

路面激励空间效应对车桥耦合随机振动的影响^{*}

桂水荣¹, 陈水生¹, 万水²

(1. 华东交通大学土木建筑学院 南昌, 330013) (2. 东南大学交通学院 南京, 210096)

摘要 基于 GB/T 7031—2005 路面不平顺功率谱, 建立多点相干输入激励的车桥耦合振动模型, 研究路面输入激励空间效应对车桥耦合振动响应的影响。将三轴自卸汽车离散为三维九自由度的弹簧-阻尼-质量体系, 桥梁离散为板-壳实体单元, 考虑路面不平顺输入激励的时滞性和相干性, 基于虚拟激励法建立路面相干激励的三维车桥耦合随机振动模型。以三跨连续梁桥为背景, 研究路面输入激励的相干效应、时滞效应及一致效应对车桥系统、车辆振动及频谱特性的影响。结果表明: 3 种输入激励的空间效应对桥梁位移和加速度振动响应存在差异, 路面激励的空间效应对车体响应影响比后悬架明显; 路面输入激励的空间效应对车-桥耦合与路面谱的共振频率影响较小; 研究路面不平顺激励对车桥耦合振动影响时, 需考虑路面不平顺输入激励的空间效应。

关键词 车桥耦合系统; 路面谱; 空间效应; 虚拟激励法

中图分类号 U443⁺.3; TH3

引 言

路面不平顺激励是影响车桥耦合系统振动的关键性因素^[1], 国内外学者在研究路面不平顺激励对车桥耦合振动影响时, 数值模拟路面不平顺时程样本激励, 未考虑各车轮输入激励的时滞性和相干性^[2]。研究地震波对车桥系统影响时, 行波效应不可忽略。张志超等^[3]认为大跨度桥梁需考虑行波效应对其影响。刘波等^[4]采用三维空间路面不平度样本分析车路耦合作用, 左右轮与路面间作用力相差很大, 表现出明显的空间分布特性。钱凯等^[5]考虑汽车前后轮路面激励输入的迟滞性及左右轮的相干性对儿童乘坐舒适性的影响。张丙强等^[6]采用三维人-车-路系统分析路面不平顺、路基参数及路面厚度对舒适度的影响, 未考虑路面输入激励的前后轮迟滞性及左右轮的相干性。Huang 等^[7]模拟了左右轮完全独立的路面不平顺激励样本, 未考虑左右轮激励样本的相干性。Liu 等^[8]考虑路面不平顺激励样本的相干性, 研究了不平顺激励样本相干系数对车桥耦合振动的影响。韩万水等^[9]分析非一致激励对车桥耦合振动影响时, 认为路面不平顺激励的不同输入法对应的车轮竖向接触力以及车桥系统的频谱特性存在差异。

在研究路面不平顺输入激励的相干性时,

Pazooki 等^[10]根据近似相似理论对相干函数进行拟合, 给出左右轮迹之间的频响函数, 并将单轮模型拓展为左右轮迹路面激励时域模型, 该模型相干函数通用性差。张永林等^[11]在单轮辙道路时序重构基础上, 结合双轮辙时空相关特性, 模拟时空相关的双辙道路激励输入的时程样本。上述文献在分析路面不平顺激励对车路耦合和车桥耦合振动响应时, 均建立在单个路面不平顺激励样本相干模型, 该模型不便于研究车桥耦合随机振动的统计效应。孙涛等^[12]基于实测路面不平顺、拟合的左右轮相干函数, 构建四轮非平稳随机激励时域路面模型。笔者基于 Naryanan^[13]提出通用相干频域模型, 以 GB/T7031—2005^[14]建议的路面不平度功率谱密度曲线, 采用虚拟激励法构建三维路面不平顺相干激励的车桥耦合随机振动模型。以某三跨连续梁桥为背景, 研究路面不平顺输入激励的相干效应、时滞效应及一致效应对车桥系统、车辆振动响应及频谱特性的影响。

1 车-桥耦合振动模型

1.1 车辆振动方程

行驶在公路桥梁上的三轴自卸汽车, 考虑车体

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51468018); 江西省自然科学基金资助项目(20181BAB206041, 20181BAB206043); 江西省教育厅科研资助项目(GJJ170365)

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2018-01-10

竖向振动、纵向点头、侧翻以及悬架和车轮竖向振动,车辆模型可以简化为三维“弹簧-质量-阻尼”多自由度振动体系。车辆简化成如图1所示的九自由度整车模型,车辆各参数见文献[15]。车辆振动方程为

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{z} = \mathbf{F}_v^{\text{int}} \quad (1)$$

其中: \mathbf{M}_v 、 \mathbf{C}_v 、 \mathbf{K}_v 为车辆模型的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆振动引起的惯性荷载向量; \mathbf{z} 为车辆模型自由度向量, $\mathbf{z} = \{z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_b \ \theta_b \ \varphi\}^T$ 。

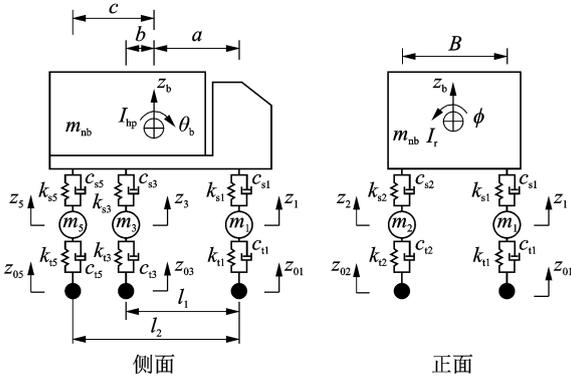


图1 三维九自由度整车模型

Fig. 1 3D vehicle model with nine degree of freedoms

1.2 桥梁振动方程

将桥梁结构运用有限元方法进行离散,桥梁振动方程为

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_b \mathbf{y} = -\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} - \mathbf{F}_g \quad (2)$$

其中: \mathbf{M}_b 、 \mathbf{C}_b 、 \mathbf{K}_b 为桥梁质量、阻尼及刚度矩阵; $\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}}$ 为车辆振动过程中车轮作用于桥面的惯性荷载列向量; \mathbf{F}_g 为各车轮作用于桥梁的重力荷载向量; \mathbf{y} 为桥梁单元结点向量。

结合模态综合叠加技术,使用典型 Rayleigh 阻尼,模态空间取 r 阶,式(2)可以改写为

$$\mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{X} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Omega} \mathbf{q} = -\mathbf{\Phi}^T (\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} + \mathbf{F}_g) \quad (3)$$

其中: \mathbf{I} 、 \mathbf{X} 、 $\mathbf{\Omega}$ 为质量、阻尼及刚度对角矩阵; $\mathbf{\Phi}$ 为 r 阶模态向量矩阵。

1.3 车桥耦合运动方程

车辆在桥上行驶,假设车轮与桥面板始终保持接触不脱离,车辆与桥梁相互作用,通过车轮与桥面板接触点处的位移协调和相互作用力的平衡条件相联系。第 i 个车轮与桥梁相互作用力可表示为

$$\mathbf{F}_{v,i}^{\text{int}} = -\mathbf{F}_{bv,i}^{\text{int}} = k_{ti} d_{vb,i} + c_{ti} \dot{d}_{vb,i} \quad (4)$$

$$d_{vb,i} = z_i - r_i - y_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

其中: $d_{vb,i}$ 为第 i 个车轮相对于桥面的垂直位移; y_i 为 i 车轮处桥面板初始竖向位移量; r_i 为 i 车轮处的路面不平顺幅值; z_i 为 i 车轮竖向位移。

将式(4)、式(5)代入式(3)并联立式(1),车桥耦合振动方程可以写成

$$\mathbf{M}_{bv} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{bv} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{bv} \mathbf{u} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_w \quad (6)$$

其中: \mathbf{M}_{bv} 、 \mathbf{C}_{bv} 、 \mathbf{K}_{bv} 为车桥耦合振动模型质量、阻尼及刚度矩阵; \mathbf{u} 为车桥耦合广义坐标列向量, $\mathbf{u} = \{q_1, q_2, \dots, q_r, z_1, \dots, z_6, z_b, \theta_b, \varphi\}^T$; \mathbf{F}_g 为车辆自重引起的动荷载; \mathbf{F}_w 为路面不平顺引起的动荷载。

$$\mathbf{F}_w = \begin{Bmatrix} -\mathbf{\Phi}^T \sum_{i=1}^{nl} \mathbf{N}_i k_{ti} r_i \\ k_{ti} r_i \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+9) \times 1} + \begin{Bmatrix} -\mathbf{\Phi}^T \sum_{i=1}^{nl} \mathbf{N}_i c_{ti} \dot{r}_i \\ c_{ti} \dot{r}_i \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+9) \times 1} + \begin{Bmatrix} -\mathbf{\Phi}^T \sum_{i=1}^{nl} \mathbf{N}_i^T \mathbf{F}_i \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+9) \times 1} \quad (7)$$

式(6)中车桥耦合振动模型中的荷载,若仅考虑路面不平顺随机激励 \mathbf{F}_w 作用时,车桥耦合时变系统的振动方程可写成

$$\mathbf{M}_{bv} \ddot{\mathbf{u}}'' + \mathbf{C}_{bv} \dot{\mathbf{u}}'' + \mathbf{K}_{bv} \mathbf{u}'' = \mathbf{F}_w \quad (8)$$

其中: \mathbf{u}'' 为由路面不平顺激励引起的车桥耦合振动广义坐标列向量。

路面不平顺激励引起的荷载 \mathbf{F}_w 包括路面不平顺的竖向位移及速度项,因而可以将 \mathbf{F}_w 分开写成位移项荷载 \mathbf{F}_{w1} 及速度项荷载 \mathbf{F}_{w2} 之和

$$\mathbf{F}_w = \mathbf{F}_{w1} + \mathbf{F}_{w2} = \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b0} \mathbf{r} \\ \mathbf{T}_{v0} \mathbf{r} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+9) \times 1} + \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b1} \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{T}_{v1} \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+9) \times 1} \quad (9)$$

$$\text{其中: } \mathbf{T}_{b0} = \begin{bmatrix} \varphi_1 N_1 k_{t1} & \cdots & \varphi_1 N_6 k_{t6} \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_r N_1 k_{t1} & \cdots & \varphi_r N_6 k_{t6} \end{bmatrix}_{r \times 6};$$

$$\mathbf{T}_{b1} = \begin{bmatrix} \varphi_1 N_1 c_{t1} & \cdots & \varphi_1 N_6 c_{t6} \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_r N_1 c_{t1} & \cdots & \varphi_r N_6 c_{t6} \end{bmatrix}_{r \times 6};$$

$$\mathbf{r}(t) = \{r(t-t_1) \ r(t-t_2) \ \cdots \ r(t-t_6)\}_{6 \times 1}^T;$$

$$\mathbf{T}_{v0} = \text{diag}([k_{t1}, k_{t2}, k_{t3}, k_{t4}, k_{t5}, k_{t6}]);$$

$$\mathbf{T}_{v1} = \text{diag}([c_{t1}, c_{t2}, c_{t3}, c_{t4}, c_{t5}, c_{t6}])。$$

2 车桥耦合虚拟激励模型

2.1 路面激励空间效应模型

2.1.1 六轮车路面激励输入模型

设图 1 中车辆模型的中轴距前轴激励为 l_1 , 后轴距前轴距离为 l_2 , B 为左右轮间距, 三轴六轮车的平面结构布置如图 2 所示。

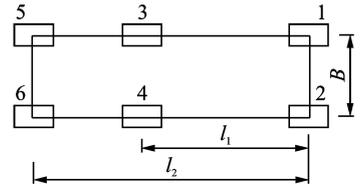


图 2 三轴车辆平面布置示意图

Fig. 2 Plan sketch of a vehicle with three axles

路面不平度系数、左右轮间距及左右轮相干函数都影响着输入各车轮的路面不平度激励。六轮车相干路面激励输入功率谱密度矩阵可以表示为

$$\mathbf{G}_q(n) = G_q(n) \begin{bmatrix} 1 & \text{coh}(n) & e^{-j2\pi n l_1} & \text{coh}(n) e^{-j2\pi n l_1} & e^{-j2\pi n l_2} & \text{coh}(n) e^{-j2\pi n l_2} \\ \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) e^{-j2\pi n l_1} & e^{-j2\pi n l_1} & \text{coh}(n) e^{-j2\pi n l_2} & e^{-j2\pi n l_2} \\ e^{j2\pi n l_1} & \text{coh}(n) e^{j2\pi n l_1} & 1 & \text{coh}(n) & e^{-j2\pi n(l_2-l_1)} & \text{coh}(n) e^{-j2\pi n(l_2-l_1)} \\ \text{coh}(n) e^{j2\pi n l_1} & e^{j2\pi n l_1} & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) e^{-j2\pi n(l_2-l_1)} & e^{-j2\pi n(l_2-l_1)} \\ e^{j2\pi n l_2} & \text{coh}(n) e^{j2\pi n l_2} & e^{j2\pi n(l_2-l_1)} & \text{coh}(n) e^{j2\pi n(l_2-l_1)} & 1 & \text{coh}(n) \\ \text{coh}(n) e^{j2\pi n l_2} & e^{j2\pi n l_2} & \text{coh}(n) e^{j2\pi n(l_2-l_1)} & e^{j2\pi n(l_2-l_1)} & \text{coh}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: $\text{coh}(n)$ 为左右轮路面输入激励的相干函数; $G_q(n)$ 为路面不平度系数。

2.1.2 相干效应模型

式(10)的相干函数 $\text{coh}(n)$ 在频域内描述了左右轮不平度轨迹中频率为 n 的各分量之间线性相关程度, $\text{coh}(n)$ 在 $0 \sim 1$ 内变化。相干函数 $\text{coh}(n) = 1$ 时, 表示左右轮迹路面不平度输入完全相关; 相干函数 $\text{coh}(n) = 0$ 时, 表示左右轮迹路面不平度激励输

入完全无关, 左右轮迹路面不平度输入随机变化。左右轮迹路面不平度对于大波长(即低频段)得出的相关函数趋近于 1, 对高频段趋近于 0^[16]。

Naryanan^[14] 提出了一种通用频域模型, 即相干函数仅与轮距和车速有关

$$\text{coh}(n) = e^{-2\pi n B} = e^{-\omega B/v} \quad (11)$$

若车辆以速度 v 行驶, 由 $f = nv$ 和 $\omega = 2\pi f$, 得 $n = \omega/2\pi v$, 六轮相干路面输入功率谱密度矩阵为

$$\mathbf{G}_{q1}(\omega) = G_q(\omega) \begin{bmatrix} 1 & e^{-\omega B/v} & e^{-j\omega l_1/v} & e^{-\omega(jl_1+B)/v} & e^{-j\omega l_2/v} & e^{-\omega(jl_2+B)/v} \\ e^{-\omega B/v} & 1 & e^{-\omega(jl_1+B)/v} & e^{-j\omega l_1/v} & e^{-\omega(jl_2+B)/v} & e^{-j\omega l_2/v} \\ e^{j\omega l_1/v} & e^{\omega(jl_1-B)/v} & 1 & e^{-\omega B/v} & e^{-\omega(jl_2-B)/v} & e^{-\omega[j(l_2-l_1)+B]/v} \\ e^{\omega(jl_1-B)/v} & e^{j\omega l_1/v} & e^{-\omega B/v} & 1 & e^{-\omega[j(l_2-l_1)+B]/v} & e^{-j\omega(l_2-l_1)/v} \\ e^{\omega l_2/v} & e^{\omega(jl_2-B)/v} & e^{j\omega(l_2-l_1)/v} & e^{\omega[j(l_2-l_1)-B]/v} & 1 & e^{-\omega B/v} \\ e^{\omega(jl_2-B)/v} & e^{j\omega l_2/v} & e^{\omega[j(l_2-l_1)-B]/v} & e^{j\omega(l_2-l_1)/v} & e^{-\omega B/v} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

统计分析的路面谱空间频率范围在 $0.011 \sim 2.83 \text{ m}^{-1}$ 之间^[16]。汽车行驶时, 取常用车速 $10 \sim 36 \text{ m/s}$, 可以保证时间频率范围 $0.33 \sim 28.3 \text{ Hz}$, 这个时间频率范围可以覆盖典型车辆的车身共振频率 ($1 \sim 1.5 \text{ Hz}$)、座椅上乘客的频率 ($4 \sim 5 \text{ Hz}$) 和车轮跳动频率 ($10 \sim 12 \text{ Hz}$)^[12]。悬架系统的自振频率由

汽车簧载质量和悬架刚度决定。

2.1.3 时滞效应模型

不考虑路面输入谱激励的左右轮迹相干性, 此时路面谱相干函数 $\text{coh}(n) = 0$, 仅考虑路面谱对前后轮车辙的时滞效应, 则式(10)可以写成

$$\mathbf{G}_{q2}(\omega) = G_q(\omega) \begin{bmatrix} 1 & 0 & e^{-j\omega l_1/v} & 0 & e^{-j\omega l_2/v} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & e^{-j\omega l_1/v} & 0 & e^{-j\omega l_2/v} \\ e^{j\omega l_1/v} & 0 & 1 & 0 & e^{-j\omega(l_2-l_1)/v} & 0 \\ 0 & e^{j\omega l_1/v} & 0 & 1 & 0 & e^{-j\omega(l_2-l_1)/v} \\ e^{j\omega l_2/v} & 0 & e^{j\omega(l_2-l_1)/v} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & e^{j\omega l_2/v} & 0 & e^{j\omega(l_2-l_1)/v} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.1.4 一致效应模型

既不考虑输入路面激励对左右轮相干性,也不考虑输入路面激励对前后车轮的时间效应,各车轮路面不平顺激励输入完全独立、不相干且随机,则式(10)可以写成

$$\mathbf{G}_{q_3}(\omega) = \mathbf{G}_{q_3}(\omega) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2 车桥耦合虚拟激励荷载模型

2.2.1 相干效应虚拟激励荷载模型

考虑路面不平顺相干效应引起的车辆振动,由式(12),可将六轮相干路面随机谱密度矩阵写成如下形式

$$\mathbf{G}_{q_1}(\omega) = \mathbf{V}^* \mathbf{S} \boldsymbol{\rho} \mathbf{S} \mathbf{V} \quad (15)$$

其中: \mathbf{V} 为输入各车轮时间效应矩阵; \mathbf{S} 为输入路面功率谱矩阵; $\boldsymbol{\rho}$ 为相干函数矩阵。

$$\mathbf{V} = \text{diag}([1 \ 1 \ e^{-j\omega d_1/v} \ e^{-j\omega d_1/v} \ e^{-j\omega d_2/v} \ e^{-j\omega d_2/v}]) \quad (16)$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}([\sqrt{S_1} \ \sqrt{S_2} \ \sqrt{S_3} \ \sqrt{S_4} \ \sqrt{S_5} \ \sqrt{S_6}]) \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) \\ \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 \\ 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) \\ \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 \\ 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) \\ \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 & \text{coh}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$\mathbf{G}_{q_1}(\omega)$ 是半正定 Hermitian 矩阵, $\boldsymbol{\rho}$ 是实对称正定矩阵,可分解为实阵 \mathbf{Q} 和其转置 \mathbf{Q}^T 的乘积

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \quad (19)$$

$$\mathbf{G}_{q_1}(\omega) = \mathbf{V}^* \mathbf{S} \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{S} \mathbf{V} = \mathbf{P}^* \mathbf{P}^T \quad (20)$$

其中

$$\mathbf{P} = \mathbf{V} \mathbf{S} \mathbf{Q} \quad (21)$$

对于车桥耦合振动路面不平顺输入,在任意圆频率下,输入车轮各点的路面不平顺功率谱幅值 $S_i (i=1,2,\dots,6)$ 均相等,记为 $S_r(\omega)$,则有

$$\mathbf{P} = \sqrt{S_r(\omega)} \mathbf{V} \mathbf{I} \mathbf{Q} = \sqrt{S_r(\omega)} \mathbf{V} \mathbf{Q} \quad (22)$$

结合式(9)和式(22),构造如下形式的虚拟荷载

$$\mathbf{F}_{w1}(\omega, t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b0} \\ \mathbf{T}_{v0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{[(r+\text{dof}) \times 1]} \mathbf{V} \mathbf{Q} \mathbf{I}_e \sqrt{S_r(\omega)} e^{i\omega t} \quad (23a)$$

$$\mathbf{F}_{w2}(\omega, t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b1} \\ \mathbf{T}_{v1} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{[(r+\text{dof}) \times 1]} \mathbf{V} \mathbf{Q} \mathbf{I}_e \sqrt{S_r(\omega)} e^{i\omega t} \quad (23b)$$

其中: \mathbf{I}_e 为单位列向量; \mathbf{I} 为单位矩阵;dof为车辆自由度。

根据式(9)构造时滞效应虚拟激励荷载模型

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{F}}_w(\omega, t) &= \tilde{\mathbf{F}}_{w1}(\omega, t) + i\omega \tilde{\mathbf{F}}_{w2}(\omega, t) = \\ & \left\{ \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b0} \\ \mathbf{T}_{v0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} + i\omega \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b1} \\ \mathbf{T}_{v1} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \right\} \mathbf{V} \mathbf{Q} \mathbf{I}_e \sqrt{S_r(\omega)} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (24)$$

2.2.2 时滞效应虚拟激励荷载模型

仅考虑输入各车轮激励前后车轮之间的时间效应,左右轮迹路面不平顺激励完全不相干(即 $\text{coh}(n)=0$),则时滞效应相干函数矩阵为

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

时滞效应输入各车轮时间效应矩阵 \mathbf{V} 、路面功率谱矩阵 \mathbf{S} ,均与相干效应模型相同,时滞效应虚拟激励荷载构造方法与相干效应相同。

2.2.3 一致效应虚拟激励荷载模型

若不考虑左右车轮轨迹的相干性及各车轴之间路面谱激励输入的时间滞后效应,即输入各车轮路面激励完全不相干,则相干系数 $\text{coh}(n)=0$,时滞效应系数为0,相干系数矩阵 $\boldsymbol{\rho} = \text{diag}\{[1,1,1,1,1,1]\}$ 。相干系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}$ 为单位对角矩阵,可以表示成 $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{I} \mathbf{I}^T$,其中: \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{S} 为输入各车轮的路面激励幅值矩阵。路面谱激励的输入矩阵可表示成

$$\mathbf{G}_{q_3}(\omega) = \mathbf{S} \mathbf{I} \mathbf{I}^T \mathbf{S} = \mathbf{P}^* \mathbf{P}^T \quad (26)$$

对于式(26),有 $\mathbf{P} = \mathbf{S} \mathbf{I}$ 。任意圆频率下,输入各车轮路面不平顺激励的功率谱幅值 $S_r(\omega)$ 均相等,则有 $\mathbf{P} = \sqrt{S_r(\omega)} \mathbf{I}$ 。

由式(8)和式(26)可以构造路面不平顺激励的虚拟激励荷载

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{F}}_w(\omega, t) &= \tilde{\mathbf{F}}_{w1}(\omega, t) + i\omega \tilde{\mathbf{F}}_{w2}(\omega, t) = \\ & \left\{ \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b0} \\ \mathbf{T}_{v0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} + i\omega \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_{b1} \\ \mathbf{T}_{v1} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \right\} \mathbf{I} \mathbf{I}_e \sqrt{S_r(\omega)} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (27)$$

其中: \mathbf{I}_e 为单位列向量; \mathbf{T}_{b0} , \mathbf{T}_{b1} , \mathbf{T}_{v0} , \mathbf{T}_{v1} 分别为车桥耦合振动虚拟激励荷载系数矩阵。

2.3 虚拟激励响应分析

将式(24)、式(27)代入式(8),由路面虚拟激励荷载引起的确定性运动方程可以写成

$$\mathbf{M}_{bv} \ddot{\tilde{\mathbf{u}}}(\omega, t) + \mathbf{C}_{bv} \dot{\tilde{\mathbf{u}}}(\omega, t) + \mathbf{K}_{bv} \tilde{\mathbf{u}}(\omega, t) = \tilde{\mathbf{F}}_w(\omega, t) \quad (28)$$

式(28)可采用精细积分法,也可采用 Newmark- β 积分格式迭代求解,计算相应虚拟响应 $\tilde{\mathbf{u}}(\omega, t)$,进而可以计算系统响应的功率谱矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{uu}(\omega, t) = \tilde{\mathbf{u}}^*(\omega, t) \tilde{\mathbf{u}}^T(\omega, t) \\ \mathbf{S}_{uu}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{S}_{uu}(\omega, t) d\omega \end{cases} \quad (29)$$

3 算例分析

3.1 车辆及桥梁动力特性参数

3.1.1 车辆参数

为研究路面激励空间效应对车桥耦合随机振动响应的影响,选取一辆三轴载重汽车单向行驶,车辆模型各参数同文献[17]。桥面不平顺激励采用 GB/T 7031—2005^[14] 的 B 级路面不平顺功率谱密度曲线。(B 级路面不平度系数 $G_q(n_0)$ 为 $64 \text{ mm}^2 \cdot \text{m}$)。

3.1.2 桥梁结构参数

以某三跨连续的预应力混凝土梁桥为研究对象,该桥跨径为 30 m,上部结构横向由 6 片 T 梁组成,主梁横断面示意图如图 3 所示。采用 ANSYS 软件建立桥梁三维有限元模型,运用板单元 shell63 模拟桥面铺装层及横隔板,主梁离散为板壳实体单元 solsh190,桥梁结构有限元模型如图 4 所示。提取前 10 阶自振频率和振型进行分析。

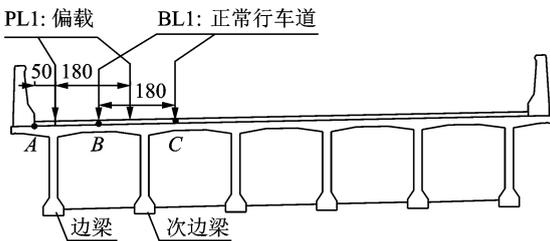


图 3 主梁横断面及加载示意图

Fig. 3 Sketch map of girder cross section and loading

3.1.3 车辆加载

根据车辆在桥梁上行驶特性及 15《桥规》^[18] 对车辆在横桥向的布载规定,研究车辆按偏载和正常行车道两种工况行驶。偏载工况(PL1)为车辆距路缘石 0.5 m;标准行车道工况(BL1)为车辆按左侧标准车道行驶,车辆加载布置如图 3 所示。

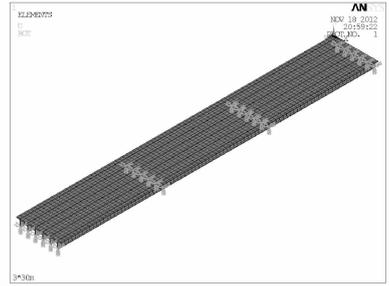


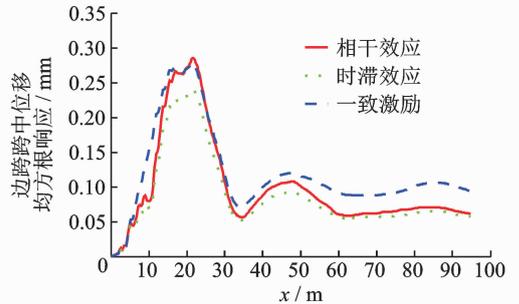
图 4 连续梁桥有限元模型

Fig. 4 The FEM of continuous beam bridge

3.2 路面谱空间效应对车桥耦合振动响应

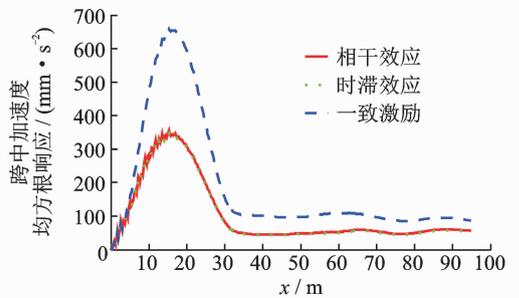
目前,高速公路桥梁对重载车辆限速为 80~100 km/h(22.2~27.8 m/s),本研究选取车辆以 25 m/s 的速度按 BL1 工况行驶在 GB/T7031—2005 B 级路面,研究路面输入激励的相干效应、时滞效应及一致效应对车桥耦合振动响应的影响,图 5 和图 6 给出了路面输入激励空间效应对边跨跨中 A 点的响应曲线。

图 5 给出路面激励空间效应对边跨跨中 A 点的竖向位移及竖向加速度时程曲线。一致效应的 A 点竖向位移和加速度均方根响应均比时滞效应和相干效应大,且相干效应对加速度曲线的影响比位移



(a) 位移均方根

(a) Displacement root-mean-square (RMS) of mid-span at side span



(b) 加速度均方根

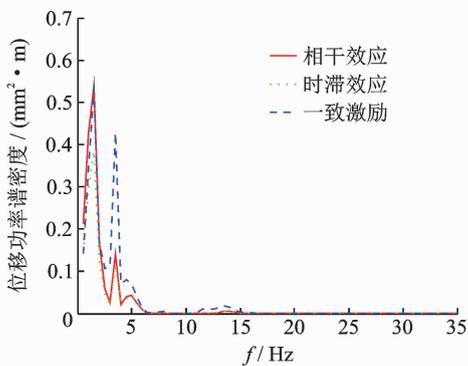
(b) Acceleration RMS of mid-span at side spanspan

图 5 路面激励空间效应对边跨跨中响应的影响

Fig. 5 The effect on the dynamic response of mid-span at side span caused by spatial road roughness spectrum

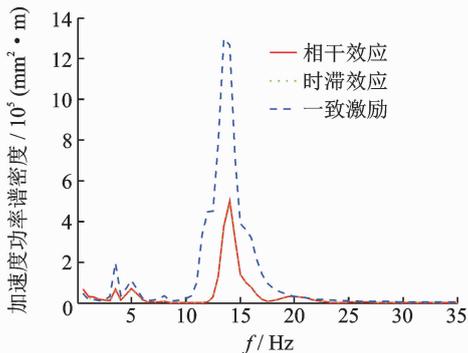
更明显。车辆位于边跨时,一致效应的A点位移均方根与相干效应接近,时滞效应与一致激励偏差较大;车辆驶出第1跨后,相干效应与时滞效应的位移均方根较接近,但与一致效应偏差较大。时滞效应和相干效应的加速度均方根响应曲线重合,两者位移均方根响应略有偏离。时滞效应和相干效应对桥梁的加速度和位移均方根响应的影响很小。

图6分别给出路面输入激励空间效应对边跨跨中A点的竖向位移及竖向加速度功率谱响应曲线。3种不同路面输入激励作用下,A点竖向位移共振频率相同;但一致激励的A点竖向位移功率谱密度曲线峰值,在桥梁基频和车辆基频处的功率谱峰值大小接近,一致激励对位移共振响应影响,车辆基频与桥梁基频具有同等作用;时滞效应和相干效应的位移共振响应,主要由车辆基频起控制作用。加速度功率谱密度曲线的频率峰值,路面输入激励的3种空间效应频率峰值相同,但一致激励加速度功率谱峰值较其他两种激励效应大。



(a) 边跨跨中位移功率谱

(a) PSD of displacement at mid-span of side span



(b) 边跨跨中加速度功率谱

(b) PSD of displacement at mid-span in the first span

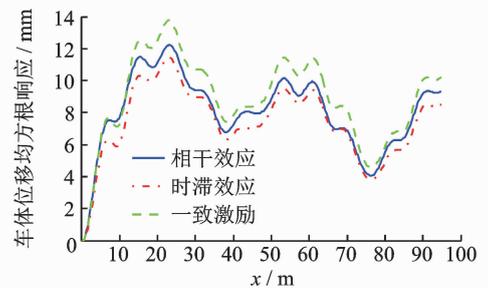
图6 路面激励空间效应对功率谱影响

Fig. 6 The effect on PSD caused by spatial road roughness spectrum

3.3 路面谱空间效应对车辆振动敏感性分析

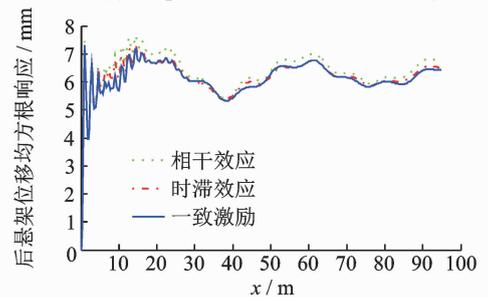
为研究路面不平顺多点输入激励的空间效应对

车辆振动特性的影响,分析车辆以25 m/s速度按PL1工况行驶在B级路面上,路面输入激励的相干效应、时滞效应和一致效应对车辆振动响应的影响。图7给出了输入激励的空间效应对车体和后悬架的位移均方根响应曲线。车体竖向位移均方根响应随车辆在桥梁上行驶位置变化较大,后悬架竖向位移均方根响应随车辆在桥梁上行驶位置变化相对较小。路面输入激励的相干性对车体位移均方根的影响比后悬架大;相干效应对后悬架位移均方根值的影响比时滞效应和一致效应明显;相干效应对车体竖向位移振动响应较时滞效应和一致效应大,最大值相差12%。



(a) 车体位移均方根

(a) Displacement RMS of vehicle body



(b) 后悬架位移均方根

(b) Displacement RMS of rear suspension

图7 路面谱空间效应对车辆位移响应影响

Fig. 7 The effect on vehicle displacement caused by spatial road roughness spectrum

图8给出了路面输入激励的空间效应对车体和后悬架加速度均方根响应的影响。车体竖向加速度均方根响应随车辆在桥梁上行驶位置变化较明显,后悬架竖向加速度均方根响应幅值随车辆在桥梁上行驶位置变化较小。车辆驶入桥跨后,后悬架加速度很快进入平稳状态。车体竖向加速度均方根沿桥跨方向变化较明显,考虑车桥耦合振动,路面不平顺激励对车体竖向位移及加速度影响比后悬架竖向位移及加速度明显。研究车桥耦合振动引起的车体振动响应,需考虑各车轮输入激励空间效应的影响。

图9给出了车辆驶入桥跨后,车体竖向加速度功率密度曲线和后悬架功率谱密度曲线。车体竖向

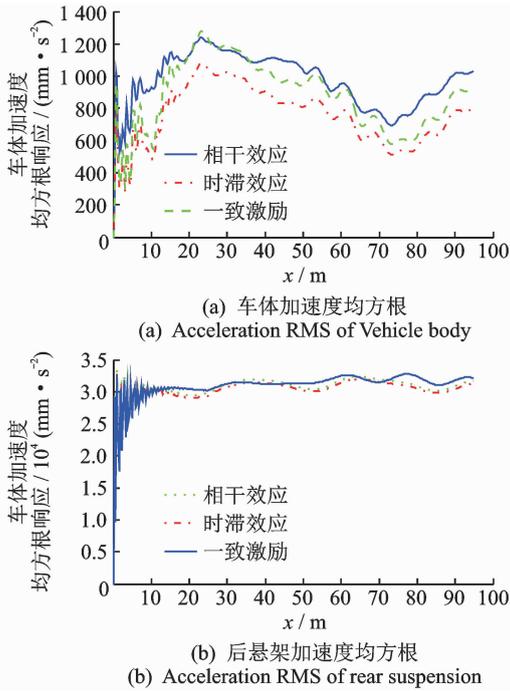


图 8 路面谱空间效应对车辆加速度响应影响
Fig. 8 The effect on vehicle acceleration caused by spatial road roughness spectrum

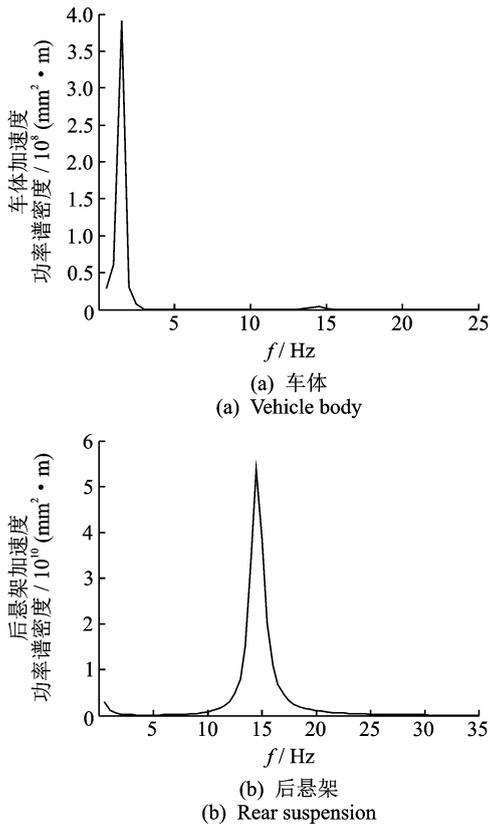


图 9 车辆加速度功率谱密度曲线
Fig. 9 PSD of vehicle acceleration

悬架加速度功率谱密度曲线的峰值出现在 14.5 Hz。考虑路面不平顺激励与车桥耦合共振效应后,车体竖向加速度共振频率峰值与车辆自振基频一致,后悬架竖向共振加速度频率峰值与车辆悬架弹跳频率一致。

4 结 论

1) 3 种路面激励空间效应对桥梁位移和加速度响应存在差异,一致效应的位移响应共振频率由桥梁和车辆基频决定,时滞效应及相干效应的响应主要由桥梁基频决定;3 种相干函数的加速度响应共振频率均由车辆悬架频率控制。

2) 3 种路面激励的空间效应对车体的位移和加速度响应影响明显,对后悬架的位移和加速度响应接近。车桥耦合振动对车体的位移及加速度的影响比后悬架明显。车体与路面谱的共振频率和车辆自振频率接近,后悬架和路面谱的共振频率受桥梁基频影响较小,与悬架自振频率接近。

3) 研究路面不平顺激励引起车桥耦合振动响应,需考虑路面不平顺输入激励的空间效应影响。

参 考 文 献

[1] Calcada R, Cunha A, Delgado R. Analysis of traffic-induced vibration in a cable-stayed bridge. part II: numerical modeling and stochastic simulation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(4): 386-397.

[2] Li Hongyi, Wekezer J, Kwaniewski L. Dynamic response of a highway bridge subjected to moving vehicles[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(5): 439-448.

[3] 张志超, 张亚辉, 林家浩. 考虑行波效应的车桥系统地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4): 8-16.
Zhang Zhichao, Zhang Yahui, Lin Jiahao. Random seismic response analysis of train-bridge systems considering wave travelling effect[J]. Journal of Earth Quake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(4): 8-16. (in Chinese)

[4] 刘波, 王有志, 安俊江, 等. 车辆-路面空间耦合振动模型及其动力响应分析[J]. 山东大学学报:工学版, 2014, 44(3): 83-89.
Liu Bo, Wang Youzhi, An Junjiang, et al. The spatial model of vehicle-pavement coupling vibration and its

- dynamic responses analysis[J]. Journal of Shandong University :Engineering Science, 2014,44(3):83-89. (in Chinese)
- [5] 钱凯, 胡启国, 李力克. 基于人-车-路耦合振动系统的儿童乘坐舒适性[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2013,32(2):351-359.
Qian Kai, Hu Qiguo, Li Like. Children ride comfort based on human-vehicle-road coupled system of vibration[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013,32(2):351-359. (in Chinese)
- [6] 张丙强, 李亮. 人车路系统三维耦合振动分析及舒适度评价[J]. 计算力学学报, 2013, 30(2):302-307.
Zhang Bingqiang, Li Liang. Dynamic analysis and comfort evaluation of the three-dimension body-vehicle-road coupled system[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(2):302-307. (in Chinese)
- [7] Huang Dongzhou, Wang T L, Mohsen S. Impact studies of multigirder concrete bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1993 119(8): 2387-2402.
- [8] Liu Chunhua, Huang Dongzhou, Wang T L. Analytical dynamic impact study based on correlated road roughness [J]. Computers & Structures, 2002, 80(20/21): 1639-1650.
- [9] 韩万水, 马麟, 院素静, 等. 路面粗糙度非一致激励对车桥耦合振动系统响应影响分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10):81-90.
Han Wanshui, Ma Lin, Yuan Sujing, et al. Analysis of the effect of inconsistent stimulus of surface roughness on vehicle-bridge coupling vibrations[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10):81-90. (in Chinese)
- [10] Pazooki A, Subhash R, Cao Dongpu. Modeling and validation of off-road vehicle ride dynamics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 679-695.
- [11] 张永林, 胡志刚, 陈立平. 时空相关车辆道路的高效数值仿真[J]. 农业机械报, 2005, 36(9): 13-15.
Zhang Yonglin, Hu Zhigang, Chen Lipin. A new approach to numerical simulation of vehicle road process with temporal-spatial correlation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 13-15. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] Narayanan S. Nonlinear and nonstationary random vibration of hysteretic systems with application to vehicle dynamics [M]//Nonlinear Stochastic Dynamic Engineering Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988: 433-442.
- [14] GB7031—2005/ISO8608 机械振动道路路面测量数据报告[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [15] 桂水荣, 陈水生, 任永明. 先简支后连续梁桥车辆冲击系数影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 54-60.
Gui Shuirong, Chen Shuisheng, Ren Yongming. Research on influencing factors of impact coefficient of continuous beam bridge transformed form simply-supported structure subjected to moving vehicle loads[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(5):54-60. (in Chinese)
- [16] 张立军, 何辉. 车辆随机振动[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2007:58-59.
- [17] 桂水荣, 陈水生, 赵辉, 等. 基于 LS-DYNA 公路桥梁车桥耦合振动模型[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7): 40-45.
Gui Shuirong, Chen Shuisheng, Zhao Hui, et al. Model of highway bridge subjected to vehicle-bridge coupled vibration based on LS-DYNA[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(7):40-45. (in Chinese)
- [18] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.



第一作者简介:桂水荣,女,1979年10月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为公路桥梁车桥耦合振动。曾发表《基于 PIM 法车桥耦合模型 Duhamel 项迭代格式选择》(《振动、测试与诊断》2017年第37卷第5期)等论文。
E-mail:guishuirong@163.com

通信作者简介:陈水生,男,1968年6月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为土木工程结构振动与控制、试验测试分析。
E-mail:Sshchen@126.com

