

计算车桥耦合振动路面不平度影响的虚拟梁元法

冯冠杰,陈 淮,王 艳,陈代海

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:为了准确、高效计算车桥耦合振动中路面不平度的影响,提出一种在车桥耦合竖向振动分析中处理路面不平度的虚拟梁元法,采用界面接触法建立车辆和路面不平顺轨迹刚性梁间的耦合传力,同时将不平顺轨迹刚性梁模拟成机动体系与桥梁结构建立连接,将虚拟梁元作为车轮的行驶轨迹,简化路面不平度输入时的编程难度。研究表明:所设置的虚拟梁元对桥梁结构竖向刚度 and 自振特性没有影响;虚拟梁元法计算结果受有限元模型网格划分尺寸影响很小,结果稳定性好;不同车辆模型分别以不同速度通过路面平顺状态下的简支梁算例桥梁时,分离迭代法计算的跨中位移最大动挠度与文献结果最大相对偏差 1.14%,虚拟梁元法与文献结果最大相对偏差为 2.06%;1/4 车辆以 40 km/h 的车速通过算例桥梁时,A 级路面不平顺下,2 种方法获得的跨中位移动挠度相对偏差为 1.58%,B 级路面为 2.99%,C 级路面为 3.62%;采用虚拟梁元法计算 7 自由度空间车辆以不同车速通过平面简支板桥的车桥耦合振动效应时,跨中位移最大动挠度与文献结果最大相对偏差为 2.45%;比较分离迭代法和虚拟梁元法在求解同一问题时的 CPU time 花费,虚拟梁元法用时为分离迭代法的 1/4,效率较高。虚拟梁元法可以准确计入路面不平度的影响,且在求解空间车辆和三维桥梁车桥耦合振动问题时具有较高的精度,比传统的分离迭代法具有较高的计算效率。

关键词:桥梁工程;虚拟梁元;接触分析;车桥耦合振动;路面不平度

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.007

Virtual beam element method used to calculate the vehicle-bridge coupled vibration with road roughness

FENG Guan-jie, CHEN Huai, WANG Yan, CHEN Dai-hai

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: To accurately and efficiently calculate the effects of road roughness on the vehicle-bridge coupling vibration problem, a method employing virtual unevenness beam elements in the contact analysis procedure was proposed to deal with the road roughness. The interface contact method was used to establish the coupling force transfer between the vehicle and the rigid beam of the uneven track. The rigid beam of the uneven track was simulated as a motorized system to establish the connection between the vehicle and the bridge structure, and the rigid beam of the uneven track was set as the driving track of the wheel, the programming difficulty of the input for road roughness was simplified. The results show that the setting of virtual unevenness beam

收稿日期:2019-04-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51408557);河南省科技攻关项目(152102310295)

作者简介:冯冠杰(1986-),男,河南安阳人,工学博士研究生,E-mail:fgjaqh@126.com。

通讯作者:陈 淮(1962-),男,河南淮阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:chenh@zzu.edu.cn。

elements has no effect on the structural stiffness and structural natural dynamic characteristics. The results of the virtual beam element method were barely affected by the element size of the finite model of a simply supported beam, and the results are stable. When the example bridge with a smooth surface is crossed by different kinds of vehicles at different speeds, the difference between the separate iteration method results and the reference result is 1.14%, for the mid-span maximum dynamic displacement, the difference between the virtual unevenness beam elements method results and the reference result is 2.06%. When the example bridge with road roughness class A is crossed by a 1/4 model vehicle at 40 km/h. The mid-span maximum dynamic deflection the difference between the two methods is 1.58%, while with road roughness class B, the difference is 2.99%, and with road roughness class C, the difference is 3.62%. Using the virtual unevenness beam elements method, when the plane slab bridge is crossed by seven degrees of freedom vehicles at different speeds, the maximum difference compared with the reference result is 2.45%. Comparing the CPU time cost between the two methods, the time cost of the separation iterative method is four times that for the virtual unevenness beam element method, which has higher efficiency. The virtual beam element method can accurately take into account the influence of road surface roughness, and has higher accuracy in solving the coupling vibration problems of space vehicles and three-dimensional bridges, and exhibit higher calculation efficiency, compared with the traditional separation iteration method. 5 tabs, 10 figs, 25 refs.

Key words: bridge engineering; virtual beam element; contact analysis; vehicle-bridge coupled vibration; road roughness

0 引言

车桥耦合振动是桥梁工程研究中的重要问题,桥梁动力特性、车辆动力特性、路面不平度等因素都会对车桥耦合振动产生影响^[1-2],而路面不平度是引起车桥耦合竖向振动的重要激励之一。Fukada 等调查 1 座跨径为 37.47 m 的预应力混凝土桥梁,研究指出第 2 车道修复处理前的路面不平度具有一定的空间波长,卡车行驶其上引起的桥梁动应力比修复后增大 40%,且冲击系数也比修复后大 1/3 左右,因此,路面不平度对桥梁动力响应有放大作用^[3]。韩万水等利用实测获得的 2 个典型不平度样本进行车桥耦合振动分析,结果表明,路面不平顺样本激励一致性和非一致性的差别对车桥耦合振动的响应有明显影响,对车轮竖向接触力以及车桥系统的频谱特性也有明显影响^[4]。张建波等在考虑路面不平顺随机性的情况下,将传统研究中准静态影响线的概念扩展成动态影响线的概念,研究得出桥梁跨中挠度和应力的标准差受桥面不平顺等级变化的影响较大,且随着桥面不平顺等级的提高而成倍增加,相比仅考虑车辆移动效应,计入路面不平顺随机激励将使桥梁的动力响应增大 20%^[5]。Rezaigui 等研究了多跨连续正交异性桥梁在车辆行驶影响

下的动力放大效应,结果表明,路面不平度引起的随机激励作用对车桥耦合振动系统冲击系数的影响远大于荷载类型、车速等因素的影响^[6]。因此,准确计入路面不平度的影响,是车桥耦合竖向振动分析的关键。

现有研究中,路面不平度有 2 种模拟方法:①认为路面不平度是符合一定功率谱密度函数特征的随机过程^[6-8],可以变换成离散的路面不平度序列;②以实测的路面不平度样本数据建立模型^[9-10]。在车桥耦合振动分析中,将获得的路面不平度模型看作车轮与路面间具有时变效应的位移约束,以此考虑其对车桥耦合振动的影响。宋一凡等将路面不平度转换为一组路面不平度离散序列,带入车辆振动微分方程,通过 MATLAB 编程求解,但是针对复杂桥梁的车桥耦合振动问题,该方法无法直接建立复杂桥梁的有限元模型,前处理工作费时费力^[11]。章长玖等将路面不平度离散序列带入分离迭代法程序,实现车桥耦合竖向振动分析,该方法有一定的通用性,但对复杂大型桥梁每一步迭代都需要读入路面不平度数据^[12-16]。也有学者将路面不平度转换成车轮与桥梁的接触力向量,代入车桥耦合振动方程进行求解。文献[8]采用弱平稳二阶遍历随机过程对路面不平度进行模拟,将路面不平度的影响转化

为车辆受到由于基础运动产生的荷载,且基础运动具有不规则的路面轮廓线。文献[17]采用接触算法,将刚性梁模型中的梁体形状设置为桥梁几何线形和轨道线形的叠加,使实际车辆在刚性梁模型上行驶,获得车桥之间的接触力数值并代入移动力模型中求解,然后在2个模型之间循环计算并以位移作为收敛准则。

本文提出一种处理车桥耦合竖向振动路面不平度问题的虚拟梁元法,首先采用界面接触法建立车辆和桥梁的接触传力机理,其中界面接触位于车辆模型和路面不平顺轨迹之间,不平顺轨迹采用不可变形刚性梁模拟,同时,将不平顺轨迹刚性梁设计成机动体系与桥梁结构建立连接。该方法考虑车桥耦合振动中路面不平顺激励的影响,简化编程难度,且具有较高的计算精度和效率。

1 虚拟梁单元

在位移接触法中设置1组虚拟梁单元,通过虚拟梁单元节点坐标的起伏变化模拟路面竖向不平顺,同时将虚拟梁单元设置为目标单元,与车轮形成接触对,其目的是使车轮的行驶轨迹与虚拟梁单元重合。虚拟梁单元的设置方式如图1所示。

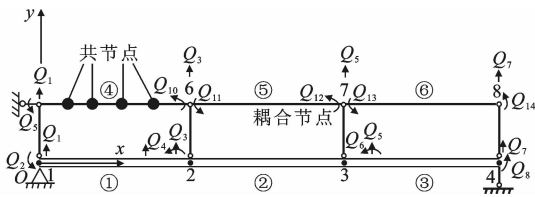


图1 设置虚拟梁单元的简支梁有限元离散

Fig.1 Finite element discrete of simply supported beam with virtual beam

图1中:坐标系 xOy 原点选为节点1位置;①~③为简支梁主梁单元编号;1~4为简支梁单元节点编号; $Q_1 \sim Q_8$ 为简支梁单元节点1~4的平面自由度;④~⑥为虚拟梁单元编号;5~8为虚拟梁单元节点编号; $Q_9 \sim Q_{14}$ 为虚拟梁单元节点5~8的平面自由度。为使虚拟梁元法能准确计入路面不平度的影响,设置的虚拟梁单元需满足以下条件:①虚拟梁单元长度可根据路面不平顺样本间距生成多根梁单元,同时通过单元节点坐标反映路面不平度的起伏不平;②虚拟梁单元定义为接触目标单元,作为车轮在桥梁上的行驶轨迹;③因为路面不平顺样本间距的取值一般较小,所以虚拟梁节点密度一般大于其主梁网络的节点密度,虚拟梁节点与主梁节点并不一一对应,虚拟梁节点中需

要与主梁建立连接关系的节点称为耦合节点,如图1所示的5~8节点,不需要与主梁节点建立耦合关系的节点称为共节点。耦合节点处释放虚拟梁单元的转动自由度,虚拟梁在该节点形成铰接,可以转动,同时在耦合节点与对应主梁节点 y 方向建立竖向自由度约束,如图1中5~8节点通过支撑连杆与主梁1~4节点建立约束关系,这样就保证了耦合节点间的虚拟梁为具有路面不平顺变化(通过共节点竖向 y 坐标的大小实现)的简支结构,车轮对虚拟梁单元冲击力通过耦合节点与主梁的约束关系传递给主梁结构;④约束虚拟梁单元始点 x 方向的自由度;⑤设置虚拟梁单元为刚性梁单元;⑥设置虚拟梁单元的质量密度为0。

为论证简支梁设置虚拟梁单元后(图1)结构竖向刚度的变化,以图2所示简支梁为例进行说明。



图2 简支梁的有限元离散

Fig.2 Finite element discrete of simply supported beam

根据有限元理论,简支梁结构整体位移向量可表示为 $\mathbf{u} = (y_1, \theta_1, y_2, \theta_2, y_3, \theta_3, y_4, \theta_4)^T$,其中: $y_1 \sim y_4$ 为节点1~4的竖向平动位移; $\theta_1 \sim \theta_4$ 为各节点的转角。根据有限元法形成结构整体刚度矩阵 \mathbf{K} ,根据结构边界条件 $y_1 = 0, y_4 = 0$,整体刚度矩阵缩减为

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{l_e^3} \begin{bmatrix} 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 & 0 & 0 & 0 \\ -6l_e & 24 & 0 & -12 & 6l_e & 0 \\ 2l_e^2 & 0 & 8l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 & 0 \\ 0 & -12 & -6l_e & 24 & 0 & 6l_e \\ 0 & 6l_e & 2l_e^2 & 0 & 8l_e^2 & 2l_e^2 \\ 0 & 0 & 0 & 6l_e & 2l_e^2 & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: l_e 为单元长度; EI 为梁单元抗弯刚度, E 为弹性模量, I 为材料截面惯性矩。

对图1所示结构体系,1~3单元的单元长度均为 l_e ,抗弯刚度为 EI ,4~6单元的单元长度也为 l_e ,4~6为刚性梁单元,整体位移向量可用列阵表示为 $\mathbf{U} = (y_1, \theta_1, y_2, \theta_2, y_3, \theta_3, y_4, \theta_4, \theta_{56}, \theta_{65}, \theta_{67}, \theta_{76}, \theta_{87})^T$,根据结构边界条件和自由度几何关系有

$$y_1 = 0, y_4 = 0, \theta_{56} = \theta_{65} = \frac{y_2}{l_e}, \theta_{67} = \theta_{76} = \frac{y_3 - y_2}{l_e},$$

$$\theta_{78} = \theta_{87} = \frac{-y_3}{l_e}$$

式中: θ_{pq} 为节点 p 和节点 q 间的虚拟梁在节点 p 处的转动角度, p, q 取5~8。

图 1 所示结构体系的整体刚度矩阵同样缩减为刚度矩阵[式(1)],此时对应的荷载向量 $\mathbf{F} = (F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_8)^T$, $F_1 \sim F_8$ 为各节点的荷载,结构位移向量 $\mathbf{U} = (\theta_1, y_2, \theta_2, y_3, \theta_3, \theta_4)^T$ 。

由此可知,当竖向荷载作用在结构节点上时,是否设置虚拟梁单元对简支梁结构的刚度无影响。结构自由度均为 $\mathbf{Q} = (Q_1, y_2, Q_2, y_3, Q_3, Q_4)^T$, 由于虚拟梁单元的质量密度为 0, 设置虚拟梁单元不改变结构的动能项 T ; 又因为假设虚拟梁单元为刚性梁, 即虚拟梁单元不存在弹性变形, 弹性势能为 0, 设置虚拟梁单元不改变结构的弹性势能项。由结构动力学原理^[18]可知, 引入虚拟梁结构, 不会改变结构的动力特性。

2 路面不平度的功率谱密度

一般认为路面不平度是平稳的、各态历经零均值的 Gauss 随机过程, 路面不平度的数值模拟方法主要有谐波叠加法、积分单位白噪声法、滤波器整形白噪声法、自回归滑动平均模型 (ARMA) 法、离散傅里叶变换法等, 其中离散傅里叶变换法是较为准确的一种方法^[19-25], 本文采用离散傅里叶变换^[19-20], 获得 A、B、C、D、E 级路面不平度数据, 如图 3 所示。

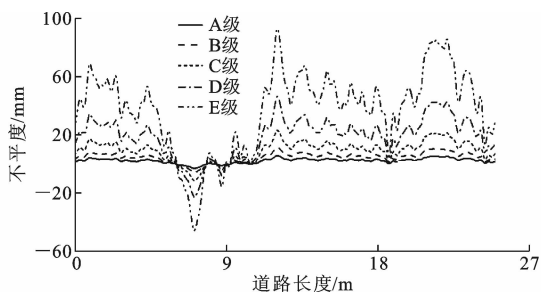


图 3 A~E 级路面不平度曲线

Fig. 3 Roughness curves of grade A to E

3 车辆模型和桥梁模型

在车桥耦合竖向振动分析中, 可将车辆理想化为移动质量、1/4 车或 1/2 车、空间车辆模型等。移动质量通过简支梁桥时竖向振动问题有理论解; 1/4 车、1/2 车、空间车辆模型通过简支梁(板)桥的车桥耦合竖向振动分析算例较多, 均可用来验证本文方法的适用性和合理性。其中 1/4 车辆模型仅考虑车体和车轮的竖向位移自由度; 1/2 车辆模型考虑各车轮的竖向位移自由度和车体的俯仰、沉浮自由度; 空间车辆模型考虑各车轮的竖向位移自由度和车体的

俯仰、沉浮、侧倾自由度, 如图 4 所示。图 4 中: $k_{t1} \sim k_{t4}$ 为车辆轮胎的刚度系数; $c_{t1} \sim c_{t4}$ 为车辆轮胎的黏滞阻尼系数; $k_1 \sim k_4$ 为车辆的悬架刚度系数; $c_1 \sim c_4$ 为车辆的悬架黏滞阻尼系数; $q_1 \sim q_4$ 为车轮的竖向位移向量; $m_1 \sim m_4$ 为车辆前后轴的轮对质量; M_0 、 I_θ 、 I_α 分别为车体质量、车体点头刚度和车体侧滚转动刚度; S_1 、 S_2 分别为车辆的轴距和轮距; $a_1 \sim a_4$ 为以车体质心为中心的轴距和轮距的分配系数, 符合 $a_1 + a_2 = 1$, $a_1, a_2 \in (0, 1)$, $a_3 + a_4 = 1$, $a_3, a_4 \in (0, 1)$ 。其自身振动方程式为^[21-22]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K}\mathbf{Z} = \mathbf{K}_t\mathbf{Q} + \mathbf{C}_t\dot{\mathbf{Q}} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Q} = (q_1, q_2, q_3, q_4)^T$ 为车轮竖向位移自由度向量; $\mathbf{Z} = (Z_G, \theta, \alpha, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)^T$ 为车架空间位移自由度向量, $Z_1 \sim Z_4$ 为与 $m_1 \sim m_4$ 对应的竖向位移向量, Z_G 为车架的沉浮位移, θ 为车架的俯仰转动角度, α 为车架的侧滚角度; \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为车辆的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\mathbf{K}_t\mathbf{Q} + \mathbf{C}_t\dot{\mathbf{Q}}$ 为车辆轮胎与桥面接触点的相互作用力, \mathbf{K}_t 、 \mathbf{C}_t 为对角矩阵, $\mathbf{K}_t = \text{diag}(k_{t1}, k_{t2}, k_{t3}, k_{t4})$, $\mathbf{C}_t = \text{diag}(c_{t1}, c_{t2}, c_{t3}, c_{t4})$ 。

为进一步验证本文方法, 分析了上述 4 种车辆模型通过简支梁(板)桥时的车桥耦合振动。由于 1/4、1/2 车辆模型比较简单, 车辆图形和振动方程可参阅相关文献。

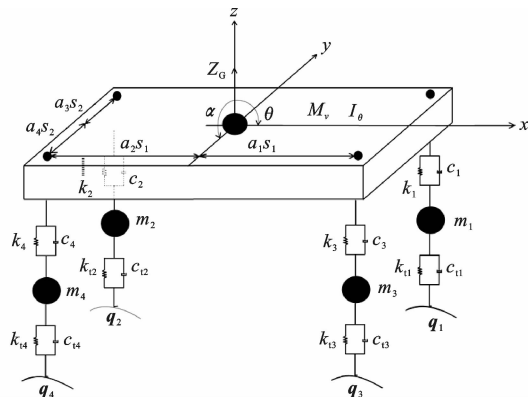


图 4 7 自由度空间车辆模型

Fig. 4 A 3D vehicle with seven degrees of freedom

4 数值求解

基于 ANSYS 有限元软件 APDL 编程语言, 编制车桥耦合振动分离迭代法程序和虚拟梁元法程序, 首先检验路面平顺时所编程序的正确性, 然后比较路面不平度等级分别为 A、B、C 时 2 个程序计算结果的差异。本文简支梁桥和车辆特性参数采用文献^[21]中的算例数据。简支梁跨长 16 m; 单位长度质量 $9.36 \times 10^3 \text{ kg/m}$; 抗弯刚度 $2.05 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。

质量块模型: $m_1 = 47\ 160\ \text{kg}$ 。1/4 车辆模型: $m_2 = 8\ 660\ \text{kg}$; 车体质量 $m_b = 38\ 500\ \text{kg}$; 车轮刚度 $k_a = 8.56 \times 10^6\ \text{N/m}$; 车架悬挂弹簧刚度 $k_b = 5.07 \times 10^6\ \text{N/m}$; 车轮阻尼 $c_a = 1.96 \times 10^5\ \text{kg/s}$; 车架悬架弹簧阻尼 $c_b = 3.82 \times 10^5\ \text{kg/s}$ 。1/2 车辆模型: $m_1 = m_2 = 4\ 330\ \text{kg}$; 车体质量 $M = 38\ 500\ \text{kg}$; $I_a = 2.446 \times 10^6\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$; 车辆前后轴距 $l_u = 8.4\ \text{m}$; $k_{t1} = k_{t2} = 4.28 \times 10^6\ \text{N/m}$; $k_1 = k_2 = 2.535 \times 10^6\ \text{N/m}$; $c_{t1} = c_{t2} = 9.8 \times 10^4\ \text{kg/s}$; 前后车架悬架弹簧阻尼 $c_1 = c_2 = 1.96 \times 10^5\ \text{kg/s}$ 。为进一步验证虚拟梁元法可有效求解空间车桥耦合振动问题,建立了整体车桥耦合振动分析模型,包括空间车辆、桥梁模型以及桥面板上设置的路面不平度虚梁,进而采用编制的虚拟梁元法程序进行

求解文献[23]中简支板桥车桥耦合振动分析,空间 7 自由度车辆参数和简支板桥参数见文献[23]。

4.1 单元网格尺寸影响分析

16 m 跨简支梁单元网格尺寸选择 0.1、0.2、0.4、0.5、0.8、1.2 m 共 7 种情况建立梁单元有限元模型,对应的单元数量依次为 160、80、40、32、20、16、8 个,虚拟梁单元长度根据路面不平顺样本间距 0.1 m 生成网格单元,同时按照前述虚拟梁耦合节点的生成规则释放耦合节点自由度形成铰接,分别采用上述 7 种有限元模型计算 1/4 车分别以车速 40、80、120、160 km/h 通过平顺路面简支梁桥时的跨中位移响应最大值,虚拟梁元法程序计算结果如表 1 所示。

表 1 单元网格尺寸影响分析
Tab. 1 Impact analysis of element size

车速/ (km · h ⁻¹)	不同单元网格尺寸(m)下的位移影响最大值/mm							最大相对 偏差/%
	0.1	0.2	0.4	0.5	0.8	1.0	2.0	
40	-1.959	-1.974	-1.976	-1.976	-1.968	-1.980	-1.976	1.06
80	-2.005	-2.033	-2.031	-2.035	-2.033	-2.031	-2.037	1.60
120	-2.031	-2.034	-2.036	-2.035	-2.033	-2.023	-2.001	1.75
160	-2.202	-2.220	-2.219	-2.220	-2.218	-2.213	-2.181	1.78

由表 1 可知:车辆以 40、80、120、160 km/h 运动时,7 种网格尺寸的有限元模型跨中位移响应最大值结果接近,最大相对偏差分别为 1.06%、1.60%、1.75%、1.78%。总的来说简支梁模型单元尺寸在 0.1~2 m 范围内变化时,1/4 车辆通过平顺路面简支梁桥时的跨中位移响应最大值相对偏差为 1.78%。因此,可知虚拟梁元法中主梁单元网格尺寸对耦合振动影响很小,该结果稳定性很高。

4.2 平顺路面车辆通过桥梁

根据第 4.1 节单元网格尺寸影响分析的结论,以下均采用单元尺寸为 0.1 m 的简支梁有限元模型进行计算,首先计算质量块分别以速度 40、80、120、160 km/h 通过跨径 16 m 简支梁桥的跨中位移响应。在分离迭代法中,认为路面平顺;在虚拟梁元法中,将虚拟梁的节点坐标设置为平顺线形。分离迭代法程序计算结果见图 5(a),虚拟梁元法程序计算结果见图 5(b),跨中节点出现最大位移时的车辆位置见表 2。计算结果表明:2 种方法计算结果与文献[21]结果一致,在不同车速下,2 种方法计算得到的跨中节点最大位移数值基本相同,跨中出现最大位移时移动荷载所在位置基本相同,移动质量以 160 km/h 的速度移动时,文献[21]中给出的跨中位置最大动挠度为 2.185 mm,分离迭代法计算结果

为 2.21 mm,比文献[21]结果大 1.14%;虚拟梁元法计算结果为 2.14 mm,比文献[21]结果小 2.06%,可以认为 2 种方法在平顺路面条件下计算结果一致。

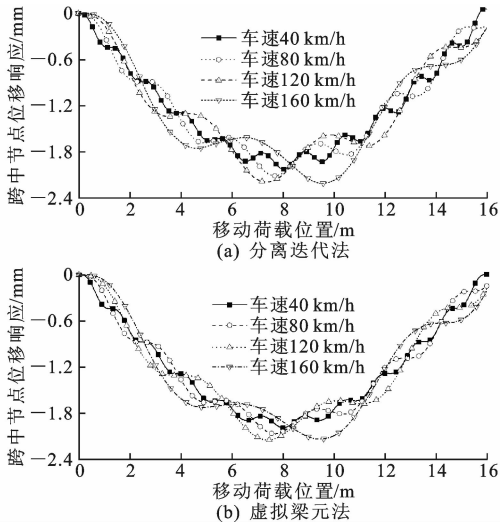


图 5 质量块模型作用下跨中位移时程曲线
Fig. 5 Displacement histories at mid-span under action of quality of block

计算 1/4 车辆分别以速度 40、80、120、160 km/h 通过跨径 16 m 简支梁桥的跨中位移响应。分离迭代法程序计算结果见图 6(a),虚拟梁元法程序计算

结果见图 6(b),跨中节点出现最大位移时移动车辆的位置见表 3。由计算结果可知:2 种方法计算结果与文献[21]结果一致,在不同车速下,2 种求解方法求得的跨中节点最大位移数值基本相同,出现最大位移时移动荷载所在位置基本相同;移动质量块以 160 km/h 的速度移动时,文献[21]结果表明,分离迭代法,虚拟梁元法的跨中最大动挠度均为 2.21 mm。因此,可以认为 2 种方法在平顺路面条件下,1/4 车辆结果与文献[21]结果一致。

计算 1/2 车辆分别以速度 40、80、120、160 km/h,通过跨径 16 m 简支梁桥的跨中位移响应。分离迭代法程序计算结果见图 7(a),虚拟梁元法程序计算结果见图 7(b),跨中节点出现最大位移时移动车辆的位置见表 4。由计算结果可知:在不同车速下,2 种方法求得的跨中节点最大位移数值、跨中出现最大位移时移动荷载所在位置基本相同,移动质量块以 160 km/h 速度移动时,文献[21]的跨中位置最

大动挠度为 1.46 mm,分离迭代法的跨中位移最大动挠度为 1.47 mm,比文献[21]结果大 0.2%;虚拟梁元法的跨中最大动挠度为 1.45 mm,比文献[21]结果小 0.66%。可以认为 2 种方法在平顺路面条件下,1/2 车辆模型与文献[21]结果一致。

可以看出:无论是分离迭代法或是虚拟梁元法,随车速的提高,桥梁跨中节点位移响应波动减弱;桥梁跨中节点位移响应最大值发生在车辆位于跨中位置左右;与移动质量块结果比较,1/4 车辆、1/2 车辆过桥的跨中节点波动频率增加,可见考虑车辆动力特性后,由于弹簧、阻尼的作用,车桥的耦合效应增加;1/2 车辆模型过桥时跨中节点最大位移明显小于移动质量块和 1/4 车辆模型过桥时的结果,这是由于 1/2 车辆考虑了车辆的长度和点头刚度,车辆与桥梁的接触点由 1 点变为 2 点。2 种方法在计算平顺路面车辆过桥时均能获得正确的结果。

表 2 跨中节点最大位移时车辆位置(移动质量块)

Tab. 2 Positions of vehicle under maximum displacement of mid-span (moving mass)

车速	40 km · h ⁻¹		80 km · h ⁻¹		120 km · h ⁻¹		160 km · h ⁻¹	
	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm
分离迭代法	8.05	-2.02	7.70	-2.11	7.40	-2.19	9.60	-2.21
虚拟梁元法	8.00	-1.99	7.76	-2.07	7.40	-2.15	9.50	-2.14

表 3 跨中节点最大位移时车辆位置(1/4 车)

Tab. 3 Positions of vehicle under maximum displacement of mid-span (1/4 vehicle)

车速	40 km · h ⁻¹		80 km · h ⁻¹		120 km · h ⁻¹		160 km · h ⁻¹	
	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm
分离迭代法	8.40	-1.97	9.00	-2.01	6.60	-2.04	8.50	-2.21
虚拟梁元法	8.40	-1.96	9.00	-2.00	6.60	-2.04	8.50	-2.21

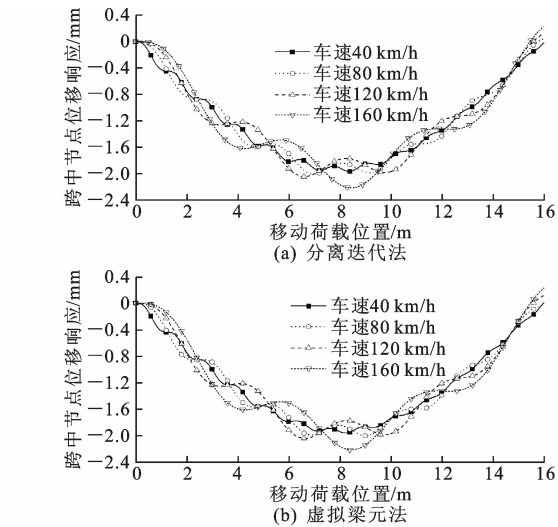


图 6 1/4 车辆模型作用下跨中位移时程曲线
Fig. 6 Displacement histories at mid-span under action of 1/4 vehicle model

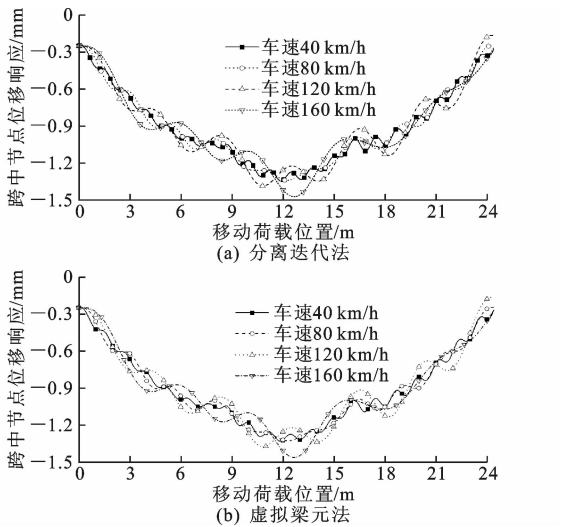


图 7 1/2 车辆模型作用下跨中位移时程曲线
Fig. 7 Displacement histories at mid-span under action of 1/2 vehicle model

4.3 不平顺路面车辆通过桥梁

计算 1/4 车辆以 40 km/h 速度通过跨径 16 m 简支梁桥,在分离迭代法中,计入路面不平顺;在虚拟梁元法中,将虚拟梁的各个竖向节点坐标设置为路面不平度等级对应线形。2 种方法计算结果的对比见图 8。由图 8 可知:在 3 种路面不平度等级下,采用 2 种方法计算得到的跨中位移的振动频率一致;路面不平度等级为 A 级时,分离迭代法、虚拟梁元法计算的跨中最大动位移分别为 2.11、2.15 mm,2 种方法的偏差

为 1.58%;路面不平度等级为 B 级时,分离迭代法、虚拟梁元法计算的跨中最大动位移分别为 2.28、2.25 mm,2 种方法的偏差为 2.99%;路面不平度等级为 C 级时,其计算的跨中最大动位移分别为 2.66、2.76 mm,2 种方法的偏差为 3.62%。因此,2 种方法计算的跨中位移振动频率一致,跨中最大动位移结果基本一致,且随着路面不平度等级的提高,主梁跨中节点最大动位移逐渐增加。采用虚拟梁元法处理车桥耦合振动问题,可以准确计入路面不平度的影响。

表 4 跨中节点最大位移时车辆位置(1/2 车)

Tab. 4 Positions of vehicle under maximum displacement of mid-span (1/2 vehicle)

车速	40 km · h ⁻¹		80 km · h ⁻¹		120 km · h ⁻¹		160 km · h ⁻¹	
	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm
分离迭代法	11.90	-1.31	12.20	-1.31	10.80	-1.36	12.70	-1.47
虚拟梁元法	11.80	-1.29	12.30	-1.29	10.90	-1.35	12.67	-1.45

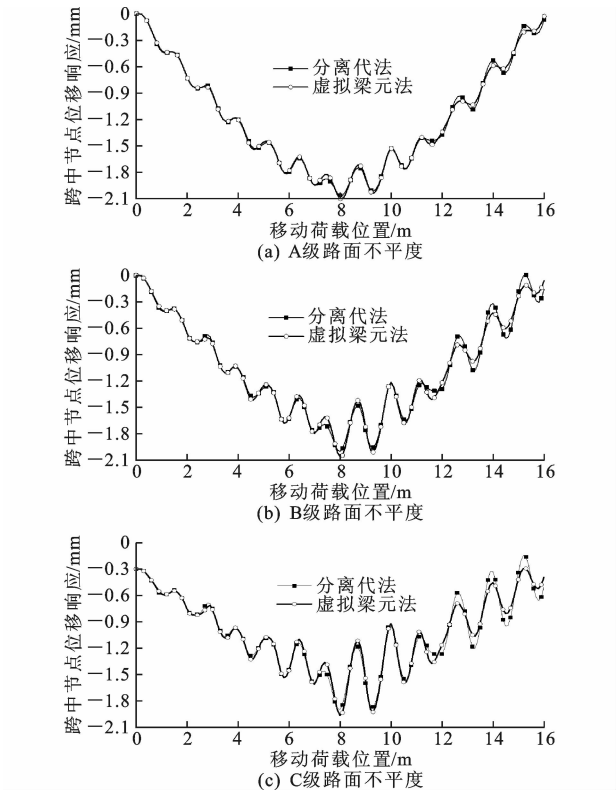


图 8 跨中竖向位移时程比较

Fig. 8 Comparisons of vertical displacement of mid-span

4.4 平顺路面车辆过桥的空间振动分析

7 自由度空间车辆与平面简支梁板桥采用虚拟梁元建立耦合振动关系时,与 1/4 车、1/2 车不同,7 自由空间车辆需要建立 2 道虚拟梁车轮轨迹线,分别对应 2 排车轮行驶轨迹,且虚拟梁间距等于车轮间距。在此基础上计算 7 自由度空间车辆分别以速度 8、20、40、80 m/s 通过跨径 80 m 简支梁桥的跨中位移响应。在虚拟梁元法中,将虚拟梁的节点坐标

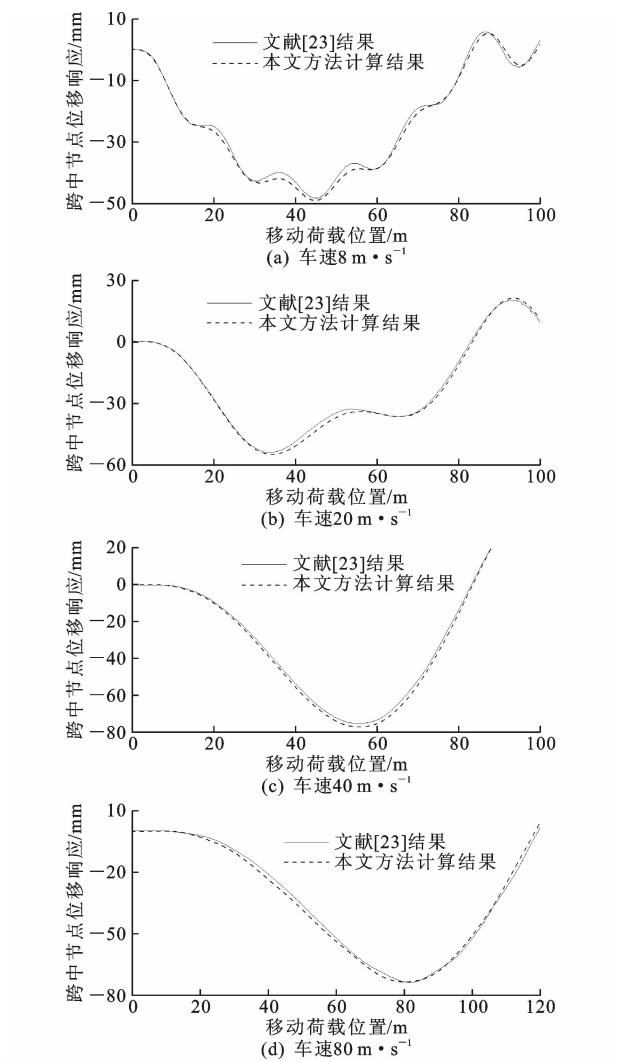


图 9 7 自由度空间车辆作用下简支板桥跨中位移时程

Fig. 9 Displacement histories at mid-span of a plate bridge under action of a 3D vehicle with seven degrees of freedom

设置为平顺线形。虚拟梁元法计算结果见图 9,跨中节点出现最大位移时的车辆位置见表 5。计算结果可知:虚拟梁元法计算结果与文献[23]结果一致,在不同车速下,2 种求解方法计算得到的跨中节点最大位移数值、跨中出现最大位移时移动荷载所在位置基本相同;空间车辆分别以 8、20、40、80 m/s 的

表 5 跨中节点最大位移时车辆位置表(移动质量)

Tab. 5 Positions of vehicle under maximum displacement of mid-span(moving mass)

车速	8 m · s ⁻¹		20 m · s ⁻¹		40 m · s ⁻¹		80 m · s ⁻¹	
	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm	车辆位置/m	响应峰值/mm
文献[23]结果	43.35	-48.22	32.47	-54.26	53.05	-75.40	81.74	-73.68
虚拟梁元法	43.20	-49.02	33.00	-55.16	54.00	-77.25	80.64	-73.45

4.5 计算效率比较

通过 CPU time 的耗时来比较程序运行的效率,CPU time 为 ANSYS 软件记录的 CPU 在处理特定任务所耗费的净时间。为此提取 1/4 车在路面平顺状态下的车桥耦合振动分析的 CPU time,计算均在同一电脑硬件上完成,计算模型均为算例中的简支梁模型,主梁划分为 160 个单元,但是虚拟梁元法需要多划分 160 个虚拟梁单元(虚拟梁元法主梁单元规模为 320 个),分离迭代法单元划分为 160 个;2 种方法的荷载步数均为 164;计算工况车速为 40、80、120、160 km/h,结果如图 10 所示。

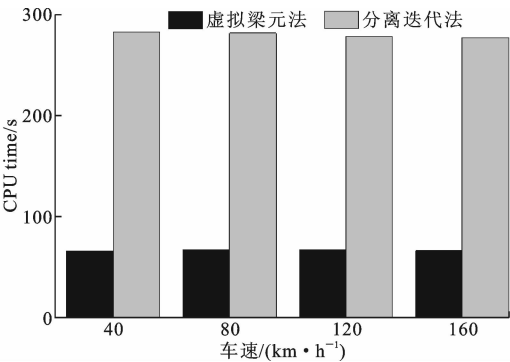


图 10 CPU time 耗时
Fig. 10 Cost of CPU time

由图 10 可知,分离迭代法程序的 CPU time 耗时约为虚拟梁元法的 4 倍多,这是因为分离迭代法中车辆动力响应采用数值方法求解车辆微分方程获得,计算过程中每步计算都要获得桥梁反馈的求解条件并读取该位置的路面不平顺数据,同时车辆和桥梁 2 个系统间需要反复多次交换数据才能达到收敛。对于车队行驶,则存在多辆车辆的编程求解问题,编程工作量较大。虚拟梁元法相当于整体法计算,车辆与桥梁通过有限元程序形成统一的整体刚

度通过简支板桥时,采用虚拟梁元法计算得到的桥梁跨中最大动挠度与文献[23]结果相对偏差分别为 1.68%、1.67%、2.45%、0.31%,虚拟梁元法求解空间车辆通过 3 维桥梁的振动效应时具有较高的精确度,可以适用于空间车辆影响下的车桥耦合振动分析。

度矩阵,具有较高的求解效率。

5 结 语

- (1)所设置的虚拟梁元对桥梁结构竖向刚度和自振特性没有影响,可以准确传递车轮与桥梁之间的相互作用荷载。
- (2)虚拟梁元法中主梁单元网格尺寸对耦合振动问题的结果影响很小,计算稳定性较好。
- (3)虚拟梁元法与传统分离迭代法一样,在考虑路面不平度的车桥耦合振动分析时可以获得较高的精确度,适用于空间车辆影响下车桥耦合振动分析。
- (4)虚拟梁元法比分离迭代法具有更高的求解效率,1/4 车过桥时的虚拟梁元法的计算效率是分离迭代方法的 4 倍以上。
- (5)本文方法解决了车辆在桥梁上匀速直线行驶的情况,下一步将研究车辆曲线变速行驶时对桥梁产生的离心力、摩擦力的影响。

参考文献:

References:

[1] 李小珍,张黎明,张 洁. 公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势[J]. 工程力学,2008,25(3): 230-240.
LI Xiao-zhen, ZHANG Li-ming, ZHANG Jie. State-of-the-art review and trend of studies on coupling vibration for vehicle and highway bridge system[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 230-240.
[2] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 2 版. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
LI Guo-hao. Stability and vibration of bridge structures[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.

- [3] FUKADA S, MATSUMOTO T, OKADA H, et al. Dynamic response of bridge affected by periodic roughness with a long spatial wave length[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2014, 4(3): 149-163.
- [4] 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.
- [5] 张建波, 廖敬波, 唐光武, 等. 考虑桥面随机不平顺的桥梁动态响应研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 214-219.
ZHANG Jian-bo, LIAO Jing-bo, TANG Guang-wu, et al. Dynamic response of a bridge considering its surface random roughness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 214-219.
- [6] REZAIGUIA A, OUELAA N, LAEFER D F, et al. Dynamic amplification of a multi-span, continuous orthotropic bridge deck under vehicular movement[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 718-730.
- [7] WANG T L, HUANG D. Cable-stayed bridge vibration due to road surface roughness[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE 1992, 188(5): 1354-1373.
- [8] DA SILVA J G S. Dynamical performance of highway bridge decks with irregular pavement surface[J]. Computers & Structures, 2004, 82(11/12): 871-881.
- [9] CALCADA R, CUNHA A, DELGADO R. Analysis of traffic-induced vibrations in a cable-stayed bridge part I: Experimental assessment[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(4): 370-385.
- [10] HAN W, YUAN S, MA L. Vibration of vehicle-bridge coupling system with measured correlated road surface roughness[J]. Structural Engineering & Mechanics, 2014, 51(2): 315-331.
- [11] 宋一凡, 陈榕峰. 基于路面平整度的车辆振动响应分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 39-43.
SONG Yi-fan, CHEN Rong-feng. Analysis method of vehicle vibration response caused by pavement roughness[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 39-43.
- [12] 章长玖, 王贵春, 陈淮. 车辆过桥的动力响应研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 364-367.
ZHANG Chang-jiu, WANG Gui-chun, CHEN Huai. Dynamic response of bridge under moving vehicular loads[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 364-367.
- [13] 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 Edition, 2013, 32(4): 560-563.
- [14] 陈代海, 李整, 刘琼, 等. 公路桥梁2种车桥耦合振动分析方法的对比研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7): 1449-1456.
CHEN Dai-hai, LI Zheng, LIU Qiong, et al. Comparative research on two analysis methods for vehicle-bridge coupling vibration of highway bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(7): 1449-1456.
- [15] 吴定俊, 李奇, 陈艾荣. 车桥耦合振动迭代求解数值稳定性问题[J]. 力学季刊, 2007, 28(3): 405-411.
WU Ding-jun, LI Qi, CHEN Ai-rong. Numerical stability of iteration scheme for solution of vehicle-bridge coupling vibration[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, 28(3): 405-411.
- [16] 朱志辉, 龚威, 张磊, 等. 基于分离迭代和耦合时变的列车-轨道-桥梁耦合系统高效动力分析混合算法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1): 66-74.
ZHU Zhi-hui, GONG Wei, ZHANG Lei, et al. An efficient hybrid algorithm for dynamic analysis of train-track-bridge coupled system based on separation iterative method and coupled time-varying method[J]. China Railway Science, 2018, 39(1): 66-74.
- [17] 王新敏. ANSYS 结构动力分析与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
WANG Xin-min. ANSYS structural dynamic analysis and applications[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [18] 樊建平, 吴孟畅, 胡隽, 等. 基于界面接触算法的车桥耦合动力学分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 52-58.
FAN Jian-ping, WU Meng-chang, HU Jun, et al. Dynamic analysis of vehicle-bridge interaction based on interfacial contact algorithm[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 52-58.
- [19] 克拉夫 R W, 彭津 J. 结构动力学[M]. 王光远, 译. 北京: 科学出版社, 1985.
CLOUGH R W, PENZIEN J. Structure dynamics[M]. Translated by WANG Guang-yuan. Beijing: Science Press, 1985.