

随机车流作用的公路斜拉桥振动响应分析

陈水生,赵辉,李锦华,陈潇

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要 目的 分析随机车流荷载对公路斜拉桥振动响应的影响,探究斜拉桥纵梁、桥塔和斜拉索的振动响应规律。**方法** 基于某高速公路的动态称重系统实测数据,建立考虑车型、车道、车速、车体质量、车辆间距和桥面不平顺的随机车流模型;采用MATLAB 软件编程求解公路斜拉桥在随机车流荷载作用下的振动响应。**结果** 采用蒙特卡洛法随机抽样生成的随机车流模型能真实再现桥面交通流状况,斜拉桥纵梁、桥塔和斜拉索的振动响应随着车流密度的增大而增大,每一辆重载车过桥都会激起一个桥梁振动响应峰值;纵梁应力循环次数随着车流密度的增大而增大;桥塔纵向位移响应随着桥塔高度的增加而增大;斜拉索的轴向振动响应大于面内振动响应,而面外振动响应最小;轴向振动响应随着斜拉索长度的增加而增大,面内振动响应因拉索长度不同而波动较大;斜拉桥的振动响应随着桥面路况的恶化而增大。**结论** 重型车的限载和桥面的定期保养可以有效减小桥梁入车致的振动响应。

关键词 斜拉桥;随机车流;车桥耦合振动;桥面不平顺

中图分类号 TU997;U441.3

文献标志码 A

Vibration Response Analysis of Highway Cable-Stayed Bridge under Stochastic Traffic Flow

CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, CHEN Xiao

(Department of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013)

Abstract: This paper analyzed the influence of random traffic load on the vibration response of highway cable-stayed bridge, and explored the vibration response law of longitudinal beam, tower and stay cable of cable-stayed bridge. Based on the measured data of a highway dynamic weighing system, a stochastic traffic flow model considering vehicle type, lane, speed, vehicle weight, vehicle spacing and uneven deck was established. The vibration response of highway cable-stayed bridge under stochastic traffic load was solved by MATLAB software programming. The stochastic traffic flow model generated by Monte Carlo random sampling can reproduce the real traffic situation of bridge. The vibration response of longitudinal beam, pylon and stay cable of cable-stayed bridge increases with the increase of traffic density, and each heavy-duty vehicle passing through the

收稿日期:2020-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(12062006,11962006)

作者简介:陈水生(1968—),男,教授,博士,主要从事车桥耦合振动及控制方面研究。

bridge will arouse a peak value of bridge vibration response. The number of longitudinal stress cycles increases with the increase of traffic density, and the longitudinal displacement response of bridge tower increases with the increase of tower height. The axial vibration response of the stay cable is greater than that of the in-plane vibration, while the out of plane vibration response is the smallest. The axial vibration response increases with the increase of the cable length, and the in-plane vibration response fluctuates greatly with the length of the cable. The vibration response of cable-stayed bridge increases with the deterioration of road condition. The limited load of heavy vehicles and regular maintenance of bridge deck can effectively reduce the excessive vibration response of bridge.

Key words: cable-stayed bridge; stochastic traffic flow; vehicle-bridge coupling; irregularity of bridge deck

近年来,随着我国综合国力和桥梁建造技术的提高,大跨度斜拉桥在高速公路和城市道路建设中迅速发展,其不仅有美观的造型,还有很强的跨越能力,在现代大跨度桥梁建设中有很大的竞争力。但是,斜拉桥本身属于柔性结构,与中小跨径桥梁相比,其竖向和横向刚度较弱,在侧风、车辆、地震等外部荷载作用下会产生较大的变形或振动^[1-3]。车辆荷载激励的斜拉桥振动响应,更应该引起重视,大型载重货车出现的频率和超重的概率较高;同一时间有多辆不同类型的车辆在桥上行驶。因此,探究随机车流荷载作用的斜拉桥振动响应规律具有重大意义。

有关斜拉桥车致振动响应的研究,学者们做了很多工作,也创造了很多有价值的成果。其中,M. T. SONG^[4]和 H. ZHANG^[5]分别将车辆简化为 1/4 车辆模型和 1/2 车辆模型分析斜拉桥的整体振动响应和斜拉索的局部振动响应;谢旭^[6]分析了不同车辆简化模型对斜拉桥整体振动响应和斜拉索振动响应的影响;X. KONG^[7]研究了斜拉桥钢-混结合段在重型车荷载作用下的振动响应特点。但上述斜拉桥的车致振动响应研究都是单车过桥,显然与实际交通状态不符。随着对车桥耦合振动研究的深入,学者们也开始探索斜拉桥在随机车流荷载作用下的振动响应,例如,杨沐野^[8]主要对斜拉桥钢箱梁的弯矩和轴力振动响应进行了分析;阮欣^[9-10]

探讨了车流随机特性参数对多塔斜拉桥响应特性的影响并基于合成车流预测斜拉桥的车辆荷载效应极值。

虽然学者们对随机车辆荷载作用的斜拉桥振动响应进行了研究,但主要侧重于主梁的振动响应,而有关桥塔和斜拉索的车致振动研究很少,且随机车流模型没有考虑桥面不平顺的影响。鉴于此,笔者以一座公路斜拉桥为研究对象,综合考虑各随机因素的影响,建立切合实际交通状况的随机车流模型,分析斜拉桥纵梁、桥塔和斜拉索的振动响应特点,为类似斜拉桥的建造和管理养护提供参考依据。

1 车桥耦合振动原理

以一辆六轴拖挂车为例,采用传统弹簧-质量-阻尼体系将车辆简化为 17 自由度空间模型,考虑牵引车和挂车的竖向振动、纵向点头、侧翻以及车轮振动,车辆模型如图 1 所示。图中, $k_{s1}, k_{s2}, \dots, k_{s12}$ 为各轴悬架弹簧刚度; $k_{t1}, k_{t2}, \dots, k_{t12}$ 为各车轮刚度; $c_{s1}, c_{s2}, \dots, c_{s12}$ 为各轴悬架阻尼系数; $c_{t1}, c_{t2}, \dots, c_{t12}$ 为各车轮阻尼系数; m_1, m_2, \dots, m_{12} 为各轴悬架系统质量; m_{hb1}, m_{hb2} 分别为牵引车和拖挂车的车体质量; I_{r1}, I_{r2} 分别为牵引车和拖挂车的车体仰俯转动惯量; J_{r1}, J_{r2} 分别为牵引车和拖挂车的车体侧翻转动惯量; θ_1, θ_2 分别为牵引车和拖挂车的仰俯角; φ_1, φ_2 分别为

牵引车和拖挂车的侧倾角; z_{b1}, z_{b2} 分别为牵引车和拖挂车的车体竖向位移; z_1, z_2, \dots, z_{12} 为车辆悬架位移坐标; $z_{01}, z_{02}, \dots, z_{012}$ 为车轮

位移坐标; B 为左右轮宽度; l_1, l_2, \dots, l_9 为各轴间尺寸。

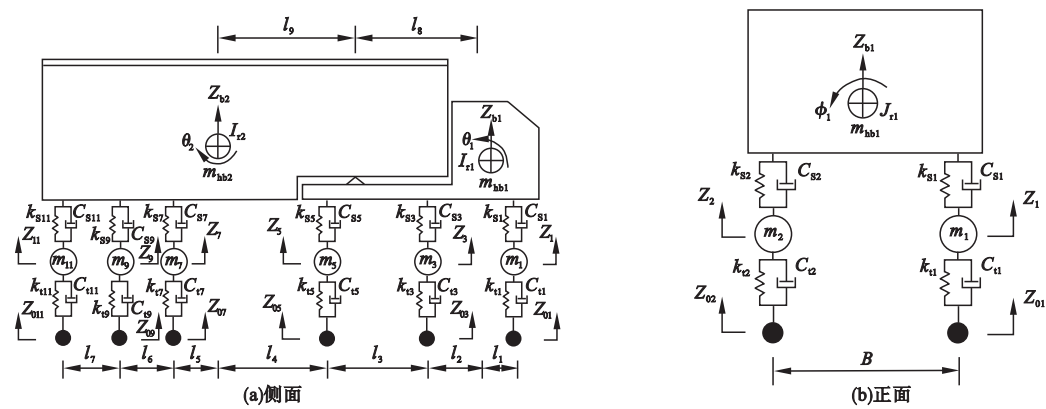


图1 车辆模型

Fig.1 Vehicle model

根据虚功原理,建立 17 自由度车辆振动方程如下:

$$M_v \ddot{z} + C_v \dot{z} + K_v z = F_v^{int}. \tag{1}$$

式中: M_v 、 C_v 、 K_v 分别为车辆的质量、阻尼和刚度矩阵; F_v^{int} 为车辆各自由度产生的惯性荷载列向量;车辆振动自由度列向量 $z = [z_1, z_2, \dots, z_{12}, z_{b1}, \theta_1, \varphi_1, z_{b2}, \varphi_2]^T$ 。

桥梁振动方程可以采用广义坐标离散的方法建立,方程表达式为

$$M_b \ddot{\delta} D + C_b \dot{\delta} + K_b \delta = -F_v^{int} - f_g. \tag{2}$$

式中: M_b 、 C_b 、 K_b 分别为桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵; f_g 为车辆自重引起的各车轮作用点处的荷载向量; δ 为单元结点向量。

为减少计算自由度,引入模态综合法,把相互耦合的节点运动方程解耦,转化为互相独立的模态方程,解耦后的桥梁振动方程为

$$I \ddot{y} + X y + \Omega y = -\Phi^T (F_v^{int} + f_g). \tag{3}$$

其中,

$$I = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix}_{n \times n},$$
$$X = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\xi_n \omega_n \end{bmatrix}_{n \times n},$$

式中: ξ_n 为桥梁第 n 阶阻尼比; ω_n 为桥梁第 n 阶自振频率; Φ 为桥梁 n 阶振型向量矩阵; y 为桥梁广义坐标列向量。

在车轮与桥面板接触始终不脱离的前提下,通过车轮与桥面接触处的位移协调条件和相互作用力平衡条件,可得第 i 车轮作用在桥梁上的荷载:

$$F_{bvi}^{int} = k_{ti} (-N_i \Phi y - q_i + z_i) + c_{ti} (-v \cdot N_{i,x} \Phi y - N_i \dot{\Phi} y - \dot{q}_i + \dot{z}_i) - f_{gi}. \tag{4}$$

式中: N_i 为第 i 车轮作用处位移场的插值函数; $N_{i,x}$ 为 N_i 对车辆行驶方向 x 坐标的导数; q_i 为车轮 i 处的桥面不平度值; f_{gi} 为第 i 车轮所承受的车辆自重; k_{ti} 、 c_{ti} 分别为第 i 车轮的刚度和阻尼系数; z_i 为第 i 车轮的竖向振动位移; v 为车辆行驶速度。

将式(4)代入式(3)并整理可得:

$$I \ddot{y} + (X - \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T c_{ti} N_i \Phi) \dot{y} + (\Omega - \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T (k_{ti} N \Phi + c_{ti} v N_{i,x} \Phi)) y + \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T c_{ti} \dot{z}_i - \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i \cdot k_{ti} \cdot z_i = -\Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i (k_{ti} q_i + c_{ti} \dot{q}_i) -$$

$$\Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T f_{gi}.$$

(5)

联立式(1)和式(5)建立车辆和桥梁的耦合振动方程:

$$\mathbf{M}_{bv} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{bv} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{bv} \mathbf{u} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_w.$$

(6)

式中: \mathbf{M}_{bv} 、 \mathbf{C}_{bv} 、 \mathbf{K}_{bv} 分别为车桥相互作用模型的质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{F}_g 为车辆自重所引起的车桥耦合竖向荷载向量; $\mathbf{u} = [y_1 \cdots y_n \ z_1 \cdots z_{12} \ z_{b1} \ \theta_1 \ \varphi_1 \ z_{b2} \ \varphi_2]^T$ 为广义坐标向量; \mathbf{F}_w 为桥面不平顺随机激励引起的车桥耦合竖向荷载。

采用 Newmark- β 数值方法求解式(6),可得桥梁在车辆荷载作用下的振动响应。但随机车流车辆较多,如果所有车辆都建立成空间整车模型,车桥耦合方程式(6)中的时变矩阵维数将非常大,且计算困难。已有研究结果表明^[11],可以对车辆模型进一步简化,将不同类型车辆单独过桥产生的动态力进行等效,用车辆等效荷载代替空间整车模型,进而分析大跨度桥梁在随机车流荷载作用下的振动响应。故笔者在考虑随机桥面不平顺影响的前提下,基于车桥耦合振动理论,首先计算交通流中不同类型车辆的等效荷载。由式(4)可得 j 类型车辆单独作用下的第 i 车轮动态荷载 F_{vji}^{int} ,其表达式为

$$F_{vji}^{\text{int}} = k_{ti}(-N_i \Phi \mathbf{y} - \mathbf{q}_i + \mathbf{z}_i) + c_{ti}(-v \cdot N_{i,x} \Phi \mathbf{y} - N_i \Phi \mathbf{y} - \dot{\mathbf{q}}_i + \dot{\mathbf{z}}_i).$$

(7)

则, j 类型车辆的等效动态车轮荷载 F_{vj}^{int} 为

$$F_{vj}^{\text{int}} = \sum_{i=1}^{nt} F_{vji}^{\text{int}}.$$

(8)

式中: nt 为 j 类型车辆的车轮数。

根据式(8)可以计算动态车轮荷载系数为

$$R_j(t) = \frac{F_{vj}^{\text{int}}}{\sum_{i=1}^{nt} f_{gi}}.$$

(9)

那么, j 类型车辆的等效荷载 F_{bvj}^{int} 为

$$F_{bvj}^{\text{int}}(t) = (1 - R_j(t)) \sum_{i=1}^{nt} f_{gi}.$$

(10)

2 随机车流的模拟

2.1 车型及车道

高速公路上的运行车辆各异,车辆类型较多,各类型车辆具有较强的随机性,根据车辆类型现场调查结果并参考已有的研究成果^[12-13],可以将高速公路上行驶车辆分为六种代表性车型,各车型及车辆行驶车道的统计数据如表 1 所示,各车型出现的频率和车辆车道的选择可以采用均匀分布函数来生成^[14]。

表 1 车型及车道统计数据

Table 1 The statistics information of vehicle types and lanes

车型	车型占比/%	轴数	车道所占比例/%	
			行车道	超车道
C1	85.64	二轴小汽车	38.17	61.37
C2	10.31	二轴货车	83.18	14.47
C3	1.46	三轴货车	92.78	9.02
C4	3.18	四轴货车	94.12	4.38
C5	0.31	五轴货车	89.63	8.51
C6	3.79	六轴货车	94.49	2.95

2.2 车 距

桥上行驶车辆的间距体现了交通流的密度和车流的长度,不同的时间段,上桥车辆数量是不相同的。根据实际交通状况,可以将交通流划分为稀疏、一般和密集三种状况,并分别采用威布尔分布、对数正态分布和伽马分布生成车距样本^[12,15]。为反映不同车流状况中各车辆之间行车间距的取值范围及不同车辆间距发生的概率,在此对每种车流状况的车辆间距分别生成 5 000 个样本并计算其概率密度,如图 2 所示。图中给出了各车流状况的车辆间距所服从概率分布函数的分布参数。可以看出,随着交通流密度的增大,车距的均值变小,概率密度峰值更加突出。

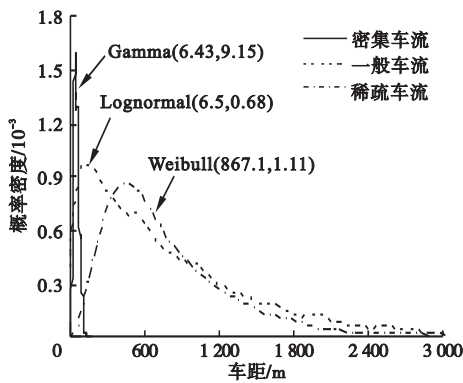


图2 车辆间距概率密度曲线

Fig. 2 Probability density curve of vehicle spacing

2.3 车速

车辆行驶速度的影响因素很多,不同车辆的行驶速度因车辆尺寸和载重量大小而有所不同,且不同交通状况的车辆行驶速度也不同。根据动态称重系统(Weigh-In-Motion System, WIM)长期监测数据的统计分析结果,每种车型的车速具有正态分布的特征^[16],表2给出了各车型的车速统计参数。

表2 车速统计数据

Table 2 The statistics information of vehicle speed

车型	速度/(km·h ⁻¹)		车型	速度/(km·h ⁻¹)	
	均值	标准差		均值	标准差
C1	89.1	14.4	C4	68.2	10.2
C2	75.2	11.8	C5	64.2	20.5
C3	64.3	6.76	C6	68.0	9.7

2.4 车体质量

不同车辆的车体质量变化较大,与地域的经济发展和地理位置有关。通常情况下,上桥车辆可以分为空载、一般载重和重载三种情况,车体质量的最小值是空载情况下车辆自身的质量,车体质量的最大值与车辆的超载有关。根据实测WIN监测数据,各车型的车体质量统计结果呈现多峰分布的特点,可以采用高斯混合分布拟合各车型车体质量^[17],拟合的高斯混合分布参数如表3所示。表中, μ_i 、 σ_i 分别为第*i*个高斯分布的均值和标准差。

表3 车体质量统计数据

Table 3 The statistics information of vehicle weight

车型	权重系数	μ_i/t	σ_i/t
C1	0.04	7.52	16.11
	0.96	2.04	0.29
C2	0.52	14.86	30.25
	0.48	6.12	14.27
C3	0.18	47.82	204.34
	0.35	19.51	17.91
	0.47	30.72	52.39
C4	0.31	17.48	24.8
	0.33	54.33	349.43
	0.36	35.37	171.16
C5	0.34	72.71	414.7
	0.25	22.86	20.71
C6	0.43	47.2	236
	0.38	54.68	256.07
	0.09	102.17	318.07
	0.12	20.15	34.33
	0.41	64.2	319.94

综合考虑车型、车道、车速、车体质量、车辆间距和车辆数量的随机性特征,随机车流荷载的模拟流程如图3所示。以一般车流为例,采用蒙特卡洛随机抽样产生的随机车流样本如图4所示。

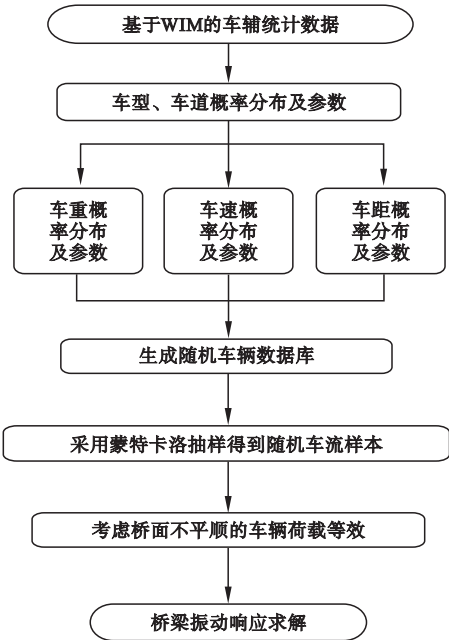


图3 随机车流模拟流程

Fig. 3 Flow chart of random traffic flow simulation

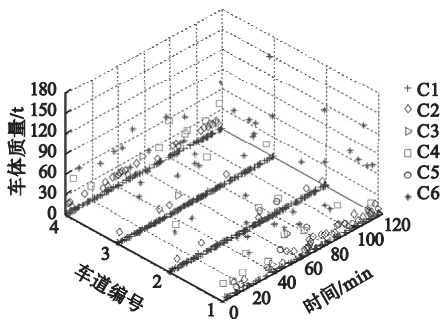


图 4 随机车流样本

Fig. 4 Random sample of traffic flow

3 工程案例

3.1 工程概况及桥梁动力特性分析

以鄱阳湖二桥为研究对象,该桥连接江

西省都昌县和庐山市,跨越中国内陆“百慕大”之称的鄱阳湖老爷庙水域。鄱阳湖二桥为双向四车道的五跨双塔空间双索面钢-混凝土组合梁斜拉桥,采用梁、塔分离的结构形式。主塔采用宝瓶形混凝土桥塔,桥面以上塔高 107.6 m;斜拉索呈双索面扇形布置,拉索最大长度为 223.042 m (编号: WZ18、EZ18),拉索最小长度为 60.168 m (编号: WZ1、EZ1);主梁钢构架由纵梁、横梁、小纵梁和压重小纵梁通过节点板及高强螺栓连接而成,南侧纵梁 ZL1 与北侧纵梁 ZL2 的间距为 26 m。桥梁纵断面和横断面如图 5 所示,图中各斜拉索分别编号。

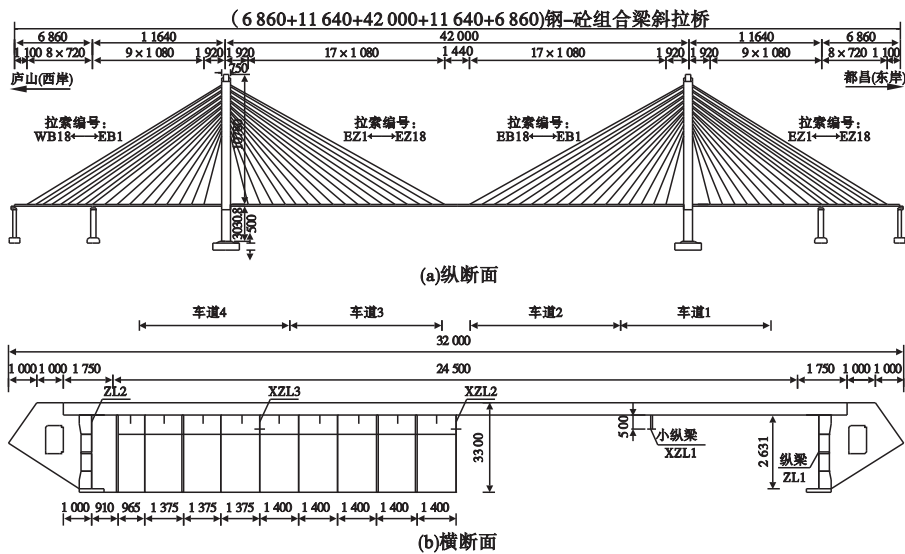


图 5 桥梁纵断面和横断面图

Fig. 5 The profile and cross section of the bridge

采用 ANSYS 有限元软件建立鄱阳湖二桥的有限元模型,钢主梁、钢横梁和桥塔采用 Beam4 梁单元模拟,斜拉索采用 Link10 杆单元模拟,桥面板和铺装层采用 Shell63 壳单元模拟,桥梁有限元模型如图 6 所示。ANSYS 提取的桥梁前十阶基频和振型如表 4 所示。由表 4 可知,鄱阳湖二桥表现出的振型特点主要为主梁的振型特点,其次是桥塔,以纵漂、竖向弯曲、侧向弯曲和扭转为主。由于桥梁各方向的刚度不同,相应振型出现的次序

也不相同,主梁竖向弯曲振型表现明显且最早出现在第 2 阶,而主梁侧向弯曲出现在第 3 阶,说明桥梁竖向抗弯刚度较低,且全桥结构的横向刚度大于竖向刚度;第 5 阶和第 6 阶出现桥塔侧向弯曲,说明桥塔横向刚度较弱;主梁扭转振型只出现在第 9 阶,扭转刚度较大,这对桥梁抗风是有利的;高阶次振型主要表现为主梁的竖向弯曲和桥塔的侧向弯曲。

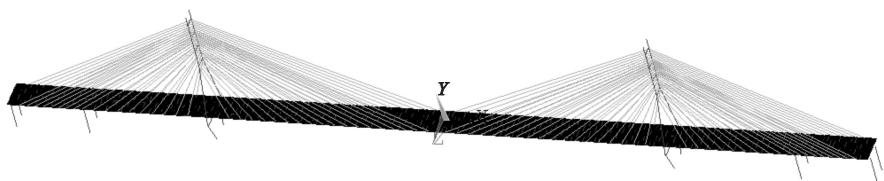


图6 桥梁有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the bridge

表4 桥梁前十阶频率及振型特征
Table 4 The first ten order frequency and mode characteristics of bridge

阶次	基频/Hz	振型特征
1	0.147	纵向纵漂
2	0.392	主梁对称竖向弯曲
3	0.438	主梁侧向弯曲
4	0.483	主梁反对称竖向弯曲
5	0.681	桥塔反向侧弯曲
6	0.693	桥塔同向侧弯曲
7	0.730	主梁对称竖向弯曲
8	0.877	主梁反对称竖向弯曲
9	0.918	主梁反对称扭转
10	0.993	主梁对称竖向弯曲

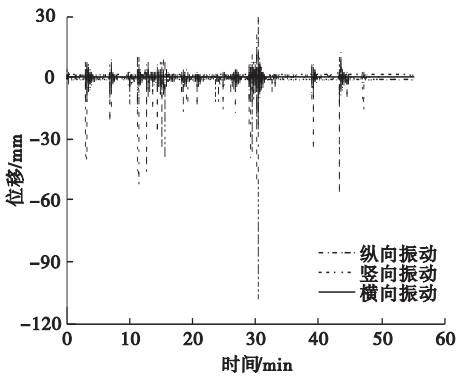


图7 纵梁 ZL1 跨中振动响应

Fig. 7 Vibration response of longitudinal beam ZL1 in mid-span

3.2 桥梁振动响应分析

3.2.1 纵梁振动响应

当不考虑桥面不平顺影响时,在 1 小时一般车流荷载作用下的主跨纵梁 ZL1 跨中竖向振动响应如图 7 所示。

由图 7 可知,纵梁跨中振动响应的

离散程度较大,随机性较强,每一辆重型车过桥都会出现一次振动响应峰值,而质量较小的 C1 型小汽车引起的振动响应较小。纵梁竖向振动响应最大,纵向振动响应次之,而横向振动响应最小,三者的峰值分别为 108.4 mm、27.45 mm、1.06 mm,这与上文分析的斜拉桥各部位的刚度强弱是一致的。

三种车流状况下的主跨纵梁 ZL1 跨中竖向位移响应和应力响应如图 8 所示。

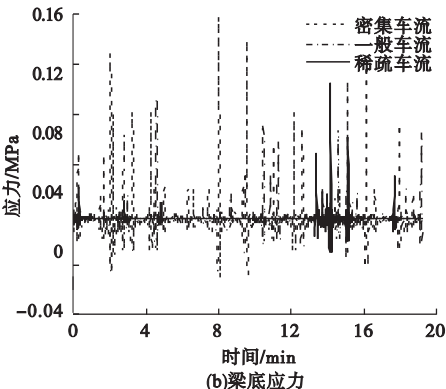
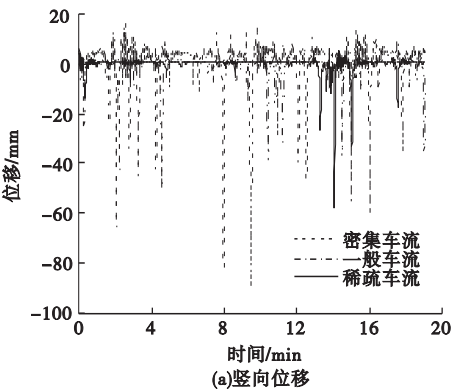


图8 不同车流状况的纵梁 ZL1 跨中振动响应

Fig. 8 Vibration response of longitudinal beam ZL1 in mid-span under different traffic flow conditions

由图 8 可知,随着桥上车辆数量的增加,纵梁跨中振动响应的峰值数量也增加,但振动响应的峰值大小并不随着车辆数量的增加而变大,一般车流的纵梁振动响应峰值反而小于稀疏车流的纵梁振动响应峰值,这与各类型车辆出现的随机性有关。每一个位移和应力响应峰值都表明有载重量较大的车辆通过桥梁跨中截面;从纵梁跨中梁底的应力响应时程可以看出,车流荷载作用会激起纵梁的应力循环,且纵梁应力响应的循环次数随着交通流中车辆数量的增加而增加。桥梁振动响应的幅值取决于车辆的载重量,随机车流荷载更容易引起纵梁的应力疲劳;限制重型车的载重量可以有效避免纵梁产生过大的振动响应。

针对不同的车流状况,可以利用 FFT 变换的方法对纵梁跨中竖向位移和应力响应的时域信号进行频域转换,得到振动响应的功率谱密度(PSD),如图 9 所示。由图 9 可知,

桥梁振动响应的 PSD 峰值主要集中在主频附近,且车流密度越大,振动响应的能量就越大。

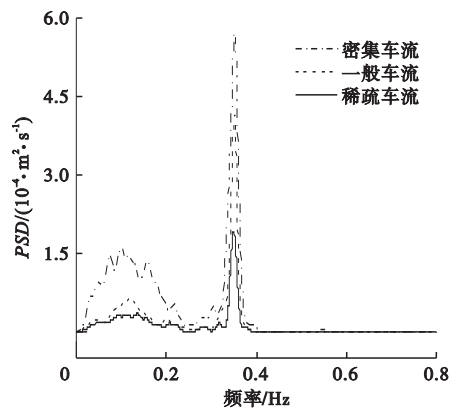


图 9 纵梁 ZL1 跨中竖向位移的功率谱密度
Fig. 9 Power spectral density of vertical displacement of longitudinal beam ZL1 in mid-span

根据随机振动理论,在频域内对相应的功率谱密度进行积分,可以求出振动响应的均方根值,纵梁 ZL1 沿桥长方向各截面的位移和应力响应均方根值如图 10 所示。

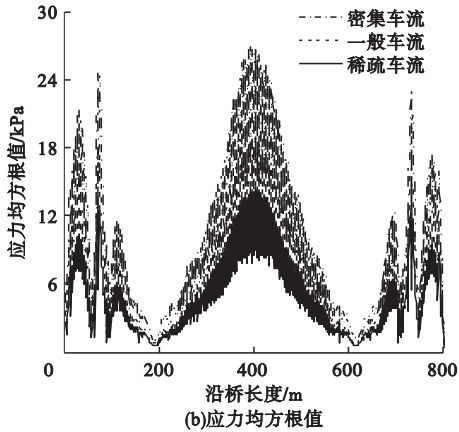
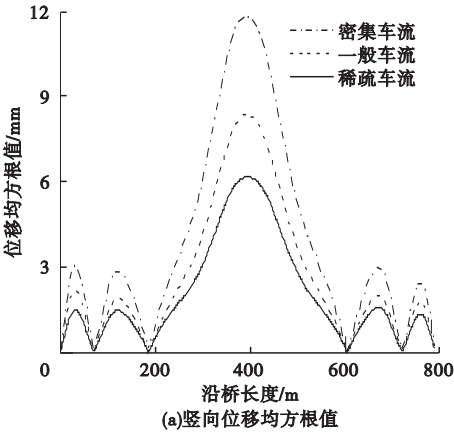


图 10 纵梁 ZL1 各截面振动响应均方根值

Fig. 10 Root mean square value of vibration response at each section of longitudinal beam ZL1

由图 10 可知,不同车流状况下,主跨跨中位置附近的振动响应均方根值最大,竖向位移响应均方根值峰值只出现在各跨的跨中位置附近,而梁底应力响应均方根值峰值不仅在各跨跨中位置出现,而且在边跨与次边跨交接位置也出现了峰值。密集的纵梁竖向位移响应均方根值较大,一般车流次之,稀疏车流较小,三者的最大值分别为 11.86 mm、

8.37 mm、6.18 mm。虽然沿桥长不同截面位置的应力响应均方根值波动较大,但依然是密集车流的应力响应均方根值最大,一般状态次之,稀疏车流较小,最大值分别为 27.13 kPa、17.21 kPa、13.53 kPa。

3.2.2 桥塔振动响应

以西侧桥塔为例,不同车流状况的塔顶纵向振动响应和沿桥塔高度各截面的纵向位

移响应均方根值如图 11 所示。由图 11 可知,塔顶纵向振动响应的峰值数量随着交通流车辆密度的增大而增大,峰值的大小取决于随机过桥车辆的载重量;沿桥塔高度各截

面的纵向位移响应均方根值随着车流密度的增大而增大;桥塔的高度越大,纵向位移响应的均方根值就越大。

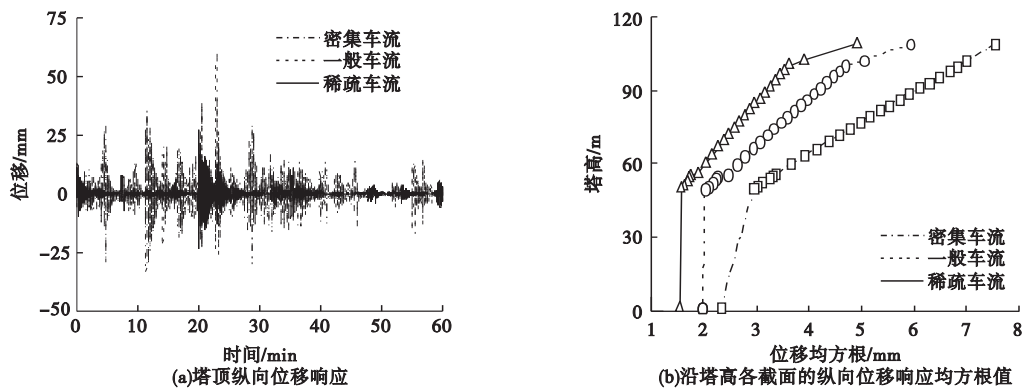


图 11 不同车流状况的桥塔纵向振动响应

Fig. 11 Longitudinal vibration response of bridge tower under different traffic flow conditions

3.2.3 斜拉索振动响应

以西岸桥塔南侧斜拉索为分析对象,图 12 给出了一般车流荷载作用下最长拉索 WZ18 中点的振动响应。

由图 12 可知,拉索的轴向振动响应峰值大于和面内振动响应峰值,而拉索的面外振动响应峰值最小,三者的峰值分别为 61.66 mm、56.77 mm、2.69 mm。拉索振动响应的峰值数量和峰值大小取决于拉索两端桥塔和纵梁的振动响应,塔端提供了较大的纵向振动,梁端提供了较大的竖向振动,所以拉索的轴向和面内振动响应较大;而塔端和梁端提供给拉索的横向振动较小,故拉索的面外振动响应较小。

不同车流荷载作用的各斜拉索中点振动响应的均方根最大值如图 13 所示。

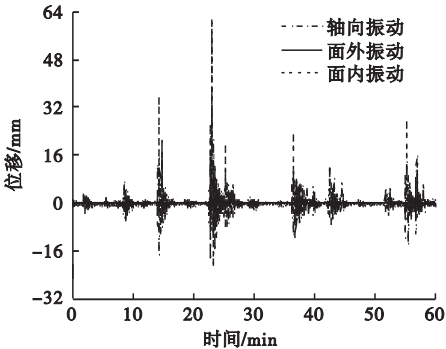


图 12 拉索 WZ18 的振动响应

Fig. 12 Vibration response of cable WZ18

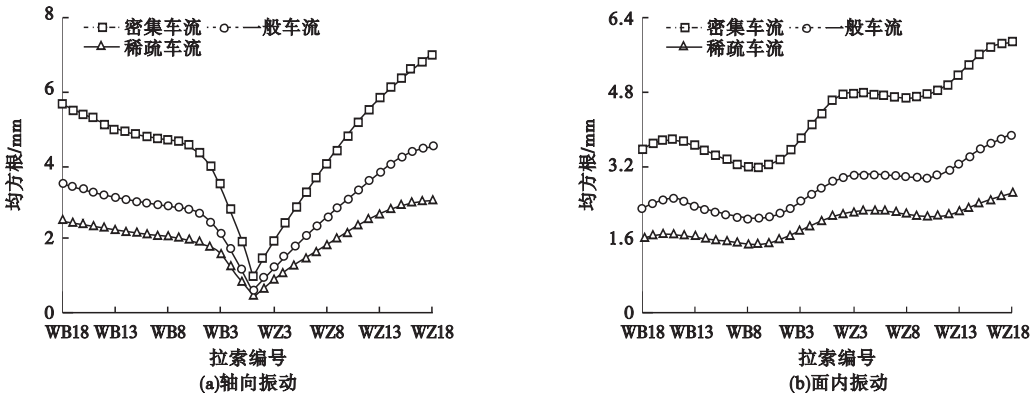


图 13 拉索振动响应的均方根最大值

Fig. 13 Maximum root mean square of cable vibration responses

由图 13 可知,各拉索的振动响应均方根最大值随着交通流密度的增大而增大;较长拉索的轴向振动响应均方根值大于较短拉索,其中最长索 WZ18 的轴向振动响应均方根值最大,最短索 WZ1 的轴向振动响应均方根值最小;不同位置拉索的面内振动响应均方根最大值各不相同,主跨各拉索的面内振动响应均方根值大于边跨和次边跨各拉索。

三根长拉索:边跨长拉索 WB18、次边跨长拉索 WB8 和主跨长拉索 WZ18 的中点面内振动响应均方根最大值如表 5 所示,结合图 13 可以看出,次边跨长拉索 WB8 的面内振动响应均方根值最小,主跨长拉索 WZ18 的面内振动响应均方根值最大。

表 5 各跨长拉索的面内振动响应均方根最大值

Table 5 Maximum root mean square value of in-plane vibration response of cables with different spans

拉索编号	位移响应均方根/mm		
	密集车流	一般车流	稀疏车流
WB18	3. 542	2. 264	1. 588
WB8	3. 174	2. 021	1. 447
WZ18	5. 891	3. 884	2. 606

3.2.4 桥面不平顺的影响

桥面不平顺具有很大的随机性,是桥梁产生随机振动的主要激励源之一,具有各态历经性,其不平顺高程的描述国际上通常采用频域方法,用功率谱密度来进行标定。当车辆以速度 v 匀速行驶时,其功率谱密度可以表示为

$$S_q(f) = S_q(n_0)n_0^2 \frac{v}{f^2}.$$

(11)

其中, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$, 为空间参考频率; $S_q(n_0)$ 为桥面不平度系数,与桥面路况等级有关; f 表示有效频带中的某一时间频率,通常情况下其取值范围为 $0.33 \sim 28.3 \text{ Hz}$ [16]。

在一般交通流车辆荷载作用下,分别考虑光滑、A 级、B 级、C 级四种桥面路况,表 6 给出了纵梁 ZL1 跨中竖向、西岸桥塔塔顶纵向和拉索 WZ18 中点的振动响应均方根值。

从表中数据可以看出,斜拉桥的振动响应随桥面路况的恶化而增大,C 级桥面路况的桥梁振动响应均方根约为光滑路况的 2 倍,桥面路况对斜拉桥各部位的振动具有较大影响。因此,桥面的定期保养可以有效减小桥梁的振动。

表 6 不同桥面路况等级的桥梁振动响应均方根
Table 6 Root mean square value of bridge vibration response under different road conditions

项目	位移响应均方根/mm			
	光滑	A 级	B 级	C 级
纵梁	9. 7	10. 8	11. 9	14. 7
塔顶	5. 6	7. 4	8. 94	10. 7
拉索轴向	4. 3	6. 5	7. 3	9. 6
拉索面内	3. 5	5. 6	6. 8	7. 3

4 结 论

(1)斜拉桥的车致振动响应随着车流密度的增大而增大。

(2)纵梁各跨跨中截面的竖向振动响应均方根值较大,其中主跨跨中截面的振动响应均方根值最大;桥塔纵向振动响应沿桥塔高度的增加而增大;斜拉索的振动响应较为复杂,其中轴向振动响应随着拉索长度的增加而增大,面外振动响应因拉索长度不同而各异。

(3)桥梁振动响应随着桥面路况的恶化而增大,为了减小桥梁的振动响应,应对过桥大型货车的载重进行限制,避免超载,并加强桥面养护。

参考文献

[1] 韩万水,陈艾荣. 风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[J]. 土木工程学报,2007,40(9):53-58.
(HAN Wanshui, CHEN Airong. Three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems [J]. China civil engineering journal, 2007,40(9):53-58.)
[2] 全伟,白士杰,包龙生. 高铁矮塔斜拉桥减隔震装置性能对比研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(2):299-306.
(QUAN Wei, BAI Shijie, BAO Longsheng.

- Study on seismic mitigation and isolation design of high-speed railway extradosed bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36 (2): 299-306.
- [3] 周士金, 刘荣桂, 蔡东升, 等. CFRP 索大跨斜拉桥的非线性地震响应控制分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 64-71.
(ZHOU Shijin, LIU Ronggui, CAI Dongsheng, et al. Nonlinear seismic response control analysis of long-span cable-stayed bridge with CFRP cables [J]. China journal of highway and transport, 2011, 24(3): 64-71.)
- [4] SONG M T, CAO D Q, ZHU W D, et al. Dynamic response of a cable-stayed bridge subjected to a moving vehicle load [J]. Acta mechanica, 2016, 227: 2925-2945.
- [5] ZHANG H, XIE X. Dynamic responses of cable-stayed bridges to vehicular loading including the effects of the local vibration of cables [J]. Journal of Zhejiang university-science a (applied physics & engineering), 2011, 12(8): 593-604.
- [6] 谢旭, 朱越峰, 申永刚. 大跨度钢索和 CFRP 索斜拉桥车桥耦合振动研究[J]. 工程力学, 2007, 24(增刊1): 53-61.
(XIE Xu, ZHU Yuefeng, SHEN Yonggang. Study on vibration of long-span cable-stayed bridge with steel and CFRP cables due to moving vehicles [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(S1): 53-61.)
- [7] KONG X, WU D J, CAI C S, et al. New strategy of substructure method to model long-span hybrid cable-stayed bridges under vehicle-induced vibration [J]. Engineering structures, 2012, 34: 421-435.
- [8] 杨沐野, 吉伯海, 傅中秋, 等. 随机实测车辆荷载下大跨度斜拉桥钢箱梁的动力响应特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 427-432.
(YANG Muye, JI Bohai, FU Zhongqiu, et al. Dynamic response characteristics of steel box girder under randomly measured vehicle loads in long-span cable-stayed bridge [J]. Journal of Hohai university (natural sciences), 2014, 42(5): 427-432.)
- [9] 阮欣, 周军勇, 石雪飞. 随机车流作用下多塔斜拉桥总体荷载响应特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 26-30.
(RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei. Overall vehicle load response characteristic of multi-span cable-stayed bridge under stochastic traffic flow [J]. Journal of tongji university (natural sciences), 2014, 42(1): 26-30.)
- [10] 阮欣, 周小燚, 郭济. 基于合成车流的桥梁车辆荷载效应极值预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 1458-1462.
(RUAN Xin, ZHOU Xiaoyan, GUO Ji. Extreme value extrapolation for bridge vehicle load effect based on synthetic vehicle flow [J]. Journal of tongji university (natural sciences), 2012, 40(10): 1458-1462.)
- [11] CHEN S R, CAI C S. Equivalent wheel load approach for slender cable-stayed bridge fatigue assessment under traffic and wind: feasibility study [J]. Journal of bridge engineering, 2007, 12(6): 755-764.
- [12] 王达. 基于有限元模型修正的大跨度悬索桥随机车流-桥耦合振动分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
(WANG Da. Analysis of vehicle-bridge coupled vibration for long-span suspension bridge with finite element model updating under random traffic flowing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.)
- [13] BAILEY S F, ROLF B. Site specific probability distribution of extreme traffic action effects [J]. Probabilistic engineering mechanics, 1999, 14: 19-26.
- [14] 鲁乃唯, 刘扬, 邓扬. 随机车流作用下悬索桥钢桥面板疲劳损伤与寿命评估[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4300-4306.
(LU Naiwei, LIU Yang, DENG Yang. Fatigue damage and life assessment for steel decks of suspension bridge under stochastic traffic flow [J]. Journal of central south university (science and technology), 2015, 46(11): 4300-4306.)
- [15] OBRIEN E J, CAPRANI C C. Headway modelling for traffic load assessment of short to medium span bridges [J]. The structural engineer, 2005, 83(16): 33-36.
- [16] CAPRANI C C, OBRIEN E J. Statistical computation for extreme bridge traffic load effects [C]//Proceedings of the eighth international conference on computational structures technology. Stirlingshire, Scotland, Civil-Comp Press, 2006: 1-17.
- [17] CHEN W Z, CHENG M, XIE Z L, et al. Improvement of extrapolation of traffic load effect on highway bridges based on Rice's theory [J]. International journal of steel structures, 2015, 15(3): 527-539.
- [18] 孙涛, 徐桂红, 柴陵江. 四轮非平稳随机激励路面模型的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 868-872.
(SUN Tao, XU Guihong, CHAI Lingjiang. A study on the road model with four-wheel non-stationary random excitations [J]. Automotive engineering, 2013, 35(10): 868-872.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)