

特重车各轮相干桥面激励对斜拉桥随机振动的影响

陈水生¹, 赵 辉^{1,2}, 李锦华¹, 朱朝阳¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 信阳师范学院建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 为了研究特重车各轮相干桥面激励对斜拉桥振动响应的影响, 根据特重车左右轮的相干函数关系和前后轮的时间滞后关系, 推导并建立了特重车各轮相干桥面不平顺激励的功率谱矩阵。基于车桥耦合振动理论和虚拟激励法分析特重车各轮相干桥面激励对大跨度斜拉桥车致振动响应的影响, 研究结果表明: 特重车各轮相干桥面激励增大了斜拉桥振动响应的离散程度, 桥梁振动响应随着各轮桥面激励相干强度的提高而增大。斜拉桥在特重车各轮相干桥面激励下的振动响应受不同相干函数模型的影响较小。特重车各轮相干非平稳桥面激励的斜拉桥振动响应离散程度大于各轮相干平稳桥面激励, 桥梁振动响应标准差最大值随着车辆加速度的提高而增大。斜拉桥的车致振动响应对多轮多点相干桥面激励很敏感, 其振动响应的离散程度随着特重车轴数的增加而增大。

关键词: 车桥耦合; 桥面不平顺; 车辆各轮相干; 虚拟激励法; 特重车

中图分类号: U441+.3; U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)02-0318-13

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.02.007

引 言

随着跨区域货运的不断增加和汽车工业的飞速发展, 公路运输因自身的优点成为现代物流行业的主力军, 不同区域间的货物运输业务剧增, 导致城市道路和高速公路上的运行车辆越来越多且车辆规格越来越复杂。与此同时, 中国桥梁建设突飞猛进, 目前全国桥梁总数达 100 多万座, 其中公路桥梁数量 83.25 万座, 已成为世界第一桥梁大国, 各种类型的大中小跨径桥梁遍布各大交通要道^[1]。在满足经济发展需求的同时, 逐年增加的交通量给在役公路桥梁带来巨大的压力和挑战, 特别是大型载货汽车超重超限而导致的桥梁垮塌事故也时有发生, 桥梁结构在移动车辆荷载作用下的使用寿命和运营安全备受社会关注^[2]。国内外学者对桥梁车致振动响应的研究从未间断, 由起初的单自由度车辆荷载^[3]到多自由度多轴车辆荷载^[4], 从确定性多车过桥^[5]到目前的随机车流过桥^[6], 从研究中小跨径简支梁桥的振动响应^[7]到研究大跨度悬索桥的振动响应^[8], 做了很多工作, 也创造了很多有价值的成果。这些研究表明, 桥梁的车致振动响应取决于三个主要因素: 桥梁、车辆和桥面不平顺。虽然学者们对不同结构形式的桥梁进行了大量的车致振动研究, 但对车辆类

型和桥面不平顺的研究依然存在不足: (1) 在已有的车辆各轮相干桥面不平顺激励的桥梁振动研究中, 车辆为二轴 1/2 车或三轴后八轮整车, 所分析的桥梁为中小跨径桥梁, 并非大规格的多轴拖挂车和跨径较大的大跨度桥梁^[9-10]。针对特重车在大跨径桥梁上行驶而引起的桥梁随机振动响应研究较少, 特别是多轴特重车各车轮受到桥面多点不平顺随机激励的桥梁振动研究更少。事实上, 中国重型货物的公路运输逐年增加, 特重车出现的概率越来越大, 且向大型化、拖挂化、集装箱化方向发展, 公路桥梁在特重车荷载作用下的随机振动响应有待进一步探究。(2) 在空间上处于车轮与桥梁间的桥面不平顺是桥梁产生随机振动的主要激励源之一, 已有桥面不平顺随机激励的数值模拟, 只是在时域内由不平顺功率谱随机生成多条时间历程样本作为系统激励输入, 且没有考虑车辆各轮桥面不平顺激励的相干性^[11-15], 这其实只是桥面不平顺激励的一次实现, 不能体现桥面不平顺的随机性特征, 也难以体现桥面不平顺随机激励的桥梁车致振动响应的随机性。已有研究表明, 虽然车辆各轮具有相同的功率谱密度, 但左右轮迹间存在互谱, 即具有相干性, 再现两轮迹多点激励模型时应该考虑其空间相干性^[16]。为了体现桥梁振动响应的随机性, 可以采用蒙特卡罗法对多条桥面不平顺样本激励下的桥梁振动响应进行统

收稿日期: 2020-07-29; **修订日期:** 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12062006, 11962006); 江西省自然科学基金资助项目(20181BAB206043, 20181BAB206041)。

计分析,但必须取大量的不平顺样本进行多次桥梁振动响应计算,才能确保统计结果的准确性,耗费大量的计算时间。

因此,鉴于已有研究的不足,本文以六轴重载汽车为主要分析对象,在频域内考虑特重车各轮桥面随机激励的左右轮相干关系和前后轮时间滞后关系,推导特重车多轮多点桥面不平顺激励的功率谱矩阵,采用虚拟激励法^[17]将复杂的桥面不平顺随机激励转化为一系列虚拟的确定性激励,进而求解车桥耦合系统随机振动响应,分析多轴特重车各轮相干桥面激励对斜拉桥振动响应的影响。

1 六轴特重车的桥面激励输入谱矩阵

公路桥梁行驶车辆的车型和车重各不相同,通常将通行车辆分为三类:车重小于20 t的为轻车,车重在20~80 t为重车,车重大于80 t为特重车。特重车中六轴车的出现频率较高且超重的概率也较大^[18],中国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定的公路-I级疲劳车辆荷载计算模型II的单车也为六轴车^[19]。为使本文特重车更具代表性,以一辆六轴拖挂车为分析对象,车辆平面图如图1所示,图中各车轮分别编号,尺寸单位:m。

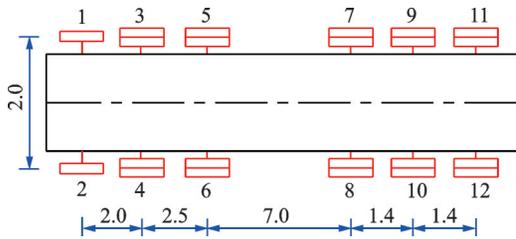


图1 车辆平面图

Fig. 1 Vehicle plan

设各车轮的桥面不平顺激励为 $q_j(t)$ ($j=1, 2, \dots, 12$), t 为车辆行驶的时间,通常假定车辆各轮的桥面不平顺激励输入是各态历经的平稳随机过程,其具有相同的统计特性,且左右轮迹的相位差近似为零。那么,可得车辆各轮的自谱为:

$$S_j(\omega) = S_q(\omega) \quad (1)$$

式中 ω 为圆频率,圆频率 ω 与时间频率 f 的关系为 $\omega = 2\pi f$; $S_q(\omega)$ 为桥面不平顺的功率谱密度。

已有的研究表明^[20],当考虑同一轮迹的前后车轮时间滞后关系时,前后轮的桥面激励互谱为:

$$S_{j,m}(\omega) = S_{m,j}^*(\omega) = S_q(\omega) e^{-i\omega L_{j,m}/v} \quad (2)$$

式中 j, m 为同一轮迹前后车轮的编号; $L_{j,m}$ 为车轮 j 与车轮 m 的前后距离,即车轮 j 和车轮 m 所在车轮的间距; v 为车辆行驶速度; $S_{m,j}^*(\omega)$ 和 $S_{j,m}(\omega)$ 互为共轭。

根据随机振动理论^[21],平稳随机过程 $x(t)$ 与 $y(t)$ 之间的相干函数可以表示为:

$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (3)$$

式中 $S_{xx}(\omega), S_{yy}(\omega)$ 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的自谱密度。

当考虑车辆左右轮迹的相干性时,由式(3)可以推得同一车轴的左车轮 j 和右车轮 m 的互谱为:

$$S_{j,m}(\omega) = S_{m,j}^*(\omega) = \text{coh}(\omega) S_q(\omega) \quad (4)$$

当同时考虑车辆左右轮的相干关系和前后轮的时间滞后关系时,可得车轮 j 和车轮 m 的互谱为:

$$S_{j,m}(\omega) = S_{m,j}^*(\omega) = S_q(\omega) \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{j,m}/v} \quad (5)$$

根据式(1)~(5)可以求出六轴特重车各车轮桥面激励输入功率谱矩阵的所有元素,该矩阵可以写为:

$$S(\omega) = S_q(\omega) \begin{bmatrix} 1 & \text{coh}(\omega) & e^{-i\omega L_{1,3}/v} \\ \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{2,3}/v} \\ e^{i\omega L_{3,1}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{3,2}/v} & 1 \\ \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{4,1}/v} & e^{i\omega L_{4,2}/v} & \text{coh}(\omega) \\ e^{i\omega L_{5,1}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{5,2}/v} & e^{i\omega L_{5,3}/v} \\ \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{6,1}/v} & e^{i\omega L_{6,2}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{6,3}/v} \\ e^{i\omega L_{7,1}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{7,2}/v} & e^{i\omega L_{7,3}/v} \\ \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{8,1}/v} & e^{i\omega L_{8,2}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{8,3}/v} \\ e^{i\omega L_{9,1}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{9,2}/v} & e^{i\omega L_{9,3}/v} \\ \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{10,1}/v} & e^{i\omega L_{10,2}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{10,3}/v} \\ e^{i\omega L_{11,1}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{11,2}/v} & e^{i\omega L_{11,3}/v} \\ \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{12,1}/v} & e^{i\omega L_{12,2}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{12,3}/v} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{1,4}/v} & e^{-i\omega L_{1,5}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{1,6}/v} & e^{-i\omega L_{1,7}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{1,8}/v} \\
& e^{-i\omega L_{2,4}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{2,5}/v} & e^{-i\omega L_{2,6}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{2,7}/v} & e^{-i\omega L_{2,8}/v} \\
& \text{coh}(\omega) & e^{-i\omega L_{3,5}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{3,6}/v} & e^{-i\omega L_{3,7}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{3,8}/v} \\
& 1 & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{4,5}/v} & e^{-i2\pi f L_{4,6}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{4,7}/v} & e^{-i\omega L_{4,8}/v} \\
& \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{5,4}/v} & 1 & \text{coh}(\omega) & e^{-i\omega L_{5,7}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{5,8}/v} \\
& e^{i\omega L_{6,4}/v} & \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{6,7}/v} & e^{-i\omega L_{6,8}/v} \\
& \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{7,4}/v} & e^{i\omega L_{7,5}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{7,6}/v} & 1 & \text{coh}(\omega) \\
& e^{i\omega L_{8,4}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{8,5}/v} & e^{i\omega L_{8,6}/v} & \text{coh}(\omega) & 1 \\
& \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{9,4}/v} & e^{i\omega L_{9,5}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{9,6}/v} & e^{i\omega L_{9,7}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{9,8}/v} \\
& e^{i\omega L_{10,4}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{10,5}/v} & e^{i\omega L_{10,6}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{10,7}/v} & e^{i\omega L_{10,8}/v} \\
& \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{11,4}/v} & e^{i\omega L_{11,5}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{11,6}/v} & e^{i\omega L_{11,7}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{11,8}/v} \\
& e^{i\omega L_{12,4}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{12,5}/v} & e^{-i\omega L_{2,6}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{12,7}/v} & e^{i\omega L_{12,8}/v} \\
& e^{-i\omega L_{1,9}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{1,10}/v} & e^{-i\omega L_{1,11}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{1,12}/v} \\
& \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{2,9}/v} & e^{-i\omega L_{2,10}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{2,11}/v} & e^{-i\omega L_{2,12}/v} \\
& e^{-i\omega L_{3,9}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{3,10}/v} & e^{-i\omega L_{3,11}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{3,12}/v} \\
& \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{4,9}/v} & e^{-i\omega L_{4,10}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{4,11}/v} & e^{-i\omega L_{4,12}/v} \\
& e^{-i\omega L_{5,9}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{5,10}/v} & e^{-i\omega L_{5,11}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{5,12}/v} \\
& \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{6,9}/v} & e^{-i\omega L_{6,10}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{6,11}/v} & e^{-i\omega L_{6,12}/v} \\
& e^{-i\omega L_{7,9}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{7,10}/v} & e^{-i\omega L_{7,11}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{7,12}/v} \\
& \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{8,9}/v} & e^{-i\omega L_{8,10}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{8,11}/v} & e^{-i\omega L_{8,12}/v} \\
& 1 & \text{coh}(\omega) & e^{-i\omega L_{9,11}/v} & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{9,12}/v} \\
& \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) e^{-i\omega L_{10,11}/v} & e^{-i\omega L_{10,12}/v} \\
& e^{i\omega L_{11,9}/v} & \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{11,10}/v} & 1 & \text{coh}(\omega) \\
& \text{coh}(\omega) e^{i\omega L_{12,9}/v} & e^{i\omega L_{12,10}/v} & \text{coh}(\omega) & 1
\end{aligned} \right\} \quad (6)
\end{aligned}$$

2.2 桥梁振动模型

2 车桥耦合模型

2.1 车辆振动模型

采用传统弹簧-质量-阻尼体系将六轴特重车简化为17自由度的空间模型,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2所示,车辆悬挂系统参数和几何参数参考文献[22-23]。

依据虚功原理,建立17自由度车辆的振动方程如下:

$$M_v \ddot{z} + C_v \dot{z} + K_v z = F_v^{\text{int}} \quad (7)$$

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} 为车辆与桥梁间相互作用力向量;通过拖车和挂车连接点处的竖向位移协调关系,挂车自由度 θ_2 和拖车自由度 θ_1 的关系为 $\theta_2 = (z_{b2} - z_{b1} - l_8 \theta_1) / l_9$, 因此,车辆振动自由度列向量可以表示为 $z = [z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_{12} \ z_{b1} \ \theta_1 \ \varphi_1 \ z_{b2} \ \varphi_2]_0$ 。

为减少车桥耦合计算矩阵维数,采用广义坐标离散的方法建立桥梁的振动方程:

$$M_b \ddot{\delta} + C_b \dot{\delta} + K_b \delta = -F_v^{\text{int}} - f_g \quad (8)$$

式中 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。

桥梁模型引入模态综合法,把相互耦联的节点运动方程解耦,转化为互相独立的模态方程,式(8)可以变为:

$$I \ddot{y} + X \dot{y} + \Omega y = -\Phi^T (F_v^{\text{int}} + f_g) \quad (9)$$

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

$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_n^2 \end{bmatrix}_{n \times n}$, 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

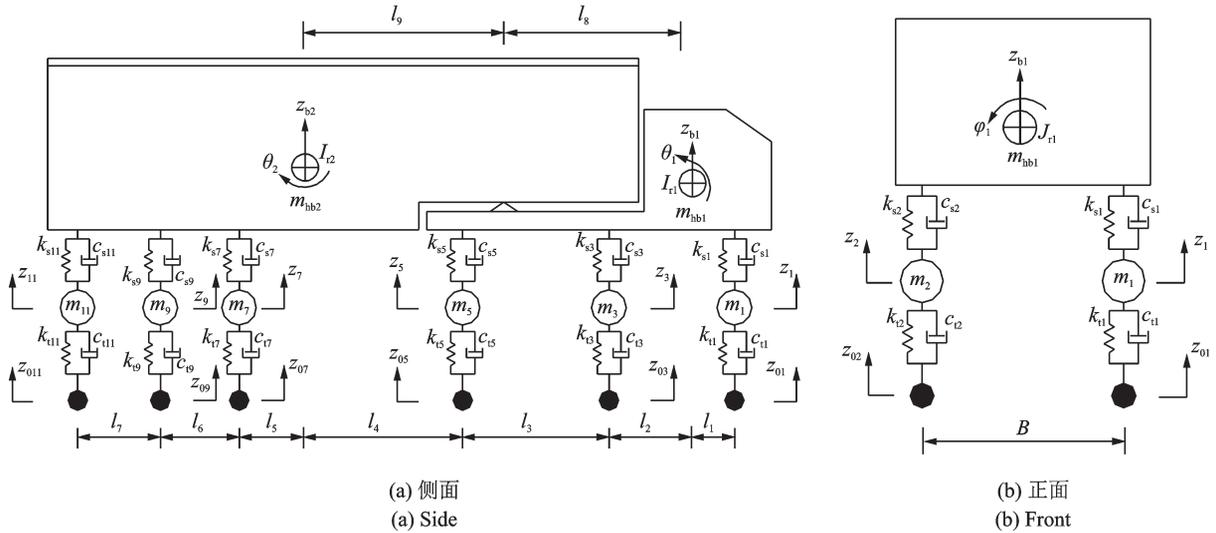


图 2 车辆模型
Fig. 2 Vehicle model

为桥梁广义坐标列向量。

2.3 车桥耦合模型

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,建立车辆和桥梁的耦合方程。当车辆在桥上行驶时,第*i*个车轮对桥梁产生的惯性力为:

$$F_{vi}^{int} = k_{vi}\Delta_i + c_{vi}\dot{\Delta}_i \quad (10)$$

式中 Δ_i 为第*i*个车轮相对于桥面的竖向位移,其表达式为:

$$\Delta_i = z_i - Y_i - q_i \quad (11)$$

式中 z_i 为第*i*个车轮的竖向位移; Y_i 为第*i*个车轮接触点处桥梁的竖向位移; q_i 为第*i*个车轮接触点处的桥面不平度。

根据模态叠加法,第*i*个车轮接触点处桥梁的竖向位移可以表示为:

$$Y_i = N_i \Phi y \quad (12)$$

式中 N_i 为第*i*个车轮作用处位移场的插值函数。

将式(12)代入式(11)可以得到 Δ_i , 再代入式(10)得到:

$$F_{vi}^{int} = k_{vi}(-N_i \Phi y - q_i + z_i) + c_{vi}(-vN_{i,x} \Phi y - N_i \Phi \dot{y} - \dot{q}_i + \dot{z}_i) \quad (13)$$

进而可得第*i*个车轮作用在桥梁上的荷载为:

$$F_{bv_i}^{int} = k_{vi}(-N_i \Phi y - q_i + z_i) + c_{vi}(-vN_{i,x} \Phi y - N_i \Phi \dot{y} - \dot{q}_i + \dot{z}_i) + f_{gi} \quad (14)$$

式中 $N_{i,x}$ 为 N_i 对车辆行驶方向 x 坐标的导数; f_{gi} 为第*i*个车轮所承受的车辆自重。

将第*i*个车轮对桥梁产生的惯性力式(13)代入桥梁的模态方程式(9)并整理,可得:

$$I\ddot{y} + (\mathbf{X} - \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T c_{vi} N_i \Phi) \dot{y} + [\Omega - \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T (k_{vi} N_i \Phi + c_{vi} v N_{i,x} \Phi)] y + \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T c_{vi} \dot{z}_i + \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i \cdot k_{vi} \cdot z_i - \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i (k_{vi} q_i + c_{vi} \dot{q}_i) - \Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T f_{gi} \quad (15)$$

联立车辆振动方程式(7)和(15),可得车桥耦合振动方程:

$$M_{bv} \ddot{u} + C_{bv} \dot{u} + K_{bv} u = F_g + F_w \quad (16)$$

式中

$$M_{bv} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_v \end{bmatrix}_{(n+17) \times (n+17)} \quad (17)$$

$$C_{bv} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} + \mathbf{Q} & A_1 \\ A_2 & C_v \end{bmatrix}_{(n+17) \times (n+17)} \quad (18)$$

$$K_{bv} = \begin{bmatrix} \Omega + S & B_1 \\ B_2 & K_v \end{bmatrix}_{(n+17) \times (n+17)} \quad (19)$$

$$F_g = \begin{bmatrix} -\Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i^T f_{gi} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(n+17) \times 1} \quad (20)$$

$$F_w = \begin{bmatrix} -\Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i k_{vi} q_i \\ k_{t1} \\ \vdots \\ k_{t12} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(n+17) \times 1} + \begin{bmatrix} -\Phi^T \sum_{i=1}^{12} N_i c_{vi} \dot{q}_i \\ c_{t1} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ c_{t12} \dot{q}_{12} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(n+17) \times 1} \quad (21)$$

$$u = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n \ z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_{12} \ z_{b1} \ \theta_1 \ \varphi_1 \ z_{b2} \ \varphi_2] \quad (22)$$

M_{bv}, C_{bv}, K_{bv} 分别为车桥相互作用模型的质量、阻尼

和刚度矩阵; Q, A_1, A_2, S, B_1, B_2 为车桥耦合相互作用产生的阻尼和刚度矩阵的修改系数矩阵; F_g 为车辆自重所引起的车桥耦合竖向荷载向量; F_w 为路面不平顺随机激励引起的车桥耦合竖向荷载向量; u 为广义坐标向量。

3 虚拟激励的构造

道路不平顺是一随机过程, 具有各态历经性, 其不平顺高程的描述国际上通常采用功率谱密度来进行标定, 其表达式为:

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) \\ \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) & 1 \\ 1 & \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) \\ \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) & 1 \\ 1 & \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) \\ \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) & 1 \\ 1 & \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) \\ \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) & 1 \\ 1 & \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) \\ \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) & 1 \\ 1 & \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) \\ \text{coh}(\omega) & 1 & \text{coh}(\omega) & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

V^* 为 V 的共轭矩阵; ρ 为实对称 Hermitian 矩阵, 可分解为一个实阵 Q 与其转置的乘积:

$$\rho = QQ^T \quad (28)$$

如果只考虑桥面不平顺随机激励荷载 F_w 作用, 车桥耦合振动方程式(16)可写成:

$$M_{bv} \ddot{u}_w + C_{bv} \dot{u}_w + K_{bv} u_w = F_w \quad (29)$$

由(21)式可知, 桥面不平顺随机激励引起的车桥耦合竖向荷载 F_w 由两部分组成: 桥面不平顺竖向位移引起的荷载项 F_{w1} 和桥面不平顺竖向位移一阶导数引起的荷载项 F_{w2} 。将式(21)进行展开, 并重新整理可得:

$$F_w = F_{w1} + F_{w2} = \begin{bmatrix} T_{b0}q(t) \\ T_{v0}q(t) \\ 0 \end{bmatrix}_{(n+17) \times 1} + \begin{bmatrix} T_{b1}\dot{q}(t) \\ T_{v1}\dot{q}(t) \\ 0 \end{bmatrix}_{(n+17) \times 1} \quad (30)$$

式中

$$T_{b0} = \begin{bmatrix} \phi_1 N_1 k_{t1} & \cdots & \phi_1 N_{12} k_{t12} \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_n N_1 k_{t1} & \cdots & \phi_n N_{12} k_{t12} \end{bmatrix}_{n \times 12} \quad (31)$$

$$S_q(\omega) = 2\pi S_q(n_0) n_0^2 \frac{v}{\omega^2} \quad (23)$$

式中 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$, 为空间参考频率; $S_q(n_0)$ 为桥面不平度系数, 与路面等级有关。

根据林家浩等^[17]提出的虚拟激励法理论, 可将六轴特重车桥面激励输入的功率谱矩阵式(6)表示为:

$$S(\omega) = V^* S \rho S V \quad (24)$$

式中

$$V = \text{diag} [1 \ 1 \ e^{-i\omega L_{1,3}/v} \ e^{-i\omega L_{1,4}/v} \ \cdots \ e^{-i\omega L_{1,12}/v}] \quad (25)$$

$$S = \text{diag} [\sqrt{S_1(\omega)} \ \sqrt{S_2(\omega)} \ \cdots \ \sqrt{S_{12}(\omega)}] \quad (26)$$

$$T_{b1} = \begin{bmatrix} \phi_1 N_{12} c_{t12} & \cdots & \phi_1 N_{12} c_{t12} \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_n N_{12} c_{t12} & \cdots & \phi_n N_{12} c_{t12} \end{bmatrix}_{n \times 12} \quad (32)$$

式中 ϕ_i 为第 i 阶振型向量, $i = 1, \dots, n_0$ 。

$$q(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ \cdots \ q_{12}(t)]_{1 \times 12}^T \quad (33)$$

$$T_{v0} = \text{diag} [k_{t1} \ k_{t2} \ \cdots \ k_{t12}]_{12 \times 12} \quad (34)$$

$$T_{v1} = \text{diag} [c_{t1} \ c_{t2} \ \cdots \ c_{t12}]_{12 \times 12} \quad (35)$$

将式(28)代入式(24)可得:

$$S(\omega) = V^* S Q Q^T S V = P^* P^T \quad (36)$$

式中 $P = V S Q$ 。

因为各车轮的桥面不平顺激励输入的自谱相等, 式(26)可以写成:

$$S = \sqrt{S_q(\omega)} \text{diag} [1 \ 1 \ \cdots \ 1]_{12 \times 12} \quad (37)$$

则有:

$$P = V Q I_e \sqrt{S_q(\omega)} \quad (38)$$

式中 I_e 为单位列向量。

根据式(30)和式(38), 分别构造桥面不平顺竖向位移和桥面不平顺竖向位移一阶导数引起的虚拟激励荷载:

$$\tilde{F}_{w1}(\omega, t) = \begin{bmatrix} T_{b0}(t) \\ T_{v0}(t) \\ 0 \end{bmatrix}_{(n+17) \times 1} V Q I_e \sqrt{S_q(\omega)} e^{i\omega t} \quad (39)$$

$$\tilde{F}_{w2}(\omega, t) = i\omega \begin{bmatrix} T_{b1}(t) \\ T_{v1}(t) \\ 0 \end{bmatrix}_{(n+17) \times 1} VQI_e \sqrt{S_q(\omega)} e^{i\omega t} \quad (40)$$

则由桥面不平顺随机激励引起的虚拟激励荷载为:

$$\tilde{F}_w(\omega, t) = \tilde{F}_{w1}(\omega, t) + \tilde{F}_{w2}(\omega, t) = \begin{bmatrix} T_{b0}(t) \\ T_{v0}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} T_{b1}(t) \\ T_{v1}(t) \\ 0 \end{bmatrix} VQI_e \sqrt{S_q(\omega)} e^{i\omega t} \quad (41)$$

此时的 $\tilde{F}_w(\omega, t)$ 为虚拟的确定性外载,将其代入式(29)就可以得到虚拟激励荷载引起的车桥系统运动方程:

$$M_{bv} \ddot{\tilde{u}}_w(\omega, t) + C_{bv} \dot{\tilde{u}}_w(\omega, t) + K_{bv} \tilde{u}_w(\omega, t) = \tilde{F}_w(\omega, t) \quad (42)$$

采用 Newmark- β 算法求解式(42)中的虚拟响应 $\tilde{u}_w(\omega, t)$,进而得到桥梁在桥面不平顺激励下的随机振动响应的功率谱 $S_{uu}(\omega, t)$:

$$S_{uu}(\omega, t) = \tilde{u}_w^*(\omega, t) \tilde{u}_w(\omega, t) \quad (43)$$

式中 $\tilde{u}_w^*(\omega, t)$ 为桥梁虚拟响应 $\tilde{u}_w(\omega, t)$ 的共轭。

桥梁随机振动响应的标准差可以通过对功率谱密度函数进行积分求得:

$$\sigma_{yy}^2(t) = \int_0^{+\infty} S_{uu}(\omega, t) d\omega \quad (44)$$

4 桥面不平顺激励的斜拉桥随机振动分析

以鄱阳湖第二公路特大桥为分析对象,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,为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,主桥各跨径为:68.6 m+116.4 m+420 m+116.4 m+68.6 m,主塔采用宝瓶形混凝土桥塔,桥面以上塔高 107.6 m,72 对斜拉索呈双索面扇形布置。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,两个纵梁间距 26 m,中间采用横梁连接,钢梁之间设置 3 道小纵梁,间距分别为 6,7,7,6 m,构架上铺装预制混凝土桥面板,形成组合梁体系。鄱阳湖特大桥设计荷载为公路-I 级,设计车速为 100 km/h,桥面宽度 24.5 m,双向四车道,桥梁横断面和桥面行车道布置如图 3 所示。

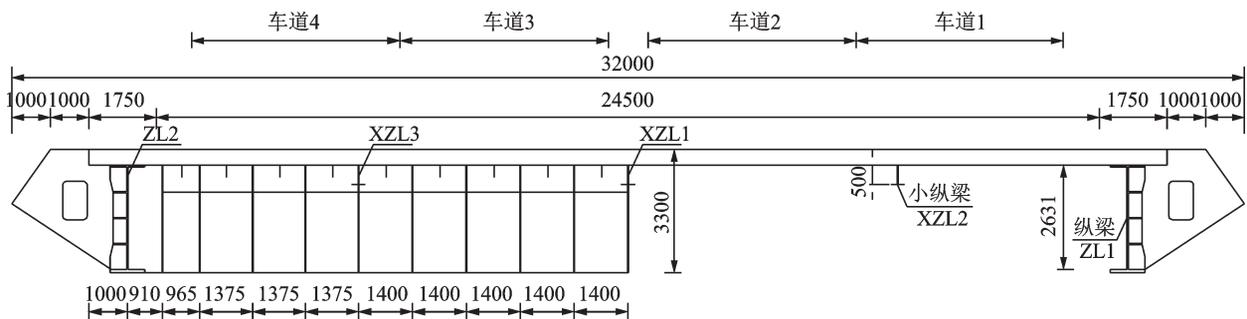


图 3 桥梁横断面和行车道布置(单位:mm)

Fig. 3 Bridge cross section and lane layout (Unit:mm)

4.1 桥梁动力特性分析及车辆荷载布置

采用 ANSYS 软件建立该桥的有限元模型,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 4 所示,

ANSYS 提取的桥梁前 10 阶频率和振型如表 1 所示。根据中国《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2015)中的经验公式计算出的鄱阳湖二桥竖向弯曲基频为 0.357 Hz,而根据有限元模型提取的竖向弯曲基频为 0.392 Hz,两者较为接近。从表 1 可以看出,鄱阳湖第二特大桥表现出的振型特征主

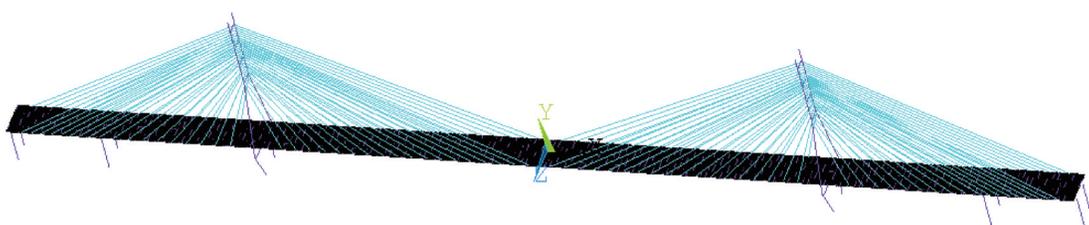


图 4 桥梁有限元模型

Fig. 4 Finite element model of bridge

要是主梁的振型特征,其次是桥塔,以纵漂、竖向弯曲、侧向弯曲和扭转为主。主梁竖向弯曲振型表现明显且最早出现在第2阶,说明桥梁竖向抗弯刚度较低;第5阶和第6阶出现桥塔侧向弯曲,说明桥塔横向刚度较小;而主梁侧向弯曲和扭转振型分别出现在第3阶和第9阶,前者早于后者出现,说明主梁侧向抗弯刚度小于侧向抗扭刚度。

表1 桥梁前10阶频率及振型特征

Tab. 1 The first ten order frequency and mode characteristics

模态阶次	频率/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	0.529	主梁反对称竖向弯曲
5	0.684	桥塔反向侧弯曲
6	0.694	桥塔同向侧弯曲
7	0.796	主梁对称竖向弯曲
8	0.959	主梁反对称竖向弯曲
9	0.979	主梁反对称扭转
10	1.082	主梁对称竖向弯曲

已有研究表明,车辆在桥上行驶位置不同时,桥梁的受力状态也各不相同,93.5%的特重车在行车道行驶,只有6.5%的特重车在车流量增加或桥梁跨度较大时行驶在超车道,并且特重车行驶速度平均在60 km/h左右^[24]。为方便研究,在无特殊说明的情况下,下文分析中的六轴特重车车重取90 t,车速取60 km/h,桥面路况等级取B级,车辆由都昌驶向庐山。桥面特重车荷载布置分两种工况:工况一为车辆在行车道行驶,即车道1行驶;工况二为车辆在超车道行驶,即车道2行驶。

4.2 各轮相干桥面激励对桥梁振动响应的影响

为了探究六轴特重车各车轮桥面不平顺随机激励的相干性对斜拉桥振动响应的影响,在此采用文献[25]的相干函数模型,模型表达式为:

$$\text{coh}(f) = e^{-Bf/v} \quad (45)$$

式中 B 为车辆左右轮迹的距离。

在工况一车辆荷载作用下,车辆各轮相干和车辆各轮不相干的主跨纵梁ZL1跨中竖向振动位移的功率谱密度如图5所示。虽然不相干和相干的功率谱密度分布范围都为0.05~0.8 Hz,与桥梁前7阶固有频率一致,但特重车各轮相干桥面激励的纵

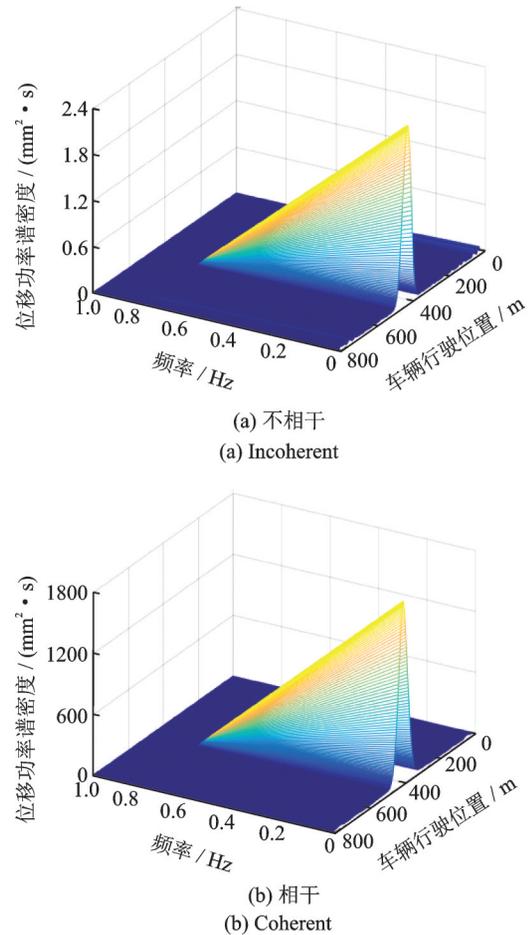


图5 纵梁竖向位移响应功率谱密度

Fig. 5 Vertical displacement response power spectral density of longitudinal beam

梁ZL1跨中竖向位移的功率谱幅值明显大于各轮不相干,即特重车各轮相干的纵梁跨中振动能量大于各轮不相干,纵梁振动更加剧烈。从图中也可以看出,位移功率谱密度的峰值出现在低频段,且随着频率的提高而幅值变小,因为低频段最早出现桥梁竖向弯曲振型,斜拉桥竖向振动响应以低频振动为主导。

主跨纵梁ZL1跨中和东侧桥塔塔顶的振动响应标准差如图6所示。从图中可以看出:特重车各轮相干桥面激励对桥梁振动响应的影响大于不相干,其增大了桥梁振动响应的离散程度。其中,纵梁跨中竖向振动对相干桥面激励最敏感,其次是桥塔塔顶纵向振动,而桥塔塔顶横向振动的敏感性相对较弱,三者相干桥面激励的振动响应标准差最大值分别是不相干桥面激励的振动响应标准差最大值的27.81, 23.43, 10倍。可见,在研究特重车荷载作用下的斜拉桥振动响应时,有必要考虑特重车多轮多点桥面不平顺激励的相干性。

从式(45)可以看出,不同的相干函数取值反映了特重车多轮多点桥面激励相干强度的大小,当

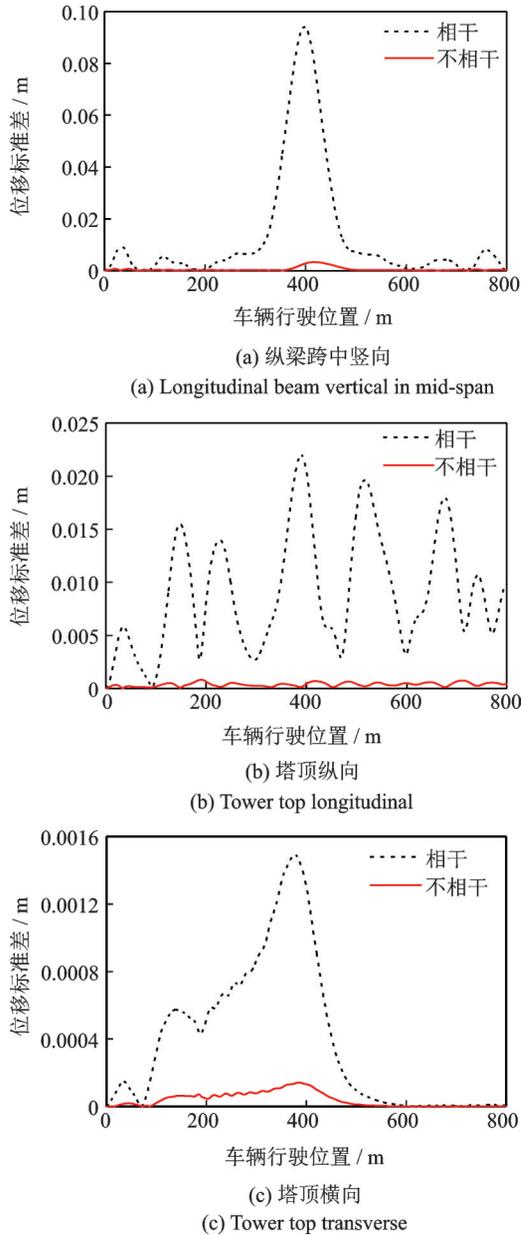


图6 纵梁和桥塔振动响应标准差

Fig. 6 Standard deviation of vibration response of longitudinal beam and tower

$\text{coh}(\omega)=0$ 时,车辆各轮桥面激励完全不相干,即各轮各自独立;当 $\text{coh}(\omega)=1$ 时,车辆各轮桥面激励完全相干。图7给出了车辆各轮桥面激励不同相干强度对斜拉桥主跨纵梁ZL1跨中竖向位移标准差的影响。可以看出,车辆各轮桥面激励各自独立的纵梁跨中位移标准差最大值为0.003 m,而车辆各轮桥面激励完全相干的纵梁跨中位移标准差最大值为0.094 m,后者是前者的31.33倍。车辆各轮桥面激励的相干强度越大,纵梁跨中振动响应的标准差就越大,振动响应随着相干强度的提高而增大。这是因为相干强度的大小反映了各车轮桥面不平顺随机激励在不同时刻瞬时值之间的关联程度,相干性越强,则桥面不平顺激励引起的各车轮动态作用力就

趋于同步,且频谱特性趋于一致,车辆对桥梁的动态作用力加强,桥梁振动响应加剧;而相干性较弱时,桥面不平顺激励引起的各车轮动态作用力就趋于各自独立,且频谱特性各不相同,车辆对桥梁的动态作用力减弱,桥梁振动响应相应减小。

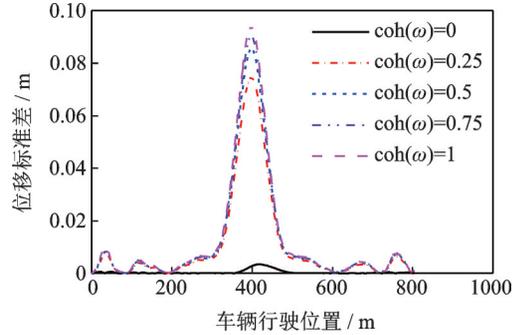


图7 不同相干强度的纵梁竖向位移标准差

Fig. 7 Standard deviation of vertical displacement of longitudinal beam with different coherence strength

车辆左右轮迹相干函数模型通常需要现场实测并经过拟合得到,除了上文分析采用的文献[25]相干函数模型,还有文献[26]中长春汽车研究所在柏油路上测定的相干函数模型和文献[27]的相干函数模型,其数学表达式分别为:

$$\text{coh}^2(f) = \begin{cases} 1 - 0.45f, & f \leq 2 \text{ Hz} \\ 0.1, & f > 2 \text{ Hz} \end{cases} \quad (46)$$

$$\text{coh}(f, B) = \left[1 + \left(\frac{fB^\alpha}{vn_p} \right)^\omega \right]^{-p} \quad (47)$$

式中 ω 为相干函数对数坐标的斜率; p 和 n_p 分别为相干函数的拐点位置和拐点处的斜率; α 为不同轮距的相干函数疏密程度。

当左右轮距 $B=2$ m, 行车速度 $v=60$ km/h 时, B级桥面路况的不同相干函数模型如图8所示。从图中可以看出,不同的相干函数模型都表现出频率越低,相干性越强,频率越高,相干性就越弱的特征。在0~10 Hz的低频段,式(47)的相干函数值最大,式(46)的相干函数值最小;在10~46 Hz频段,式(47)的相干函数值最大,式(45)的相干函数值最小;在46~100 Hz的高频段,式(46)的相干函数值最大,式(45)的相干函数值最小。可见,不同的相干函数模型相干函数值相差较大。

在工况一车辆荷载作用下,采用不同的相干函数模型,特重车各轮相干桥面激励对主跨纵梁ZL1跨中竖向位移标准差的影响如图9所示。从图中可以看出,三种相干函数模型的桥梁振动响应标准差接近重合,不同相干函数模型对大跨度斜拉桥振动

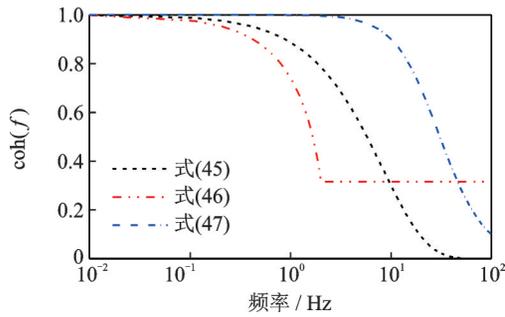


图8 不同相干函数模型

Fig. 8 Different coherence function models

响应的影响较小。在考虑特重车各轮桥面激励的相干性时,这三种相干函数模型都能反映斜拉桥在桥面不平顺激励下的振动响应规律。为研究方便,下文分析依然采用文献[25]的相干函数模型,不再特别说明。

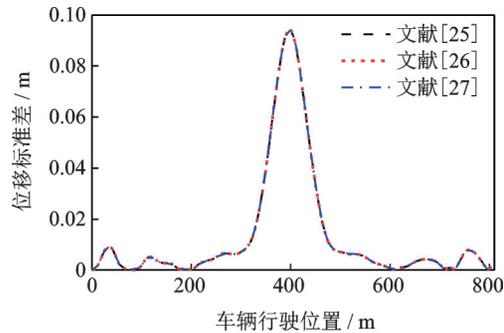
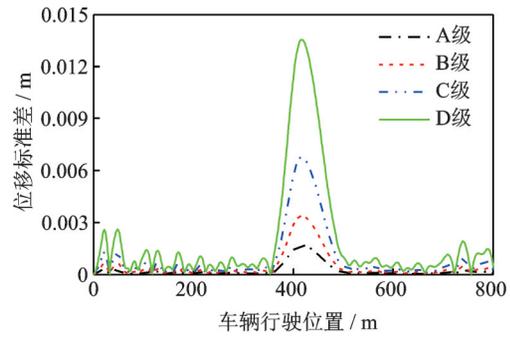


图9 不同相干函数模型的纵梁竖向位移标准差

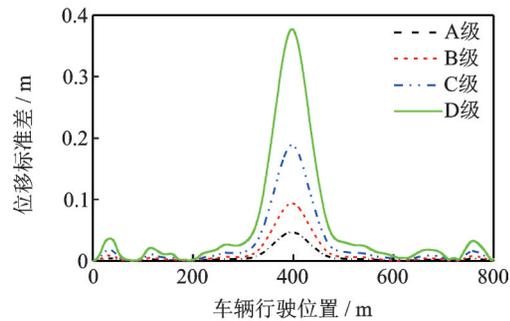
Fig. 9 Standard deviation of vertical displacement of longitudinal beam with different coherence function models

不同的桥面路况,桥面不平度幅值相差较大,且具有很强的随机性。由式(23)可知,不同路况等级的桥面,其桥面不平顺功率谱密度不同,对特重车各轮提供的激励强度也不相同,图10给出了不同路况等级的主跨纵梁ZL1跨中竖向位移标准差。由图10可知,随着桥面路况的恶化,斜拉桥车致振动响应的离散程度变大,竖向位移响应标准差成倍增加。当不考虑各轮桥面激励相干性时,桥面不平顺对纵梁跨中竖向位移标准差最大值的影响较小,D级桥面路况引起的纵梁跨中竖向位移标准差最大值仅为13.6 mm。当考虑车辆各轮桥面激励相干性时,桥梁振动响应对桥面路况的恶化较敏感,A级、B级、C级、D级桥面不平顺激励的纵梁跨中竖向位移标准差最大值分别为47,94.23,188.68和377.34 mm。可见,考虑车辆各轮桥面激励相干这一实际情况的桥梁振动响应离散程度增大,也充分说明了加强大跨度斜拉桥桥面养护工作的重要性。



(a) 不相干

(a) Incoherent



(b) 相干

(b) Coherent

图10 不同桥面路况的纵梁竖向位移标准差

Fig. 10 Standard deviation of vertical displacement of longitudinal beam with different bridge deck condition

4.3 车速和行车位置对桥梁振动响应的影响

与城市桥梁不同,高速公路桥梁承担着跨区域大宗货物运输,重型车辆多,车辆尺寸和车辆载重大,因此车辆行驶速度比客车小,且按照大车靠右行驶的交通规则在行车道行驶。考虑车辆各轮桥面激励的相干性,图11给出了不同荷载工况,不同行车速度的主跨纵梁ZL1跨中竖向位移标准差最大值和东侧桥塔塔顶纵向位移标准差最大值。从图中可以看出,同一荷载工况,纵梁竖向位移标准差最大值和塔顶纵向位移标准差最大值随着车辆行驶速度的提高而增大。不同的荷载工况,纵梁竖向位移标准差最大值受特重车行驶位置的影响较大,工况一荷载作用下的振动响应标准差最大值大于工况二,距离车辆荷载作用位置越近,纵梁振动响应的离散程度就越大,这主要是因为纵梁竖向刚度较小且直接承受车辆竖向荷载作用,其对车辆荷载较敏感。而桥塔纵向位移标准差最大值受车辆行车位置的影响却非常小,两种工况趋于重合,因为桥塔不仅刚度较大,而且引起塔顶纵向位移的塔端拉索索力的水平分力受车辆荷载作用位置的影响较小。

当车辆在桥上匀速行驶时,桥面不平顺激励是平稳高斯随机过程;然而,当车辆变速行驶时,相应的桥面不平顺随机激励为一非平稳随机过程,其不

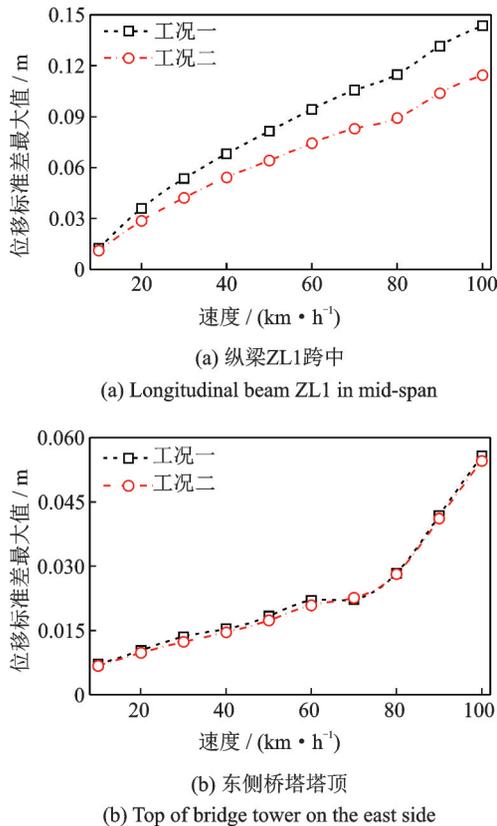


图 11 不同工况和车速的桥梁振动响应标准差最大值
Fig. 11 Maximum standard deviation of bridge vibration response with different load cases and vehicle speed

平度的均方根值是时变的。当车辆以初速度 v_0 和加速度 a 行驶时,式(23)可以表示为:

$$S_q(\omega, t) = 2\pi S_q(n_0) n_0^2 \frac{v_t}{\omega^2} = 2\pi S_q(n_0) n_0^2 \frac{v_0 + at}{\omega^2} \quad (48)$$

式中 v_t 为 t 时刻车辆行驶速度。

考虑车辆各轮桥面激励的相干性,图 12 给出了特重车在车道 1 以 60 km/h 匀速行驶和以 5 m/s^2 加速行驶的主跨纵梁 ZL1 跨中竖向位移标准差。从图中可以看出,非平稳桥面不平顺激励的振动响应标准差明显大于平稳桥面激励,非平稳桥面激励的纵

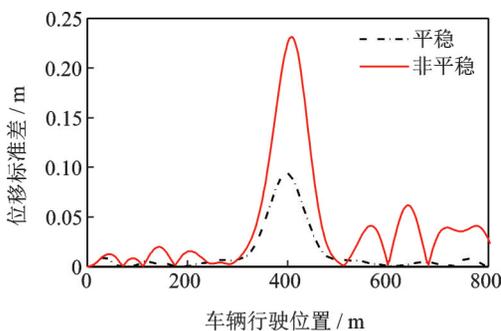


图 12 非平稳桥面激励的纵梁竖向位移标准差
Fig. 12 Standard deviation of vertical displacement of longitudinal beam under non-stationary deck excitation

梁竖向位移标准差最大值是平稳桥面激励的 2.473 倍。可见,非平稳桥面激励的离散性较大,且对桥梁振动响应的影响也较大,其增大了桥梁振动响应的离散程度,对桥梁运营安全和使用寿命不利,故特重车应尽量匀速通过桥梁,避免在桥上加速行驶。

为探究特重车在桥上加速行驶对斜拉桥振动响应的影响,不同初始速度 v_0 和不同加速度 a 的主跨纵梁 ZL1 跨中竖向位移标准差最大值如图 13 所示。同一初始速度,当车辆加速度为 $8 \sim 12 \text{ m/s}^2$ 时,纵梁竖向位移标准差最大值随着车辆加速度的提高而变化较小,但当车辆加速度为 $1 \sim 8 \text{ m/s}^2$ 和 $8 \sim 15 \text{ m/s}^2$ 时,纵梁竖向位移标准差最大值随着车辆加速度的提高而增大。同一加速度,当车辆加速度为 4, 8 和 12 m/s^2 时,初始速度对纵梁竖向位移标准差最大值影响很小;当加速度在区间 $1 \sim 4, 4 \sim 8$ 和 $12 \sim 15 \text{ m/s}^2$ 时,纵梁竖向位移标准差最大值随着车辆初始速度的提高有小幅度的增大;而当加速度在区间 $8 \sim 12 \text{ m/s}^2$ 时,纵梁竖向位移标准差最大值随着车辆初始速度的提高有小幅度的减小。

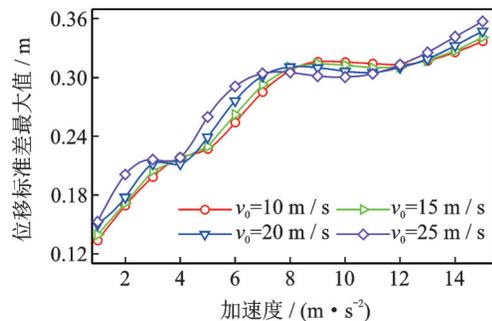


图 13 不同初始速度和加速度的纵梁竖向位移标准差最大值
Fig. 13 Maximum standard deviation of vibration response of longitudinal beam with different initial velocities and accelerations

4.4 不同特重车对桥梁振动响应的影响

实际交通情况表明,载重量大于 80 t 的特重车除了六轴特重车外,还有五轴特重车和四轴特重车(拖挂车),不同的特重车车型,其各轴轴距和车轮数各不相同,桥面不平顺激励的功率谱矩阵也不相同。参考文献[22]和文献[23]的车辆参数,对四轴拖挂车和五轴拖挂车各轮相干桥面激励的桥梁振动响应进行分析,各车型车辆的轴距及轴重分配比例如图 14 所示(轴距单位:m)。当各车以相同载重量 90 t,相同车速 60 km/h 在车道 1 行驶时,主跨纵梁 ZL1 跨中竖向位移标准差如图 15 所示。从图中可以看出,纵梁竖向位移标准差随着特重车轴数的增加而

增大。特重车的轴数越多,在多点相干桥面不平顺激励下的桥梁振动响应离散程度越大。相同的轴数和轮数,因车辆轴距和车轮布置位置不同,五轴双后轴特重车在多点相干桥面激励下的桥梁振动响应大于五轴双前轴。可见,多轴特重车对各轮相干桥面不平顺激励很敏感,不同类型特重车引起的桥梁振动响应各不相同;轮数越多,在桥面不平顺激励下的斜拉桥振动响应离散程度就越大。

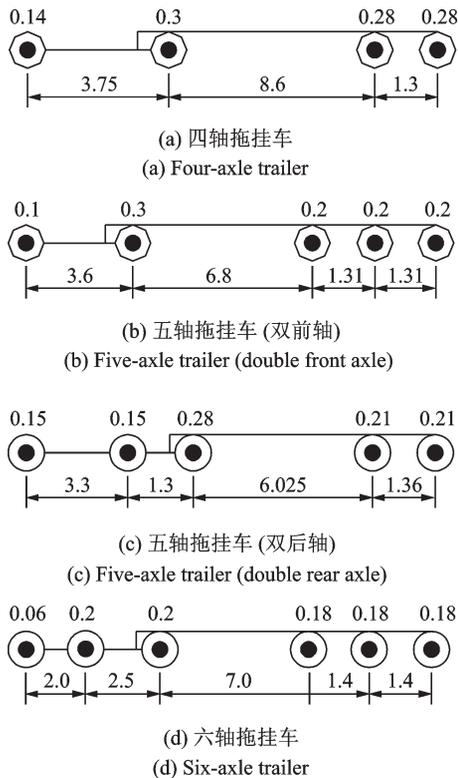


图 14 不同特重车的轴距及轴重分配

Fig. 14 Wheel base and axle load distribution of different extra-heavy truck

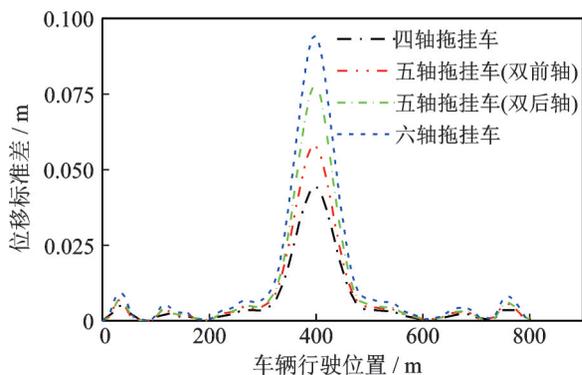


图 15 不同特重车的纵梁竖向位移标准差

Fig. 15 Standard deviation of vibration response of longitudinal beam with different extra-heavy truck

5 结 论

本文考虑特重车多轮多点桥面不平顺激励输入

的相干性和时滞性,采用车桥耦合振动理论和虚拟激励法研究其对斜拉桥随机振动响应的影响,得到如下结论:

(1)多轴特重车各轮相干桥面激励增大了斜拉桥振动响应的离散程度,其对纵梁振动响应的影响大于对桥塔振动响应的影响;各车轮的相干性越强,桥梁振动响应的离散程度就越大。

(2)不同桥面激励相干函数模型对大跨度斜拉桥的车致振动响应影响较小;斜拉桥纵梁跨中和桥塔塔顶的振动响应离散程度随着行车速度的提高而增大,车辆加速行驶引起的非平稳桥面激励增大了桥梁的振动响应;不同荷载工况对桥塔振动响应的影响较小,对纵梁振动响应的影响较大。

(3)当考虑车辆各轮桥面激励的相干性时,特重车轴数越多,所受到的桥面不平顺激励点就越多,桥梁振动响应的离散程度就越大;而相同的轴数和轮数,桥梁振动响应会因车辆轴距和各车轮布置位置的不同而有较大差异。

为了摸清特重车各轮相干桥面不平顺激励对车桥系统振动响应的影响,建立多轴特重车多轮多点桥面激励相干函数模型至关重要;并且,同一时间的过桥车辆数量较多,各车辆之间会因桥梁变形而存在相关性。因此,后续可以开展多轴特重车相干函数模型的研究,也可以综合考虑多车相干和桥面不平顺相干进行车桥系统振动研究,研究工作将更切合车桥接触的实际情况且意义重大。

参考文献:

- [1] 马建,冯镇,邱军领,等.改革开放40年中国公路交通行业技术变迁及启示[J].长安大学学报(社会科学版),2018,20(6):38-67.
Ma Jian, Feng Zhen, Qiu Junling, et al. Transformations and inspirations of technology in Chinese road transportation industry over the past 40 years of reform and opening up [J]. Journal of Chang'an University (Social Science Edition), 2018, 20(6): 38-67.
- [2] 宗周红,陆飞龙,薛程,等.基于WIM系统的京沪高速公路重车疲劳荷载模型[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(5):878-884.
Zong Zhouhong, Lu Feilong, Xue Cheng, et al. Fatigue load model of heavy vehicle for Beijing-Shanghai National Highway based on WIM system [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(5): 878-884.
- [3] Xiang T Y, Zhao R D, Xu T F. Reliability evaluation of vehicle-bridge dynamic interaction [J]. Journal of

- Structural Engineering, 2007, 133(8): 1092-1099.
- [4] Deng L, Wang W, Cai C S. Effect of pavement maintenance cycle on the fatigue reliability of simply-supported steel I-girder bridges under dynamic vehicle loading[J]. Engineering Structures, 2017, 133: 124-132.
- [5] 陈水生,宋元,桂水荣.公路连续梁桥在横向多车作用下的振动响应研究[J].福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 497-504.
- Chen Shuisheng, Song Yuan, Gui Shuirong. Studies on vibration response of the continuous girder highway bridge under horizontal multi-vehicle loads[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 497-504.
- [6] Liang Y Z, Xiong F. Multi-parameter dynamic traffic flow simulation and vehicle load effect analysis based on probability and random theory[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(8): 3581-3591.
- [7] Oliva J, Goicolea J M, Antolin P, et al. Relevance of a complete road surface description in vehicle-bridge interaction dynamics[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 466-476.
- [8] Zhou G P, Li A Q, Li J H, et al. Test and numerical investigations on static and dynamic characteristics of extra-wide concrete self-anchored suspension bridge under vehicle loads[J]. Journal of Central South University of Technology, 2017, 24: 2382-2395.
- [9] 张建波,廖敬波,唐光武.考虑桥面随机不平顺的桥梁动态响应研究[J].振动与冲击, 2016, 35(7): 214-219.
- Zhang Jianbo, Liao Jingbo, Tang Guangwu, et al. Dynamic response of a bridge considering its surface random roughness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 214-219.
- [10] 桂水荣,陈水生,万水.路面激励空间效应对车桥耦合随机振动的影响[J].振动、测试与诊断, 2019, 39(3): 611-618.
- Gui Shuirong, Chen Shuisheng, Wan Shui, et al. Effect spatial of road roughness excitation on vehicle-bridge coupling random vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(3): 611-618.
- [11] Ahmari S, Yang M J, Zhong H. Dynamic interaction between vehicle and bridge deck subjected to support settlement[J]. Engineering Structures, 2015, 84: 172-183.
- [12] Liu B, Wang Y Z, Hu P, et al. Impact coefficient and reliability of mid-span continuous beam bridge under action of extra heavy vehicle with low speed[J]. Journal of Central South University, 2015, 22: 1510-1520.
- [13] Zhong H, Yang M J. Dynamic effect of foundation settlement on bridge-vehicle interaction[J]. Engineering Structures, 2017, 135: 149-160.
- [14] Kortis J, Daniel L, Duratny M. The Simulation of the influence of surface irregularities in road pavements on the response of the bridge to moving vehicle[J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 2991-2996.
- [15] Yin X F, Cai C S, Liu Y, et al. Experimental and numerical studies of nonstationary random vibrations for a high-pier bridge under vehicular loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(10): 1005-1020.
- [16] Newland D E. Random Vibrations and Spectral Analysis[M]. London: Longman, 1985.
- [17] 林家浩,张亚辉.随机振动的虚拟激励法[M].北京:科学出版社, 2004.
- [18] 刘浪,陈东军,任青阳.超重车模型及多-单车道荷载效应[J].西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1169-1176.
- Liu Lang, Chen Dongjun, Ren Qingyang. Over-loaded truck models and their load effects on multiple-one lane for highway bridges[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1169-1176.
- [19] 中华人民共和国行业标准.公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015[S].北京:人民交通出版社, 2015.
- [20] 鲍警予.路面对四轮汽车的输入谱矩阵[J].汽车工程, 1992, 14(1): 39-45.
- Bao Jingyu. Road input spectra array to four-wheel vehicle[J]. Automotive Engineering, 1992, 14(1): 39-45.
- [21] 朱位秋.随机振动[M].北京:科学出版社, 1998.
- [22] 韩万水,闫君媛,武隽,等.基于长期监测的特重车流作用下桥梁动态放大系数研究[J].振动工程学报, 2014, 27(2): 222-232.
- Han Wanshui, Yan Junyuan, Wu Jun, et al. Analysis bridge dynamic amplification factors under extra-heavy truck scenarios based on long-term monitoring data[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(2): 222-232.
- [23] 中国汽车工业总公司,中国汽车技术研究中心.中国汽车车型手册[M].济南:山东科学技术出版社, 1993.
- [24] 韩万水,闫君媛,武隽,等.基于长期监测的特重车交通荷载特性及动态过桥分析[J].中国公路学报, 2014, 27(2): 54-61.
- Han Wanshui, Yan Junyuan, Wu Jun, et al. Extra-heavy truck load features and bridge dynamic response based on long-term traffic monitoring record[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 54-61.
- [25] 卢凡,陈思忠.汽车路面激励的时域建模与仿真[J].汽车工程, 2015, 37(5): 549-553.
- Lu Fan, Chen Sizhong. Modeling and simulation of road surface excitation on vehicle in time domain[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(5): 549-553.
- [26] 赵珩,卢士富.路面对四轮汽车输入的时域模型[J].汽

车工程, 1999, 21(2): 112-117.

Zhao Hang, Lu Shifu. A vehicle's time domain model with road input on four wheels [J]. Automotive Engi-

neering, 1999, 21(2): 112-117.

[27] Ammon D. Problems in road surface modeling [J]. Vehicle System Dynamics, 1991, 20(S): 28-41.

Influence of coherent bridge deck excitation from different wheels of an extra-heavy truck on random vibration of a cable-stayed bridge

CHEN Shui-sheng¹, ZHAO Hu^{1,2}, LI Jin-hua¹, ZHU Zhao-yang¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2.College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: In order to study the influence of the coherent bridge deck excitation on the vibration response of a cable-stayed bridge, the power spectrum matrix of the coherent bridge deck excitations is derived and established according to the coherence function relationship of the left and right wheels and the time lag relationship between the front and rear wheels. Based on the vehicle-bridge coupled vibration theory and the pseudo excitation method, the influence of the coherent bridge deck excitation of each wheel of an extra-heavy truck on the vibration response of a long-span cable-stayed bridge is analyzed. The results show that the vibration response dispersion of the cable-stayed bridge is increased by the coherent deck excitation of each wheel of the extra-heavy truck. The vibration response of the bridge increases with the increase of the coherence strength. Besides, different coherent function models have little effect on the vibration response of cable-stayed bridge under coherent deck excitation. The discrete degree of the vibration response of the cable-stayed bridge excited by the coherent non-stationary bridge deck is greater than that excited by the coherent stationary bridge deck. The maximum standard deviation of the bridge vibration response increases with the increase of vehicle acceleration. Moreover, the vehicle induced vibration response of the cable-stayed bridge is very sensitive to multi-wheel and multi-point coherent deck excitation, in which the dispersion degree of vibration response increases with the increase of the number of the extra-heavy truck axles.

Key words: vehicle-bridge coupling; deck irregularity; all wheels coherent; pseudo excitation method; extra-heavy truck

作者简介: 陈水生(1968—),男,教授,博士生导师。电话:13907006807; E-mail: shschen@126.com。

通讯作者: 赵 辉(1982—),男,讲师。电话:15098000301; E-mail: 2685803096@qq.com。