参数,并生成随机车辆数据库,再采用蒙特卡罗随机抽样得到随机车流样本,最后将其转化为 SDOF 体系下的等效随机车流荷载。

2.2.1 随机车流模拟

1) 车型及车道。基于矮寨大桥的实测车流统计数据,将桥上行驶车辆分为 6 种代表性车型,对于其他车型,均可按照等效轴重的原理转换为相近车型,并假设各车型与车辆行驶车道选择服从均匀分布,矮寨大桥车流中车型及车道统计数据见表 3。

2) 车重。车重可由桥梁动态称重系统获得^[26],既有研究实测统计数据表明各车型车重呈多峰值分布特征,根据有关研究并结合矮寨大桥实际交通实测数据,采用高斯分布来模拟 V1、V2 车型车重,而其它车型车重则采用高斯混合分布来模拟生成合,其分布参数见表 4。

表3 车型及车道统计数据

Table 3 Vehicle type and lane statistics

车型	车型描述	车型比例	行车道比例	
			行车道	超车道
V1	小型客车	0.58	0.3664	0.6336
V2	双轴货车	0.11	0.6458	0.3542
V3	3轴货车	0.03	0.6108	0.3892
V4	4轴挂车	0.04	0.7642	0.2358
V5	5轴挂车	0.06	0.7260	0.2742
V6	6轴挂车	0.18	0.8808	0.1192

表 4 车重统计数据

Table 4 Vehicle weight statistics

车型	分布参数			车型	分布参数		
	权重系数	μ_i/kN	σ_i/kN		权重系数	μ_i/kN	σ_i/kN
V1	1.0	40	4	V2	1.0	180	38
	0.3	190	40		V4	0.4	250
V3	0.7	307	60	V4		0.6	420
	0.5	300	65		V6	0.5	300
V5	0.5	600	120	V6		0.5	710

注: μ_i, σ_i 分别为第 i 个高斯分布的均值和标准值。

3) 车速。既有实测研究表明,车速与车型、载重,车流密度及交通状况有关,各车型的车速一般服从正态分布,给出了各车型的车速统计见表 5。

表 5 车速统计数据

Table 5 Vehicle speed statistics

km/h

车型	速度		车型	速度	
	均值	标准差		均值	标准差
V1	81.9	14.9	V4	70.0	6.9
V2	67.5	4.2	V5	68.5	6.2
V3	75.5	10.2	V6	65.3	8.8

4) 车间距。车间距是描述车流密度(车辆运行状态)的特征参数,根据不同的车辆运行状态分布可采用威布尔分布、对数正态分布和伽马分布来模拟生成稀疏、一般和密集等 3 种运行状态下的车间距样本。参考相关研究及实测数据,车间距概率密度曲线及分布参数见图 7。

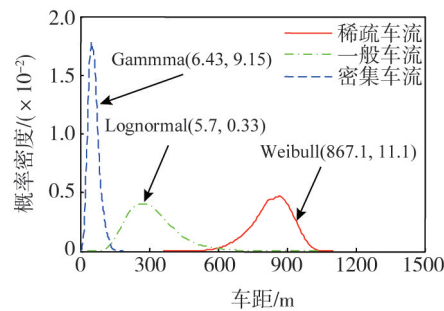


图 7 车距概率密度曲线

Fig. 7 Distance probability density curves

基于上述各车流参数分布函数,建立随机车流数据库,再借助 MATLAB 程序进行蒙特卡罗抽样生成各种车辆运行状态下的随机车流样本,稀疏车辆运行状态下 1 车道和 2 车道的随机车流样本,见图 8。

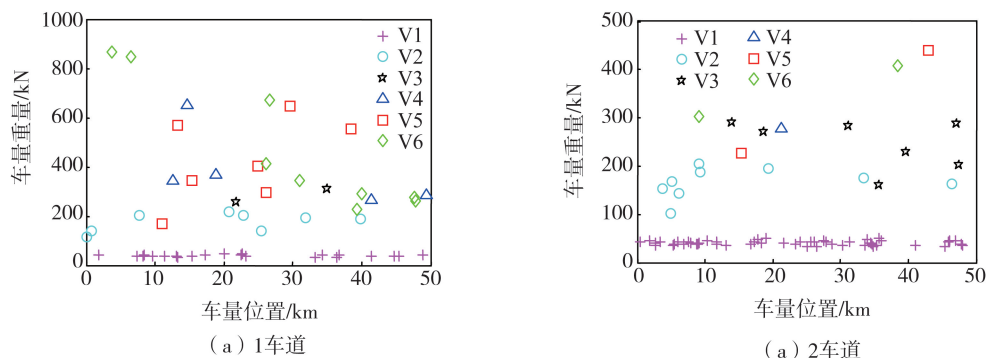


图 8 稀疏车流样本

Fig. 8 Sparse traffic flow sample

2.2.2 等效随机车流荷载

将2.2.1节生成的随机车辆样本代入式(4),可得SDOF系统下的等效随机车流荷载。在20 min时段的不同车流运行状态下的等效随机车流荷载激励见图9。由图可知,等效车流荷载具有明显随机特征,且其激励频率主要集中于0~0.06 Hz区间,而卓越频率约为0.019 Hz,远小于悬索桥纵向振动基频(如矮寨大桥纵向振动基频为0.116 Hz^[9]),可见随机车流荷载对悬索桥加劲梁的纵向激励为一种慢冲击为主的低频随机激励。

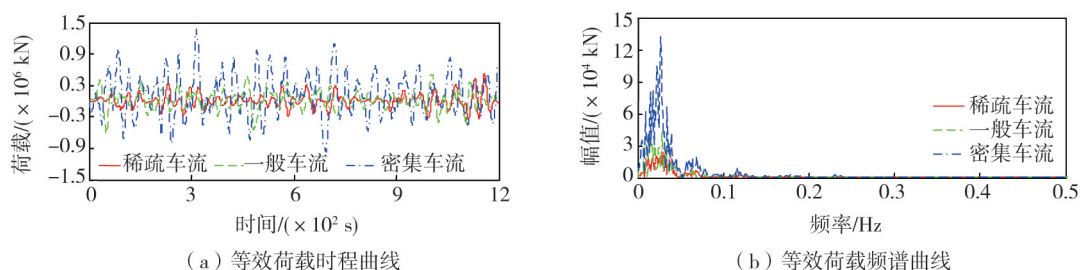


图9 等效随机车流荷载

Fig.9 Equivalent random traffic flow load

2.2.3 纵向位移响应计算结果分析

为验证所提方法的可靠性,现分别采用基于SDOF系统简化模型和全桥模型的ANSYS瞬态分析计算方法^[12],对随机车流作用下悬索桥加劲梁纵向振动分析计算,分析时考虑了3种车流运行状态的荷载情况,计算时段为20 min。

上述各计算工况下的加劲梁运动响应统计值见表6。由表可知,2种计算方法得到的位移响应较为接近,速度响应次之,而基于简化模型计算得到的加速度基本不可靠。在位移响应中,位移幅值和均方根值误差小于5%,而累计位移误差约在13%~19%之间。值得注意的是,表6中静态效应为全桥模型的ANSYS瞬态分析时不打开时间积分所得,与简化SDOF模型结果完全吻合,验证了SDOF模型参数取值合理、可靠。该静态位移是由于车重在桥上分布位置随时间不断变化,即非对称荷载时程导致加劲梁在纵向发生静态运动,与车重、车流密度、车辆位置分布随时间变化及悬索桥体系刚度有关。需要说明的是,本文所述的静态位移与文献[16-17]所述的拟静态位移有差别,本文的静态位移没有考虑动力放大效应,而文献[16-17]的拟静态位移已经考虑了动力放大效应,因此它所产生的累积位移效应更大。

限于篇幅,以一般车流运行状态为代表,该荷载工况下的加劲梁纵向位移响应见图10。由图10(a)可知,动态位移响应均以静态位移为平衡位置的振动响应,在位移程曲线中呈“毛刺”状,且全桥模型瞬态分析计算得到的位移响应略大于SDOF模型计算结果。加劲梁纵向位移响应的频谱曲线见图10(b)。由图10(b)可知,随机车流下的加劲梁位移响应由超低频拟静态强迫振动响应和共振响应组成。对于拟静态响应,其频率小于0.06 Hz,主频为0.019 Hz,与前述随机车流激励频率对应,为分布不平衡车辆荷载导致的静态位移考虑动力放大效应后的位移响应。对于共振响应,SDOF系统只有1阶模态振动,但实际上车流导致的加劲梁纵向振动虽由1阶纵向振动主导,但伴随出现2阶,甚至更高阶纵向振动模态。全桥模型瞬态分析的位移频谱曲线见图10(b),简化模型因不能考虑多阶振动模态而导致计算结果偏小。

表6 加劲梁纵向运动响应统计值

Table 6 Response statistics of longitudinal motion of stiffeners

计算方法	位移/cm			速度/(cm/s)		加速度/(cm/s ²)		
	累计值	幅值	均方根值	幅值	均方根值	幅值	均方根值	
稀疏车流	静态	111.06	5.41	2.92	0.64	0.13	1.83	0.11
	全桥模型瞬态	598.63	7.80	3.07	4.37	0.69	5.75	0.67
	简化SDOF模型	478.99	7.51	3.05	2.36	0.57	4.62	0.40
一般车流	静态	149.37	5.44	2.31	0.51	0.16	1.60	0.17
	全桥模型瞬态	534.86	6.39	2.45	2.81	0.59	3.55	0.54
	简化SDOF模型	462.05	6.71	2.42	1.79	0.52	2.30	0.36
密集车流	静态	334.13	8.39	2.48	1.16	0.36	2.85	0.39
	全桥模型瞬态	1569.88	10.50	3.25	4.80	1.57	5.00	1.44
	简化SDOF模型	1265.07	11.45	3.10	3.28	1.17	3.15	0.81

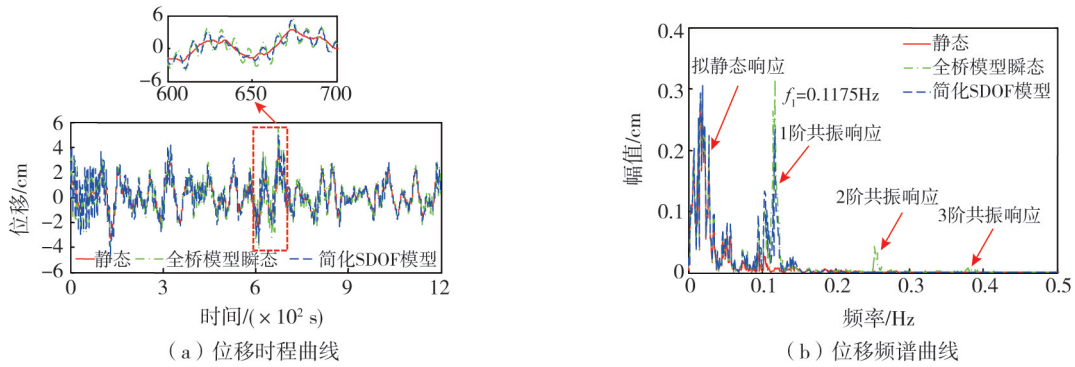


图 10 随机车流下加劲梁纵向位移响应

Fig. 10 Longitudinal displacement response of the stiffening girder under random traffic flow

引入动力放大系数为总响应值比静态响应,由表 6 中加劲梁纵向位移数值计算得到的位移动力放大系数见表 7。显然,在随机车流作用下加劲梁纵向累计位移的动力放大系数(约为 3~5),远超过位移幅值及均方根值的放大系数(约为 1.05~1.40),可见动力效应是累计位移的主要成因,桥梁相关规范中的冲击系数远不能反映随机车流下车致振动对累计位移行程的影响,研究加劲梁纵向累计位移效应时需要作全过程的振动响应分析。

表 7 纵向位移响应放大系数

Table 7 Amplification factor of longitudinal displacement response

计算方法	稀疏车流			一般车流			密集车流		
	累计值	幅值	均方根值	累计值	幅值	均方根值	累计值	幅值	均方根值
全桥模型瞬态	5.39	1.44	1.05	3.58	1.17	1.06	4.70	1.25	1.31
简化 SDOF 模型	4.31	1.39	1.04	3.09	1.23	1.05	3.79	1.36	1.25

需指出的是,SDOF 简化分析模型能反映车流下的悬索桥纵向运动特征,其位移幅值及均方根值精确可靠,而计算预估的累计位移行程误差稍大,在结构设计阶段初步评估及位移控制参数优化采用简化计算方法适用可行;若需采用较为精确的累计位移行程来评估支座及伸缩缝等附属装置的耐久性,则需采用对全桥有限元模型下进行随机车流振动的瞬态时程分析,或是进一步优化简化模型,比如采用多个独立的 SDOF 体系组合替代单一的 SDOF 体系。另外,上述计算分析暂未考虑不同随机模式的影响,从 3 种车流运行状态计算工况的计算结果(表 6)来看,随机车流模式对响应结果影响具有一定的随机性,实际上,随机模式中的不确定因素可导致响应结果上存在差异^[27],有待后续拓展研究,以明确随机车流模式对振动响应结果的影响。

3 结论

本文以单跨悬索桥为研究对象,剖析了移动荷载下加劲梁纵向运动特征,研究了加劲梁纵向振动简化替代模型,并基于简化 SDOF 模型提出了一种简捷、实用的随机车流下悬索桥加劲梁纵向振动计算分析方法。得到如下主要结论:

1) 悬索桥在缓慢移动荷载作用下,加劲梁主要沿纵向发生一个近似正弦的静态位移运动;由该静态位移反算得到等效纵向荷载,将其分别施加于悬索桥全桥模型的梁端和 SDOF 体系,得到移动荷载作用下加劲梁纵向振动的 2 种替代简化振动模型。数值计算表明,上述计算模型均能反映移动荷载下的加劲梁纵向振动规律,采用位移影响函数的等效荷载作用于等效 SDOF 体系得到的振动响应与全桥模型计算结果最为接近。

2) 提出了基于 SDOF 振动体系的随机车流下加劲梁纵向振动简化分析方法,研究表明等效 SDOF 振动计算模型能反映加劲梁纵向运动特征规律,简化方法计算获得的位移幅值及均方根值精确可靠,而累计位移误差稍大(约 13%~19%),在结构设计阶段预估累计位移及振动控制参数优化,采用所提简化计算方法适用可行,极大地简化了现行计算方法。

3) 随机车流荷载对悬索桥而言为一种缓慢冲击激励,日常行车条件下加劲梁以毫米级的低速沿纵向往复运动,运动幅值为厘米级;加劲梁纵向累计位移由两部分构成,即车流导致的静态位移和动态位移,前者由车重随机分布的位置变化形成的不平衡荷载导致;后者由随机车流导致加劲梁产生动力放大效应和纵向共

振引起,是累计位移主要来源,从计算工况来看可高达前者的2~4倍。进行累计位移控制时,可从结构刚度、纵向约束措施等方面减小静态累计位移,而采用耗能阻尼装置将其“毛刺”位移“过滤”来控制动态响应的累计位移。

4)所以简化模型将单跨悬索桥梁的加劲梁悬挂体系等效为一个SDOF振动体系,将随机车流等效为随机时程荷载,研究仍存在一定的局限性,有待后续的研究中予以探讨和完善。首先,SDOF体系因未能考虑高阶振动模态导致累计位移计算结果偏小,更为精确的简化计算方法如考虑多个SDOF振动体系组合的计算方法有待进一步研究;其次,所提简化模型及计算方法针对单跨悬索桥,对于多跨及多塔悬索桥的适用性需进一步明确;最后,所提简化模型研究仅涉及随机车流荷载,后续将拓延风荷载乃至风-车联合作用下的简化计算方法研究。

参考文献:

- [1] 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 Yufeng, CHEN Xiongfei, ZHANG Litao, 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)
- [2] 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(1): 04019106.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] SUN Z, ZHANG Y F. Failure mechanism of expansion joints in a suspension bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(10): 05016005.
- [6] SUN Z, ZOU Z L, ZHANG Y F. Utilization of structural health monitoring in long-span bridges: Case studies[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(10): e1979.
- [7] LIU Z X, GUO T, HEBDON M H, et al. Measurement and comparative study on movements of suspenders in long-span suspension bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(5): 04019026.
- [8] 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.
- [9] 黄国平,胡建华,华旭刚,等.移动车辆作用下大跨度悬索桥梁端纵向位移机理[J].振动与冲击,2021,40(19):107-115.
HUANG Guoping, HU Jianhua, HUA Xugang, et al. Girder end longitudinal displacement mechanism of long-span suspension bridge under moving vehicles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(19): 107-115. (in Chinese)
- [10] 李光玲,韩万水,陈笑,等.风和随机车流下悬索桥伸缩缝纵向变形[J].交通运输工程学报,2019,19(5):21-32.
LI Guangling, HAN Wanshui, CHEN Xiao, et al. Longitudinal deformation of expansion joint of suspension bridge under wind and random traffic flow[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(5): 21-32. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 韩大章,郭彤,黄灵宇,等.随机车辆荷载下大跨钢桥伸缩缝纵向位移响应及病害控制研究[J].振动与冲击,2019,38(24):172-178.
HAN Dazhang, GUO Tong, HUANG Lingyu, et al. A study on longitudinal displacements and damage control of expansion joints of long-span steel bridges under stochastic traffic loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 172-178. (in Chinese)
- [13] 李永乐,钱逸哲,朱金,等.随机风、车流联合作用下大跨公路悬索桥纵向振动特性研究[J].中国公路学报,2021,34(4):93-104.
LI Yongle, QIAN Yizhe, ZHU Jin, et al. Longitudinal vibration characteristics of a long-span highway suspension bridge under stochastic wind and traffic loads[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 93-104. (in Chinese)
- [14] 赵国辉,高建华,刘健新,等.悬索桥线性液体黏滞阻尼器阻尼系数优化[J].交通运输工程学报,2013,13(3):33-39.
ZHAO Guohui, GAO Jianhua, LIU Jianxin, et al. Damping coefficient optimization of linear fluid viscous damper for suspension bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(3): 33-39. (in Chinese)
- [15] LIANG L T, FENG Z Q, CHEN Z Q. Seismic control of SDOF systems with nonlinear eddy current dampers[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16): 3427.
- [16] WU C L, JING H K, FENG Z Q, et al. Control of longitudinal movement response of suspension bridges induced by passing trains using low-exponent fluid viscous dampers[J]. Structures, 2024, 62: 106330.
- [17] LIANG L T, FENG Z Q, ZHANG H Y, et al. An analytical study on using Maxwell-coulomb friction damper to mitigate quasi-static response of SDOF systems[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(11): 4762-4769.
- [18] 梁龙腾,封周权,陈政清,等.漂浮体系悬索桥拟静态纵向运动特性及其控制[J].地震工程与工程振动,2022,42(1):110-121.
LIANG Longteng, FENG Zhouquan, CHEN Zhengqing, et al. Characteristics of quasi-static longitudinal motion and its mitigation for floating-type suspension bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 110-121. (in Chinese)

- [19] 梁龙腾,封周权,陈政清,等.大跨度悬索桥加劲梁纵向运动特性及其电涡流阻尼控制研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(4):118-127.
LIANG Longteng, FENG Zhouquan, CHEN Zhengqing, et al. Longitudinal movement characteristics of long span suspension bridge girder and its control based on eddy current dampers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(4): 118-127. (in Chinese)
- [20] 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 Tianbao, LI Songlin. Longitudinal displacement characteristics and longitudinal supporting requirements for long-span railway suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(4): 29-35. (in Chinese)
- [21] 邓露,段林利,何维,等.中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究[J].中国公路学报,2018,31(7):92-100.
DENG Lu, DUAN Linli, HE Wei, et al. Study on vehicle model for vehicle-bridge coupling vibration of highway bridges in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 92-100. (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 Zhouquan, JING Haokun, CHEN Zhengqing, 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] 魏标,刘义伟,蒋丽忠,等.地震作用下双曲面球型减隔震支座在铁路简支梁桥中的动力行为[J].土木工程学报,2019,52(6):110-118.
WEI Biao, LIU Yiwei, JIANG Lizhong, et al. Dynamic behaviors of double spherical isolation bearing in simply-supported railway bridges under earthquakes[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 110-118. (in Chinese)
- [24] 谢静思.吉茶高速公路矮寨大桥车辆荷载谱研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
XIE Jingsi. Research on Load spectrum in Aizhai bridge of JiCha highway[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [25] 陈水生,赵辉,李锦华,等.随机车流作用的公路斜拉桥振动响应分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(1):84-94.
CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, et al. Vibration response analysis of highway cable-stayed bridge under stochastic traffic flow[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(1): 84-94. (in Chinese)
- [26] 周云,李自强,胡健鑫,等.基于贝叶斯理论的非接触式桥梁动态称重研究[J].地震工程与工程振动,2023,43(1):43-54.
ZHOU Yun, LI Ziqiang, HU Jianxin, et al. Research on contactless bridge weigh-in-motion based on Bayesian theory[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(1): 43-54. (in Chinese)
- [27] 胡章亮,魏标,蒋丽忠,等.高速铁路梁桥建模参数敏感性分析[J].铁道科学与工程学报,2023,20(2):393-404.
HU Zhangliang, Wei Biao, Jiang Lizhong, et al. Sensitivity analysis of modeling parameters of high-speed railway girder bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 393-404. (in Chinese)