

车流密集程度对重载随机车流 与桥梁耦合振动影响分析

桂水荣,何锐,曾宏伟

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要 目的 将元胞自动机建立的重载随机车流模型引入车桥耦合振动系统,探究重载随机车流密集程度激发桥梁振动响应规律。方法 基于元胞自动机和 NaSch 模型,模拟道路交通周期边界条件下单向双车道重载随机车流,真实还原桥梁上车流演变规律,建立考虑车型、车速、车道、车重和驾驶员行为特性的重载随机车流-桥梁耦合振动模型;采用 MATLAB 软件编程求解重载随机车流与桥梁耦合振动特性。结果 重载车流从自由流向阻塞流转变,桥梁竖向挠曲变形逐渐增大,振动加速度先增大后减小;阻塞流时桥梁产生最大竖向变形,密集流时桥梁竖向振动速度和加速度响应最剧烈。桥梁振动响应的能量峰值主要集中在桥梁主频 4 Hz 和 9 Hz 附近,且随着车流密度增大、车速降低,随机车流激发的桥梁振动响应能量峰值先增大后减小。结论 车辆占有率为 18% 的密集流出现最大振动响应能量峰值,车辆占有率为 31% 的拥挤流最易激发桥梁高阶频率振动。

关键词 重载随机车流;车桥耦合振动;元胞自动机;车流密集程度

中图分类号 TU997;U491.4

文献标志码 A

引用格式:桂水荣,何锐,曾宏伟. 车流密集程度对重载随机车流与桥梁耦合振动影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):797-806. (GUI Shuirong, HE Rui, ZENG Hongwei. Analysis of the impact of traffic density on coupled vibration of overloaded random traffic flow and bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5): 797-806.)

Analysis of the Impact of Traffic Density on Coupled Vibration of Overloaded Random Traffic Flow and Bridge

GUI Shuirong, HE Rui, ZENG Hongwei

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013)

Abstract: The study establishes a model of heavy random traffic flow based on cellular automata

收稿日期:2023-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52268026,12062006)

作者简介:桂水荣(1979—),女,副教授,博士,主要从事随机车流模拟、公路桥梁车桥耦合振动等方面研究。

and introduces a vehicle-bridge coupled vibration system to explore the law of bridge vibration response induced by the density of heavy random traffic flow. By simulating one-way two-lane heavy random traffic flow under periodic boundary conditions using cellular automaton and NaSch model, the study aims to accurately reproduce the evolution of traffic flow on the bridge, and establish a coupled vibration model of heavy random traffic flow and bridge which vehicle type, speed, lane, weight, and driver behavior characteristics are taken into consideration. MATLAB software is used for programming to solve the coupled vibration characteristics of heavy random traffic flow and bridge. The results show that the overloaded traffic flow transitions from free flow to blocking flow, and the vertical deformation of the bridge gradually increases. The vibration acceleration initially increases and then decreases. The maximum vertical deformation of the bridge occurs during blocking flow, and the vertical vibration velocity and acceleration response of the bridge are most intense during dense flow. The energy peak of the bridge's vibration response is mainly concentrated around the bridge's main frequencies of 4 Hz and 9 Hz. With the increase in traffic density and the decrease in vehicle speed, the energy peak of the bridge's vibration response excited by random traffic flow first increases and then decreases. The maximum vibration response energy peak occurs during dense flow when the vehicle occupancy rate is 18%, and the congested flow with a vehicle occupancy rate of 31% is most likely to excite higher-order frequency vibrations in the bridge.

Key words: overloaded random traffic flow; vehicle-bridge coupled vibration; cellular automaton; traffic density

随着交通运输快速发展,现今道路上车辆数量日益增多,交通状况越来越复杂^[1-2],研究车-桥耦合振动问题,模拟随机车流荷载需与实际交通荷载更贴近。元胞自动机模型作为一种新型仿真交通流模型,能依据交通规则,真实还原行驶车辆的随机性。若能将汽车荷载动力特性融入到元胞自动机模型中,生成能反映真实交通规则的随机汽车荷载作用于桥梁,一方面,模拟结果更贴近实际,利于改进桥梁设计,提高桥梁服役期间安全性和稳定性;另一方面,可以评估桥梁在实际使用期间可能遇到的风险和挑战,为桥梁风险评估、监测优化和管理决策等方面提供有益信息。

在对随机车流-桥梁耦合振动响应研究中,已有学者取得了诸多成果。韩万水等^[3]观测交通荷载数据特征,运用 Monte-carlo 法重现随机车流,建立了随机车流-桥梁耦合振动分析系统。陈水生等^[4]采用蒙特卡洛法随机抽样生成随机车流模型,分析随机车流荷载对公路斜拉桥振动响应影响,探究了

斜拉桥纵梁、桥塔和斜拉索振动规律。然而 Monte-carlo 法只能提供车辆数量、速度等参数的概率分布,无法考虑驾驶员的驾驶行为及车辆行驶规则。有学者考虑车辆行驶之间的相互干扰,采用元胞自动机模拟车辆行驶、加速、减速、换道等行为生成随机车流,研究随机车流与桥梁耦合振动问题。S. R. Chen 等^[5-6]将随机车流的元胞自动机模型与车桥耦合振动理论相结合,生成随机车流与桥梁耦合振动模型,提出等效动车轮荷载的简化方法。周军勇等^[7]提出了一种改进多轴单元胞自动机微观车流与桥梁耦合振动分析方法。

国内外学者对车桥耦合振动问题进行了大量研究,但主要侧重于研究缺乏车辆行驶规则的随机车流或者规范中标准汽车荷载模型,鲜有考虑规范与实际车辆荷载之间差异。实际道路上存在许多满载甚至超载的重型车辆,此类车辆荷载远超规范中标准汽车荷载^[8-9],给桥梁运营带来了极大损害。基于此,笔者基于元胞自动机模型,考虑车辆行驶

规则和驾驶员行为特性,模拟纯重载货车工况下的随机车流,研究不同车流状态(自由流、密集流、拥挤流、阻塞流)与桥梁耦合振动响应。研究表明,阻塞流时桥梁产生最大竖向变形,密集流时桥梁竖向振动速度和加速度响应最剧烈;桥梁振动响应的能量峰值主要集中在桥梁主频 4 Hz 和 9 Hz 附近,且随着车流密度增大、车速降低,随机车流激发的桥梁振动响应能量峰值先增大后减小,密集流时具有最大的振动响应能量峰值。

1 重载随机车流模拟

1.1 基本模型

双车道 NaSch 系统模型最早由 M. Rickert 等^[10]和 D. Chowdhury 等^[11]引入换道规则,将单车道的 NaSch 模型^[12]扩展到双车道随机车流模型。在该模型中,车辆运行的时间、空间和速度被整数离散化,道路空间被划分为 $2 \times N$ 个离散元胞。车辆最大行驶速度 v_{\max} ,每辆车行驶速度在 $0 \sim v_{\max}$ 间取整数,随机慢化概率为 p 。模型中考虑车辆加速、减速、随机慢化、换道等车辆行为进行演化。

双车道随机车流模型采用周期性边界条件,每次位置更新结束,道路上头车位置为 x_{lead} 。设 L_{road} 为道路长度,若 $x_{\text{lead}} > L_{\text{road}}$,则该车将从道路起点重新进入道路元胞空间,重新进入车道位置及速度分别为 $x_{\text{last}} = x_{\text{lead}} - L_{\text{road}}$ 、 $v_{\text{last}} = v_{\text{lead}}$,这里 x_{lead} 、 x_{last} 、 v_{lead} 、 v_{last} 分别表示道路上头车和尾车的位置和速度。

模型中,需要考虑车辆每时刻与当前车道车辆的前后间距、与目标车道车辆的前后间距,根据式(1)~式(4)计算出当前车道车辆的前后车距及安全行驶距离:

$$d_{\text{safe}}(t) = v_n(t) + 2. \quad (1)$$

$$d_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t). \quad (2)$$

$$d_n^{\text{other}}(t) = x_{n+1}^{\text{other}}(t) - x_n(t). \quad (3)$$

$$d_{n,\text{back}}^{\text{other}}(t) = x_n(t) - x_{n-1}^{\text{other}}(t). \quad (4)$$

式中: $d_{\text{safe}}(t)$ 为 t 时刻车辆行驶的安全距离;

$d_n(t)$ 为车辆与当前车道前车之间的距离; $d_n^{\text{other}}(t)$ 为车辆与旁边车道前车之间的距离; $d_{n,\text{back}}^{\text{other}}(t)$ 为车辆与旁边车道后车之间的距离; $x_n(t)$ 与 $x_{n+1}(t)$ 分别为 n 车与当前车道前车的元胞位置; $x_{n-1}^{\text{other}}(t)$ 与 $x_{n+1}^{\text{other}}(t)$ 分别为旁边车道后车与前车的元胞位置。车辆位置关系计算模型如图 1 所示。

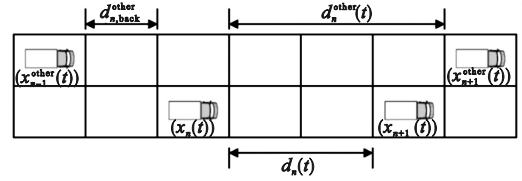


图 1 车辆位置关系计算模型

Fig. 1 Vehicle position and spacing calculation model

(1) 加速规则

t 时刻,当车辆速度小于最大速度 v_{\max} ,且与前车车距不小于安全行驶距离,该车辆按照加速规则加速行驶,则:

$$v_n(t+1) = \begin{cases} \min(v_n(t)+1, v_{\max}), & d_n(t) \geq d_{\text{safe}}(t); \\ v_n(t), & v_n(t) \leq d_n(t) < d_{\text{safe}}(t). \end{cases} \quad (5)$$

式中: $v_n(t+1)$ 为车辆在 $t+1$ 时刻的速度。

(2) 减速规则

t 时刻,当车辆与前车距离小于最小安全距离或安全行驶距离时,车辆按减速规则减速行驶,则:

$$v_n(t+1) = \begin{cases} \min(v_n(t) - 1, d_n(t)), & 2 \leq d_n(t) < v_n(t); \\ 0, & d_n(t) < 2. \end{cases} \quad (6)$$

(3) 随机慢化

考虑各种不确定因素(如路面状况、驾驶员心态等),造成车辆减速行驶,则:

$$v_n(t+1) = \max(v_n(t) - 1, 0), \text{rand} < p; d_n(t) \geq d_{\text{safe}}(t). \quad (7)$$

式中: rand 为慢化随机数; p 为随机慢化概率。

(4)换道规则

车辆在当前车道受到前车阻碍,且目标车道有良好的行驶条件,则驾驶员产生换道动机:

$$d_n(t) < \min(v_n(t) + 1, v_{\max}) \text{ and } v_n(t) < v_{\max} \text{ and } d_n^{\text{other}}(t) \geq d_{\text{safe}}(t).$$
 (8)

若产生换道行为,车辆不能对目标车道后车产生影响,需满足换道安全条件:

$$d_{n,\text{back}}^{\text{other}}(t) \geq d_{\text{safe}}(t).$$
 (9)

(5)位置更新

当 t 时刻循环更新完成时,车辆位置按式(10)进行更新:

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1).$$
 (10)

1.2 重载随机车流

基于元胞自动机和 NaSch 模型,结合三轴重载货车结构几何尺寸,生成重载随机车流,研究桥梁在重载随机车流作用下的振动响应。随机车流状态受交通拥挤程度动态变化,笔者着重研究随机车流密集程度对桥梁振动响应规律的影响。

研究随机车流密集程度,刘伟铭^[13]提出了双截面 McMaster 算法,并将基本交通流曲线图(交通流量—车辆占有率图)划分为4个区域。郝媛等^[14]将该算法用于判别城市快速路交通流状态,并将随机车流分为自由流、密集流、拥挤流、阻塞流。车流状态控制参数见表1。

表1 车流状态控制参数

Table 1 Traffic flow state control parameters		
车流	车辆速度/(km·h ⁻¹)	车辆占有率/%
自由流	>90	<15
密集流	64~90	15~25
拥挤流	30~63	26~40
阻塞流	<30	>40

数值模拟随机车流时,控制元胞自动机模型中的车辆速度、车辆占有率等参数,实现4种车流状态划分,生成4种车流状态下重载随机车流,并将4种重载随机车流作用于桥梁,研究重载车辆下自由流、密集流、拥挤流及阻

塞流对桥梁振动强弱的影响。图2为单向双车道重载随机车流模型某一条车道时空图。

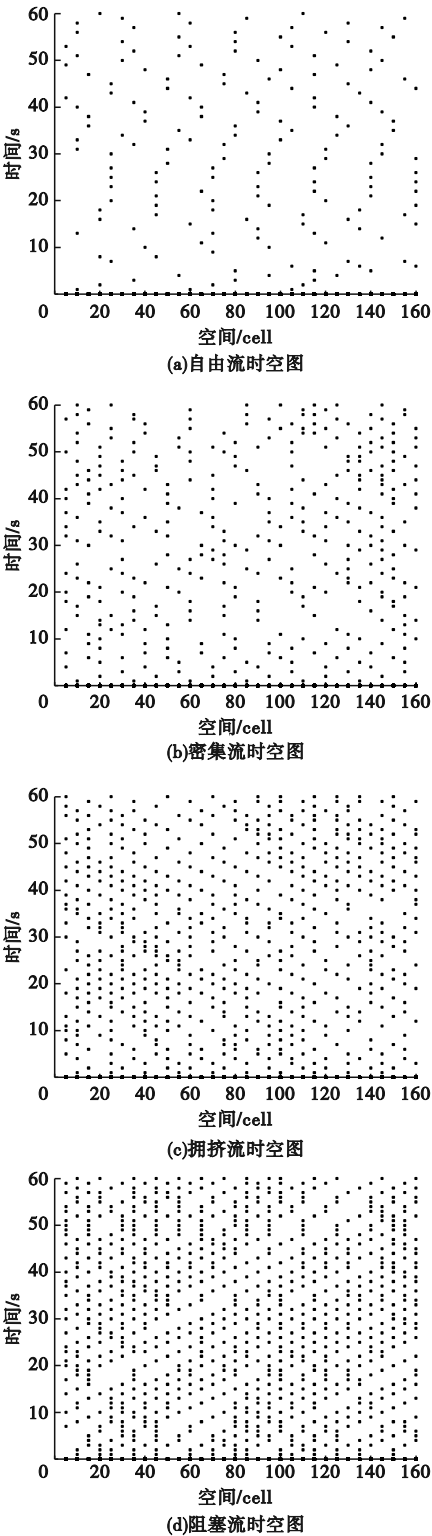


图2 不同车流状态下的随机车流时空图

Fig. 2 The spatiotemporal maps of random traffic flow under different flow conditions

2 随机车流 - 桥梁耦合振动模型

2.1 车桥耦合振动原理

为准确地评估随机车流对桥梁激振效果,需选择适用于车桥耦合振动分析的车辆动力模型。当前,我国最常采用的桥梁荷载试验车辆是三轴重载汽车。桂水荣等^[15]在研究中使用的三轴车模型能准确地反映该类车辆的动力特性参数,该车辆模型具有9个自由度(见图3),动力特性参数与文献^[15]中一致。

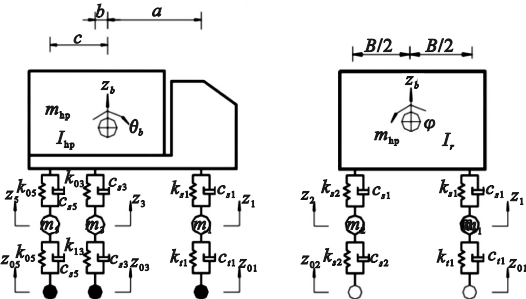


图3 三维重载车辆模型

Fig. 3 Coupled model of three-axle heavy vehicle and bridge

图3中, m_{hb} 、 I_{hp} 和 I_r 分别为车身的质量、俯仰转动惯量和侧倾转动惯量; z_{o1} 、 z_{o2} 、 z_{o3} 分别为前、中、后轮处车轮竖向振动位移; m_1 、 m_2 、 m_3 分别为前、中、后悬架与轮胎质量之和; k_{s1} 、 k_{s2} 、 k_{s3} 分别为前、中和后悬架弹簧刚度; c_{s1} 、 c_{s2} 和 c_{s3} 分别为前、中、后悬架阻尼系数; k_{t1} 、 k_{t2} 和 k_{t3} 分别为前、中、后轮胎等效刚度; c_{t1} 、 c_{t2} 和 c_{t3} 分别为前、中和后轮胎阻尼系数; l_1 、 l_2 、 l_3 分别为车辆前、中、后轴到车辆重心的距离。 z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_b 、 θ_b 、 φ_b 分别为车辆系统的广义坐标; B_f 为前轴宽度; B_r 为后轴宽度; a 为前轴到车辆质心距离; b 为中轴到车辆质心距离; c 为后轴到车辆质心距离。

根据虚功原理,建立9自由度车辆振动方程如下:

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{Z} = \mathbf{F}_v^{\text{int}}. \quad (11)$$

式中: $\mathbf{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆振动过程中各自由度的惯

性荷载列向量; \mathbf{M}_v 、 \mathbf{C}_v 、 \mathbf{K}_v 分别为车辆系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_n, z_b, \theta_b, \varphi_b\}^T$ 为车辆模型各自由度向量。

对桥梁结构离散,建立桥梁全自由度振动方程:

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_b \mathbf{U} = -\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} - \mathbf{F}_g. \quad (12)$$

式中: \mathbf{M}_b 、 \mathbf{C}_b 、 \mathbf{K}_b 分别为桥梁子系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}}$ 分别为车辆振动过程中车轮作用于桥面的惯性荷载向量; \mathbf{F}_g 分别为车辆重力引起的各车轮作用点处荷载向量; \mathbf{U} 、 $\dot{\mathbf{U}}$ 、 $\ddot{\mathbf{U}}$ 分别为单元结点位移、速度和加速度向量。运用模态综合叠加技术,模态空间提取阶模态,(12)式可变为

$$\mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{X} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Omega} \mathbf{q} = -\mathbf{\Phi}^T (\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} + \mathbf{F}_g). \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & 1 & \\ & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r},$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & 2\xi_i \omega_i & \\ & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r},$$

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \omega_i^2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r}.$$

$\mathbf{\Phi}$ 为 r 阶振型向量矩阵; ξ_i 为第 i 阶阻尼比; ω_i 为第 i 阶自振频率; \mathbf{q} 为振型广义坐标列阵。

联立桥梁振动方程和车辆振动方程,得到车桥耦合振动方程:

$$\mathbf{M}_{bv} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{bv} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{bv} \mathbf{u} = \mathbf{F}_g - \mathbf{F}_w. \quad (14)$$

式中: $\mathbf{M}_{bv} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_v \end{bmatrix}_{n \times n}$ 、 $\mathbf{C}_{bv} = \begin{bmatrix} \eta + \mathbf{Q} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 & \mathbf{C}_v \end{bmatrix}_{n \times n}$ 、

$\mathbf{K}_{bv} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Omega} + \mathbf{S} & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{K}_v \end{bmatrix}_{n \times n}$ 分别为车桥耦合模型

的质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{F}_g 为车辆自重引起的车桥耦合竖向荷载向量; \mathbf{u} 为广义坐标向量; \mathbf{F}_w 为桥面不平顺随机激励引起的车桥耦合竖向荷载。

2.2 重载随机车流数据矩阵

元胞自动机模拟随机车流,车辆位置和速度具有随机性,无法依据公式计算车辆的位置和速度。因此,编程时对元胞自动机模拟得到的随机车流进行矩阵化处理,形成包含车辆速度、运行时间以及横、纵向位置的三维数据矩阵。通过检索该三维矩阵,获取任一车辆任意时刻的速度和所处空间位置特性,应用于车桥耦合分析系统求解振动响应。

重载随机车流数据矩阵能够记录车辆每一时刻的速度和位置,准确反映车辆实时运动状态,并与车桥耦合振动程序有效兼容。在求解随机车流-桥梁耦合振动响应中,读取车流数据矩阵,将车流信息导入车桥耦合振动程序。

2.3 程序兼容处理

为解决重载随机车流模型计算程序与车桥耦合振动模型程序中时间步长不一致问题,笔者采用“等时差分”方法^[16]解决二者计算步长匹配问题。

元胞自动机模拟随机交通流模型中车辆速度和位置更新的时间步长为 1 s,而在车桥耦合计算程序中,Newmark 积分步长 Δt 小于 0.02 s,两者积分步长不兼容。将重载随机车流模型步长均匀细分,使之与 Newmark 积分步长相等。均匀细分随机车流模型中每一秒时间步长,位移更新时间步长(1s)内车辆运行状态视为匀速行驶,计算车辆在每个积分区间的位置。

文中模拟随机车流的元胞自动机模型时间步长为 1 s,车桥耦合振动响应计算程序积分步长为 Δt ,故将随机车流-桥梁耦合振动模型中随机车流模拟时间步长等分 $1/\Delta t$ 为份,车辆在 1 s 内所经过的路程也等分为 $1/\Delta t$ 段。

2.4 随机车流-桥梁耦合系统算法流程

将随机车流的每一时刻车流信息导入车桥耦合振动系统,设定随机车流最大模拟时长 time-max,每一循环对随机车流-桥耦合

系统振动方程中的质量、阻尼和刚度矩阵进行更新,运用 Newmark 数值积分法或精细积分法求解每一时刻广义坐标向量,结合模态综合叠加技术求解系统内各点动力响应,算法流程如图 4 所示。

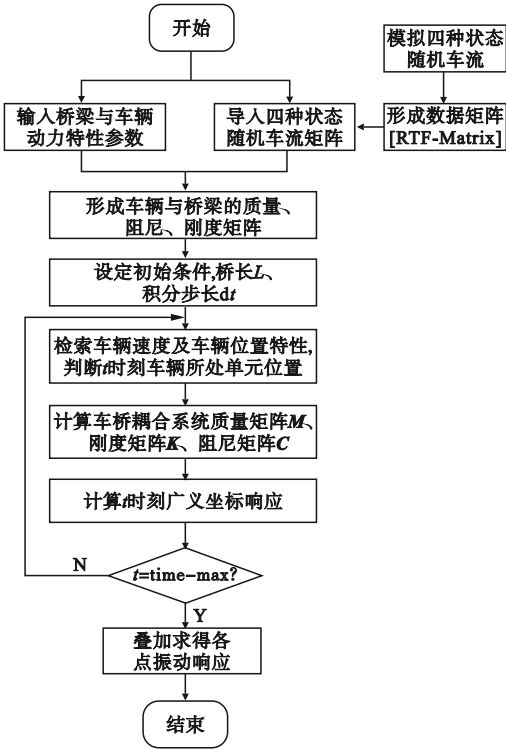


图 4 重载随机车流-桥耦合计算流程图

Fig. 4 Flowchart of the coupled calculation process of heavy random traffic flow and bridge

3 重载随机车流作用分析

3.1 重载随机车流模型参数设置

笔者采用元胞自动机模型,模拟单向双车道高速公路场景,道路长度为一座 4×40 m 连续 T 梁桥的桥长,选取 5 m 长的元胞将两条车道划分,两条车道各由 32 个元胞组成,每辆三轴重载货车占据一个元胞。依据车辆占有率和车辆速度将随机车流划分为自由流、密度流、拥挤流和阻塞流,参考文献[13-14]研究成果,随机车流参数设置见表 2。重载随机车流作用于 4×40 m 连续 T 梁桥的分布示意图如图 5 所示。

表2 数值模拟重载随机车流参数设置

Table 2 Parameter settings for numerical simulation of overloaded random traffic flow

车流	车速上限/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	车辆占有率/%
自由流	90	9
密集流	90	18
拥挤流	54	31
阻塞流	18	47

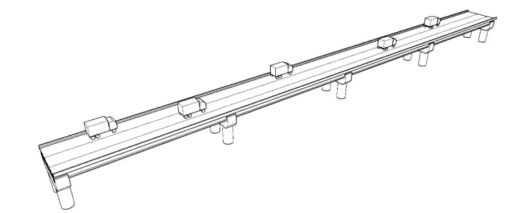


图5 重载随机车流作用于桥梁示意图

Fig. 5 Diagram of bridge under the action of overloaded and random traffic flow

3.2 桥梁动力特性

采用 ANSYS 有限元软件建立 $4\times 40\text{ m}$ 连续 T 梁桥的有限元模型,混凝土铺装层和桥面板采用 shell63 板单元模拟,其余均采用 Solsh190 壳单元模拟。桥梁横断面如图 6 所示,桥梁有限元模型如图 7 所示。提取桥梁前十阶自振频率和振型见表 3。 $4\times 40\text{ m}$ 连续 T 梁桥奇数阶频率为竖向弯曲振型,偶数阶频率为扭转振型。

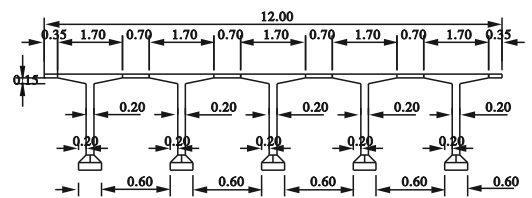


图6 桥梁横断面图

Fig. 6 Cross-sectional view of the bridge

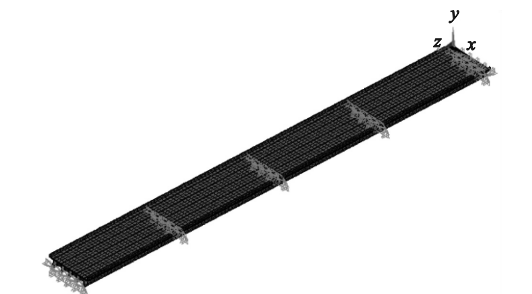


图7 桥梁有限元模型

Fig. 7 Finite element model of the bridge

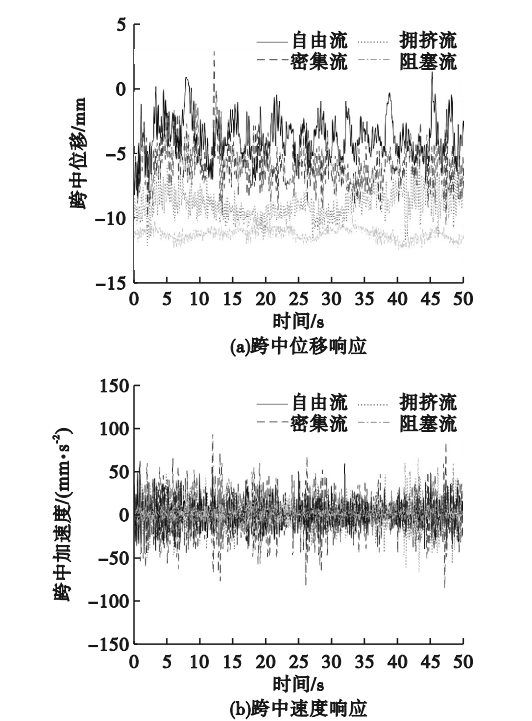
表3 桥梁前十阶自振频率及振型特征

Table 3 The first ten order frequency and mode characteristics of bridge

阶次	频率/Hz	振型特征
1	2.214 7	主梁对称竖向弯曲
2	2.715 7	主梁对称扭转
3	2.774 7	主梁反对称竖向弯曲
4	3.484 0	主梁反对称扭转
5	4.009 7	主梁对称竖向弯曲
6	4.505 3	主梁对称扭转
7	5.700 1	主梁反对称竖向弯曲
8	8.364 8	主梁对称扭转
9	8.874 2	主梁反对称竖向弯曲
10	9.135 8	主梁对称扭转

3.3 桥梁动力响应分析

将 4 种重载随机车流按车道作用于双车道 $4\times 40\text{ m}$ 连续 T 梁桥。数值模拟时,随机车流加载总时长取 50 s ,车桥耦合振动程序积分时间步长 $\text{d}t$ 取 0.005 s ,研究 4 种重载随机车流对桥梁振动响应的影响。提取 4 种车流作用下第一跨边梁跨中位移、速度和加速度时程响应如图 8 所示。



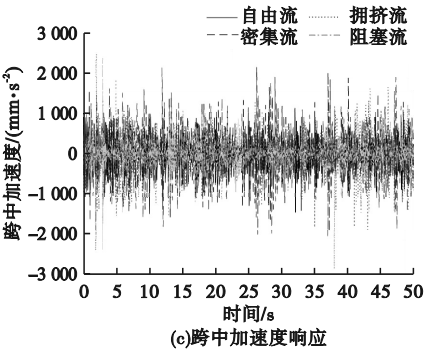


图8 四种重载随机车流作用下的振动响应
Fig.8 Vibration response under the influence of four types of heavy random traffic flow

表4 桥梁竖向振动响应幅值

Table 4 Amplitude of vertical vibration response of bridges

车流类型	上挠最大位移/mm	下挠最大位移/mm	最大速度/(mm·s ⁻¹)	最大加速度/(mm·s ⁻²)
自由流	1.24	7.62	64.85	1 648
密集流	0.07	10.90	86.71	2 778
拥挤流	4.38	12.59	70.19	2 377
阻塞流	9.71	13.16	39.52	2 173

为进一步分析车流密度与桥梁竖向振动响应幅值关系,表4给出了第一跨边梁跨中振动响应峰值的平均值。由表可知,重载随机车流由自由流向阻塞流转变过程中,桥梁边跨边梁跨中平均最大挠度由7.62 mm增长至13.16 mm,这与图8(a)中响应一致;而同一位置的速度与加速度幅值先增大后减小,其中最大速度与最大加速度在密集流状态下达到顶峰。而阻塞流车流基本处于缓慢行驶状态,最大速度和最大加速度响应均较密集流和拥挤流小。

上述结果表明,随着车流密度增大、车流平均速度减小,桥梁竖向位移不断增大,这主要由于受车流密度影响,作用于桥梁静荷载增大,桥梁静挠度增大,车流速度对桥梁竖向位移影响较小。桥梁竖向振动速度和加速度先增大后减小,这是因为车流密度发展至阻塞流时,车流荷载因车道拥挤逐渐趋向于缓慢行驶,桥梁竖向速度和加速度振动剧烈程

从图8(a)可以看出,随着车流密度增大,重载随机车流由自由流向阻塞流转变过程中,桥梁第一跨边梁的竖向位移呈增大趋势,这是由于随着车流密度增大,车流静荷载不断增大,桥梁竖向位移不断增大。从图8(b)和图8(c)可以看出,重载随机车流由自由流向阻塞流转变过程中,桥梁第一跨边梁跨中竖向振动速度峰值与加速度峰值呈现先增大后减小趋势。

为避免随机车流模拟的偶然性因素,笔者连续模拟100次,提取各种车流状态的响应峰值,取其平均值,结果见表4。

度相较于密集流和拥挤流反而有所降低,桥梁竖向振动的速度和加速度响应剧烈程度受车流密度与车辆速度影响较大。

3.4 功率谱密度分析

针对不同车流状况,对第一跨边梁跨中竖向加速度响应的时域信号进行频域转换,得到4种车流状态下桥梁竖向加速度振动响应功率谱密度曲线(PSD)(见图9)。由图可知,各种车流作用下,桥梁振动响应的PSD峰值集中在桥梁主频附近,且随着车流密度增大,振动响应能量先增大后减小,密集车流状态下桥梁竖向振动加速度响应具有最大能量,这与3.3节中密集流时具有最大振动加速度,振动响应最剧烈的结论一致。

分析图9还可以看出,不同车流状态的重载随机车流,作用于桥梁产生的振动加速度功率谱密度曲线均存在两个频率接近的能量峰值,且随着车流密集程度增加,第一能量峰值频率由3.5 Hz逐渐增长至5 Hz,第二能

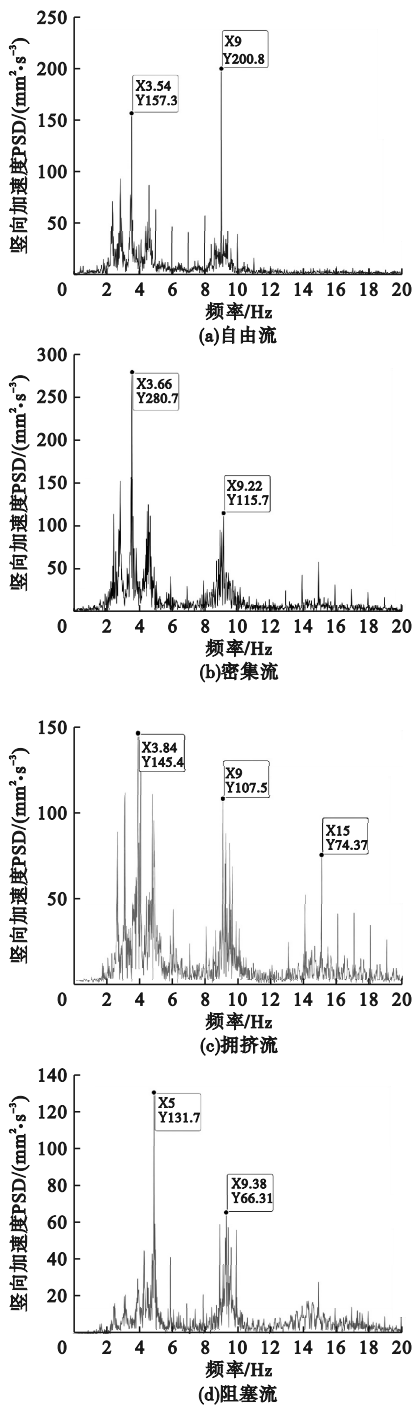


图9 加速度响应 PSD 分析

Fig. 9 Acceleration response power spectral density (PSD) analysis

量峰值也有轻微增大现象,对应的频率由 9 Hz 增长至 9.38 Hz。说明随着车流密集程度加剧,随机车流与桥梁耦合作用逐渐激发了桥梁高阶频率振动响应。

从图 9(b)、图 9(c) 可以看出,在密集流

和拥挤流作用下,桥梁前 10 阶频率之外(大于 10 Hz)出现了周期性能量峰值,且拥挤流最为明显,而自由流和阻塞流的高频处并无明显峰值,说明较为密集的车流会激发桥梁高阶频率振动。结合流量-密度关系图^[17],拥挤流处于一个亚稳态区域,该区域内车流可向交通性能更好的密集流发展,也可能发展成交通性能更差的阻塞流,受道路交通流状况影响,此车流状态下车辆有频繁加、减速和换道行为,较小的扰动容易导致车流形成堵塞^[18]。由此说明,影响桥梁高阶频率振动是由不稳定的车流状态和复杂的车辆驾驶行为所引起。

4 结 论

(1)在重载随机车流与 4 × 40 m 连续 T 梁桥耦合振动中,当重载车流从自由流向阻塞流转变,桥梁竖向挠度变形逐渐增大,竖向振动加速度先增大后减小。阻塞流作用下,桥梁产生最大竖向变形;密集流作用下,桥梁竖向振动速度和加速度响应最剧烈。

(2)在自由流、密集流、拥挤流、阻塞流 4 种重载随机车流作用下,四跨连续 T 梁桥的边跨边梁跨中振动能量峰值主要集中在 3.5 ~ 5 Hz 和 9 ~ 9.38 Hz 频率处。随着车流密度增大、车速降低,随机车流引起桥梁振动能量峰值呈现先增大后减小的趋势,且在密集车流时达到最大。

(3)重载车流从自由流向阻塞流转变,低阶频率振动能量峰值对应的频率有逐渐增大的趋势。密集流和拥挤流在十阶基频之外的高频段出现明显的周期性能量峰值,自由流和阻塞流功率谱曲线在高阶频未出现周期性能量峰值。

参考文献

[1] 张颂. 复合式断面高速公路交通组织与关键指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
(ZHANG Song. Study on traffic organization and key index of expressway with combined type cross section [D]. Xi'an: Chang'an

- University, 2021.)
- [2] 王政杰. 基于可变元胞传输模型下的交通拥堵识别[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023. (WANG Zhengjie. Traffic congestion recognition based on variable cell transmission model [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.)
 - [3] 韩万水, 马麟, 汪炳, 等. 随机车流-桥梁系统耦合振动精细化分析与动态可视化[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 78-87. (HAN Wanshui, MA Lin, WANG Bing, et al. Refinement analysis and dynamic visualization of traffic-bridge coupling vibration system [J]. China journal of highway and transport, 2013, 26(4): 78-87.)
 - [4] 陈水生, 赵辉, 李锦华, 等. 随机车流作用的公路斜拉桥振动响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 84-94. (CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, et al. Vibration response analysis of highway cable-stayed bridge under stochastic traffic flow [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(1): 84-94.)
 - [5] 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, 2007, 12(6): 755-764.
 - [6] CHEN S R, WU J. Dynamic performance simulation of long-span bridge under combined loads of stochastic traffic and wind [J]. Journal of bridge engineering, 2009, 15(3): 219-230.
 - [7] 周军勇, 苏建旭, 齐飒. 基于元胞自动机微观模拟的随机车流与桥梁耦合振动数值研究[J]. 工程力学, 2021, 38(2): 187-197. (ZHOU Junyong, SU Jianxu, QI Sa. Numerical investigation on random traffic-bridge coupled vibration using cellular automaton based microscopic simulation [J]. Engineering mechanics, 2021, 38(2): 187-197.)
 - [8] 隋新宇. 应用于重型载货车的车辆质量估计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2023. (SUI Xinyu. Research on vehicle mass estimation method applied to heavy truck [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.)
 - [9] 赵少杰, 任伟新. 公路桥梁车辆荷载截尾分段概率模型及应用[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 260-267. (ZHAO Shaojie, REN Weixin. Piecewise truncation probability distribution model of vehicle loads for highway bridges and its application [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(6): 260-267.)
 - [10] RICKERT M, NAGEL K, SCHRECKENBERG M, et al. Two lane traffic simulations using cellular automata [J]. Physica a: statistical mechanics and its applications, 1996, 231: 534-550.
 - [11] CHOWDHURY D, WOLF D E, SCHRECKENBERG M. Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: effects of lane-changing rules [J]. Physica a statistical mechanics & its applications, 1997, 235(3/4): 417-439.
 - [12] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic [J]. Journal de physique, 1992, 2(12): 2221-2229.
 - [13] 刘伟铭. 高速公路系统控制方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998. (LIU Weiming. System control method for freeway [M]. Beijing: China Communications Publishing, 1998.)
 - [14] 郝媛, 徐天东, 干宏程, 等. 城市快速路交通流特性研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006, 4(4): 21-27. (HAO Yuan, XU Tiandong, GAN Hongcheng, et al. Research on traffic stream characteristics of urban expressway [J]. Journal of transportation engineering and information, 2006, 4(4): 21-27.)
 - [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. (GUI Shuirong, CHEN Shuisheng, 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.)
 - [16] 吴孟畅. 基于随机车流的公路桥车桥耦合振动分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. (WU Mengchang. Coupled vibration analysis of highway bridge based on random flow [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.)
 - [17] 贾斌, 高自友, 李克平, 等. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (JIA Bin, GAO Ziyu, LI Keping, et al. Models and simulations of traffic system based on the theory of cellular automaton [M]. Beijing: Science Press, 2007.)
 - [18] 夏运达, 赵杨. 考虑前后车速和减速幅度的元胞自动机模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 73-79. (XIA Yunda, ZHAO Yang. Cellular automaton model considering velocity of the front and rear vehicles and deceleration values [J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2019, 19(2): 73-79.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)