

车辆各轮相干桥面不平顺激励的车桥耦合振动

陈水生¹, 赵辉^{*1}, 李锦华¹, 夏钰桓²

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 湖北恒大建设工程有限公司, 武穴 435400)

摘要:根据车辆左右轮的互功率谱密度和相干函数, 推导了左右轮桥面不平顺特性中对应相位角的相干关系, 提出了采用相位角相干生成车辆各轮相干桥面不平顺激励的方法, 并通过数值算例验证了该生成方法的可靠性。工程应用结果表明, 车辆各轮相干桥面不平顺激励增大了桥梁、车辆竖向和车辆俯仰角的振动响应, 但降低了车辆侧倾角的振动响应; 不同相干函数模型对桥梁振动响应影响较小, 但对车辆振动响应影响较大; 同一相干函数模型, 桥梁振动响应随着相干强度的增大而增大, 但车辆振动响应随着相干强度的增大而减小; 研究桥面不平顺随机激励对车桥耦合系统振动响应的影响有必要考虑车辆各轮的相干关系。

关键词:桥面不平顺; 车辆各轮相干; 相位角相干; 相干函数; 车桥耦合; 蒙特卡罗法

中图分类号: O32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-4708(2021)03-0393-08

1 引言

在空间上处于车轮与桥梁间的桥面不平顺既影响车辆行驶安全和乘坐舒适性, 也是桥梁产生随机振动的主要激励源。如何建立有效的贴近实际的桥面不平顺随机激励模型, 对研究车桥耦合系统的振动规律至关重要。虽然国内外学者对车桥耦合振动的研究从未间断, 也创造了很多有价值的成果, 但针对桥面不平顺随机激励的数值模拟, 大多采用滤波白噪声法、谐波叠加法和逆傅里叶变换法等方法^[1-5], 没有考虑车辆左右轮迹的相干性。已有的研究表明, 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, 再现两轮辙激励时域模型时必须考虑其空间相干性^[6]。而有关车辆左右轮迹相干的桥面激励研究大多采用滤波白噪声法^[7,8], 该方法通过拟合左右轮迹间的传递函数生成左右轮相干的激励样本, 但生成的右轮迹激励样本丢失了高频成分, 导致不能吻合目标功率谱密度, 虽然有学者对丢失的高频成分进行补偿, 但效果并不理想, 高频成分很难把握, 波动较大^[9]。文献[10]虽然考虑了各车轮间的相干函数关系, 但时域模型没有验证有效性; 文献[11, 12]分别采用谐波叠加法和逆傅里叶变换法建立了左右轮迹相干

的路面随机激励模型, 但没有说明相位角的相干关系建立过程, 且左右轮路面激励样本的相干函数值与理论值误差较大。

因此, 针对上述研究中车辆各轮相干桥面激励模型存在的不足, 本文考虑左右轮间的相干函数关系和前后轮间的时间滞后关系, 详细推导了左右轮桥面不平顺特性中对应相位角的相干关系, 利用相位角的相干关系建立车辆各轮相干的桥面不平顺时域模型, 并验证了时域模型的有效性。最后, 通过工程实例说明车辆六轮相干桥面随机激励对车桥耦合振动的影响。

2 车辆六轮相干桥面不平顺激励模型

2.1 单轮桥面不平顺激励模型

基于功率谱表征的方法, 车辆单轮桥面激励随机过程 $r(t)$ 可以表示为傅里叶随机增量的 Fourier-Stieltjes 积分^[13],

$$r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} dZ(\omega) \quad (1)$$

随机增量 $dZ(\omega)$ 必须满足如下的正交条件,

$$E\{dZ(\omega)\} = 0 \quad (2)$$

$$E\{dZ^*(\omega)dZ(\omega)\} = \delta(\omega - \omega) S_r(\omega) d\omega \quad (3)$$

式中 $S_r(\omega)$ 为桥面不平顺的功率谱密度函数。当随机过程为实数时, 需满足 $dZ(-\omega) = dZ^*(\omega)$, 方程(1)可以表示为

$$r(t) = \int_0^{+\infty} e^{i\omega t} dZ(\omega) + \int_0^{+\infty} [e^{i\omega t} dZ(\omega)]^* \quad (4)$$

对式(4)的随机增量可以有如下近似表达式,

收稿日期: 2020-06-25; 修改稿收到日期: 2020-09-08.

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

作者简介: 赵辉^{*}(1982-), 男, 博士, 讲师
(E-mail: 2685803096@qq.com).

$$dZ(\omega)|_{\omega=\omega_k} \approx \Delta Z(\omega_k) = \sqrt{S_r(\omega_k)} e^{i\phi_k} \sqrt{\Delta\omega} \quad (5)$$

式中 ϕ_k 为随机相位角, ω_k 为区间 $[\omega^L, \omega^U]$ 的频率点, $\Delta\omega = (\omega^L - \omega^U)/N$, 将式(5)代入式(4)便可求得单轮平稳桥面激励的时域表达式为

$$r(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{k=1}^N \sqrt{S_r(\omega_k)} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (6)$$

2.2 左右轮相干桥面激励模型

平稳随机过程的功率谱密度函数与其相关函数满足维纳-辛钦转换关系, 因此, 可以由桥面不平顺的时域表达式推出功率谱密度函数。设左右轮迹的桥面不平度分别为 $r^L(t)$ 和 $r^R(t)$, 自功率谱密度函数为 $S_r^L(\omega)$ 和 $S_r^R(\omega)$, 则

$$\begin{aligned} S_r^L(\omega) &= 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\int_0^T \frac{r^L(t) r^L(t+\tau)}{T} dt \right] e^{-i\omega\tau} d\tau = \\ &= 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_r(\omega_k) \Delta\omega} \times \right. \\ &\quad \cos(\omega_k t + \phi_k^L) \sqrt{2S_r(\omega_j) \Delta\omega} \times \\ &\quad \left. \cos[\omega_j(t+\tau) + \phi_j^L] dt \right\} e^{-i\omega\tau} d\tau \approx \\ &= \int_0^{+\infty} S_r(\omega_k) [\delta(\omega - \omega_k) + \delta(\omega + \omega_k)] d\omega = S_r(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

同理可得 $S_r^R(\omega) = S_r(\omega)$ 。

左右轮桥面不平顺的互功率谱密度函数计算如下,

$$\begin{aligned} S_r^{LR} &= 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_r(\omega_k) \Delta\omega} \times \right. \\ &\quad \cos(\omega_k t + \phi_k^L) \sqrt{2S_r(\omega_j) \Delta\omega} \times \\ &\quad \left. \cos[\omega_j(t+\tau) + \phi_j^R] dt \right] e^{-i\omega\tau} d\tau = \\ &= \sum_{k=1}^N S_r(\omega_k) [\delta(\omega - \omega_k) + \delta(\omega + \omega_k)] \times \\ &\quad \cos(\phi_k^L - \phi_k^R) \Delta\omega + \sum_{k=1}^N S_r(\omega_k) [\delta(\omega + \omega_k) - \\ &\quad \delta(\omega - \omega_k)] i \sin(\phi_k^L - \phi_k^R) \Delta\omega \approx \\ &= \int_0^{+\infty} S_r(\omega_k) [\delta(\omega - \omega_k) + \delta(\omega + \omega_k)] \times \\ &\quad \cos(\phi_k^L - \phi_k^R) d\omega_k + \int_0^{+\infty} S_r(\omega_k) [\delta(\omega + \omega_k) - \\ &\quad \delta(\omega - \omega_k)] i \sin(\phi_k^L - \phi_k^R) d\omega_k = \\ &= S_r(\omega) \cos(\phi_k^L - \phi_k^R), \quad \omega = \omega_k \end{aligned} \quad (8)$$

根据左右轮迹相干函数的定义, 可以得到相干函数与左右轮迹相位角的关系为

$$\text{coh}_{LR}^2(\omega) = \frac{|S_{LR}(\omega)|^2}{S_L(\omega) S_R(\omega)} = \cos^2(\phi_k^L - \phi_k^R) \quad (9)$$

$$\phi_k^R = \phi_k^L - \text{sign}(x) \arccos(\text{coh}_{LR}) \quad (10)$$

式中 $\text{sign}(x)$ 为符号函数, x 为正负随机数, 已知

左右轮迹的相干函数, 并将上述得到的右轮迹相位角代入式(6), 就可以得到右轮的时域样本。

2.3 前后轮桥面激励模型

同一侧的轮迹, 中轮和后轮的桥面激励滞后前轮一段时间, 中轮和后轮的桥面激励数学表示为

$$\begin{cases} r_3(t) = r_1(t - l_1/v), & r_5(t) = r_1(t - l_2/v) \\ r_4(t) = r_2(t - l_1/v), & r_6(t) = r_2(t - l_2/v) \end{cases} \quad (11)$$

按照前后轮时间滞后的关系, 结合式(8)可以求得中轮和后轮的桥面激励样本, 如左侧中轮的求解可以表示为

$$r_3(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{k=1}^N \sqrt{S_r(\omega_k)} \cos\left[\omega_k\left(t - \frac{l_1}{v}\right) + \phi_k^L\right] \quad (12)$$

3 数值算例

道路不平顺是一随机过程, 具有各态历经性, 当车辆以速度 v 匀速行驶时, 桥面激励输入的功率谱密度(PSD)可以表示为

$$S_r(\omega) = 2\pi S_r(n_0) n_0^2 (v/\omega^2) \quad (13)$$

式中 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 为空间参考频率, $S_r(n_0)$ 为桥面不平度系数, 与桥面等级有关, ω 为频带 $[\omega^L, \omega^U]$ 的某一圆频率。

为验证本文车辆六轮相干桥面不平顺时域模型的有效性, 采用文献[14]的相干函数模型

$$\text{coh}(\omega) = \begin{cases} e^{-\rho\omega B} & (\omega \in (\omega^L, \omega^U)) \\ 0 & (\omega \notin (\omega^L, \omega^U)) \end{cases} \quad (14)$$

式中 ρ 为桥面不平顺的经验值, 在此取 $\rho = 1$ 。以 C 级桥面为例, 桥面不平度系数 $S_r(n_0) = 256 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 车辆左右轮距 $B = 1.8 \text{ m}$, 前中轴距 $l_1 = 3.6 \text{ m}$, 前后轴距 $l_2 = 4.8 \text{ m}$, 车辆行驶速度 $v = 36 \text{ km/h}$, 采样时间 10 s , 可得左轮迹各车轮的桥面不平顺激励输入如图 1 所示, 可以看出, 同一轮迹前中后轮的桥面激励存在明显的时间延迟。图 2 给出了左轮迹前轮和中轮、前轮和后轮桥面激励样本的互相关函数, 可以看出, 在时差 $t = -0.36 \text{ s}$ 时, 前轮和中轮的互相关函数值最大, 该时间点与前中轮的时差 $l_1/v = 0.36 \text{ s}$ 吻合; 在时

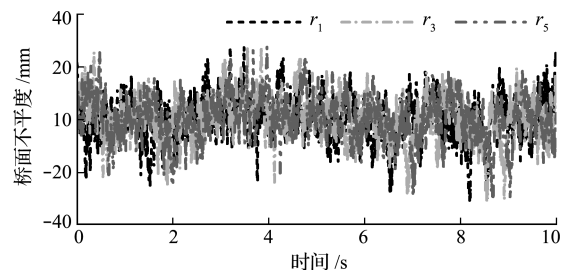


图1 左侧轮迹不平度样本

Fig. 1 Sample of left wheel track unevenness

差 $t = -0.48$ s 时,前轮和后轮的互相关函数值最大,与前后轮的时差 $l_2/v = 0.48$ s 吻合,充分说明六轮相干桥面激励的时间滞后性是有效的。

计算左轮迹各车轮桥面激励样本的功率谱密度,并与理论值进行对比,如图 3 所示,可以看出,桥面激励样本的功率谱与理论功率谱吻合很好。

相同的相干函数模型式(14),不同的车辆各轮相干桥面激励生成方法,图 4 给出了本文方法生成的桥面不平顺时域样本的相干函数,并与文献[11, 12]方法的研究结果进行对比。可以看出,频率越低,相干性越强,频率越高,相干性越弱;本文方法左右轮迹的相干函数与理论值非常吻合,而文献[11, 12]的误差相对较大;综上所述,说明本文的车

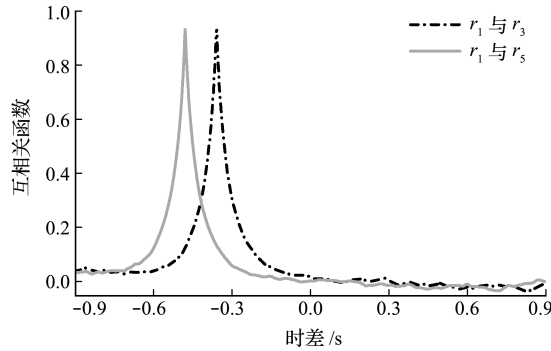


图 2 前中后轮互相关函数

Fig. 2 Cross correlation function of front, middle and rear wheels

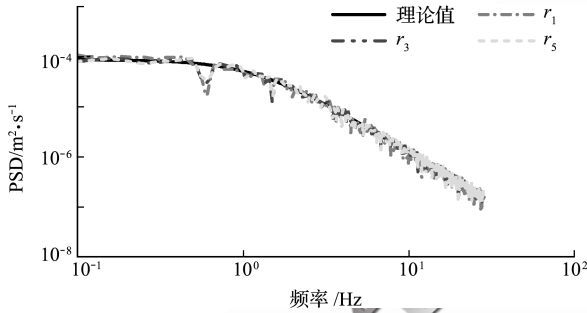


图 3 桥面激励的功率谱密度

Fig. 3 Power spectral density of bridge deck excitation

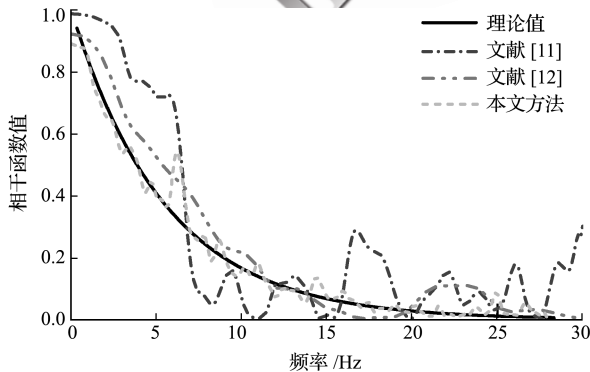


图 4 左右轮相干函数计算值与理论值对比

Fig. 4 Comparison between the calculated value and the theoretical value of the left and right wheel coherence function

辆六轮相干多变量桥面不平顺时域模型有效可靠且精度较高。

4 工程应用

4.1 车桥耦合振动模型

采用传统的弹簧-质量-阻尼振动体系将一辆三轴重载汽车简化为三轴九自由度空间模型,考虑车体竖向振动、纵向点头、侧翻以及车轮振动,车辆参数参考文献[15]。依据达朗贝尔原理,建立九自由度车辆振动方程如下,

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{z} = \mathbf{F}_v^{\text{int}} \quad (15)$$

式中 $\mathbf{M}_v$, $\mathbf{C}_v$ 和 $\mathbf{K}_v$ 分别为车辆的质量、阻尼和刚度矩阵, $\mathbf{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆各自由度产生的惯性荷载列向量, $\mathbf{z} = [z_1 \cdots z_6 \quad z_b \quad \theta_b \quad \varphi]$ 为车辆振动自由度列向量。

以江西奉铜高速公路上的某预应力混凝土简支 T 梁桥为研究对象,桥梁上部结构由 6 片 T 梁组成, T 梁高 2 m, 单片梁宽 2.1 m。桥面横向布置为 0.5 m(防撞栏) + 11.65 m(行车道) + 0.5 m(防撞栏)。使用广义坐标离散的方法建立桥梁的振动方程,

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_b \mathbf{s} = -\mathbf{F}_v^{\text{int}} - \mathbf{F}_g \quad (16)$$

式中 $\mathbf{F}_g$ 为车辆自重引起的各车轮作用点处的荷载向量, $\mathbf{s}$ 为单元结点向量。

采用模态综合法,联立式(15, 16),可得车桥耦合振动方程为

$$\mathbf{M}_{bv} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{bv} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{bv} \mathbf{u} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_w \quad (17)$$

式中 $\mathbf{M}_{bv}$, $\mathbf{C}_{bv}$ 和 $\mathbf{K}_{bv}$ 分别为车桥相互作用模型的质量、阻尼和刚度矩阵, $\mathbf{F}_w$ 为路面不平顺随机激励引起的车桥耦合竖向荷载, $\mathbf{u}$ 为广义坐标向量。

$$\mathbf{F}_g = \begin{bmatrix} -\Phi^T \sum_{i=1}^6 \mathbf{N}_i^T \mathbf{F}_i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(n+9) \times 1} \quad (18)$$

$$\mathbf{F}_w = \begin{bmatrix} -\Phi^T \sum_{i=1}^6 \mathbf{N}_i k_{ii} r_i \\ k_{t1} \\ \vdots \\ k_{t6} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(n+9) \times 1} +$$

$$\begin{bmatrix} -\Phi^T \sum_{i=1}^6 \mathbf{N}_i c_{ii} \dot{r}_i \\ c_{t1} \dot{r}_1 \\ \vdots \\ c_{t6} \dot{r}_6 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(n+9) \times 1} \quad (19)$$

4.2 车桥耦合振动响应分析

为充分体现桥面激励的随机性特征,本文在分析车辆六轮相干桥面随机激励对车桥系统的影响时,采用传统蒙特卡罗法对车桥振动响应进行统计分析。按照本文车辆六轮相干桥面不平顺激励时域样本的生成方法,随机产生 10000 个桥面不平顺激励样本,求解车辆和桥梁在不同不平顺样本激励下的振动响应。为研究方便,车辆荷载只考虑一种布置方式,荷载作用在次边梁上,车辆外侧车轮距离防撞栏 1.475 m,车辆以 72 km/h 的速度行驶在 B 级桥面。

4.2.1 考虑车辆六轮相干性

如前言所述,学者们在研究车桥耦合振动响应时,并没有考虑车辆多轮多点的相干性,为了分析车辆左右轮相干桥面不平顺激励对车桥系统的影响,以前轴左右车轮为例,图 5 给出了左右轮相干和不相干的桥面不平顺激励样本的功率谱密度,可以看出,考虑相干的前轴左右轮桥面不平顺激励的功率谱曲线几乎是重合的,即左右轮桥面不平顺激励频率几乎相同;而不相干的前轴左右轮桥面不平顺激

励的功率谱曲线明显不同,即左右轮桥面不平顺激励频率不相同。从图 6 前轴左右轮的车桥相互作用力也可以看出,相干桥面不平顺激励的左右轮车桥相互作用力几乎是重合的,左右轮的车桥相互作用力均值都是 31.754 kN,标准差都是 24.25 kN;不相干桥面不平顺激励的左右轮车桥相互作用力完全不同,其左右轮车桥相互作用力的均值分别为 32.314 kN 和 32.55 kN,标准差分别为 26.781 kN 和 28.481 kN。可见,左右轮相干的桥面不平顺激励频率相同,左右车轮的车桥相互作用力也相同;而不相干的左右轮桥面不平顺激励频率不同,且左右轮的车桥相互作用力差别较大。

车辆各轮相干和不相干桥面不平顺激励下的桥梁边梁跨中竖向位移响应如图 7 所示,可以看出,车辆六轮相干与不相干的桥梁竖向位移响应均值基本重合,说明桥梁的振动响应主要是由车辆自身重力这一确定性荷载激励引起;车辆六轮相干的桥面随机激励对桥梁竖向位移响应均值影响很小,但对桥梁竖向振动响应标准差的影响大于不相干桥面激励,表明其增大了桥梁振动响应的离散程度;相干桥面激励下的桥梁竖向位移标准差最大值是不相干桥面激励效应最大值的 1.4 倍。

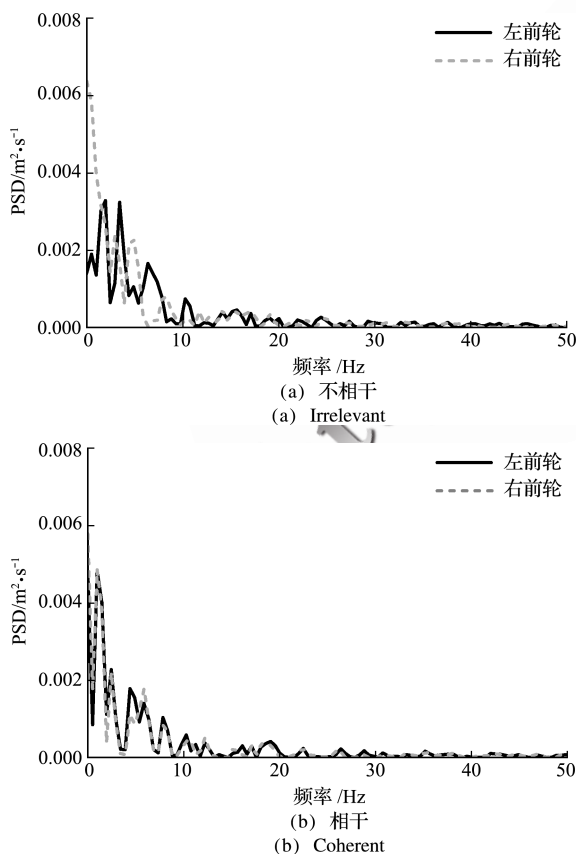


图 5 前轴左右轮的桥面不平顺功率谱密度

Fig. 5 Power spectral density of irregularity on the left and right wheels of the front axle

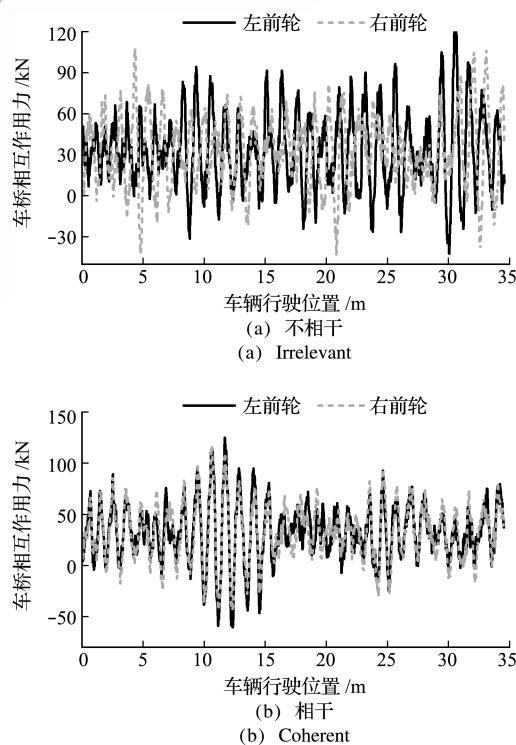
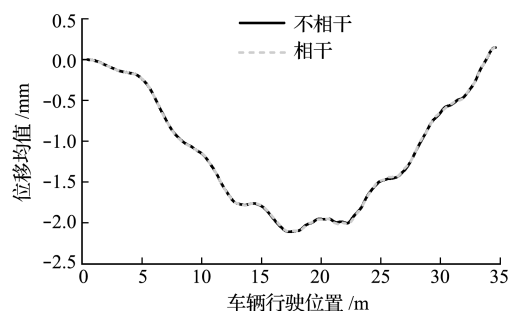
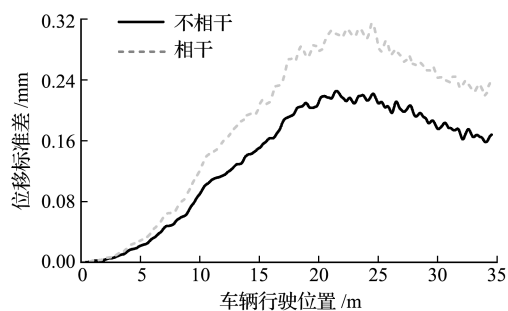


图 6 前轴左右轮的车桥相互作用力

Fig. 6 Axle interaction between left and right wheels of front axle



(a) Mean value of vertical displacement response



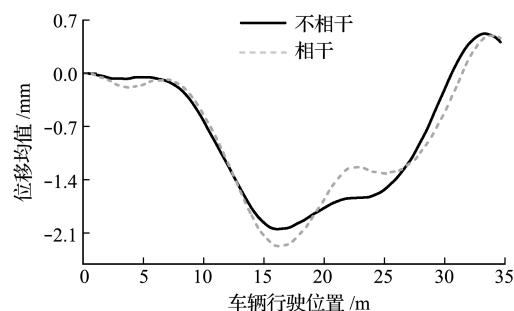
(b) Standard deviation of vertical displacement response

图7 桥梁振动响应

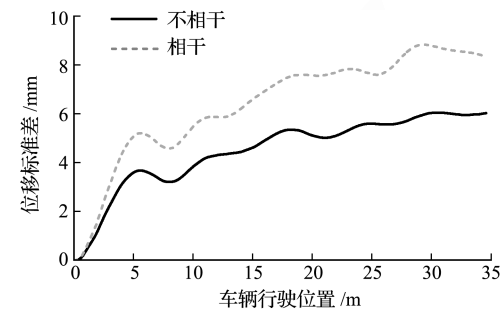
Fig. 7 Vibration response of bridge

为了探究车辆六轮相干桥面不平顺激励对车体竖向、俯仰和侧倾三个方向振动响应的影响,图8和图9分别给出了车体的振动位移和振动加速度响应,可以看出,车体竖向位移响应的均值受车辆六轮相干桥面激励的影响较大,相干桥面激励的车体竖向位移响应均值最大值是不相干桥面激励效应最大值的1.12倍;相干桥面激励的车体竖向位移标准差和加速度响应标准差的最大值分别是不相干桥面激励效应最大值的1.46倍和1.43倍;相干桥面激励的车体俯仰角位移标准差和加速度标准差最大值分别是不相干桥面激励效应最大值的1.41倍和1.38倍;但是,相干桥面激励的车体侧倾角位移标准差和加速度标准差小于不相干桥面激励效应,不相干的位移标准差最大值和加速度标准差最大值分别是相干的4.83倍和3.72倍。车体侧倾角振动响应出现相干情况小于不相干情况,这与图5和图6的结果一致,不相干的桥面不平顺激励频率不同且左右轮车桥相互作用力大小不同,导致了车体左右摇摆较为剧烈,引起较大的侧倾角振动响应。

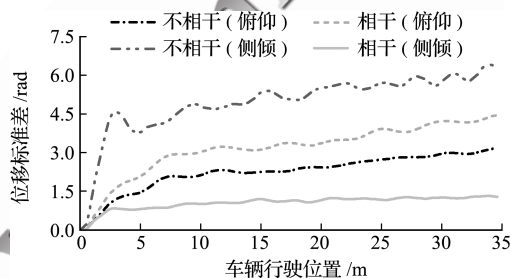
可见,车辆各轮相干桥面不平顺激励对车桥耦合振动系统的影响较大,且对车体振动的影响大于对桥梁振动的影响,使车辆竖向振动和前后点头振



(a) Mean value of vertical displacement response



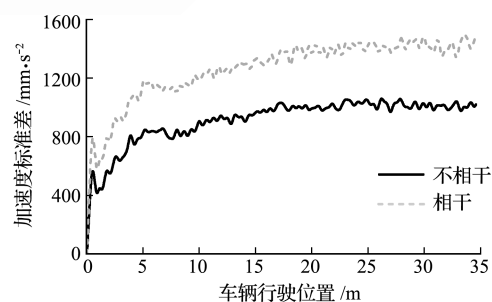
(b) Standard deviation of vertical displacement response



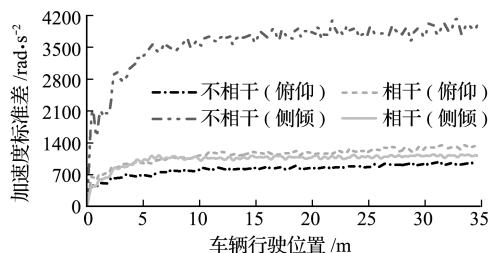
(c) Standard deviation of pitch and roll displacement response

图8 车体振动位移响应

Fig. 8 Vibration displacement response of vehicle body



(a) Standard deviation of vertical acceleration response



(b) Pitch and roll acceleration response standard deviation

图9 车体振动加速度响应

Fig. 9 Vibration acceleration response of vehicle body

动更激烈,但又减弱了车辆左右摇摆的激烈程度;车桥耦合系统的振动位移响应对车辆各轮相干桥面激励比振动加速度响应敏感,特别是车辆振动位移标准差会随着车辆的行驶有小幅缓慢增加,而振动加速度标准差却趋于平缓。因此,在研究车桥耦合振动时,有必要考虑车辆各轮桥面不平顺激励的相干性。

4.2.2 不同相干函数

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,除了本文分析采用的文献[14]相干函数,还有文献[16]的长春汽车研究所在柏油路上测定的相干函数模型和文献[17]的相干函数模型。采用不同的相干函数模型生成多变量桥面激励,其对桥梁边梁跨中竖向和车辆侧倾角振动响应标准差的影响如图10所示。可以看出,三种相干函数模型对桥梁振动响应的影响相差不大,文献[16]误差相对较小,文献[14,17]结果较为接近;但车辆侧倾角振动响应对不同的相干函数模型很敏感,文献[16]相干函数模型影响最大,文献[17]相干函数模型影响最小。

4.2.3 不同相干强度

从文献[14]的研究结果可知,在左右车轮间距不变时,改变相干函数模型参数 ρ 的取值大小,就

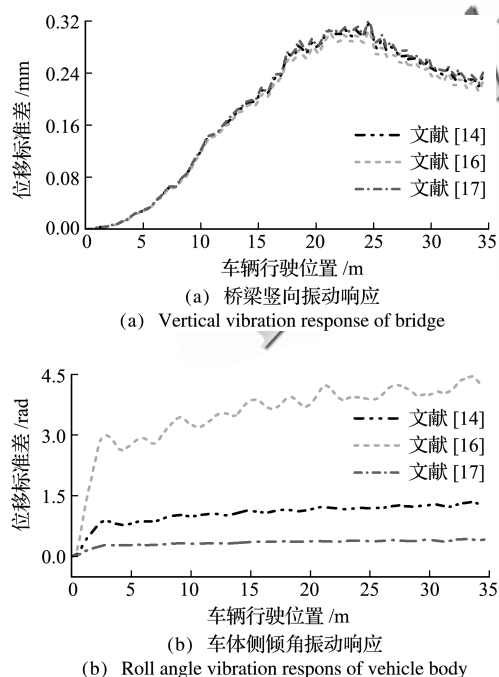


图10 不同相干函数模型的车桥系统振动响应
Fig. 10 Vibration response of vehicle bridge system with different coherence function models

可以得到不同相干强度的相干函数模型,相干强度随着参数 ρ 的增大而减小,且不会影响桥面不平顺激励的功率谱密度。图11给出了车辆各轮不同相干强度对边梁跨中竖向位移和车辆侧倾角振动响应标准差的影响。可以看出,相干强度的大小对车桥系统的振动响应影响较大,车辆各轮的相干强度越大,桥梁的振动响应就越大,但车辆侧倾角振动响应越小。

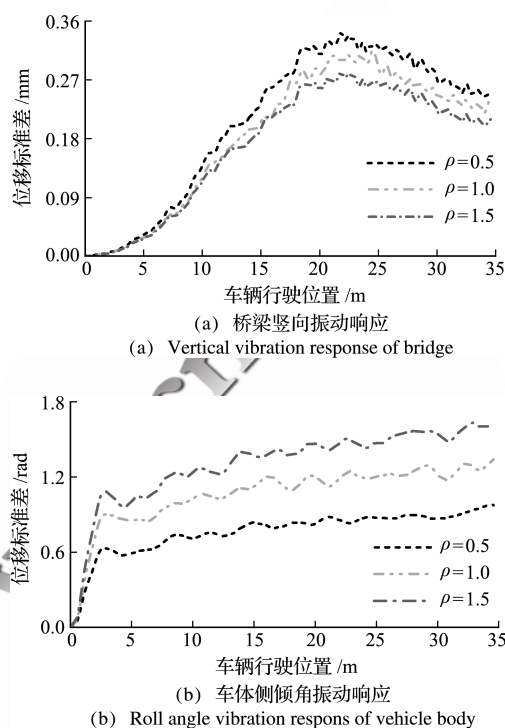


图11 不同相干强度的车桥系统振动响应
Fig. 11 Vibration response of vehicle bridge system with different coherence strength

5 结 论

本文在功率谱表示法生成单变量桥面不平顺的基础上,根据车辆左右轮桥面不平顺特性中对应相位角的相干关系,生成车辆各轮相干的桥面不平顺随机激励。数值算例结果表明,利用相位角相干生成的车辆各轮相干桥面不平顺激励,不仅满足理论功率谱密度和相干函数的要求,还比其他生成方法精度高。在实际工程中,车辆各轮相干桥面激励增大了桥梁的振动响应,也增大了车辆的竖向和俯仰角振动响应,但减小了车辆侧倾角振动响应。不同相干函数模型对桥梁振动影响较小,对车辆振动影响较大,且车桥系统的振动响应对相干强度的强弱很敏感。

参考文献(References):

- [1] 陈 盟,龙海洋,嵇立颖,等. 随机路面时域模型的建模与仿真[J]. 机械工程与自动化, 2017(2): 40-41. (CHEN Meng, LONG Hai-yang, JU Li-ying, et al. Stochastic road roughness modeling and simulation in time domain[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017(2): 40-41. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] 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**(4): 1510-1520.
- [4] Zhong H, Yang M J. Dynamic effect of foundation settlement on bridge-vehicle interaction [J]. *Engineering Structures*, 2017, **135**: 149-160.
- [5] Ma L, Zhang W, Han W S, et al. Determining the dynamic amplification factor of multi-span continuous box girder bridges in highways using vehicle-bridge interaction analyses [J]. *Engineering Structures*, 2019, **181**: 47-59.
- [6] Newland D E. *Random Vibrations and Spectral Analysis*[M]. London: Longman, 1985.
- [7] 张国胜,方宗德,陈善志,等. 基于幂函数的路面不平度白噪声激励模拟方法[J]. 汽车工程, 2008, **30**(1): 44-47. (ZHANG Guo-sheng, FANG Zong-de, CHEN Shan-zhi, et al. White noise simulation for road roughness based on power function[J]. *Automotive Engineering*, 2008, **30**(1): 44-47. (in Chinese))
- [8] 张永林,钟毅芳. 汽车道路双轮辙多点随机激励建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, **16**(6): 1147-1149, 1154. (ZHANG Yong-lin, ZHONG Yi-fang. Investigation into the time domain model and numerical simulation of bilateral track excitation from road irregularities[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, **16**(6): 1147-1149, 1154. (in Chinese))
- [9] 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 Gui-hong, CHAI Ling-jiang. A study on the road model with four-wheel non-stationary random excitations [J]. *Automotive Engineering*, 2013, **35**(10): 868-872. (in Chinese))
- [10] 石晓辉,蒋 欣,赵 军,等. 四轮随机路面激励下的七自由度车辆响应特性[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(27): 71-78. (SHI Xiao-hui, JIANG Xin, ZHAO Jun, et al. Seven degrees of freedom vehicle response characteristic under four wheel random pavement excitation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(27): 71-78. (in Chinese))
- [11] 王 亚,陈思忠,郑凯锋. 时空相关路面不平度时域模型仿真研究[J]. 振动与冲击, 2013, **32**(5): 70-74. (WANG Ya, CHEN Si-zhong, ZHENG Kai-feng. Simulation research on time domain model of road roughness with time-space correlation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, **32**(5): 70-74. (in Chinese))
- [12] 任宏斌,陈思忠,吴志成,等. 车辆左右车轮路面不平度的时域再现研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, **33**(3): 257-259, 306. (REN Hong-bin, CHEN Si-zhong, WU Zhi-cheng, et al. Time domain excitation model of random road profile for left and right wheels [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, **33**(3): 257-259, 306. (in Chinese))
- [13] Priestley M B. Power spectral analysis of non-stationary random processes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1967, **6**(1): 86-97.
- [14] Bogsjö K. Coherence of road roughness in left and right wheel-path[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, **46**(s1): 599-609.
- [15] 桂水荣,陈水生,万 水. 基于路面一致激励车桥耦合非平稳随机振动分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, **38**(5): 908-915, 1077. (GUI Shui-rong, CHEN Shui-sheng, WAN Shui. Analysis of consistent stimulus of road roughness on vehicle-bridge coupling nonstationary random vibrations[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, **38**(5): 908-915, 1077. (in Chinese))
- [16] 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 Heng, LU Shi-fu. A vehicle's time domain model with road input on four wheels[J]. *Automotive Engineering*, 1999, **21**(2): 112-117. (in Chinese))
- [17] Ammon D. Problems in road surface modeling[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1991, **20**(s1): 28-41.

Vehicle-bridge coupling vibration excited by vehicle wheels with coherent deck irregularity

CHEN Shui-sheng¹, ZHAO Hui^{*1}, LI Jin-hua¹, XIA Yu-huan²

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

2. Hubei Hengda Construction Engineering Co., Ltd., Wuxue 435400, China)

Abstract: According to the cross power spectral density and coherence function of the left and right wheels of a vehicle, the coherence relationship of the corresponding phase angle in the characteristics of the left and right wheel deck irregularity was derived. This paper presented a method of coherent generation of all wheels correlation bridge deck irregularity excitation by phase angle coherence for all wheels, and the reliability of the method was verified by numerical examples. The results in engineering applications show that the vibration responses of the bridge, the vehicles vertical and vehicle pitch angle responses are increased, but the vibration response of the vehicle's roll angle is reduced; Different coherence function models have little influence on the vibration response of the bridge, but have a great influence on the vehicle vibration response; For the same coherence function model, the vibration response of the bridge increases with the increase of the coherence strength, but the vehicle vibration response decreases with the increase of the coherence strength; In order to study the influence of random excitation on the vibration response of the vehicle-bridge coupled system, it is necessary to consider the coherent relationship of vehicle wheels.

Key words: deck irregularity; all wheels correlation; phase angle coherence; coherence function; vehicle-bridge coupling; Monte Carlo method

引用本文/Cite this paper:

陈水生, 赵 辉, 李锦华, 等. 车辆各轮相干桥面不平顺激励的车桥耦合振动[J]. 计算力学学报, 2021, 38(3): 393-400.

CHEN Shui-sheng, ZHAO Hui, LI Jin-hua, et al. Vehicle-bridge coupling vibration excited by vehicle wheels with coherent deck irregularity[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(3): 393-400.