

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.013

连续梁桥跳车冲击下车桥耦合振动响应分析

张凡¹, 李雪峰¹, 肖润生²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省七星工程测试有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:为研究车辆在不同工况下发生跳车对变截面连续梁桥动力响应的影响,文章选用 1/4 车辆模型,采用 D'Alembert 原理建立车辆振动平衡方程;基于 Euler-Bernoulli 梁理论将变截面连续梁划分成多个微段并进行受力分析,建立桥梁振动平衡方程,采用模态坐标法考虑振型的正交性对方程进行简化,与车辆振动方程联立得到车桥耦合振动方程,最终理论推导出跳车冲击过程中的车桥耦合振动平衡方程;利用 MATLAB 自编程序求解车桥耦合振动方程,得出车桥耦合动力响应。研究表明:当跳车高度不断增加时,桥梁动力响应持续加重,位移最大值逐渐增加;当不同桥跨中发生跳车时,跳车跨位移响应最大,距离跳车跨越远,位移响应越小。

关键词:变截面;连续梁桥;跳车冲击;车桥耦合;动力响应

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)02-0226-07

Analysis of vehicle-bridge coupling vibration response of continuous beam bridge under vehicle jumping impact

ZHANG Fan¹, LI Xuefeng¹, XIAO Runsheng²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Qixing Engineering Testing Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In order to study the influence of vehicle jumping on the dynamic response of variable cross-section continuous beam bridge under different working conditions, the 1/4 vehicle model is selected, and the vehicle vibration balance equation is established by D'Alembert principle. Based on the Euler-Bernoulli beam theory, the variable cross-section continuous beam is divided into several micro-segments and the force analysis is carried out. The bridge vibration balance equation is established. The modal coordinate method is used to consider the orthogonality of the vibration mode to simplify the equation. The vehicle-bridge coupling vibration equation is obtained by combining with the vehicle vibration equation. Finally, the vehicle-bridge coupling vibration balance equation in the process of vehicle jumping impact is derived theoretically. MATLAB self-compiled program is used to solve the vehicle-bridge coupling vibration equation, and the vehicle-bridge coupling dynamic response is obtained. The results show that when the jump height increases, the dynamic response of the bridge continues to increase, and the maximum displacement increases gradually. When the jump occurs in the middle of different bridge spans, the displacement response of the jump span is the largest, and the displacement response is smaller when it is far away from the jump span.

Key words: variable cross-section; continuous beam bridge; vehicle jumping impact; vehicle-bridge coupling; dynamic response

收稿日期:2022-06-07;修回日期:2022-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878234)

作者简介:张凡(1995—),男,安徽滁州人,合肥工业大学硕士生;

李雪峰(1980—),男,安徽肥东人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

0 引 言

桥梁在运营过程中主要承受车辆荷载的作用,文献[1]阐述了当车辆通过桥梁时,桥梁会受到车辆荷载的激励而产生振动,同时桥梁的振动也会反作用于车辆,因此车辆和桥梁的振动是一种相互作用、相互耦合的过程,称为车桥耦合振动。当桥面存在障碍物导致车辆发生跳车现象时会加剧车桥耦合振动,同时增大桥梁的内力和位移,长此以往,会对桥梁结构产生损坏。文献[2]采用车辆二维模型在理想简支梁桥模型上行进而发生跳车冲击下桥梁的动力响应,并在简支梁桥和连续梁桥上进行试验,结果表明跳车冲击对桥梁的动力响应影响很大;文献[3-4]以简支梁桥为研究对象,研究桥头跳车激励对车桥耦合系统的影响,分别讨论桥梁结构的动力效应随车速、桥头高差的变化而呈现的变化规律;文献[5]应用 Euler-Bernoulli 梁假设,把实验车辆简化为 2 个互不相关的质量块,建立跳车试验中动力时程响应的理论计算模型,利用振型正交化的特性,对理论计算模型进行求解;文献[6-7]以 1/4 简构车辆和含阻尼简支梁桥为对象,建立可描述跳车冲击过程的车桥耦合振动模型,采用数值积分法获得车桥耦合振动响应的数值解,在不同高度、不同跳车位置以及不同车速等工况下,重点讨论跳车冲击过程中桥梁竖向动态位移响应的表现特征;文献[8]根据车桥耦合振动理论,考虑不同的路面粗糙度和跳车位置,分析桥梁动态挠度的差异性;文献[9]模拟车辆与桥面耦合、起跳冲击、与桥面分离、下落冲击和再耦合的完整跳车过程,并采用改进的龙格-库塔法对方程进行数值求解。

上述跳车冲击研究大多是基于简支梁桥等简单桥梁结构,显然已不符合工程实际要求。变截面连续梁桥由于其优越的受力性能、更大的桥梁跨度已成为主流的桥梁结构,因此,本文以三跨变截面连续梁桥为研究对象,对跳车冲击下车桥耦合动力响应进行研究。

1 车桥耦合振动方程的建立

1.1 车辆振动方程

1/4 车辆模型如图 1 所示。

将车辆简化为两自由度的弹簧-阻尼-质量模型,将车身作为一个整体且不考虑变形。图 1 中: m_v 为车身质量; k_v 、 c_v 、 y_v 分别为车身刚度、阻尼及挠度; m_w 为车轮和悬架整体质量; k_w 、 c_w 、 y_w

分别为车轮悬架体系的刚度、阻尼及挠度; r 为路面不平整度数值; y 为车桥接触点竖向位移。

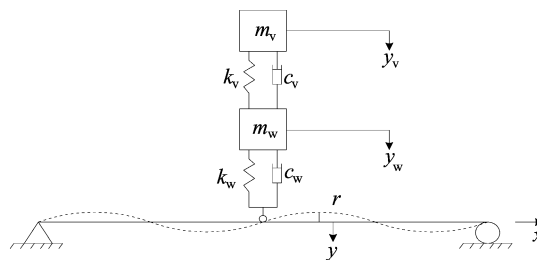


图 1 1/4 车辆模型

根据 D'Alembert 原理,对车身进行受力分析,可得:

$$m_v \ddot{y}_v + c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) + k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (1)$$

对车轮和悬架系统进行分析,可得:

$$m_w \ddot{y}_w + c_w (\dot{y}_w - \dot{y} + \dot{r}) + k_w (y_w - y + r) - c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) - k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (2)$$

整理后写成矩阵形式得:

$$\mathbf{M}_v \dot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Y}_v = \mathbf{P}_v \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & m_w \end{bmatrix}; \mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v + c_w \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v + k_w \end{bmatrix}; \mathbf{Y}_v = \begin{bmatrix} y_v \\ y_w \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ c_w (\dot{y} - \dot{r}) + k_w (y - r) \end{bmatrix}。$$

1.2 桥梁振动方程

本文研究对象为变截面连续梁,将连续梁划分成多个微小的梁段,当数量足够大时,每个微小梁段可近似看成等截面梁,因此可按照等截面梁进行计算,以 Euler-Bernoulli 梁理论为基础,推导建立桥梁振动平衡方程。取长度为 dx 的微段进行受力分析,如图 2 所示。

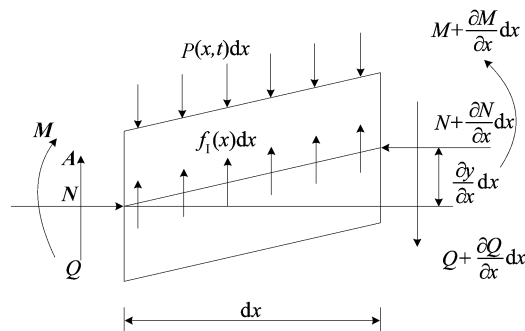


图 2 梁段隔离体受力情况

图 2 中: $P(x, t)$ 为车辆过桥时对桥梁的作用力; M 为截面处弯矩; Q 为截面处剪力; N 为轴力; $f_1(x) = m(x)\ddot{y}$ 为惯性力, $m(x)$ 为梁单位长度质量; y 为隔离体的竖向位移。

由竖向力平衡条件, 可得:

$$Q - \left[P(x, t) - m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right] dx - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) = 0 \quad (4)$$

整理得:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -P(x, t) + m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (5)$$

由力矩平衡, 并略去式(5)中高阶小量可得:

$$\frac{\partial M}{\partial x} = Q - N \frac{\partial y}{\partial x} \quad (6)$$

根据大位移、中等旋转、小应变的假设, 非线性应力-应变关系为:

$$\xi_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (7)$$

其中: ξ_x 为应变; y 为梁中性轴上 x 位置处的横向位移。

根据 Kelvin-Voigt 模型^[10], 可得应力-应变本构关系为:

$$\sigma_x = E\xi_x + E\delta\dot{\xi}_x \quad (8)$$

其中: E, δ 为桥梁材料的弹性模量和阻尼比; σ_x 为应力。

应力-弯矩、应力-轴力关系式为:

$$M = -b \int_{-h(x)/2}^{h(x)/2} \sigma_x z dx \quad (9)$$

$$N = b \int_{-h(x)/2}^{h(x)/2} \sigma_x dx \quad (10)$$

其中: b 为截面宽度; $h(x)$ 截面高度。

式(9)、式(10)整理可得:

$$M = EI(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \delta EI(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) \quad (11)$$

$$N = \frac{1}{2} EA(x) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + \delta EA(x) \left[\frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) \right]^2 \quad (12)$$

联立式(6)、(11)、(12)可得:

$$Q = -\frac{\partial}{\partial x} \left[EI(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \delta EI(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) \right] + \frac{\partial y}{\partial x} \left\{ \frac{1}{2} EA(x) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + \delta EA(x) \left[\frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

将式(13)代入式(5)可得:

$$m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \delta EI(x) \frac{\partial^4}{\partial x^4} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) +$$

$$2E \frac{\partial I(x)}{\partial x} \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} + E \frac{\partial I^2(x)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2\delta E \frac{\partial I(x)}{\partial x} \frac{\partial^3}{\partial x^3} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) + \delta E \frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) - \frac{3}{2} EA(x) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{E}{2} \frac{\partial A(x)}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^3 - \delta E \frac{\partial A(x)}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) - 2\delta EA(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \times \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) - \delta EA(x) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) = P(x, t) \quad (14)$$

由前文可知, 每个长度为 dx 的梁微段可近似看成等截面, 因此质量 $m(x)$ 、惯性矩 $I(x)$ 和梁截面面积 $A(x)$ 均为常数, 进而式(14)可进一步简化为:

$$m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \delta EI(x) \frac{\partial^4}{\partial x^4} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) + \frac{3}{2} EA(x) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2\delta EA(x) \frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) + \delta EA(x) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) = P(x, t) \quad (15)$$

采用振型叠加法求解上述方程, 用广义坐标和模态函数代替桥梁结构的几何坐标, 为耦合的方程组解耦, 便于求解方程, 坐标转换式如下:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \quad (16)$$

利用振型的正交性及伽辽金法求解方程, 整理后可得:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \phi_n(x) m(x) \phi_i(x) \ddot{q}_i(t) dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \phi_n(x) EI(x) \frac{\partial^4 \phi_i(x)}{\partial x^4} q_i(t) dx + \sum_{i=1}^{\infty} \delta \int_0^l \phi_n(x) EI(x) \frac{\partial^4 \phi_i(x)}{\partial x^4} \dot{q}_i(t) dx - \frac{3}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \phi_n(x) EA(x) \left[\frac{\partial \phi_i(x)}{\partial x} q_i(t) \right]^2 \frac{\partial^2 \phi_i(x)}{\partial x^2} \times q_i(t) dx - \sum_{i=1}^{\infty} 2\delta \int_0^l \phi_n(x) EA(x) \frac{\partial \phi_i(x)}{\partial x} q_i^2(t) \times \frac{\partial^2 \phi_i(x)}{\partial x^2} \frac{\partial \phi_i(x)}{\partial x} \dot{q}_i(t) dx - \sum_{i=1}^{\infty} \delta \int_0^l \phi_n(x) EA(x) \times \left[\frac{\partial \phi_i(x)}{\partial x} q_i(t) \right]^2 \frac{\partial^2 \phi_i(x)}{\partial x^2} \dot{q}_i(t) dx = \int_0^l \phi_n(x) P(x, t) dx \quad (17)$$

$P(x, t)$ 为车辆过桥时对桥梁产生的作用力, 其表达式为:

$$P(x, t) = (m_v + m_w)g - m_v \ddot{y}_v - m_w (\ddot{y}_w + \ddot{y} - \ddot{r}) + k_w (y_w - y + r) + c_w (\dot{y}_w - \dot{y} + \dot{r}) \quad (18)$$

$$m(x) = \rho A(x) \quad (19)$$

其中, ρ 为桥梁材料的密度。

最终整理可得:

$$\begin{aligned} & \ddot{q}_n(t) \int_0^l \phi_n^2(x) m(x) dx + q_n(t) \int_0^l \phi_n(x) EI(x) \times \\ & \frac{\partial^4 \phi_n(x)}{\partial x^4} dx + \dot{q}_n(t) \int_0^l \delta \phi_n(x) EI(x) \frac{\partial^4 \phi_n(x)}{\partial x^4} dx + \\ & \phi_n(x) \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) - q_n^3(t) \int_0^l \frac{3}{2} \phi_n(x) EA(x) \times \\ & \left[\frac{\partial \phi_n(x)}{\partial x} \right]^2 \frac{\partial^2 \phi_n(x)}{\partial x^2} dx - q_n^2(t) \dot{q}_n(t) \int_0^l 3\delta \phi_n(x) \times \\ & EA(x) \left[\frac{\partial \phi_n(x)}{\partial x} \right]^2 \frac{\partial^2 \phi_n(x)}{\partial x^2} dx + \phi_n(x) m_v \ddot{y}_v + \\ & \phi_n(x) m_w \ddot{y}_w + \phi_n(x) m_w \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) \ddot{q}_i(t) - \\ & \phi_n(x) k_w y_w - \phi_n(x) c_w \dot{y}_w + \phi_n(x) c_w \times \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) \dot{q}_i(t) = \phi_n(x) (m_v + m_w) g + \\ & \phi_n(x) k_w r + \phi_n(x) c_w \dot{r} + \phi_n(x) m_w \ddot{r} \quad (20) \end{aligned}$$

1.3 路面不平度

车辆在路面上行驶时, 驾驶人会感受到上下颠簸, 这是由于路面不平造成的。本文以国家标准 GB 7031—2005 功率谱为基础采用三角级数叠加法进行路面不平度的模拟。

国家标准 GB 7031—2005 给出路面不平度功率谱表达式为:

$$G_r(n) = G_r(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (21)$$

其中: n 为有效频率带中的空间频率; n_0 为空间参考频率值, 取值为 0.1; $G_r(n_0)$ 为当空间频率值为 n_0 时的路面功率谱密度; w 为频率指数, 取 $w=2$ 。

假设车辆匀速行驶速度为 v , 根据 $n=f/v$ 将空间频率 n 转化为时间频率 f , 得到关于时间频率的功率谱密度函数为:

$$G_r(f) = \frac{G_r(n)}{v} = G_r(n_0) n_0^2 \frac{v}{f^2} \quad (22)$$

假定频率区间为 (f_1, f_2) , 将整个区间划分为 N 个小区间, 每个小区间段上的功率谱值近似为该小区间段中心频率的功率谱密度函数, 可得各小区间段的功率谱函数为:

$$\gamma = G_r(f_{\text{mid},i}) \Delta f_i, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (23)$$

其中: Δf_i 为第 i 个小区间段间隔的频率; $G_r(f_{\text{mid},i})$ 为第 i 个小区间段中心频率 $f_{\text{mid},i}$ 所对应的功率谱密度函数。

将各个小区间段的正弦波函数进行叠加即为整个区间段对应时间范围内的随机路面位移函数:

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{G_r(f_{\text{mid},i}) \Delta f_i} \sin(2\pi t f_{\text{mid},i} + \varphi_i) \quad (24)$$

假设车辆匀速沿桥面方向行驶的路程为 x , 则 $x=vt$, 再由 $n=f/v$ 可得路面不平度关于路程 x 的函数:

$$r(x) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi x n_{\text{mid},i} + \varphi_i) \quad (25)$$

其中: $A_i = \sqrt{\gamma}$; φ_i 为随机相位角且服从均匀分布。

1.4 车桥耦合方程

利用车桥接触点的位移协调关系, 建立车桥耦合振动方程, 可得:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} + \mathbf{H}\mathbf{X}^2 + \mathbf{Q}\mathbf{X}^3 = \mathbf{P} \quad (26)$$

其中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为车桥耦合质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \mathbf{H} 、 \mathbf{Q} 为车桥耦合几何非线性矩阵; \mathbf{P} 为车桥耦合外力作用向量; \mathbf{X} 为车桥耦合广义位移向量。

1.5 跳车冲击下车桥耦合方程的建立及求解

1.5.1 车辆未遇到障碍物过程

车辆在桥梁上行驶未遇障碍物时车桥耦合振动方程为:

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{X}}_1 + \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{X}}_1 + \mathbf{K}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{H}_1 \mathbf{X}_1^2 + \mathbf{Q}\mathbf{X}_1^3 = \mathbf{P}_1 \quad (27)$$

其中: $\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}$; $\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}$; $\mathbf{K}_1 = \mathbf{K}$; $\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}$; $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}$; $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}$ 。

1.5.2 车辆遇到障碍物腾空过程

车辆遇到障碍物发生腾空时车辆与桥面分离, 两者成为独立的个体, 无相互作用力。

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{C}_2 \dot{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{K}_2 \mathbf{X}_2 + \mathbf{H}_2 \mathbf{X}_2^2 + \mathbf{Q}\mathbf{X}_2^3 = \mathbf{P}_2 \quad (28)$$

其中: \mathbf{M}_2 、 \mathbf{C}_2 、 \mathbf{K}_2 分别为车辆遇到障碍物发生腾空时的车桥耦合质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \mathbf{H}_2 、 \mathbf{Q}_2 为车辆发生腾空时的几何非线性矩阵; \mathbf{P}_2 为车辆发生腾空时的车桥耦合外力作用向量; \mathbf{X}_2 为车辆发生腾空时的车桥耦合广义位移向量。

1.5.3 车辆落地冲击过程

当车辆腾空结束后重新落到地面上时, 此时车辆对桥梁的作用力是由 0 逐渐增大的冲击力, 车桥耦合质量、阻尼、刚度、几何非线性矩阵都不发生改变。该时段的车桥耦合振动方程写为:

$$\mathbf{M}_3 \ddot{\mathbf{X}}_3 + \mathbf{C}_3 \dot{\mathbf{X}}_3 + \mathbf{K}_3 \mathbf{X}_3 + \mathbf{H}_3 \mathbf{X}_3^2 + \mathbf{Q}_3 \mathbf{X}_3^3 = \mathbf{P}_3 \quad (29)$$

其中: $M_3 = M$; $C_3 = C$; $K_3 = K$; $H_3 = H$; $Q_3 = Q$; P_3 为车辆落地冲击状态下车桥耦合广义外力作用向量。

1.5.4 车辆落地冲击回稳过程

在车辆冲击回稳时间段内,当车辆对桥梁的冲击力到达最大值后,冲击力会不断减小,直到车辆回到未发生跳车时的正常行驶状态,该时段内的车桥耦合振动方程可写为:

$$M_4 \ddot{X}_4 + C_4 \dot{X}_4 + K_4 X_4 + H_4 X_4^2 \dot{X}_4 + Q_4 X_4^3 = P_4 \quad (30)$$

其中: $M_4 = M$; $C_4 = C$; $K_4 = K$; $H_4 = H$; $Q_4 = Q$; P_4 为车辆冲击回稳状态下车桥耦合广义外力作用向量。

1.5.5 车辆回归正常行驶过程

该时段内跳车冲击过程结束,车辆回到未发生跳车时的正常行驶状态,车桥耦合振动方程可写为:

$$M_5 \ddot{X}_5 + C_5 \dot{X}_5 + K_5 X_5 + H_5 X_5^2 \dot{X}_5 + Q_5 X_5^3 = P_5 \quad (31)$$

其中: $M_5 = M$; $C_5 = C$; $K_5 = K$; $H_5 = H$; $Q_5 = Q$; $P_5 = P$ 。

1.5.6 车桥耦合方程的求解

综合比较各种数值分析方法,其中 Newmark- β 法拥有较好的稳定性以及计算效率,因此本文选择 Newmark- β 法对车桥耦合方程进行求解,编制基于 MATLAB 的 Newmark- β 算法程序语言,对车桥耦合方程进行求解。

2 连续梁跳车冲击下耦合振动分析

本文采用某三跨变截面连续梁桥,桥跨形式为(27.92+42+27.92) m,使用 C50 的混凝土,研究车辆在桥上行驶时发生跳车的整个过程,制定不同工况,探究对车桥耦合振动响应的影响。车辆模型参数为:车身质量 $m_v = 3.85 \times 10^4$ kg;车轮和悬架整体质量 $m_w = 8.66 \times 10^3$ kg;车身的刚度 $k_v = 3.396 \times 10^6$ N/m 和阻尼 $c_w = 2.292 \times 10^5$ kg/s;车轮悬架体系刚度 $k_w = 8.56 \times 10^6$ N/m 和阻尼 $c_w = 1.96 \times 10^5$ kg/s。

2.1 不同跳车高度下车桥耦合振动响应分析

研究选取 B 路面等级,车速为 20 m/s,障碍物位于中跨跨中,障碍物高度 h 分别选取 0.03、0.05、0.08、0.10 m,计算桥梁第 1 跨和中跨跨中位移响应,综合比较 4 种跳车高度下车桥耦合振动响应,在桥梁的前 40 m 和 70 m 后的范围内,不同跳车高度下的桥梁跨中竖向位移曲线几乎重

合。因此,仅选取 40~70 m 范围内的跨中动力响应进行研究,位移响应曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,当车辆发生跳车时,桥梁跨中位移响应明显放大。在车辆遇到障碍物之前,不同工况下桥梁跨中竖向位移曲线完全一致。然后,车辆遇到障碍物发生腾空,由图 3 可见此时桥梁跨中竖向位移有较大的回落,随着障碍物高度的增加,回落幅度增大,第 1 跨跨中回落峰值逐渐趋于 0,障碍物高度为 0.10 m 时达到 0.85 mm。对于中跨跨中位移,当障碍物高度为 0.10 m 时回落峰值达到 -2.10 mm。随着障碍物高度的增加,出现回落峰值以及回稳峰值的时刻不断延后,这是由于障碍物高度越高,车辆保持在空中的时间越长,从而桥梁恢复变形的时间越长。车辆水平车速保持不变,随着车辆腾空时间增加,车辆水平位移也会增加。因此,随着跳车高度增加,车辆落地位置也会逐渐靠后。

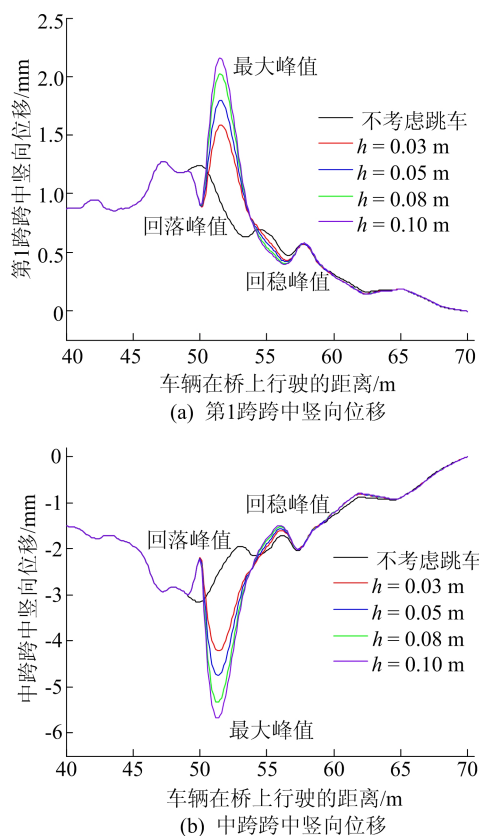


图 3 不同跳车高度下车桥跨中位移响应

腾空结束后车辆开始冲击桥面,随着障碍物高度的增加,桥梁跨中位移逐渐增大,当障碍物高度为 0.10 m 时第 1 跨最大峰值达到了 2.23 mm,是不考虑跳车的 2.15 倍。而中跨跨中位移最大峰值已经超过了 -5 mm,最大达到了 -5.73 mm,是不

考虑跳车的2.29倍。由此说明跳车冲击作用下车桥耦合动力响应明显放大。

2.2 不同跳车位置下车桥耦合振动响应分析

上节研究的不同工况中障碍物仅位于中跨跨中,当车辆在桥面实际行驶时障碍物是随机的,现在设置工况:车速 $v=20\text{ m/s}$,路面不平整度B级,障碍物高度 $h=0.08\text{ m}$,障碍物分别位于第1跨跨中、第2跨跨中、第3跨跨中,计算车辆在不同跨发生跳车时桥梁各跨跨中位移响应如图4所示。

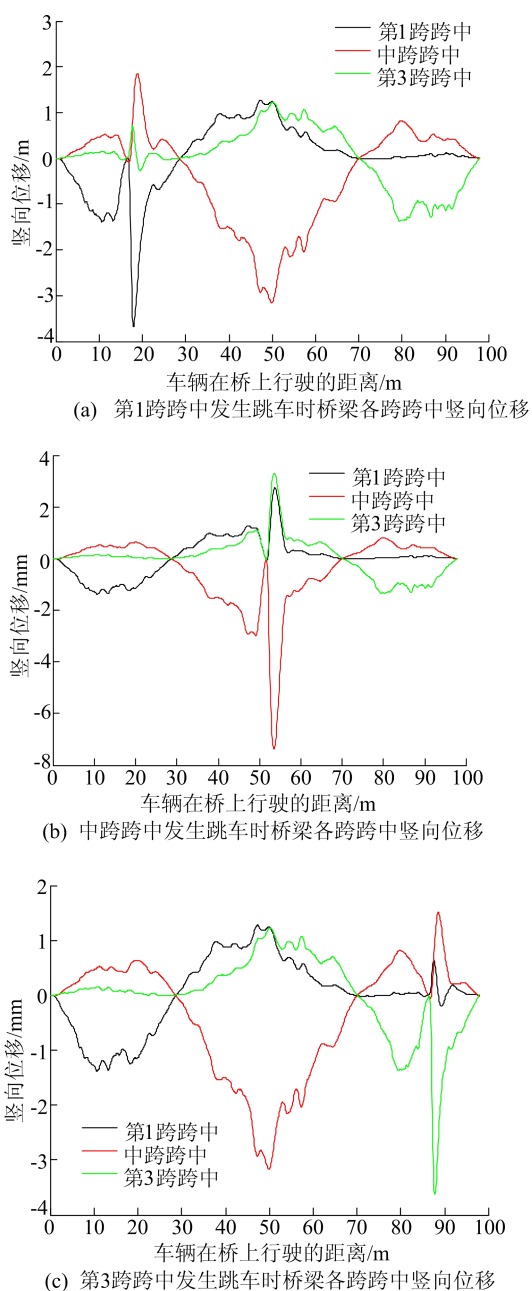


图4 不同跳车位置下车桥耦合振动响应分析

由图4a可知,当车辆在第1跨跨中发生跳车时,在跳车冲击作用下桥梁各跨跨中位移均出现

大幅度的震荡,第1跨震荡幅度最大,最大值达到 -3.67 mm ,中跨稍小些,达到 1.86 mm ,第3跨震荡幅度最小,达到 0.70 mm 。仔细观察3条曲线变化规律,会发现在冲击力作用下第3跨跨中位移峰值最早出现,第1跨出现稍晚些,中跨最迟。第1跨、第2跨、第3跨竖向位移分别在车辆行驶到 17.7 、 18.8 、 17.9 m 时达到峰值。

由图4b可知,当车辆在中跨跨中发生跳车时,在跳车冲击作用下桥梁各跨跨中位移均出现大幅度震荡,中跨震荡幅度最大达到 -7.38 mm ,第3跨幅值略小些,为 3.31 mm ,第1跨最小为 2.74 mm 。可以发现,当桥梁中跨跨中发生跳车时,各跨跨中竖向位移最大值出现的时刻非常接近,当车辆行驶到 53.7 m 时,第1跨跨中竖向位移达到最大值,当车辆行驶到 53.5 m 时,中跨和第3跨跨中竖向位移最大值同时出现。

由图4c可知,当第3跨跨中发生跳车时,在跳车冲击作用下桥梁各跨跨中位移均出现大幅度震荡,其中第3跨震荡幅度最大达到 3.62 mm ,中跨最大值稍小,为 1.51 mm ,第1跨最大值最小,为 0.66 mm 。当车辆在桥梁第3跨跨中发生跳车时,第1跨、第2跨、第3跨跨中位移分别在车辆行驶到 87.5 、 88.5 、 87.7 m 处达到峰值。

3 结 论

1) 随着跳车高度的增加,桥梁各跨跨中位移最大值也随之增加,位移峰值的出现相较于车辆冲击力峰值的出现具有一定的滞后性,不同跳车高度下均延后约 0.0725 s 。当跳车冲击结束后,桥梁跨中位移响应并不能立刻恢复稳定,还需进行一段时间的轻微震荡。

2) 不同桥跨跨中发生跳车,跳车发生跨位移峰值最大,距离越远,峰值越小。但各跨峰值出现先后顺序并非如此,当跳车发生在第1跨和第3跨时,最早出现峰值并不是跳车发生跨,而是距离最远的第3跨和第1跨最先出现峰值,中跨跨中位移最后出现峰值。

3) 车桥耦合振动叠加跳车冲击,是一种十分复杂的振动形式,本文采取的研究方法虽然存在一定的不足,但是目前针对跳车冲击下车桥耦合振动的大部分研究主要是基于简支梁桥,随着时代的发展,简支梁桥已经无法满足实际工程的要求。因此,本文以三跨变截面连续梁桥为研究对象,具有一定的参考意义。

[参 考 文 献]

- [1] 赵志军. 车桥耦合振动数值分析[J]. 交通运输研究, 2013(1):106-108.
- [2] KISHAN H, TRAILL-NASH R W. A modal method for calculation of highway bridge response with vehicle braking [J]. Institution of Civil Engineers Transition, 1977, 19(1): 44-50.
- [3] 殷立辉. 桥头跳车对简支梁桥动力性的影响[J]. 交通标准化, 2011(14):142-144.
- [4] 殷立辉, 曹楠楠. 车桥耦合系统桥头跳车动力效应分析[J]. 黑龙江水专学报, 2010, 37(1):60-62.
- [5] 张帆, 李之达, 彭龙帆. 基于跳车试验的桥梁动力响应数值模拟[J]. 交通科技, 2017(6):51-53.
- [6] 周子骥. 跳车冲击作用下的桥梁动力响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [7] 周子骥, 高芳清, 米聪聪. 跳车冲击过程中的桥梁动态位移响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(2):133-137.
- [8] 赵相章, 杨忠恒, 王兴必. 跳车冲击作用下桥梁动态位移响应研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(8): 132-133.
- [9] 李丙镇. 桥上车辆跳车冲击行为的动力学影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [10] SIMSEK M, KOCATÜRK T. Nonlinear dynamic analysis of an eccentrically prestressed damped beam under a concentrated moving harmonic load[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(1/2):235-253.
- (责任编辑 胡亚敏)
-
- (上接第 160 页)
- [24] RAMANAN R, KIM B H, CHO D H, et al. Algae-bacteria interactions: evolution, ecology and emerging applications [J]. Biotechnology Advances, 2016, 34(1):14-29.
- [25] WHYTE L, MAULE A, CULLIMORE D. Method for isolating cyanobacteria-lysing streptomycetes from soil [J]. Journal of Applied Bacteriology, 1985, 58(2):195-197.
- [26] YAMAMOTO Y, KOUCHIWA T, HODOKI Y, et al. Distribution and identification of actinomycetes lysing cyanobacteria in a eutrophic lake [J]. Journal of Applied Phycology, 1998, 10:391-397.
- [27] ZHANG B H, CHENG J, LI L, et al. *Streptomyces jiujiangensis* sp. nov., isolated from soil in South China [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2014, 105:763-770.
- [28] CHOI H J, KIM B H, KIM J D, et al. Streptomyces neyagawaensis as a control for the hazardous biomass of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) in eutrophic freshwaters [J]. Biological Control, 2005, 33(3):335-343.
- [29] TAKAMURA Y, YAMADA T, KIMOTO A, et al. Growth inhibition of *Microcystis* cyanobacteria by L-lysine and disappearance of natural *Microcystis* blooms with spraying [J]. Microbes and Environments, 2004, 19(1): 31-39.
- [30] UNNITHAN V, UNC A, SMITH G. Mini-review: a priori considerations for bacteria-algae interactions in algal biofuel systems receiving municipal wastewaters [J]. Algal Research, 2013, 4:35-40.
- [31] KLUGHAMMER B, SULTEMEYER D, BADGER M R, et al. The involvement of NAD(P)H dehydrogenase subunits, NdhD3 and NdhF3, in high-affinity CO₂ uptake in *Synechococcus* sp. PCC7002 gives evidence for multiple NDH-1 complexes with specific roles in cyanobacteria [J]. Molecular Microbiology, 1999, 32(6):1305-1315.
- [32] WANG X, HAO C, ZHANG F, et al. Inhibition of the growth of two blue-green algae species (*Microcystis aruginosa* and *Anabaena spiroides*) by acidification treatments using carbon dioxide [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10):5742-5748.
- [33] LUDWIG M, SULTEMEYER D, PRICE G D. Isolation of ccmKlmn genes from the marine cyanobacterium, *Synechococcus* sp. pcc7002 (Cyanophyceae), and evidence that ccmM is essential for carboxysome assembly [J]. Journal of Phycology, 2000, 36(6):1109-1119.
- [34] EL-AYOUTY Y, ABD EL-RAHMAN S. Structural variations in peptide toxins of *Microcystis aeruginosa* grown on different carbon sources [J]. Journal of Natural Toxins, 1996, 5(1):39-47.
- [35] CHUNG P, POND W, KINGSBURY J, et al. Production and nutritive value of *Arthrospira platensis*, a spiral blue-green alga grown on swine wastes [J]. Journal of Animal Science, 1978, 47(2):319-330.
- [36] VAN BAALEN C, HOARE D S, BRANDT E. Heterotrophic growth of blue-green algae in dim light [J]. Journal of Bacteriology, 1971, 105(3):685-689.
- [37] 金相灿, 郑朔方. 有机磷和无机磷对铜绿微囊藻生长的影响及动力学分析 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(5):40-44.
- [38] 杨峰峰. 不同营养盐条件下有机碳源对铜绿微囊藻的生长影响研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [39] ZHANG W, ZHANG P, SUN H, et al. Effects of various organic carbon sources on the growth and biochemical composition of *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Bioresource Technology, 2014, 173:52-58.
- [40] FERGOLA P, CERASUOLO M, POLLIO A, et al. Allelopathy and competition between *Chlorella vulgaris* and *Pseudokirchneriella subcapitata*: experiments and mathematical model [J]. Ecological Modelling, 2007, 208(2/3/4):205-214.
- (责任编辑 闫杏丽)