

路面谱函数对车桥耦合随机振动敏感性分析*

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 将桥梁离散为梁单元, 车辆简化为两自由度车模型, 基于虚拟激励法建立车桥耦合随机振动模型。分别以 GB7031 谱、Wang 谱及 ISO 谱三种路面不平顺谱函数作为不平顺激励输入, 研究路面谱函数对简支梁桥及车辆振动响应的影响。分析三种路面功率谱对桥梁竖向振动响应的影响, 研究不同路面谱函数作用下车速对桥梁振动响应的敏感性及车辆振动对路面谱函数的敏感性。研究表明: 三种路面谱函数引起的简支梁桥跨中竖向位移均方根曲线形状相似; 路面谱与车桥耦合共同作用, 桥梁及车辆共振频率出现在桥梁一阶频率处; ISO 谱引起的车辆振动响应受车速变化敏感性较弱, 但桥梁振动响应受车速影响敏感性较强; GB7031 谱和 Wang 谱引起车辆和桥梁的动力响应及频率特性接近, GB7031 谱计算结果略大于 Wang 谱。

关键词 车桥耦合系统; 随机振动; 路面谱函数; 虚拟激励法; 敏感性

中图分类号 U441⁺.3; TH.3

引言

路面不平顺一直被广大学者认为是影响车桥耦合振动的一个主要因素, 国内外学者针对这一影响因素展开广泛研究。Chatterjee 等^[1]根据 10 个桥面随机不平顺激励样本, 考虑路面不平顺激励影响, 认为车桥耦合共振响应很大程度上依赖于车辆速度和桥梁频率。Li 等^[2]认为桥面不平顺样本的峰值位置对冲击系数有很大影响。Calcada 等^[3]分析了各种因素对桥面板的冲击, 认为桥面不平顺是影响车辆对桥梁冲击效应的最主要因素。Claude 等^[4]分析不同等级路面对桥面板的局部冲击, 路面不平顺对桥梁振动响应起主要作用, 且对不同点位冲击作用不同。对车桥耦合进行理论研究时, 国内外学者纷纷采用不同的路面谱函数进行分析。Li 等^[5]采用 Wang 1993 谱^[6]分析桥面不平顺对车桥耦合振动的影响。韩万水等^[7]采用 Dodds 谱函数^[8]分析路面非一致激励对车桥耦合振动的影响。叶茂等^[9]采用 GB7031-86 谱^[10]分析高架桥汽车荷载对地面作用力。许海亮等^[11]研究车路耦合效应基本采用 GB7031-86 谱。张立军等^[12]研究认为 Wigner-Ville 谱能很好反映路面波形特征。但研究多轮车非平稳随机路面激励相干模型^[13]均采用

GB7031-1986 谱, 研究车辆振动特性^[14-15]主要采用余生志^[16]实测谱和 GB7031-86 谱。钟阳等^[17]对比中国和美国 200 多条道路的路面平整度指标, 认为中国路面平整状况远远差于美国。国内外学者采用不同的路面谱函数研究车辆振动、车桥耦合振动响应、车路耦合振动响应, 各国规范和学者所采用的路面谱函数对车桥耦合振动响应的影响未曾比对, 研究路面谱函数对其影响, 就显得尤为必要。本研究将车辆简化为两自由度的四分之一车模型, 桥梁离散为梁单元, 以路面随机谱激励函数作为输入, 基于虚拟激励法建立车桥耦合随机振动模型, 研究 GB7031 谱、Wang 谱及国际标准化组织 (International standardization organization, 简称 ISO) 谱三种路面谱函数对简支梁桥及车辆振动响应的影响。

1 车-桥耦合系统计算模型

1.1 车辆模型

根据车辆振动特性, 作用在桥梁上的车辆荷载, 可以简化成四分之一车模型, 将车体质量集中到 m_1 , 悬架弹簧刚度及阻尼等效为 k_1 和 c_1 , 轮轴质量集中到 m_2 , 车轮刚度及阻尼等效为 k_2 和 c_2 的弹簧-质量-阻尼系统。假设简支梁桥静止时为平衡位置,

* 国家自然科学基金资助项目(51268013, 51468018)
收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2016-10-28

车辆以速度 v 行驶,簧载质量 m_1 的动位移为 z_1 , 轴位移为 z_2 , 车轮始终与梁体保持接触不脱离, 与所在位置梁的挠度 $y(x, t)$ 保持一致, 如图 1 所示。根据达朗贝尔原理, 四分之一车模型振动方程可写成

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 - c_1 \dot{z}_2 + k_1 z_1 - k_1 z_2 = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 - c_2 \dot{z}_2 - c_1 \dot{z}_1 + (c_1 + c_2) \dot{z}_2 - k_2 d - k_1 z_1 + (k_1 + k_2) z_2 = 0 \quad (2)$$

其中: $d(x, t) = y(x, t) + w(x, t)$; $w(x, t)$ 为路面不平顺样本幅值。

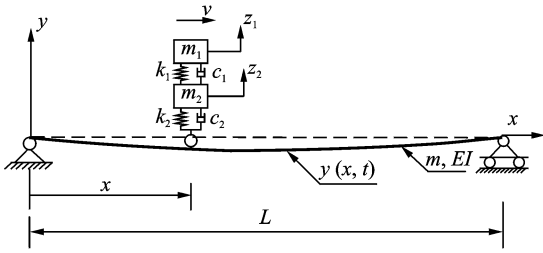


图 1 四分之一车-桥耦合振动模型

Fig. 1 A simple beam bridge subjected to two degree of freedom system

1.2 桥梁模型

将桥梁进行有限元离散, 桥梁振动方程为

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_b \mathbf{y} = -\mathbf{F}_b^{\text{int}} - \mathbf{F}_g \quad (3)$$

其中: $\mathbf{F}_b^{\text{int}}$ 为车辆振动作用于桥面的惯性荷载列向量; \mathbf{F}_g 为由车辆重力引起的各车轮作用于桥面板静荷载列向量; \mathbf{y} 为单元节点列向量。

为减少计算工作量, 引入模态综合叠加技术, 使用 Rayleigh 阻尼, 取 r 阶模态, 根据振型分解法, 式(3)可以改写为

$$\mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{X} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Omega} \mathbf{q} = -\mathbf{\Phi}^T \mathbf{F}_{b_v} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{I}, \mathbf{X}, \mathbf{\Omega}$ 为对角质量、阻尼及刚度矩阵; $\mathbf{\Phi}$ 为桥梁 r 阶模态向量矩阵, $\mathbf{\Phi} = [\boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2, \dots, \boldsymbol{\phi}_r]$; $\boldsymbol{\phi}_r$ 为第 r 阶频率对应各节点模态向量。

1.3 车桥耦合振动模型

根据车轮与桥梁接触处的位移协调和相互作用力平衡关系, 车桥耦合振动过程中, 作用于桥梁上的荷载可以表示为

$$\mathbf{F}_{b_v} = \mathbf{N}^T [(m_1 + m_2)g + k_2(z_2 - \mathbf{N}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{q} - w) + c_2[\dot{z}_2 - v\mathbf{N}_{,x}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{q} - \mathbf{N}\dot{\boldsymbol{\Phi}}\dot{\mathbf{q}} - \dot{w}]] \quad (5)$$

其中: \mathbf{N} 为插值函数; $\mathbf{N}_{,x}$ 为插值函数对 x 的导数。

将式(5)代入式(4)并进行模态正交分解, 可得

$$\mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{X} - \mathbf{\Phi}^T c_2 \mathbf{N}^T \mathbf{N} \boldsymbol{\Phi}) \dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{\Omega} - \mathbf{\Phi}^T \mathbf{N} c_2 v \cdot \mathbf{N}_{,x} \boldsymbol{\Phi} + \mathbf{\Phi}^T \mathbf{N}^T k_2 \mathbf{N} \boldsymbol{\Phi}) \mathbf{q} + c_2 \mathbf{\Phi}^T \mathbf{N}^T \dot{z}_2 + \mathbf{\Phi}^T \cdot$$

$$k_2 \mathbf{N}^T z_2 = -\mathbf{\Phi}^T \mathbf{N}^T [(m_1 + m_2)g - k_2 w - c_2 \dot{w}] \quad (6)$$

将式(1), (2)与式(6)联立建立车桥耦合振动方程

$$\mathbf{M}_{b_v} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{b_v} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{b_v} \mathbf{u} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_w \quad (7)$$

其中: $\mathbf{M}_{b_v}, \mathbf{C}_{b_v}, \mathbf{K}_{b_v}$ 为广义质量、阻尼及刚度矩阵; \mathbf{u} 为广义坐标列阵, $\mathbf{u} = \{q_1, q_2, \dots, q_r, z_1, z_2\}^T$ 。

式(7)中外荷载包括自重产生的确定性激励荷载 \mathbf{F}_g 和路面不平顺产生的随机激励荷载 \mathbf{F}_w , \mathbf{F}_g 引起的车桥耦合确定性振动响应 \mathbf{u}_{d1} , 可由 Newmark- β 法或 PIM 迭代求解; \mathbf{F}_w 引起的车桥耦合随机振动响应 \mathbf{u}_r , 可由虚拟激励法进行求解。

$$\begin{cases} \mathbf{F}_g = \begin{Bmatrix} -\mathbf{\Phi}^T \mathbf{N}^T (m_1 + m_2) g \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+2) \times 1} \\ \mathbf{F}_w = \begin{Bmatrix} \mathbf{\Phi}^T \mathbf{N}^T (k_2 w + c_2 \dot{w}) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+2) \times 1} \\ \mathbf{M}_{b_v} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{vs} \end{bmatrix}_{(r+2) \times (r+2)} \\ \mathbf{C}_{b_v} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} + \mathbf{Q} & \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 & \mathbf{C}_{vs} \end{bmatrix}_{(r+2) \times (r+2)} \\ \mathbf{K}_{b_v} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Omega} + \mathbf{S} & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{K}_{vs} \end{bmatrix}_{(r+2) \times (r+2)} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{M}_{vs}, \mathbf{C}_{vs}, \mathbf{K}_{vs}$ 分别为车辆模型的质量、阻尼及刚度矩阵; $\mathbf{Q}, \mathbf{S}, \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2$ 分别为车桥耦合振动引起的阻尼及刚度矩阵的修改系数矩阵。

1.4 车桥耦合虚拟激励模型

由式(8)可知路面不平顺激励产生的随机荷载 \mathbf{F}_w , 包括路面不平顺位移项 $w(x)$ 、速度项 $\dot{w}(x)$ 。假设路面不平顺为均匀调制演变随机过程 $w(x) = g(x)r(x)$, $g(x)$ 确定性慢变调制函数, $r(x)$ 以 x 为自变量的零均值平稳随机过程。若车辆以速度 v 行驶 (x 为车辆行驶位置, $x = vt$), 路面激励由空间域转化到时间域 $w(t) = g(t)r(t)$, 则有 $\dot{w}(t) = g(t)\dot{r}(t)$, 则由式(8)可以将随机激励荷载写成

$$\mathbf{F}_w(t) = \mathbf{T}_0 g(t)r(t) + \mathbf{T}_1(t)g(t)\dot{r}(t) = \sum_{i=0}^1 \mathbf{T}_i(t)g(t)R_i(t) \quad (9)$$

其中: $\mathbf{T}_0 = \begin{Bmatrix} \mathbf{\Phi}^T \mathbf{N}^T k_2 \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+2) \times 1}$; $\mathbf{T}_1 = \begin{Bmatrix} \mathbf{\Phi}^T \mathbf{N}^T c_2 \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(r+2) \times 1}$; $R_0(t) = r(t)$; $R_1(t) = \dot{r}(t)$ 。

虚拟激励法适用于求解随机激励作用下时变系统, 由式(9)可知, 路面不平顺激励引起的随机荷载 \mathbf{F}_w 中包含了路面不平顺时间序列的竖向位移项和

速度项。根据式(9)可构造虚拟激励荷载

$$\tilde{\mathbf{F}}_w(\omega, t) = (\mathbf{T}_0(t) + i\omega\mathbf{T}_1(t))g(t)\sqrt{S_{rr}(\omega)}e^{i\omega t} \quad (10)$$

其中: $S_{rr}(\omega)$ 为频域下路面不平顺功率谱密度。

则式(10)的虚拟激励荷载作用下车桥耦合振动虚拟响应必为

$$\tilde{\mathbf{u}}_{ir}(\omega, t) = \mathbf{I}(\omega, t)\sqrt{S_{rr}(\omega)} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{I}(\omega, t) = \int_0^t \mathbf{H}(t-\tau, \tau)(\mathbf{T}_0(\tau) + i\omega\mathbf{T}_1(\tau))g(\tau) \cdot e^{i\omega\tau} d\tau$; $\mathbf{H}(t-\tau, \tau)$ 为脉冲响应矩阵。

对式(11)求响应功率谱密度为

$$\mathbf{S}_{u_{ir}u_{ir}}(\omega, t) = \tilde{\mathbf{u}}_{ir}^*(\omega, t)\tilde{\mathbf{u}}_{ir}^\top(\omega, t) \quad (12)$$

其中: $\tilde{\mathbf{u}}_{ir}^*(\omega, t)$ 为虚拟响应的共轭矩阵; $\tilde{\mathbf{u}}_{ir}^\top(\omega, t)$ 为虚拟响应的转置矩阵。

由位移功率谱密度与加速度功率谱密度的转换关系可得系统加速度功率谱密度矩阵为

$$\mathbf{S}_{\ddot{u}_{ir}\ddot{u}_{ir}}(\omega, t) = (\omega)^4[\mathbf{S}_{u_{ir}u_{ir}}(\omega, t)] \quad (13)$$

2 路面不平顺谱激励模型

当车辆以一定速度 v 通过,根据时间频率 f 与空间频率 n 的关系 $f=vn$,将空间频率(n_1, n_2)内的路面位移谱密度 $G_q(n)$ 转换为时间频率(f_1, f_2)内的路面位移谱密度 $G_q(f)$,有

$$G_q(f) = G_q(n_0)n_0^2v/f^2 \quad (14)$$

由时间频率 f 与圆频率 ω 的关系 $\omega=f/2\pi$,时间频域内的功率谱密度函数可转化成圆频率域内的功率谱密度函数

$$S_{rr}(\omega) = 2\pi G_q(n_0)n_0^2v/\omega^2 \quad (15)$$

各国规范及学者对路面位移谱密度函数 $G_q(n)$ 有不同表达式及分类标准。

2.1 GB 7031 谱

国内学者^[11]研究车路耦合引起的车辆振动或对路面的振动响应,采用GB 7031-05^[10]建议路面功率谱表达式(以下简称GB7031谱)为

$$G_q(n) = G_q(n_0) |n/n_0|^{-\omega} \quad (16)$$

其中: $n_0=0.1\text{ m}^{-1}$,为空间参考频率; $G_q(n_0)$ 空间频率为 n_0 时路面功率谱密度,与路面等级有关,分A~F级(常用路面等级为A~D级,对应参数分别取 $G_{qA}(n_0)=16\times 10^{-6}$, $G_{qB}(n_0)=64\times 10^{-6}$, $G_{qC}(n_0)=256\times 10^{-6}$, $G_{qD}(n_0)=1\ 024\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{m}^{-1}$); ω 为频率指数,决定路面谱的频率结构,一般取 $\omega=2$; n 表示有效频带中某一空间频率,其带宽为($n_1,$

n_2), n_1 和 n_2 为有效频带的上限和下限,频带宽需包括路面不平顺引起车辆振动的主要固有频率。

2.2 Wang 1993 谱

美国各学者研究路面不平顺激励对桥梁的冲击效应影响^[5],均采用Wangl等^[6]1993的路面不平度功率谱密度表达式(以下简称Wang 1993谱)

$$S(\omega) = A_r(\omega/\omega_0)^{-\omega} \quad (17)$$

其中: $S(\omega)$ 为功率谱密度; ω 为空间圆频率; ω_0 为参考空间频率,取 $1/2\pi$; ω 为双对数谱密度曲线斜率,决定路面功率谱密度频率结构,简化计算可以取2; A_r 为路面不平度系数,分4个等级, $A_{r1}=5\times 10^{-6}$, $A_{r2}=20\times 10^{-6}$, $A_{r3}=80\times 10^{-6}$, $A_{r4}=260\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{m}^{-1}$ 分别对应平顺、良好、一般、不平顺4种路面状况。

2.3 ISO 1972 谱

1972年国际标准协会采纳英国MIRA推荐以功率谱进行道路分类的标准ISO SC2/WG4(以下简称ISO 1972谱)。该标准将路面不平顺功率谱 $S_q(n_0)$ 用分段函数^[18]表示

$$\begin{cases} S_q(n) = S_q(n_0)(n/n_0)^{-\omega_1} & (n \leq n_0) \\ S_q(n) = S_q(n_0)(n/n_0)^{-\omega_2} & (n \geq n_0) \end{cases} \quad (18)$$

其中: n 为空间频率,单位为 m^{-1} ; n_0 为标准空间频率, $n_0=1/2\pi=0.16\text{ m}^{-1}$,它是路面谱低频和低频范围的分界; ω_1, ω_2 分别为低、高频两段频率指数; $S_q(n_0)$ 为标准空间频率 n_0 所对应的功率谱密度,表示路面不平的程度。

ISO SC2/WG4标准将道路分为5类:A极好、B好、C一般、D坏、E极坏,对应 $S_q(n_0)$ 的几何平均值分别为(4, 16, 64, 256, 1024) $\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{m}^{-1}$, ω_1 和 ω_2 分别取2和1.5。

结合各国规范及学者提出的路面谱表达式及文献^[19]的实测路面不平顺资料,不同等级路面谱的主要区别在于路面粗糙程度。文献^[19]指出,空间频率趋于零时,路面输入振幅将趋向无穷大,这与实际不符,在极低频段内有些频率长波信号已低于最小空间频率,对于汽车悬架,极低波段信号成分没有研究意义。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,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(1~1.5 Hz)、座椅上乘客的频率(4~5 Hz)和车轮跳动频率(10~12 Hz)^[13]。

3 算例分析

以一辆 32 t 载重汽车为例,车辆以不同速度行驶在不同路面谱激励的简支梁桥上。简支梁桥结构动力特性参数为: $L=30\text{ m}$, $\rho=2\,600\text{ kg/m}^3$, $A=1.062\,2\text{ m}^2$, $I=0.509\,2\text{ m}^4$, $E=3.5\times 10^{10}\text{ N/m}^2$,车辆参数取 $m_1=32\,025\text{ kg}$, $m_2=2\,382\text{ kg}$, $k_1=1.9\times 10^5\text{ N/m}$, $c_1=5\times 10^3\text{ N}\cdot\text{s/m}$, $k_2=1.21\times 10^6\text{ N/m}$, $c_2=3\times 10^3\text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。运用 Beam4 梁单元建立桥梁结构有限元模型,提取前 10 阶自振频率及振型进行数值分析。

3.1 路面谱函数对桥梁竖向响应敏感性分析

路面不平顺激励可以看作高斯平稳随机过程,各国规范和学者均提出了不同的函数表达式,并根据路面粗糙度不同,对路面等级进行分类。目前国内高速公路以 GB7031 谱的 A,B,C 级为主,尤以 B 级最多,该等级路面与 Wang 1993 谱的良好等级路面状况接近。图 2,3 分别给出了车辆以 25 m/s 速度行驶在 GB7031 谱 B 级路面、ISO 1972 谱等级为“好”的路面及 Wang 1993 谱等级为“良好”路面的跨中位移均方根及加速度功率谱曲线。车辆未驶入跨中前,三种路面谱函数引起的桥梁跨中位移均方根响应接近;车辆驶过桥梁跨中,Wang 1993 谱引起的跨中位移均方根曲线减小的速率明显较 ISO 1972 谱小;GB7031 谱和 Wang 1993 谱引起的跨中位移均方根随车辆行驶位置的变化斜率相同,但 GB7031 谱引起的桥梁竖向均方根响应较 Wang 1993 谱大。三种谱函数作用下,加速度功率谱密度的共振频率峰值相同,均在 4 和 34 Hz 处出现共振峰值,且桥梁基频 4 Hz 处的功率谱峰值明显大于 34 Hz 频率峰值。路面不平顺引起的桥梁竖向加速度响应,主要由桥梁基频决定,路面不平顺谱函数形式对车桥耦合共振频率影响较小,但谱函数粗糙度 G_0 (路面等级) 直接影响车桥耦合振动响应大小。

3.2 路面谱函数对车速的敏感性分析

分别将空间频域内的 GB7031 谱函数、ISO 1972 谱函数及 Wang 1993 谱函数转化为时间频域内谱函数,选取“B 级”、“好”或“良好”等级路面,分析车速对桥跨不同点竖向位移均方根的影响。图 4 给出了跨中和 $L/4$ 位置的最大位移均方根随车速变化曲线。ISO 1972 谱函数对桥梁动位移响应随车速变化敏感性较其他两种谱函数明显;GB7031 谱

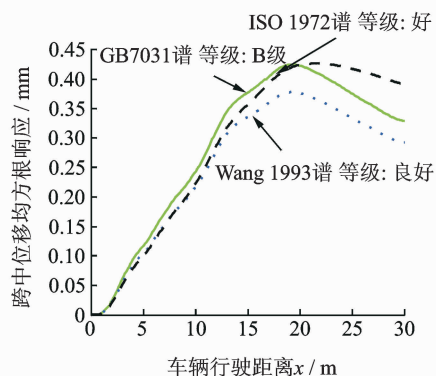


图 2 路面谱函数对跨中位移均方根影响

Fig. 2 The RMS curves of displacement at the bridge midpoint with different road roughness spectrum function

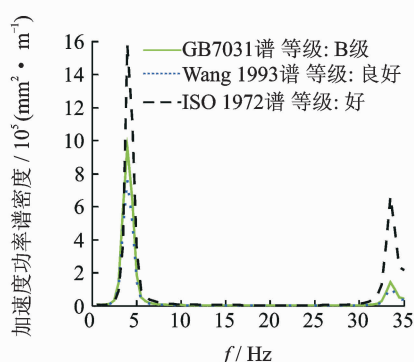


图 3 路面谱函数对跨中加速度功率谱影响

Fig. 3 The RMS curves of acceleration at the bridge midpoint with different road roughness spectrum function

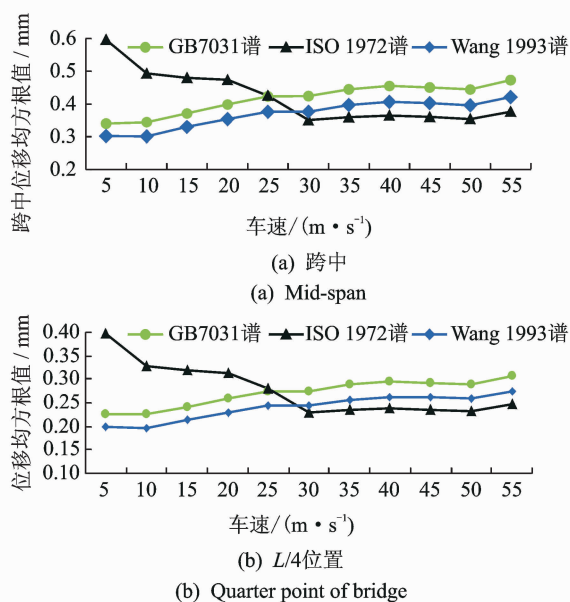


图 4 位移最大均方根随车速变化

Fig. 4 The maximum RMS of displacement based on different speed

和 Wang 1993 谱引起的桥梁竖向动位移响应随车速增加而增大,当车速位于 10~25 m/s 区间时,跨中及 L/4 位置竖向位移响应随车速增加较快;车速大于 30 m/s 时,跨中及 L/4 位置由 GB7031 谱和 Wang1993 谱引起的桥梁动位移响应随车速变化缓慢。ISO 1972 谱引起的跨中及 L/4 位置动位移均方根响应,当车速在 5~30 m/s 区间时,随车速增加处于高值且变化较小;车速达到 30 m/s 时竖向位移出现最小峰值;当车速大于 30 m/s 时,随车速增加,竖向动位移响应随车速增加变化缓慢。

3.3 路面谱函数对车辆振动敏感性分析

为研究路面谱函数对车辆振动响应的敏感性,设车辆以 25 m/s 速度匀速通过简支梁桥,车辆驶出桥跨后,忽略路面不平顺激励作用,但车辆仍以相同速度行驶在光滑地面上。图 5 和图 6 给出车辆悬架位移和车体加速度随车辆行驶位置变化曲线。从图 5 可以看出,车辆驶入桥跨后,悬架位移迅速达到最大值,车辆驶出桥跨后,悬架位移逐渐减小。从图 6 的车体加速度均方根响应曲线可以看出,车辆驶入桥跨后,车体加速度迅速增大,但并未立即达到最大值,当车辆行驶至桥跨 20 m 位置后,车体加速度达到最大值,车辆驶出桥跨后,悬架位移迅速减小,随着车辆在路面上继续向前行驶,车体加速度仍有最大和最小峰值出现。这说明车桥耦合共振对悬架位移影响远大于车路耦合共振,车辆在光滑路面上行驶,车体加速度未像悬架位移一样迅速回零。

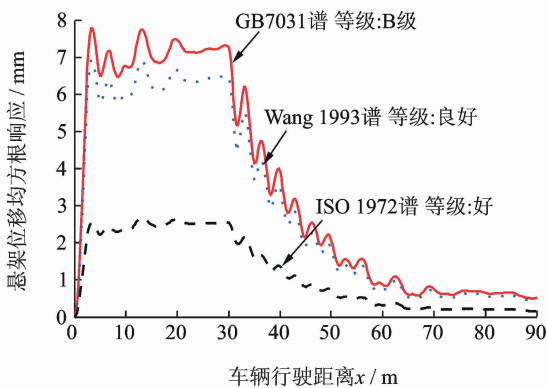


图 5 车辆悬架位移均方根响应

Fig. 5 The RMS of displacement of suspension

图 7 给出了三种路面谱与车桥耦合共同作用时,车辆悬架和车体的加速度功率谱密度曲线。对桥梁和车辆动力特性分析,该简支梁桥一阶竖向自振频率为 4.422 Hz,车辆自振频率为 1.65 Hz。三

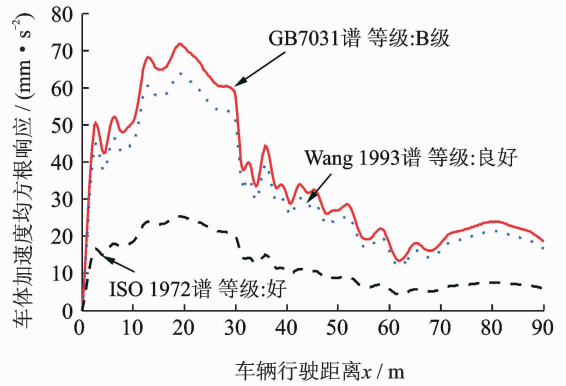
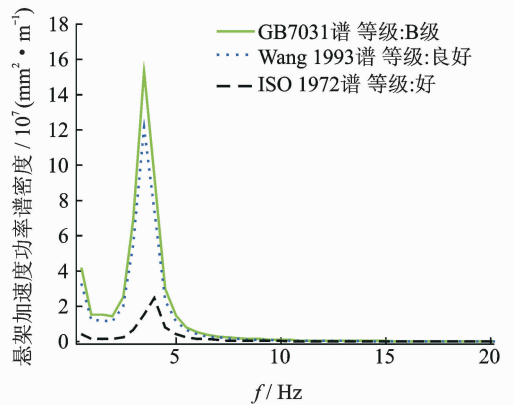


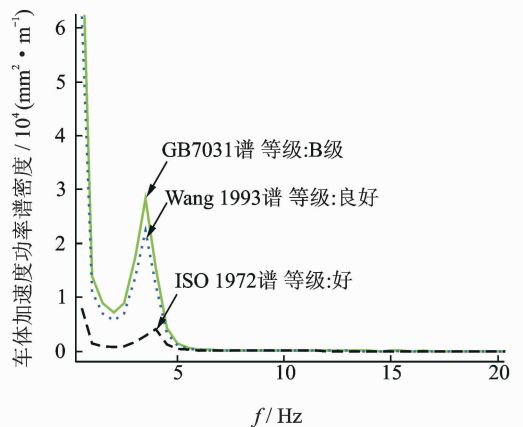
图 6 车体加速度均方根响应

Fig. 6 The RMS of acceleration of truck body



(a) 悬架加速度

(a) Suspension acceleration



(b) 车体加速度

(b) Truck body acceleration

图 7 车辆加速度功率谱密度

Fig. 7 The power spectrum of truck acceleration

种路面谱激励与车桥耦合的共振频率、悬架加速度和车体加速度均在简支梁桥一阶频率附近出现共振频率峰值。与车路耦合作用不同,路面不平顺激励与车桥耦合共振,主要由路面激励的低阶频率引起,桥梁基频对共振频率起决定作用。路面谱对桥梁和

车辆振动响应的影响,GB7031谱对车辆悬架位移和车体竖向加速度谱密度的影响均较Wang 1993谱大。ISO 1972谱引起的桥梁跨中竖向位移功率谱响应较大,车辆悬架竖向位移和车体竖向加速度功率谱最小。

图8给出了车辆悬架位移和车体加速度最大值随车速变化关系。GB7031谱和Wang 1993谱引起的车辆悬架位移和车体加速度随车速增加而逐渐增大。ISO 1972谱随车速变化缓慢,车速小于22 m/s时,悬架位移和车体加速度随着车速有增加趋势;车速大于26 m/s时,悬架位移随车速略有增大,但车体加速度随车速变化平缓。路面不平顺激励与车桥耦合共同作用,由ISO 1972谱引起的车辆振动响应对车速的敏感性较GB7031谱和Wang 1993谱弱。

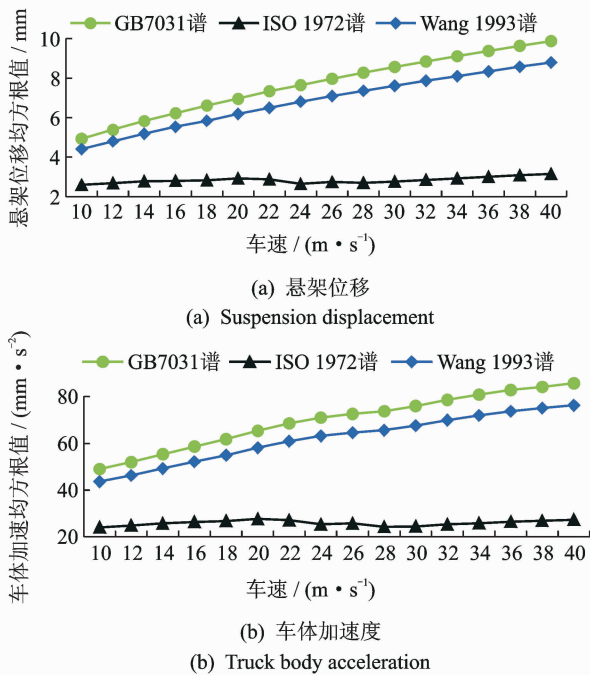


图8 车辆最大竖向动响应随车速变化

Fig.8 The maximum dynamic response of vehicle with different speed

4 结论

1) 三种路面谱函数引起的桥梁跨中竖向位移均方根曲线形状相似。

2) 三种路面谱函数引起的桥梁跨中、车体及悬架动响应的共振频率均出现在桥梁一阶频率处,ISO 1972谱引起的桥梁振动能量最大,而GB7031谱引起车辆振动能量最大。

3) 由ISO谱引起的车辆振动响应随车速变化较小,GB7031谱和Wang 1993谱引起的车辆和桥梁振动响应均随车速增加而增大。

4) 研究车桥耦合随机振动响应,路面不平顺输入激励可以采用GB7031谱和Wang 1993谱函数,两种路面谱函数计算结果接近。

参 考 文 献

- [1] Chatterjee P K, Datta T K, Surana C S. Vibration of continuous bridges under moving vehicles[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994,169(5):619-632.
- [2] Li Yingyan, O'Brien E, Gonzalez A. The development of a dynamic amplification estimator for bridge with good road profiles[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006,293:125-137.
- [3] 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.
- [4] Claude B, Bailey S F, Fafard M, et al. Dynamic behavior of deck slabs of concrete road bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004,9(2):137-146.
- [5] 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.
- [6] Wang T L, Huang D Z, Shahawy M, et al. Dynamic response of highway girder bridge[J]. Computers & Structures, 1993, 60(6):1021-1027.
- [7] 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 vibration[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(10):81-90. (in Chinese)
- [8] Dodds C J, Robson J D. The description of road surface roughness[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973,31(2):175-183.
- [9] 叶茂, 谭平, 周福霖, 等. 高架桥对地面作用力的随机振动分析[J]. 工程力学, 2009, 26(3):128-133.
Ye Mao, Tan Ping, Zhou Fulin, et al. The stochastic analysis of ground force induced by viaduct systems [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 128-133. (in Chinese)
- [10] 中国国家标准化管理委员会. GB7031-2005 机械振动

- 道路路面谱测量数据报告[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [11] 许海亮,袁勇,屈铁军,等.考虑路面不平整度的车路耦合振动模型的建立[J].振动与冲击,2014,33(19):152-156.
Xu Hailiang, Yuan Yong, Qu Tiejun, et al. Dynamic model for a vehicle-pavement coupled system considering pavement roughness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(19):152-156. (in Chinese)
- [12] 张立军,张天侠.车辆非匀速行驶时路面随机输入的时频研究[J].汽车工程,2005,27(6):710-714.
Zhang Lijun, Zhang Tianxia. A study on road random inputs to a vehicle with uneven speed in time and frequency domain[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(6):710-714. (in Chinese)
- [13] 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. Study on the road model with four-wheel non-stationary random excitations [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(10):868-872. (in Chinese)
- [14] 李朝峰,王得刚,刘杰,等.11自由度非线性车辆平顺性模型的研究及应用[J].东北大学学报:自然科学版,2009,30(6):857-860.
Li Chaofeng, Wang Degang, Liu Jie, et al. Study and application of 11-DOF nonlinear ride comfort model for vehicle[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009,30(6):857-860. (in Chinese)
- [15] 宋刚,吴志刚,林家浩.考虑时域硬约束的车辆主动悬架 H_∞ 控制[J].农业机械学报,2009,40(4):11-17.
Song Gang, Wu Zhigang, Lin Jiahao. H_∞ Control of active suspensions with time-domain hard constraints [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(4):11-17. (in Chinese)
- [16] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2000:173-180.
- [17] 钟阳,潘水强.中国与美国路面不平整状况的对比分析[J].广州大学学报:自然科学版,2004,3(5):448-451.
Zhong Yang, Pan Shuiqiang. Comparison of road roughness between China and the United States [J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2004,3(5):448-451. (in Chinese)
- [18] 唐意,陈燊.桥梁车振伪随机桥面不平度模拟[J].福州大学学报:自然科学版,2003,31(3):326-329.
Tang Yi, Chen Shen. Simulation of pseudo-random road profile in the study of vehicle-bridge vibration [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2003,31(3):326-329. (in Chinese)
- [19] Healey A J, Nathman E, Smith C C. An analytical and experimental study of automobile dynamics with random roadway inputs. Transactions [J]. Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, 1977, 99(4):284-292.



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《系杆拱桥吊杆节点足尺模型承载性能试验研究》(《桥梁建设》2013年第43卷第2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

