

文章编号:1674-2974(2016)01-0045-08

风与车流联合作用下在役桥行车舒适性研究^{*}

殷新锋[†], 丰锦铭, 杨小旺, 刘 扬

(长沙理工大学 桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 现有基于风-汽车-桥梁耦合振动的行车舒适性研究中, 较少考虑了车流随机性和路面等级退化因素, 致使分析成果具有一定局限性. 本文综合考虑了车流随机性和路面等级退化等因素, 运用一种新的车辆和路面等级退化模型分析大跨度桥梁的振动及行车舒适性. 建立一个包含座椅及车辆纵向振动的 24 自由度空间车辆模型; 基于考虑邻近车辆影响的改进 CA (Cellular Automaton-元胞自动基) 模型和路面退化模型, 通过桥梁和车辆相互作用力关系, 建立了风-车流-桥梁系统的耦合振动方程. 数值计算表明: 本文所提出的方法能够合理地模拟风-车流-桥梁系统的耦合振动, 且驾驶员座椅模型的各向振动对行车舒适性有显著影响.

关键词: 风-车流-桥梁耦合振动; 三维车辆模型; 路面退化; 行车舒适性

中图分类号: TU311.3; TU352.1

文献标识码: A

Ride Comfort of Existing Bridges under Combined Loads of Traffic and Wind

YIN Xin-feng[†], FENG Jin-ming, YANG Xiao-wang, LIU Yang

(Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Ministry of Education and Hunan Province, Changsha Univ of Science and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: The existing studies of ride comfort are based on wind-vehicle-bridge coupled vibration, which seldom consider the effects of both traffic random characters and road surface progressive deterioration, thus they cannot match very well for the real situation of the bridge under the random traffic loads. Based on wind-traffic-bridge system under random traffic loads, this paper studied the ride comforts taking into account the road surface progressive deterioration. We presented a three-dimensional vehicle model with 24 degrees-of-freedom (DOFs) including a three-dimensional suspension seat model and longitudinal vibration of the vehicle, and then introduced an improved CA model considering the influence of the next-nearest neighbor vehicle and a progressive deterioration model for road-roughness. The wind-traffic-bridge coupled equations were established by combining the motion equations of both the bridge and vehicles using the displacement relationship and interaction force relationship at the patch contact. The numerical simula-

^{*} 收稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108045), National Natural Science Foundation of China(51108045); 国家重点基础研究发展(973)计划项目(2015CB057700); 湖南省高校创新平台开放基金资助项目(13k051); 长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目; 长沙理工大学桥梁与隧道工程重点学科基金资助项目

作者简介: 殷新锋(1980-), 男, 安徽岳西人, 长沙理工大学副教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: yinxinfeng@163.com

tions show that the proposed method can rationally simulate the vibration of the wind-traffic-bridge coupled system; and the 3-D vibrations of the driver seat model can significantly affect the drive comforts.

Key words: wind-traffic-bridge coupled vibration; three-dimensional vehicle model; road surface progressive deterioration; ride comfort

行车舒适性问题的研究重点是车体振动,尤其是当汽车行驶在风环境下的大跨度桥梁上时,其振动更为明显.虽然车辆每次行驶在桥上的时间只有几分钟,但是这种短期的不适会造成司机严重的驾驶疲劳,可能会导致灾难性的交通事故.因此,在过去20年里,研究者们主要通过分析风-车-桥耦合系统的振动来研究行车舒适性,而现有风-车-桥梁耦合系统振动分析中,较少考虑了车流随机和路面等级退化因素,致使分析成果具有一定局限性^[1-3];且现有行车舒适性研究中常采用忽略座椅振动的整车振动模型,实际上这种忽略座椅振动的简化模型虽然大大降低了计算和模拟过程的复杂性,但却给计算结果精确性带来了误差,需要有待验证^[3].因此,本文提出了包括悬架座椅模型及车辆纵向振动的24自由度空间车辆模型.

以往的风-车-桥耦合振动的分析中,大多学者选择单个的三维车辆模型^[1-4],或者仅仅考虑一个确定的车列荷载^[5].近年来,虽少数研究者开始将研究重点转移到随机车流作用下桥梁振动响应分析,如韩万水,Chen等,但还未形成统一结论^[5-6],且都未考虑路面退化的影响因素.在考虑车流随机性的风-汽车-桥梁相互作用研究中,研究人员或将随机车流简化为多车辆分布假设模式或简化统计过程,对于大跨度桥梁而言,这样的简化不能准确预测实际车辆的动态性能^[6-7].最近,研究人员将CA模型运用到随机车流的模拟中,开发了一种考虑实际车流随机性的随机车流模型,并将其运用到风-车流-桥耦合振动中.

本文给出了一种考虑了前面邻近车辆及次近邻车辆相互影响的改进CA模型和路面等级退化模型.提出了风-车流-桥耦合振动系统中大跨度桥梁行车舒适性研究的新方法.建立了一个包括三维悬架座椅模型的空间车辆模型,给出了可考虑前面邻近车辆及次近邻车辆影响的改进CA模型.建立并求解了风-车流-桥耦合方程.数值模拟表明,本文提出的方法能合理地模拟风-车流-桥耦合系统和驾驶

员座位的各向振动,且能更加合理地研究行车舒适性.

1 风-车流-桥梁相互作用分析方法

1.1 风-车流-桥梁系统的三维模型

在风-车流-桥梁耦合系统间的相互作用研究中,大多数的车辆模型不考虑驾驶员座椅模型和车辆的纵向振动,然而模型中座椅振动和车辆纵向振动对行车舒适性研究有着不可忽略的影响^[1-3].

1.1.1 包含驾驶员座椅的车辆三维模型运动方程

在已有12自由度的车辆三维模型的基础上^[3]建立了一个包括驾驶员座椅振动和车辆的纵向振动的24自由度车辆模型(如图1和图2所示).自由度包括车身纵向位移 x_t ,垂直位移 z_t ,横向位移 y_t ,俯仰角 θ_t ,滚动角 ϕ_t 和偏转角 φ_t ,以及车辆的第1至第4轴纵向位移(x_a^1, x_a^2, x_a^3 和 x_a^4),垂直位移(z_a^1, z_a^2, z_a^3 和 z_a^4)和横向位移(y_a^1, y_a^2, y_a^3 和 y_a^4); $z_{su}(x_{su}, y_{su})$ 和 $z_{ss}(x_{ss}, y_{ss})$ 分别代表驾驶员座椅 m_{su} 和座椅悬架 m_{ss} 的垂直(纵向,横向)位移.基于文献[2-3],可知,对悬架弹性和阻尼力,可以写为:

$$F_{szi} = K_{szi} U_{szi} \quad (1)$$

$$F_{dszi} = C_{szi} \dot{U}_{szi}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

式中 U_{szi} 是悬架弹簧的竖向位移; K_{szi}, C_{szi} 分别是悬架弹簧竖向刚度及阻尼.悬架横向和纵向的弹性和阻尼力可以写成:

$$\begin{aligned} F_{syi} &= K_{syi} \cdot U_{syi} \\ F_{dsyi} &= C_{syi} \cdot \dot{U}_{syi} \\ F_{sxi} &= K_{sxi} \cdot U_{sxi} \\ F_{dsxi} &= C_{sxi} \cdot \dot{U}_{sxi} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 U_{syi}, U_{sxi} 分别是悬架弹簧的横/纵向位移; $K_{syi}, K_{sxi}, C_{syi}, C_{sxi}$ 分别是悬架弹簧横/纵向刚度及阻尼.

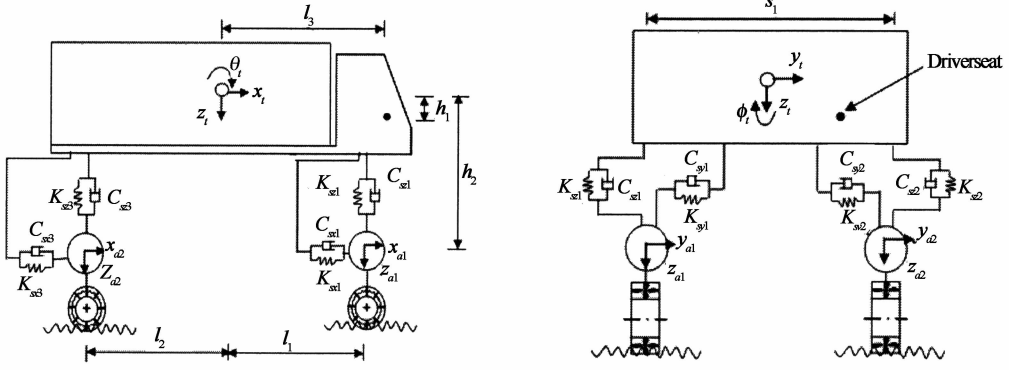


图 1 三维车辆模型
Fig. 1 A new full-scale vehicle model

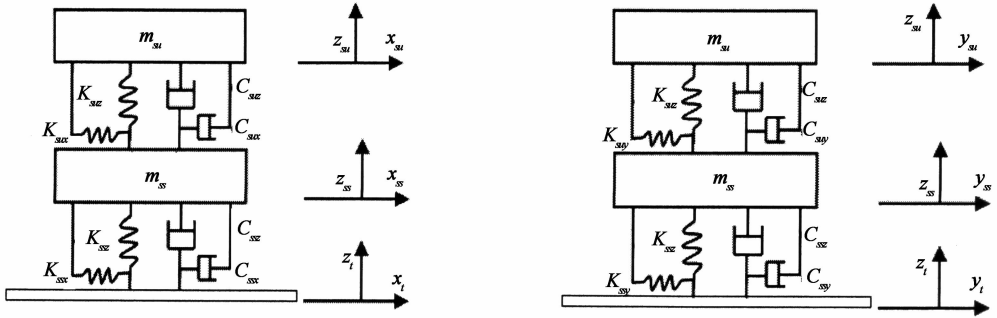


图 2 三维座椅模型
Fig. 2 The three-dimensional driver seat model

基于文献[2-3],整车的运动方程式根据拉格朗日公式可表示为:

$$m_t \ddot{z}_t + F_{sz1} + F_{sz2} + F_{sz3} + F_{sz4} + F_{sz1} + F_{dsz1} + F_{dsz2} + F_{dsz3} + F_{dsz4} = m_t g + F_{zrw} \quad (4a)$$

$$m_t \ddot{y}_t + F_{sy1} + F_{sy2} + F_{sy3} + F_{sy4} + F_{sy1} + F_{dsy1} + F_{dsy2} + F_{dsy3} + F_{dsy4} = F_{ytw} \quad (4b)$$

$$m_t \ddot{x}_t + F_{sx1} + F_{sx2} + F_{sx3} + F_{sx4} + F_{sx1} + F_{dsx1} + F_{dsx2} + F_{dsx3} + F_{dsx4} = F_{xrw} \quad (4c)$$

$$I_{xt} \ddot{\phi}_t + (s_1/2)(F_{sz1} - F_{sz2}) + (s_2/2)(F_{sz3} - F_{sz4}) + (s_1/2)(F_{dsz1} - F_{dsz2}) + (s_2/2)(F_{dsz3} - F_{dsz4}) = M_{xrw} \quad (4d)$$

$$I_{zt} \ddot{\theta}_t + l_1(F_{sz1} + F_{sz2}) - l_2(F_{sz3} + F_{sz4}) + l_1(F_{dsz1} + F_{dsz2}) - l_2(F_{dsz3} + F_{dsz4}) = M_{zrw} \quad (4e)$$

$$I_{yt} \ddot{\theta}_t + l_1(F_{sy1} + F_{sy2}) - l_2(F_{sy3} + F_{sy4}) + l_1(F_{dsy1} + F_{dsy2}) - l_2(F_{dsy3} + F_{dsy4}) = M_{ytw} \quad (4f)$$

$$m_{ai} \ddot{z}_{ai} - F_{szi} + F_{tzi} - F_{dszi} + F_{dtzi} = m_{ai} g, i = 1, 2, 3, 4 \quad (4g)$$

$$m_{ai} \ddot{y}_a^i - F_{dsy}^i - F_{sy}^i + F_y^i = 0, i = 1, 2, 3, 4 \quad (4h)$$

$$m_{ai} \ddot{x}_{ai} - F_{dsxi} - F_{sxi} + F_{xi} = 0, i = 1, 2, 3, 4 \quad (4i)$$

式中 m_t 和 m_{ai} 分别为车身的质量和第 i 个车轴的质量。

如图 2 所示,通常用 6 自由度的三维座椅模型来研究座椅的振动以及关于悬挂式座椅的运动方程:

$$m_{su} \ddot{z}_{su} = m_{su} g - K_{suZ}(z_{su} - z_{ss}) - C_{suZ}(z_{su} - z_{ss}) \quad (5a)$$

$$m_{ss} \ddot{z}_{ss} = m_{ss} g - K_{suZ}(z_{su} - z_{ss}) - C_{suZ}(z_{su} - z_{ss}) - K_{ssZ}(z_{ss} - z_t) - C_{ssZ}(z_{ss} - z_t) \quad (5b)$$

$$m_{su} \ddot{x}_{su} = K_{sulX}(x_{su} - x_{ss}) + C_{sulX}(\dot{x}_{su} - \dot{x}_{ss}) \quad (5c)$$

$$m_{ss} \ddot{x}_{ss} = K_{sulX}(x_{su} - x_{ss}) + C_{sulX}(\dot{x}_{su} - \dot{x}_{ss}) - K_{ssX}(x_{ss} - x_t) - C_{ssX}(\dot{x}_{ss} - \dot{x}_t) \quad (5d)$$

$$m_{su} \ddot{y}_{su} = K_{suy}(y_{su} - y_{ss}) + C_{suy}(\dot{y}_{su} - \dot{y}_{ss}) \quad (5e)$$

$$m_{ss} \ddot{y}_{ss} = K_{suy}(y_{su} - y_{ss}) + C_{suy}(\dot{y}_{su} - \dot{y}_{ss}) - K_{ssY}(y_{ss} - y_t) - C_{ssY}(\dot{y}_{ss} - \dot{y}_t) \quad (5f)$$

式中 $z_{su}(x_{su}, y_{su})$ 和 $z_{ss}(x_{ss}, y_{ss})$ 分别表示乘员质量 m_{su} 和座椅质量 m_{ss} 的垂直(纵向,横向)位移。而 $K_{sulX}, K_{suy}, K_{ssZ}$ 和 $C_{sulX}, C_{suy}, C_{suZ}$ 分别代表驾驶员座

椅垂直、纵向、横向刚度及阻尼,方程(5a)~(5f)可以以矩阵形式表示为:

$$[M_v]\{\dot{U}_v\} + [C_v]\{\dot{U}_v\} + [K_v]\{U_v\} = \{F_G\} + \{F_{v-b}\} + \{F_{vw}\} \quad (6)$$

式中 $[M_v]$, $[C_v]$ 和 $[K_v]$ 分别代表车辆的质量,阻尼和刚度矩阵; $\{U_v\}$ 代表车辆位移; $\{F_G\}$ 代表车辆的重力; $\{F_{v-b}\}$ 表示作用于路面的接触力; $\{F_{vw}\}$ 代表作用于车辆的风力.

1.1.2 车辆模型的准定常风力

风对车辆的准定常风力可表示为^[5-6,8-9]:

$$\begin{aligned} F_{xw} &= \frac{1}{2}\rho_a A U_R^2 C_D(\psi); F_{zw} = \frac{1}{2}\rho_a A U_R^2 C_L(\psi); \\ F_{yw} &= \frac{1}{2}\rho_a A U_R^2 C_S(\psi); M_{xw} = \frac{1}{2}\rho_a A h_v U_R^2 C_R(\psi); \\ M_{yw} &= \frac{1}{2}\rho_a A h_v U_R^2 C_P(\psi); M_{zw} = \frac{1}{2}\rho_a A h_v U_R^2 C_Y(\psi) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 F_{xw} , F_{yw} , F_{zw} , M_{xw} , M_{yw} 和 M_{zw} 分别代表作用于车辆上的牵引力、侧向力、升力、滚动力矩、俯仰力矩和偏转力矩; ρ_a 表示密度; C_D , C_S , C_L , C_R , C_P 和 C_Y 分别代表车辆的牵引力、侧向力、升力、滚动力矩、俯仰力矩和偏转力矩. A 是车辆的前部区域; h_v 是车辆的重心到路面的距离; U_R 是车辆的相对风速,用公式可表示为:

$$\begin{aligned} U_R^2 &= [(U + u(x, t)), \cos \beta + S]^2 + \\ & [(U + u(x, t)) \sin \beta]^2 \\ \tan \psi &= \frac{(U + u(x, t)) \sin \beta}{(U + u(x, t)) \cos \beta + S} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 S 代表车辆的行驶速度; U 和 $u(x, t)$ 分别代表车辆行驶过程中的平均风速和紊流风速; β 是车辆在行驶方向与风向之间的角度; ψ 的取值范围为 $0 \sim \pi$.

1.1.3 桥梁风力荷载的模态分析

桥梁纵向、横向和扭转运动用模态叠加法表达为:

$$m(x)(h)_0(x, t) + 2\xi_h \omega_h h_0(x, t) + \omega_h^2 h_0(x, t) = L_w^b(x, t) \quad (9a)$$

$$I(x)(\ddot{\alpha})_0(x, t) + 2\xi_a \omega_a \dot{\alpha}_\beta(x, t) + \omega_a^2 \alpha_b(x, t) = M_w^b(x, t) \quad (9b)$$

$$m(x)(\dot{p})_b(x, t) + 2\xi_p \omega_p \dot{p}_b(x, t) + \omega_p^2 p_b(x, t) = D_w^b(x, t) \quad (9c)$$

$$\begin{aligned} h_b(x, t) &= \sum_{i=1}^n h_i(x) \xi_i(t); p_b(x, t) = \\ & \sum_{i=1}^n p_i(x) \zeta_i(t); \alpha_b(x, t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) \gamma_i(t) \end{aligned} \quad (10)$$

式中 m_x 和 $I(x)$ 分别表示单元的广义质量和广义惯性矩; $h_i(x)$, $p_i(x)$ 和 $\alpha_i(x)$ 分别表示结构纵向、横向和扭转模态; $\xi_i(x)$, $\zeta_i(x)$ 和 $\gamma_i(x)$ 分别表示桥梁在广义坐标下纵向、横向和扭转的方向; ζ_b , ζ_p 和 ζ_a 是结构纵向、横向和扭转运动的阻尼比; ω_h , ω_p 和 ω_a 表示各向运动频率; n 为所考虑的桥梁运动模式的总数; L_w^b , D_w^b 和 M_w^b 为气动力.

式(9a)到(9c)写成矩阵形式为:

$$[M_b]\{\dot{U}_b\} + [C_b]\{\dot{U}_b\} + [K_b]\{U_b\} = \{F_{bw}\} \quad (11)$$

式中: $[M_b]$, $[C_b]$ 和 $[K_b]$ 分别为桥梁的质量,阻尼和刚度矩阵; $\{U_b\}$ 为桥梁所有自由度的位移矢量; $\{\dot{U}_b\}$ 和 $\{\ddot{U}_b\}$ 是 $\{U_b\}$ 对时间的一二阶导数; $\{F_{bw}\}$ 是作用在桥梁上的风荷载.

1.1.4 考虑邻近车辆影响的车流模拟

元胞自动机(CA)交通仿真模型可以模拟车辆间跟驶和换道,速度变化等车辆行驶情况,可真实模拟实际交通状况.本文采用了一种可考虑邻近车辆相互作用的改进CA模型来模拟交通流.在跟车模型中,大多数研究人员通常将车流中车辆间速度变化用下列方程表示^[9-10]:

$$\ddot{x}_n(t+T) = \lambda(\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n) \quad (12)$$

式中 T 是响应时间滞后值, λ 是敏感系数, \ddot{x}_n 是车辆的加速度, \dot{x}_n 是车辆的速度.考虑前面邻近车辆间的影响,方程(12)变为:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n &= \lambda_1 (\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n)_{t-T_1} + \\ & \lambda_2 (\dot{x}_{n+2} - \dot{x}_n)_{t-T_2} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 T_1 表示紧前车辆反应时间滞后值, T_2 表示次紧前车辆反应时间滞后值, λ_1 和 λ_2 是各自敏感性系数,取值范围都是 $0 \sim 1$.

根据式(13),假设最近和次邻近车辆的敏感度系数分别是 λ_1 和 λ_2 ,且 $\lambda_1 > \lambda_2$.车辆的加速度可表示为:

$$\ddot{x}_n(t+1) = \lambda(\Delta \dot{x}_{n+1}(t), \Delta \dot{x}_{n+2}(t-1)) \quad (14)$$

式中 $\bar{\lambda} = \lambda_1(\dot{x}_{n+1}(t) - \dot{x}_n(t)) + \lambda_2(\dot{x}_{n+2}(t-1) - \dot{x}_n(t-1))$,由式(14),可模拟车流间车辆的速度变化.

1.1.5 风-车流-桥梁耦合系统组成

利用位移关系和接触面作用力的相互关系,可以得到车桥耦合系统的运动方程如下:

$$\begin{bmatrix} M_b \\ M_v^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_b \\ U_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b + C_{b-b} & -C_{b-v} \\ -C_{v-b} & C_v^N + C_{v-v}^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b + K_{b-b} + K_{b-db} & -K_{b-db} \\ -K_{v-b} - K_{v-db} & K_v^N + K_{v-v}^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_b \\ U_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{b-r} + F_{b-cr} + F_{wv} \\ -F_{v-r} - F_{v-cr} + F_G^N + F_{bw} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

式中, M_v^N , C_v^N , 和 K_v^N 分别表示质量, 阻尼和刚度矩阵; C_{b-v}^N 和 K_{v-v}^N 分别为 N 辆车相互耦合作用导致的阻尼和刚度矩阵; C_{b-v} , C_{v-b} 和 K_{b-v} , K_{v-b} 分别表示由车辆与桥梁间耦合作用导致的阻尼和刚度矩阵; K_{b-db} 和 K_{v-db} 分别为作用在桥上及车辆上由桥梁单元间振动导致的刚度矩阵; K_{b-db} 为车轮模型与桥梁单元相互作用导致的刚度矩阵. F_{b-v} 和 F_{v-r} 表示分别作用在桥上及车辆上由路面不平度导致的接触力; F_{b-cr} 和 F_{v-cr} 表示桥梁单元间振动导致作用在桥上及车辆上荷载, F_{wv} 和 F_{bw} 表示分别作用在车辆和桥梁上的风荷载; F_G^N 表示 N 辆车的重力. 汽车行驶在桥上时, 接触面的位置以及接触力是不断变化的, 方程(15)可以通过 Newmark- β 时域法求解, 车辆参数参见文献[3,10].

1.2 路面退化模拟

路面状况是影响桥梁和车辆的动力响应的重要因素. 路面不平度通常符合零均值的平稳高斯函数, 该函数可以由功率谱密度函数通过傅里叶逆变换得到, 表达式为^[3-4]:

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2\varphi(n_k) \Delta n} \cos(2\pi n_k x + \theta_k) \quad (16)$$

式中: θ_k 表示随机相位角在 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布, $\varphi(\cdot)$ 表示路面高程的功率谱密度函数, 本研究采用功率谱密度函数如下:

$$\varphi(n) = \varphi(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2}, (n_1 < n < n_2) \quad (17)$$

式中 n 表示空间频率 (cycle/m); n_0 表示周期为 $1/2\pi$ 的间断频率; $\varphi(n_0)$ 是路面不平度系数, 该值根据路面情况选择; n_1 和 n_2 分别表示上下截止频率. 国际标准化组织 1995 年提出了路面不平度的分类指数, 用 $\varphi(n_0)$ 不同的值 A(非常好)到 H(非常差)表示.

文献[8]基于现有车辆荷载及腐蚀环境造成的路面等级退化的影响, 给出了 $\varphi(n_0)$ 在服役期间内变化的计算公式为:

$$\varphi(n_0) = 6.1972 \times 10^{-9} \times \exp \{ [1.04e^{\eta} \cdot I_{RI0} + 263(1 + S_c)^{-5} (C_L)_t] / 0.42808 \} + 2 \times 10^{-6} \quad (18)$$

式中: I_{RI0} 表示路面最初的不平整度, t 表示桥梁服役年数, η 值根据干湿、冷冻或结冰状态, 数值在 $0.01 \sim 0.7$ 之间的环境变化系数. S_c 表示由车道每一层强度和厚度计算得来的参数. $(C_L)_t$ 为据车流量情况随时间变化值, 以百万次计. 根据式(18), 以慢车道为例, 路面平整度退化如表 1 所示. 由表 1 可知路面平整度在前 15 年间由很好等级变成很差等级.

表 1 慢车道道路条件 15 年内的变化
Tab. 1 Variation of road condition for slow lane in 15 years

时间/年	不平度系数 $\phi(n_0)$	不平度分类
$1 \leq t \leq 8$	5×10^{-6}	很好
$9 \leq t \leq 10$	12×10^{-6}	较好
$11 \leq t \leq 12$	80×10^{-6}	普通
$t = 13$	320×10^{-6}	较差
$14 \leq t \leq 15$	1280×10^{-6}	很差

2 数值分析

2.1 工程实例简介

某公路大桥在中国湖南省边境, 是一座非对称混合双塔斜拉桥, 双索面, 其桥跨分布为 $80 \text{ m} + 208 \text{ m} + 716 \text{ m} + 70 \text{ m} + 2 \times 65 \text{ m}$, 钢箱梁, 具体情况如图 3 所示. 图 4 为有限元软件 ANSYS 建立的数值模型.

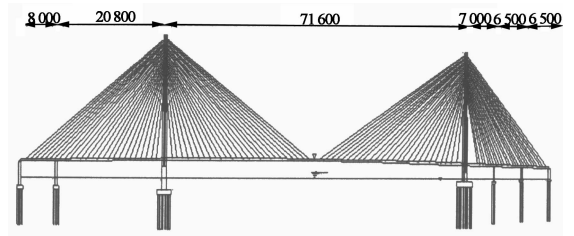


图 3 某斜拉桥(单位:cm)

Fig. 3 The highway bridge (Unit:cm)

2.2 考虑邻近车辆影响的交通流模拟

运用以上考虑邻近车辆影响的方程(16)~(18), 为某公路桥建立了考虑邻近车辆影响的双车道元胞自动机模型.

根据已有实例^[6], 假定桥梁两端的引道长度为 1005 m , x_{\max} 值为 5, 限速 135 km/h . 最近和次近车辆影响的敏感系数为 $\lambda_1 = 0.2$ 和 $\lambda_2 = 0.05$. 为了

便于比较,将交通量分为稀疏状态车辆($\rho = 0.07$)和密集状态车流($\rho = 0.15$).图5中, x 轴和 y 轴分别为空间和时间的坐标,图中的每个点表示一个车辆;随着交通流量的增加,会在某些区域形成局部堵塞(如图5中的黑带部分).

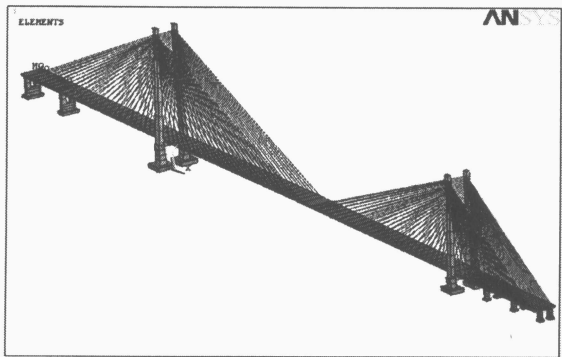


图4 全桥模型
Fig. 4 The full bridge model

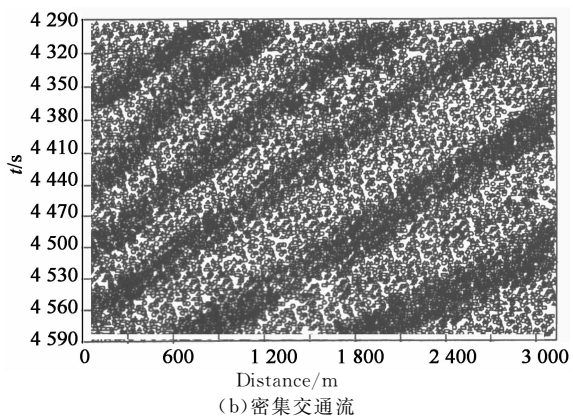
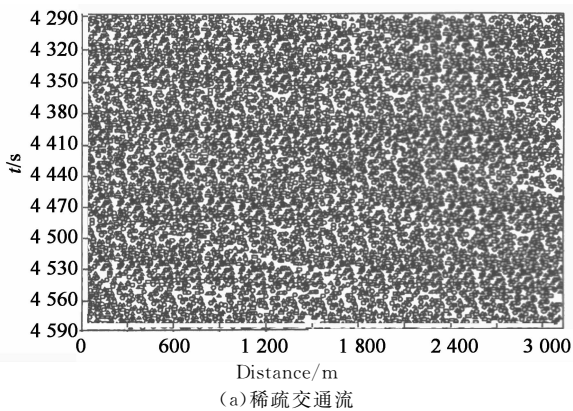


图5 不同的车辆占率下的交通模拟
Fig. 5 Traffic simulation with different vehicle occupancies

2.3 不同交通流下桥梁响应的比较

图6给出了在同一中等风速($U = 17.6 \text{ m/s}$)与2种交通条件下,桥梁跨中竖向振动响应时程曲线.

由图6可知跨中竖向位移随着车辆占有率增加而增加,车辆占有率对桥梁的位移有重要影响.如交通占有率从0.07增加到0.15时,桥梁的最大竖向位移从28.6 cm增加到42.3 cm.

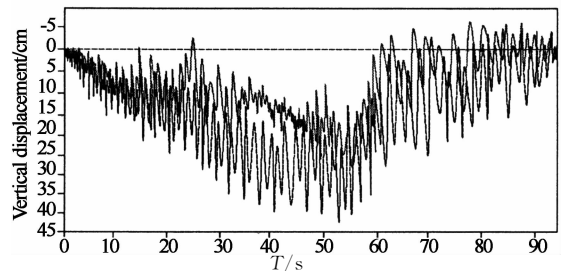


图6 两种不同的交通流占有的下桥梁响应
(—— $\rho = 0.07$; --- $\rho = 0.15$)
Fig. 6 The bridge responses under two different traffic flow occupancies

2.4 交通条件相同而风速不同条件下桥梁响应比较

图7为交通流占有率 $\rho = 0.07$ 时,在2种典型的风速下(弱风速度 $U = 2.7 \text{ m/s}$ 和中等风速 $U = 17.6 \text{ m/s}$)桥梁跨中响应时程曲线.由图7可知桥梁跨中处位移和加速度随着风速的增加而增加.风速对桥梁的位移尤其是横向位移起到了重要作用.如当风速从 2.7 m/s 增加到 17.6 m/s ,最大竖向位移从21.3 cm增加到28.6 cm,而最大横向位移从3.1 cm增大到8.7 cm,横向位移对风速变化更加敏感.

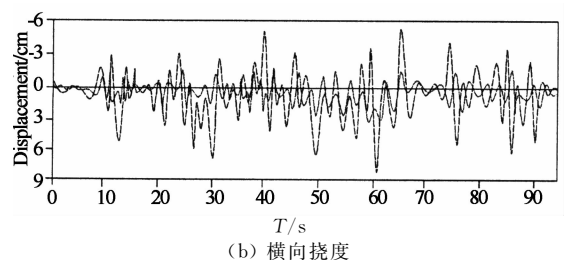
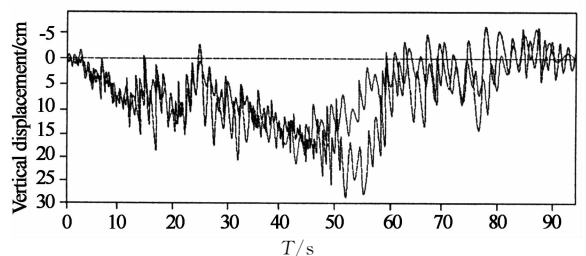


图7 两种不同风速下在桥梁跨中响应
(——弱风; ---中等风)
Fig. 7 The responses at the midpoint of the bridge under two different wind speed

2.5 路面退化条件下桥梁响应的比较

由表 1 可知在交通荷载和环境作用下路面平整度会不断恶化,因此,本节分析了桥梁跨中截面在两段时间内的振动响应,如图 8 所示.由图 8 可知跨中的振动响应随桥梁运营时间增加而增大,这可能是由于路面不平度的逐年恶化所致.因此,路面不平度对桥梁的位移和加速度有显著影响.如从第 8 年到第 13 年,桥梁的垂直位移从 28.6 cm 上升到了 34.8 cm.

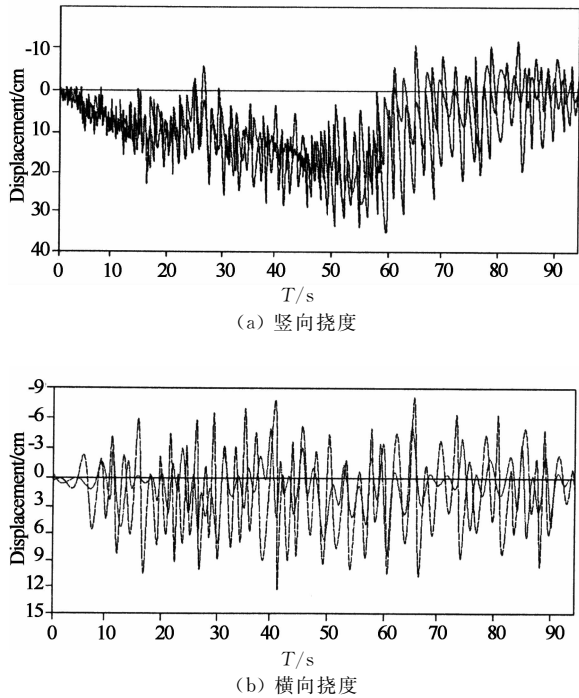


图 8 关于路面退化的桥梁的响应(——8年;---13年)
Fig. 8 The responses of the bridge with roughness progressive deterioration

2.6 风-车流作用下不同车辆模型对行车舒适度影响比较

一般用来评价舒适度等级的关键参数常采用座椅的加权均方根加速度总值^[11].因此,引入座椅的各向振动对行车舒适性的研究十分重要.本文提出了一个包含三维座椅的行车舒适性研究模型来弥补以前研究没有考虑座椅本身振动的简化模型的不足,并分析了车辆占有率、风速及时间年限对行车舒适度的影响.图 9 给出了当车辆占有率为 $\rho = 0.07$ 时某一车辆座椅三向振动加速度历程,表 2~表 4 给出了不同参数下的行车舒适度.由表 2~表 4 可知,当车辆占有率为 $\rho=0.07$ 时,考虑座椅振动模型得到的行车舒适度等级为没有不舒适,而没有考虑座椅本身振动的简化模型得到的舒适度指标是有点不舒适,因此驾驶员座椅模型的各向振动可显著影响行车舒适度,使用简化的车辆模型来研究行车舒

适度并不准确.

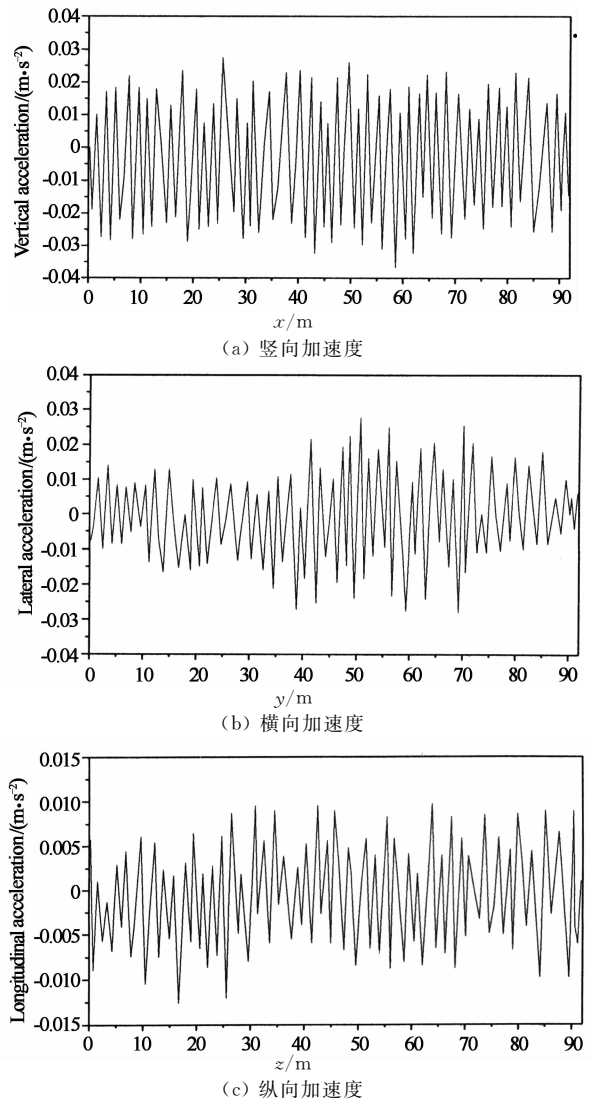


图 9 座椅三向振动加速度
Fig. 9 The dimensional vibration acceleration

表 2 不同交通占有率下车行舒适度
Tab. 2 Ride comfort with two vehicle occupancies (m/s²)

车辆占有率		a_{sux}	a_{suy}	a_{suz}	a_{su}	舒适性
$\rho=0.07$	本文模型	0.06	0.12	0.23	0.30	没有不舒适
	简化模型	0.14	0.16	0.29	0.41	一点不舒适
$\rho=0.15$	本文模型	0.12	0.19	0.32	0.45	非常不舒适
	简化模型	0.17	0.28	0.35	0.58	非常不舒适

表 3 不同风速下车行舒适度
Tab. 3 Ride comfort with two wind speeds (m/s²)

风速		a_{sux}	a_{suy}	a_{suz}	a_{su}	舒适性
$U=2.7$ m/s	本文模型	0.02	0.09	0.12	0.18	没有不舒适
	简化模型	0.05	0.10	0.29	0.22	没有不舒适
$U=17.6$ m/s	本文模型	0.06	0.12	0.23	0.30	没有不舒适
	简化模型	0.14	0.16	0.29	0.41	一点不舒适

表4 不同时间下车舒适性
Tab.4 Ride comfort with year increases (m/s²)

时间		a_{sux}	a_{suy}	a_{suz}	a_{su}	舒适性
8年	本文模型	0.06	0.12	0.23	0.30	没有不舒适
	简化模型	0.14	0.16	0.29	0.41	一点不舒适
13年	本文模型	0.13	0.22	0.28	0.45	一点不舒适
	简化模型	0.18	0.27	0.36	0.57	非常不舒适

3 结 论

本文综合考虑了车流随机性和路面等级退化等因素,基于考虑邻近车辆影响的改进 CA 模型(Cellular Automation—元胞自动基)和路面退化模型,建立了包含悬浮座椅及车辆纵向振动的 24 自由度空间车辆模型,通过桥梁和车辆相互作用力关系的运动方程,分析了大跨度桥梁的振动及行车舒适性.数值计算表明:

1) 本文提出的方法能合理地模拟风-汽车-桥梁耦合系统的振动;

2) 改进过并考虑邻近车辆影响的 CA 模型可合理模拟随机车流,并可用来研究风-车流-桥梁耦合系统的振动;

3) 车辆占用率对桥梁的位移有重要影响.如车辆占有率从 0.07 增加到 0.15 时,桥梁的最大竖向位移从 28.6 cm 增加到 42.3 cm;

4) 桥梁中跨跨中处的位移和加速度随着风速的增加而增加,风速对桥梁的位移尤其是横向位移起到了重要作用.如当风速从 2.7 m/s 增加到 17.6 m/s,21.3 cm 增加到 28.6 cm,而最大横向位移从 3.1 cm 增大到 8.7 cm,横向位移对风速变化更加敏感;

5) 营运年限及路面等级对桥梁位移有较大影响.当服役时间从 8 年提高到 13 年时,桥梁的竖向位移从 28.6 cm 增加到 34.8 cm;

6) 驾驶员座椅模型的各向振动可显著影响行车舒适度,使用简化的车辆模型来研究行车舒适度并不准确.

参考文献

[1] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京:科学出版社,

2005:154—164.

XIA He. Vehicle structure interaction[M]. Beijing: Science Press, 2005:154—164. (In Chinese)

[2] 殷新锋. 汽车荷载作用下梁式桥与斜拉桥的动态响应分析[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2010:6—20.

YIN Xin-feng. Car loads beam bridge with cable-stayed bridge dynamic response analysis [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2010:6—20. (In Chinese)

[3] YIN X F, FANG Z, CAI C S. Lateral vibration of high-pier bridges under moving vehicular loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011,16(3): 400—412.

[4] LU Deng, CAI C S. Bridge model updating using response surface method and genetic algorithm[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 5(15):553—564.

[5] 韩万水,陈艾荣. 随机车流下的风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[J]. 土木工程学报,2008,41(9):97—102.

HAN Wan-shui, CHEN Ai-rong. Three dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems under random traffic flow[J]. China Civil Engineering Journal, 2008,41(9):97—102. (In Chinese)

[6] CHEN S R, CAI C S. Equivalent wheel load approach for slender cable-stayed bridge fatigue assessment under traffic and wind: feasibility study[J]. Journal of Bridge Engineering ASCE,2007,12(6): 55—64.

[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 Wan-shui, MA Lin, YUAN Su-jing, 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)

[8] ZHANG Wei, CAI C S. Fatigue reliability assessment for existing bridges considering vehicle speed and road surface conditions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012,17(3):443—453.

[9] KONG Xian-juan, GAO Zi-you, LI Ke-ping. A two lane cellular automata model with influence of next nearest neighbor vehicle[J]. Communications in Theoretical Physics, 2006,45(4): 657—662.

[10] ZHOU Y F, CHEN S R. Dynamic simulation of a long-span bridge-traffic system subjected to combined service and extreme loads[J]. Journal of Structural Engineering, 2015,141(9):546—554.

[11] ISO 2631—1 Mechanical vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole body vibration—Part1: General requirements[S]. Geneva:1997.