

车桥随机振动作用下的桥梁动态影响线研究^{*}

徐文涛, 张建波, 魏星

(郑州大学 力学与工程科学学院, 郑州 450001)

摘要: 将传统的静态影响线概念推广到动态影响线范围,研究了在车辆荷载和桥面随机不平度的作用下,简支梁桥和3跨弹性支承梁桥跨中挠度的动态影响线.基于虚拟激励法将桥面不平度转化为确定性的简谐激励,并采用精细积分法对车桥系统方程求解,获得了桥梁跨中挠度动态影响线的均值和标准差.基于 3σ 法则构造虚拟激励输出响应的确定值计算方法,获得了桥梁挠度动态影响线的确定性值域.最后通过算例分析了桥梁动态影响线的随机特性和车速与桥面不平度等级变化对桥梁动态影响线的影响,并研究了简支梁桥和弹性支承梁桥在随机振动作用下的动态影响线差异.

关键词: 桥面不平度; 车桥耦合; 虚拟激励法; 精细积分法; 动态影响线

中图分类号: U441.2 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.09.003

引 言

影响线以直观、准确和全面反映结构信息的特点在桥梁工程中得到了广泛的应用.以准静态荷载通过试验获得桥梁挠度或应变的影响线,建立合理的有限元模型,对其进行数值分析以评定桥梁的承载能力,是在役桥梁结构安全评定的一种重要方法^[1-3].传统影响线理论是基于单位移动荷载的基础上提出来的,未考虑车辆与桥梁之间的耦合随机动力扩大效应,实际中这种随机振动对桥梁具有较大的动态影响,设计时应予考虑.基于传统影响线理论,将动态影响线的概念定义为考虑移动荷载与结构的动态增大效应时,结构某量值随荷载位置变化而变化的函数曲线.相比传统的准静态影响线概念,应用动态影响线理论,能准确表达桥梁结构某量值在行驶车辆作用下的状态,实现理论分析与试验数据的密切结合,达到准确、快速评定桥梁实际承载能力的目的.大量的研究结果表明桥梁动态响应与桥面不平度有密切关系^[4],在桥面不平度作用下,行驶车辆与桥梁之间会产生较强的随机振动^[5-6],对桥面不平度进行合理的模拟,是获取桥梁动态影响线精确理论值的关键.相比将桥面不平度描述为多条曲线叠加的确定性分析方法^[5,7-10],基于随机理论在频域内模拟桥面不平度,从概率层面上进行分析更能体现车桥随机振动的本质特征.对于这种时变非平稳随机振动问题,分析、计算手段成为关键.尤其在桥梁工程中基于实测影响线的模型修正方法取得较大的发展后^[11],建立的桥梁有限元模型

* 收稿日期: 2015-04-25; 修订日期: 2015-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(11402235);教育部科学技术研究重点项目(212105)

作者简介: 徐文涛(1980—),男,河南人,副教授,博士,硕士生导师(E-mail: xukeyangzi@aliyun.com);

魏星(1981—),男,河南人,讲师,硕士(通讯作者. E-mail: 12900664@qq.com).

更加精细、复杂,这对计算的效率和精度提出了更高的要求.而传统的分析中大部分都是通过逐步积分法求解车桥振动方程的,如 Newmark 法^[5,7,10,12],逐步积分法本身的局限性限制了求解的效率和精度.基于上述,本文将传统静态影响线概念推广到动态影响线范围,基于虚拟激励法^[13]将桥面不平度引起的非平稳随机激励转化为一组确定性的简谐激励的叠加,基于严格的随机理论,大大简化了求解的过程.并构建该问题的精细积分格式^[14]求解车桥耦合系统的振动方程,分析了简支梁桥和 3 跨弹性支承梁桥在行驶车辆和桥面不平度共同作用下的随机响应,讨论了车速和桥面不平度等级变化对桥梁随机响应的影响.针对虚拟激励方法输出响应的统计特性,为适应工程领域确定值的需要,基于 3σ 法则构造虚拟激励输出响应的确定值计算方法,将桥梁的随机响应转化为确定性的值域,获得了桥梁跨中挠度的动态影响线值,为桥梁实测影响线和理论计算影响线的密切结合实现快速、精确地评定桥梁结构承载能力的研究提供了初步的理论基础.

1 车桥耦合振动方程

1.1 车桥模型

车辆选用 4 自由度 1/2 模型,车身假设为刚体,前后轮视为集中质量,并假设车轮与桥面始终保持接触,桥梁采用 Bernoulli-Euler 梁,如图 1 所示.其中: m_0 为车体质量; z_0 为车体的竖向位移; θ 为车体绕横向轴的转角; I_z 为车体转动惯矩(点头刚度); m_1, m_2 为车辆前后轮的质量; z_1, z_2 为前后轮的竖向位移; K_{s1}, K_{s2}, C_{s1} 和 C_{s2} 为前后悬挂装置的弹簧刚度和阻尼系数; K_{t1}, K_{t2}, C_{t1} 和 C_{t2} 为前后轮胎的刚度和阻尼系数; L_1, L_2 为车辆前后轴到车体重心的距离.

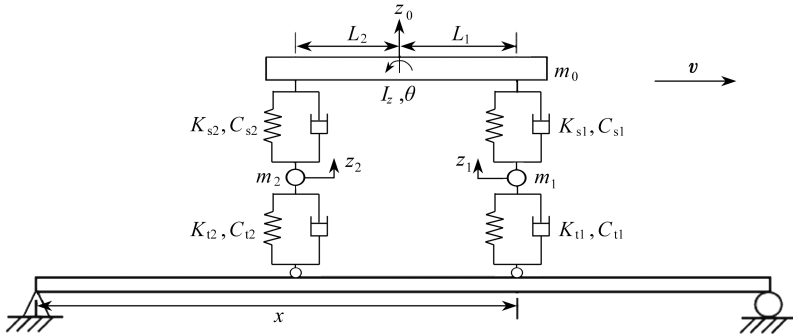


图 1 车辆与简支梁桥模型

Fig. 1 The model for a vehicle and a simply-supported bridge

1.2 车桥耦合振动方程

利用 d'Alembert(达朗贝尔)原理可以推导出车辆系统的振动方程和有限元离散状态下的桥梁振动方程,通过车轮与桥梁接触点处的位移协调条件和车桥相互作用力之间的平衡关系,将车辆与桥梁两个子系统的方程联系起来,并利用单元形函数 N_1, N_2 将车辆前后轮与桥梁接触点处的作用力和位移转换为节点载荷和节点位移,然后按有限元法的对号入座方法组装车桥系统的质量、阻尼、刚度和载荷矩阵,则车桥耦合系统的时变方程为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F_g + F_w, \quad (1)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} M_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_b \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_v & C_{vb}^T \\ C_{vb} & C_b' \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_v & K_{vb}^T \\ K_{vb} & K_b' \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_v \\ U_b \end{bmatrix},$$

$$C_b' = C_b + C_{t1}N_1N_1^T + C_{t2}N_2N_2^T, \quad K_b' = K_b + K_{t1}N_1N_1^T + K_{t2}N_2N_2^T,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{vb} &= [\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad C_{i1}N_1 \quad C_{i2}N_2], \quad \mathbf{K}_{vb} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad K_{i1}N_1 \quad K_{i2}N_2], \\ F_{w1} &= K_{i1}z_{w1} + C_{i1}\dot{z}_{w1}, \quad F_{w2} = K_{i2}z_{w2} + C_{i2}\dot{z}_{w2}, \\ F_{g1} &= \frac{L_2 m_0 g}{L_1 + L_2} + m_1 g, \quad F_{g2} = \frac{L_1 m_0 g}{L_1 + L_2} + m_2 g, \\ \mathbf{F}_g &= F_{g1} [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad N_1]^T + F_{g2} [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad N_2]^T, \\ \mathbf{F}_w &= F_{w1} [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad N_1]^T + F_{w2} [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad N_2]^T, \end{aligned}$$

式中, $\mathbf{M}, \mathbf{K}, \mathbf{C}, \mathbf{U}$ 分别为质量、刚度、阻尼和节点位移矩阵; 下标 v, b, vb 分别表示相应的车辆、桥梁和车桥耦合项; 桥梁阻尼矩阵 \mathbf{C}_b 假设为 Rayleigh 矩阵; N_1, N_2 为前后车轮与桥梁接触点处的单元形函数列向量; \mathbf{F}_g 是由车辆轴重引起的确定性激励; \mathbf{F}_w 是由桥面不平度引起的随机激励; z_{w1}, z_{w2} 为前后接触点处的桥面不平度位移。

2 车桥系统的非平稳随机振动分析

桥面不平度假设为 0 均值平稳随机激励, 采用随时间变化的车轮荷载位置指示变量 $g_i(t)$, 根据车辆行驶距离与行驶速度的关系 $x = vt$, 可将激励由空间域转换为时间域, 即^[15]

$$w(t) = g_i(t)q(t), \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

这样, 问题就转变为移动荷载作用下的非平稳随机振动, 其中 $g_i(t)$ 为调制函数, 当第 i 个车轮在桥上时 $g_i(t)$ 为 1, 否则 $g_i(t)$ 为 0, 如下式:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq (L/v), \\ 0, & \text{other.} \end{cases} \quad (3)$$

$q(t)$ 为以时间坐标 t 为自变量的 0 均值平稳 Gauss (高斯) 随机过程, 其功率谱密度函数 $G_{qq}(\omega)$ 采用国标 GB/T 7031—2005/ISO 8608:1995 (机械振动 道路路面谱测量数据报告), 拟合表达式:

$$G_{qq}(\omega) = 4\pi^2 G_{qq}(n_0) n_0^2 \frac{v}{\omega^2}, \quad (4)$$

式中, ω 为圆频率, rad/s; n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_{qq}(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度函数值, 称为路面不平度系数, m^3 ; v 是车辆行驶速度, km/h.

2.1 随机响应的均值

车桥耦合系统方程的解可表示为

$$\mathbf{Y}(t) = \int_0^t \mathbf{H}(t - \tau, \tau) (\mathbf{F}_g(\tau) + \mathbf{F}_w(\tau)) d\tau, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{H}(t - \tau, \tau)$ 为脉冲响应矩阵. 根据式(5), 系统响应的均值

$$\bar{\mathbf{Y}}(t) = E[\mathbf{Y}(t)] = \int_0^t \mathbf{H}(t - \tau, \tau) E[\mathbf{F}_g(\tau) + \mathbf{F}_w(\tau)] d\tau, \quad (6)$$

其中 $E[\mathbf{Y}(t)]$ 表示 $\mathbf{Y}(t)$ 的均值. 由于 $q(t)$ 是 0 均值 Gauss 过程, 则式(6)可化为

$$\bar{\mathbf{Y}}(t) = \int_0^t \mathbf{H}(t - \tau, \tau) E[\mathbf{F}_g(\tau)] d\tau. \quad (7)$$

由式(7)可知, 车桥系统响应的均值是由确定性载荷 \mathbf{F}_g 引起的.

2.2 构造虚拟激励

根据式(2), 车辆前后轮与桥面接触点处的桥面不平度可表示为

$$z_{w1} = g(t)q(t), \quad z_{w2} = g(t - \Delta t)q(t - \Delta t), \quad \Delta t = (L_1 + L_2)/v. \quad (8)$$

对 z_{w1}, z_{w2} 求导可得其速度项

$$\dot{z}_{w1} = g(t)\dot{q}(t), \quad \dot{z}_{w2} = g(t - \Delta t)\dot{q}(t - \Delta t). \quad (9)$$

由于 $g_i(t)$ 为慢变函数,故不对其进行求导,则车桥系统方程中的随机激励 F_w 中的 F_{w1} 和 F_{w2} 可表示为

$$\begin{cases} F_{w1} = K_{11}g(t)q(t) + C_{11}g(t)\dot{q}(t), \\ F_{w2} = K_{12}g(t - \Delta t)q(t - \Delta t) + C_{12}g(t - \Delta t)\dot{q}(t - \Delta t). \end{cases} \quad (10)$$

可将随机激励 F_w 改写为

$$F_w = [N_{k1} \quad N_{k2}]G(t)Q(t) + [N_{c1} \quad N_{c2}]G(t)\dot{Q}(t), \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} N_{k1} &= K_{11}[0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad N_1]^T, \quad N_{c1} = C_{11}[0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad N_1]^T, \\ N_{k2} &= K_{12}[0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad N_2]^T, \quad N_{c2} = C_{12}[0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad N_2]^T, \\ G(t) &= \text{diag}[g(t), g(t - \Delta t)], \quad Q(t) = [q(t) \quad q(t - \Delta t)]^T. \end{aligned}$$

根据随机振动理论,桥面不平度及其一阶导数的自功率谱和互功率谱关系如下:

$$G_{qq}(\omega) = -G_{\dot{q}\dot{q}}(\omega) = i\omega G_{q\dot{q}}(\omega), \quad G_{\dot{q}\dot{q}}(\omega) = \omega^2 G_{qq}(\omega), \quad (12)$$

式中 i 表示虚数.根据 Wiener-Khintchine(维纳-辛钦)关系可得

$$\begin{aligned} E[\{Q(\tau_1)\}\{Q(\tau_2)\}^T] &= E\begin{bmatrix} q(t_1)q(t_2) & q(t_1)q(t_2 - \Delta t) \\ q(t_1 - \Delta t)q(t_2) & q(t_1 - \Delta t)q(t_2 - \Delta t) \end{bmatrix} = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \begin{bmatrix} 1 & e^{i\omega(-\Delta t)} \\ e^{i\omega\Delta t} & 1 \end{bmatrix} e^{i\omega\tau} G_{qq}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} V^* R_0 V^T e^{i\omega\tau} G_{qq}(\omega) d\omega, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 V^* 是 V 的复共轭矩阵,

$$V = \text{diag}[1, e^{-i\omega\Delta t}], \quad R_0 = a_0 a_0^T, \quad a_0 = [1 \quad 1]^T.$$

车桥系统响应的方差矩阵为

$$\begin{aligned} R_{YY}(t) &= E[(Y - \bar{Y})(Y - \bar{Y})^T] = \\ &= \int_0^t \int_0^t H(t - \tau_1, \tau_1) E[F_w(\tau_1)F_w(\tau_2)] H^T(t - \tau_2, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \end{aligned} \quad (14)$$

联立式(11)~(13)并代入式(14),系统响应的方差矩阵 $R_{YY}(t)$ 可化为

$$R_{YY}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{YY}(\omega, t) d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} I^*(\omega, t) I^T(\omega, t) G_{qq}(\omega) d\omega, \quad (15)$$

$$I(\omega, t) = \int_0^t H(t - \tau, \tau) [N_{k1} + i\omega N_{c1} \quad N_{k2} + i\omega N_{c2}] G(t) V a_0 e^{i\omega\tau} d\tau. \quad (16)$$

根据式(15),构造如下虚拟激励:

$$\tilde{F}_w(\omega, t) = [N_{k1} + i\omega N_{c1} \quad N_{k2} + i\omega N_{c2}] G(t) V a_0 \sqrt{G_{qq}(\omega)} e^{i\omega t}. \quad (17)$$

则其引起的响应为

$$\tilde{Y}(\omega, t) = I(\omega, t) \sqrt{G_{qq}(\omega)}. \quad (18)$$

3 车桥时变系统方程求解

将车桥耦合系统方程改写,可得车桥耦合系统的时不变方程:

$$M'\ddot{U} + C'\dot{U} + K'U = F_g + \tilde{F}_w + F_z, \quad (19)$$

其中

$$M' = \begin{bmatrix} M_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_b \end{bmatrix}, \quad C' = \begin{bmatrix} C_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_b \end{bmatrix}, \quad K' = \begin{bmatrix} K_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_b \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_v \\ U_b \end{bmatrix},$$

$$F_z = F_{z1}[0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad N_1]^T + F_{z2}[0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad N_2]^T,$$

$$F_{z1} = K_{t1}z_{b1} + C_{t1}\dot{z}_{b1}, F_{z2} = K_{t2}z_{b2} + C_{t2}\dot{z}_{b2}.$$

由式(19)可知,车桥系统时不变系统的激励为车辆轴重引起的确定性激励 F_g ,由桥面不平度转化的虚拟激励 \tilde{F}_w ,桥面位移引起的时变激励 F_z .

对于时变激励 F_z 中车轮与桥梁接触点的速度和位移项,通过节点加速度和单元形函数可得.假设 t_k 时刻,车轮在第 n 个单元,且此时节点加速度已知,为 a_n^k, a_{n+1}^k .对加速度进行时间线性插值分析计算,可得车轮移动到任一时刻 $t_k + \tau$ ($0 < \tau < \Delta t$) 时的节点加速度为

$$a_n = a_n^k + \frac{(a_n^{k+1} - a_n^k)}{\Delta t} \tau, a_{n+1} = a_{n+1}^k + \frac{(a_{n+1}^{k+1} - a_{n+1}^k)}{\Delta t} \tau. \quad (20)$$

将方程(19)写成状态空间的形式

$$\dot{V} = HV + r_1(t) + r_2(t) + r_3(t), \quad (21)$$

式中 H 为 Hamilton (哈密顿) 矩阵,与式(5)中的脉冲响应矩阵 $H(t - \tau, \tau)$ 不同,

$$H = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ B & G \end{bmatrix}, B = -(M')^{-1}K', G = -(M')^{-1}C', V = \begin{Bmatrix} U \\ \dot{U} \end{Bmatrix},$$

$$r_1(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ (M')^{-1}F_g \end{Bmatrix}, r_2(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ (M')^{-1}\tilde{F}_w \end{Bmatrix}, r_3(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ (M')^{-1}F_z \end{Bmatrix}.$$

由线性系统的叠加原理可知,对于不同性质的激励,方程可以分开求解.采用精细积分法分别求得确定性激励下桥梁跨中挠度响应的均值 $Y_g(t)$ 和虚拟激励下桥梁跨中挠度响应 $\tilde{Y}_w(\omega_i, t)$,进而可求出响应 $\tilde{Y}_w(\omega_i, t)$ 的功率谱 $S_Y(\omega_i, t)$ 和标准差 $\sigma_Y(t)$:

$$S_Y(\omega_i, t) = \tilde{Y}_w^*(\omega_i, t) \tilde{Y}_w(\omega_i, t), \sigma_Y(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^m S_Y(\omega_i, t) \Delta \omega}. \quad (22)$$

桥面不平度中 $q(t)$ 是平稳 Gauss 随机过程,由概率理论知,在线性运算下随机过程的 Gauss 性质不变,所以桥梁跨中的挠度响应也是 Gauss 型随机变量, 3σ 法则是适用的,将均值 $Y_g(t)$ 加减 3 倍标准差 $\sigma_Y(t)$ 可得桥梁跨中挠度的实际响应值域.

4 算例分析

车辆和桥梁模型如图 1 和图 2 所示.为了与实际工程相符合,3 跨弹性支承梁桥的中跨与边跨设置为不等长度,模型参数如表 1 所示.在桥梁建设中应用较广泛的是橡胶支座,对桥梁支承有着较大的弹性效应,因此将其模拟为弹性支座,其刚度取值为 $K_i = EI\pi^3 / (0.25L_i^3)$ ($i = 1, 2$)^[16].车辆选用的是货车模型,车辆行车速度 v 设置为 40, 60, 80, 100 km/h.我国高等路面不平度功率谱基本在 A, B, C, 3 个等级范围内,路面不平度等级从 A 到 C 逐渐提高,其中 B, C 级占的比重较大,因此选用 A, B, C, 3 个等级进行分析,时间频率范围 0.3 ~ 30 Hz,频率增量设置为 0.3 Hz.基于 MATLAB 软件对算例进行了编程求解.

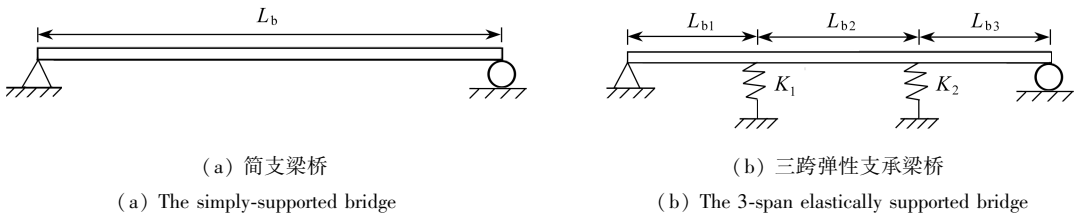


图 2 桥梁模型

Fig. 2 The models for the bridges

表 1 车桥模型参数

Table 1 The parameters of the vehicle and bridge

vehicle parameters			
m_0 / kg	24 790	$C_{s2} / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1.96×10^6
$I_z / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.258×10^6	m_1 / kg	4 330
L_1 / m	1.838	m_2 / kg	4 330
L_2 / m	1.787	$K_{11} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4.28×10^6
$K_{s1} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.54×10^6	$K_{12} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4.28×10^6
$K_{s2} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.54×10^6	$C_{11} / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	9.8×10^5
$C_{s1} / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1.96×10^6	$C_{12} / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	9.8×10^5
simply-supported bridge parameters		3-span elastically supported bridge parameters	
L_b / m	40	L_{b1} / m	30
$EI / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$	1.28×10^{11}	L_{b2} / m	40
$m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	12 000	L_{b3} / m	30
		$EI / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$	1.28×10^{11}
		$m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	12 000

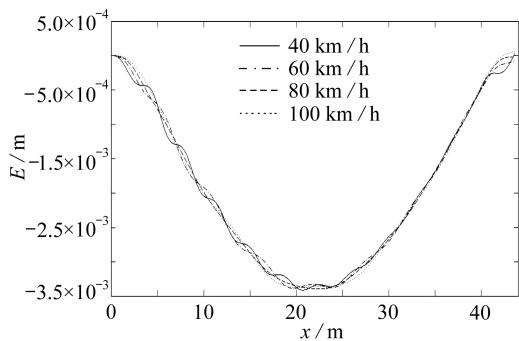
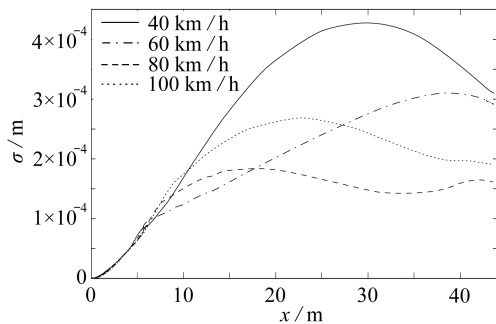
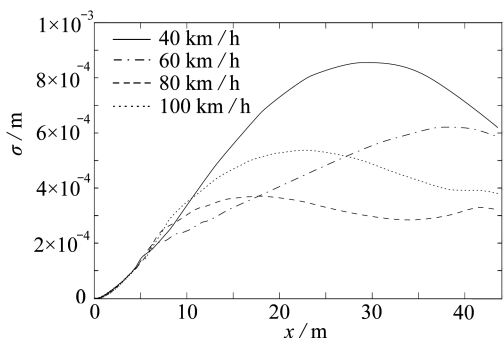
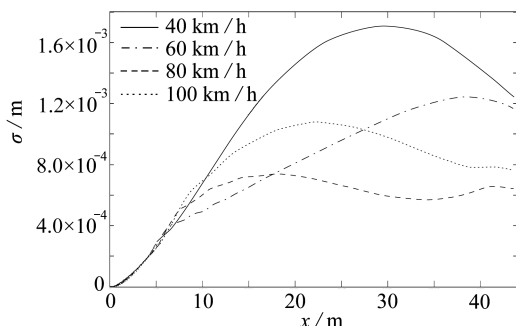
(a) 均值
(a) Mean values(b) A 级路面不平度
(b) Bridge deck roughnesses of grade A(c) B 级路面不平度
(c) Bridge deck roughnesses of grade B(d) C 级路面不平度
(d) Bridge deck roughnesses of grade C

图 3 简支梁桥跨中挠度动态影响线的均值和标准差

Fig. 3 Mean values and standard deviations of the dynamic deflection influence line at the span center of the simply-supported bridge

4.1 简支梁桥跨中挠度的动态影响线

由图 3(a) 可知, 简支梁桥跨中挠度响应的均值大小与车速的关系不大, 但车速变化对均

值曲线的平滑性有较大的影响,这是因为车速变化会影响车桥之间的耦合振动作用.由图 3 (b)~(d)可知,挠度响应的标准差受车速变化的影响很大,但并不随着车速的增大而线性增加,在车速为 40 km/h 时,标准差值最大,这是因为相比其它车速,此时车辆对桥梁随机激励的频率与桥梁的固有频率更加相近.比较图 3(b)~(d),可以看出,在相同速度时,随着桥面不平度等级从 A 到 C 的提高,尽管挠度响应标准差曲线的形状相似,但其值成倍增加.

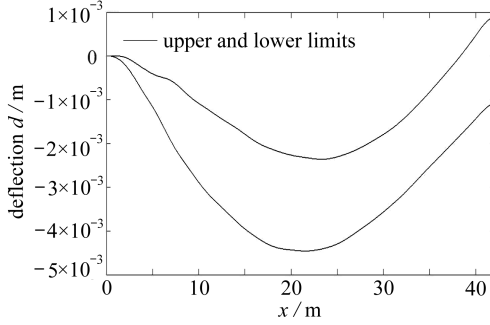
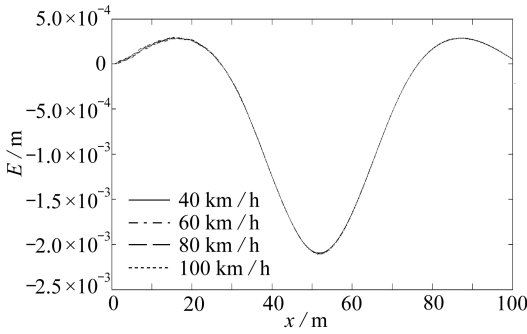
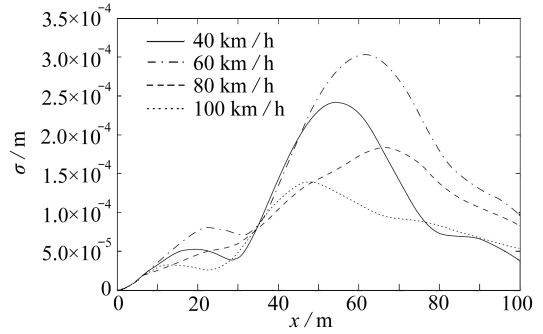


图 4 简支梁桥跨中挠度动态影响线值域

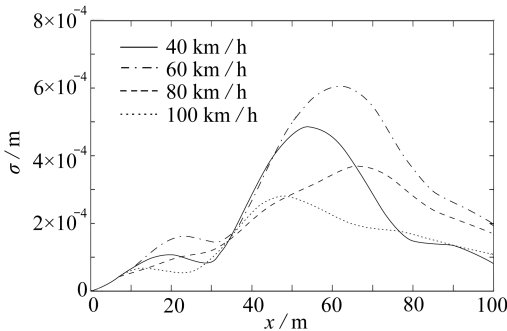
Fig. 4 The value range of the dynamic deflection influence line at the span center of the simply-supported bridge



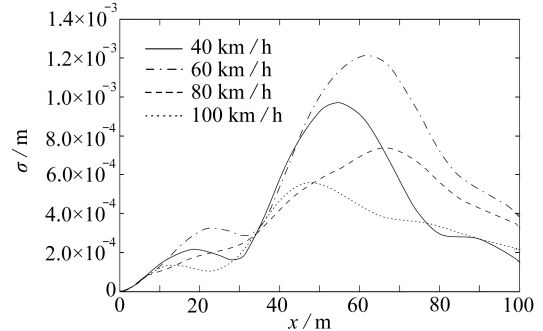
(a) 均值
(a) Mean values



(b) A 级路面不平度
(b) Bridge deck roughnesses of grade A



(c) B 级路面不平度
(c) Bridge deck roughnesses of grade B



(d) C 级路面不平度
(d) Bridge deck roughnesses of grade C

图 5 三跨弹性支承梁桥跨中挠度动态影响线的均值和标准差

Fig. 5 Mean values and standard deviations of the dynamic deflection influence line at the span center of the 3-span elastically supported bridge

根据 3σ 法则,将简支梁桥挠度响应的均值加减 3 倍标准差,可得桥梁跨中挠度的动态影响线值域,如图 4 所示,此时车速为 80 km/h,桥面不平度为 B 级.对于其它车速和桥面不平度

等级作用下的动态影响线值域,结合图 3 可以推出.可以看出,桥梁跨中挠度动态影响线的值域很广,具有很强的随机性,通过将桥面不平度模拟为几条曲线的叠加而求解出的桥梁挠度影响线或试验获得的桥梁挠度影响线只是其中的特例.

4.2 三跨弹性支承梁桥跨中挠度的动态影响线

与图 3(a)相比,图 5(a)中 3 跨弹性支承梁桥挠度响应的均值曲线几乎重合,其曲线也更加平滑,这是因为弹性支承减小了车桥之间的动态相互作用.近些年来,橡胶支座在桥梁建设中应用广泛,对桥梁支承有较大的弹性效应,因此,合理的选择橡胶支座可以有效降低车辆对桥梁的冲击作用.由图 5(b)~(d)可知,车速与桥面不平度等级变化对弹性支承梁桥挠度响应标准差的影响很大,与简支梁桥受车速影响的规律不同,弹性支承梁桥在车速为 60 km/h 时的随机响应值最大,这是因为弹性支承梁桥与简支梁桥的固有频率不同.

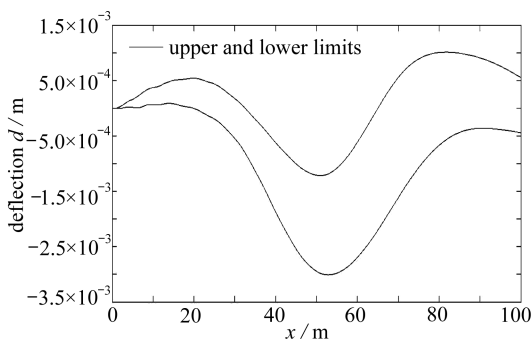


图 6 三跨弹性支承梁桥跨中挠度动态影响线的值域

Fig. 6 The value range of the dynamic deflection influence line at the span center of the 3-span elastically supported bridge

弹性支承梁桥跨中挠度动态影响线的值域如图 6 所示,此时车速为 80 km/h,桥面不平度为 B 级.与简支梁桥一样,3 跨弹性支承梁桥挠度的实际响应也具有很强的随机性.综合图 3~6 可知,车速对桥梁跨中挠度的随机响应影响很大,但无固定的规律,与桥梁的参数有关.桥面不平度对桥梁跨中挠度的随机响应影响显著,是桥梁产生随机振动的前提.因此,对桥梁进行定期养护,特别是对桥面平整度的维护,是延长桥梁使用寿命的关键.

5 结 论

本文基于虚拟激励法和精细积分法对车桥随机振动进行了数值分析,获得了简支梁桥和 3 跨弹性支承梁桥的挠度动态影响线,并研究了车速和桥面不平度等级变化对桥梁动态影响线的影响.结论如下:

- 1) 车速和桥面不平度等级变化对桥梁的随机响应的影响很大.随着桥面不平度等级的提高,桥梁随机响应的值域成倍增大.车速对桥梁随机响应的影响与车辆和桥梁参数密切相关.
- 2) 相比简支梁桥,弹性支承梁桥能很好地减轻车辆与桥梁之间的动力相互作用,对桥梁的动态响应有一定的影响.在桥梁结构分析中,不能轻易地将橡胶支座或其它弹性支座简化为刚性支座.
- 3) 桥梁挠度动态影响线的随机性很强,在桥梁承载能力分析中,可以选用动态影响线值域的最大影响线对桥梁结构进行安全评定.相比其它确定性的分析方法,基于随机振动的本质,从概率层面对其进行分析更加精确.

参考文献(References):

- [1] 唐光武, 廖敬波, 赵岩, 郭骞. 基于影响线的桥梁结构评定理论研究进展[J]. 公路交通科技, 2008(6): 39-43, 47. (TANG Guang-wu, LIAO Jing-bo, ZHAO Yan, GUO Qian. Research advance of assessment theory for bridge structure based on influence line[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2008(6): 39-43, 47. (in Chinese))
- [2] 李贤东. 基于准静态广义影响线的双曲拱桥承载力评定初步研究[D]. 硕士学位论文. 重庆: 重庆交通大学, 2009. (LI Xian-dong. Preliminary study on load rating of two-way curved arch bridge based on quasi-static generalized influence line [D]. Master Thesis. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [3] Strauss A, Wender R, Frangopol D M, Bergmeister K. Influence line-model correction approach for the assessment of engineering structures using novel monitoring techniques[J]. *Smart Structures and Systems*, 2012, 9(1): 1-20.
- [4] 施颖, 宣纪明, 宋一凡. 不平整度桥面下连续梁桥车桥耦合振动分析[J]. 桥梁建设, 2009(6): 15-18, 22. (SHI Ying, XUAN Ji-ming, SONG Yi-fan. Analysis of vehicle-bridge coupling vibration of continuous girder bridge under uneven deck[J]. *Bridge Construction*, 2009(6): 15-18, 22. (in Chinese))
- [5] 李武生, 王贵春. 基于桥面不平顺的车桥耦合振动分析[J]. 公路工程, 2014, 39(4): 98-102, 127. (LI Wu-sheng, WANG Gui-chun. The analysis on vehicle-bridge coupled vibration due to bridge pavement surface roughness[J]. *Highway Engineering*, 2014, 39(4): 98-102, 127. (in Chinese))
- [6] 叶茂, 张鹏, 傅继阳, 曹文斌, 任珉. 带弹性支撑多跨连续梁桥的车桥耦合演变随机振动[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 76-82. (YE Mao, ZHANG Peng, FU Ji-yang, CAO Wen-bin, REN Min. Coupled vehicle-bridge evolutionary random vibration for a multi-span continuous bridge with elastic bearings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(3): 76-82. (in Chinese))
- [7] 盛国刚, 李传习, 赵冰. 多个移动车辆作用下简支梁的动力响应分析[J]. 工程力学, 2006, 23(12): 154-158. (SHENG Guo-gang, LI Chuan-xi, ZHAO Bing. Dynamic analysis of a simply-supported beam subjected to moving vehicles[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(12): 154-158. (in Chinese))
- [8] 谭国金, 刘寒冰, 程永春, 王龙林, 刘斌. 基于车-桥耦合振动的简支梁桥冲击效应[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(1): 62-67. (TAN Guo-jin, LIU Han-bing, CHENG Yong-chun, WANG Long-lin, LIU Bin. Analysis of impact of vehicle to simply supported beam bridge based on vehicle-bridge coupled vibration[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(1): 62-67. (in Chinese))
- [9] 殷新锋, 蔡春盛, 刘杨. 基于面接触的车桥耦合振动研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3): 244-252. (YIN Xin-feng, CAI Chun-sheng, LIU Yang. Vehicle-bridge coupled vibration based on the patch contact[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(3): 244-252. (in Chinese))
- [10] 易晋生, 顾安邦, 王小松. 车桥耦合振动理论在桥面不平度研究中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(4): 560-563. (YI Jin-sheng, GU An-bang, WANG Xiao-song. Application of vehicle-bridge coupling vibrations theory in the study of bridge surface roughness [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2013, 32(4): 560-563. (in Chinese))
- [11] LIAO Jing-bo, TANG Guang-wu, MENG Li-bo, LIU Hui-geng, ZHANG You-jin. Finite element model updating based on field quasi-static generalized influence line and its bridge engineering

- application[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **31**: 348-353.
- [12] 李小珍, 朱艳, 强士中. 车桥系统空间非平稳随机分析[J]. 铁道学报, 2012, **34**(6): 88-94. (LI Xiao-zhen, ZHU Yan, QIANG Shi-zhong. Spatial train-bridge coupling system non-stationary stochastic responses analysis[J]. *Journal of China Railway Society*, 2012, **34**(6): 88-94. (in Chinese))
- [13] 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. (LIN Jia-hao, ZHANG Ya-hui. *Pseudo Excitation Method of Random Vibration*[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [14] 钟万勰. 结构动力方程的精细时程积分法[J]. 大连理工大学学报, 1994, **34**(2): 131-136. (ZHONG Wan-xie. On precise time-integration method for structural dynamics[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1994, **34**(2): 131-136. (in Chinese))
- [15] 赵岩, 张亚辉, 林家浩. 车辆随机振动功率谱分析的虚拟激励法概述[J]. 应用数学和力学, 2013, **34**(2): 107-117. (ZHAO Yan, ZHANG Ya-hui, LIN Jia-hao. Summary on the pseudo-excitation method for vehicle random vibration PSD analysis[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, **34**(2): 107-117. (in Chinese))
- [16] 叶茂, 谭平, 任珉, 周福霖, 王道远. 中间带弹性支承各种边界条件连续梁模态分析[J]. 工程力学, 2010, **27**(9): 80-85. (YE Mao, TAN Ping, REN Min, ZHOU Fu-lin, WANG Dao-yuan. Modal analysis of multi-span beams with intermediate flexible constraints and different boundary conditions[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, **27**(9): 80-85. (in Chinese))

Dynamic Deflection Influence Lines of Bridges Subjected to Vehicle-Bridge Random Vibration

XU Wen-tao, ZHANG Jian-bo, WEI Xing

(School of Mechanics & Engineering Science, Zhengzhou University,
Zhengzhou 450001, P.R.China)

Abstract: The concept of traditional static influence lines was extended to the dynamic field, and the dynamic deflection influence lines at the span centers of a simply-supported bridge and a 3-span elastically supported bridge were studied in view of the interaction between the bridge random deck roughness and the vehicle. To obtain the mean values and standard deviations of the dynamic influence lines at the bridge span centers, the deterministic harmonic excitations were derived from the bridge deck roughnesses with the pseudo-excitation method, and the equation for the vehicle-bridge system was solved with the precise integration method. Based on the 3σ method, the deterministic value ranges of the dynamic deflections were obtained. Finally, the random characteristics of the dynamic influence lines were analyzed through numerical examples, and the effects of vehicle velocity and bridge random deck roughness on the dynamic influence line were discussed. Then the difference of dynamic influence lines between the simply-supported bridge and the 3-span elastically supported bridge was discussed.

Key words: bridge deck roughness; vehicle-bridge interaction; pseudo-excitation method; precise integration method; dynamic influence line

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(11402235)