

文章编号: 1005-0523(2010)03-0014-07

高速列车—无砟轨道—桥梁耦合系统振动特性分析

利远翔, 雷晓燕, 张 斌

(华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要:根据高速列车—无砟轨道—桥梁系统运动的特点,建立了适合该问题动力学分析的新型车辆单元和轨道—桥梁单元,运用有限元方法和 Lagrange 方程,推导了两种单元的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵。整个列车—轨道—桥梁系统被离散为车辆单元和轨道—桥梁单元,其中一节车辆离散成一个车辆单元,轨道—桥梁系统离散成四层梁单元。最后通过一个实例计算对整个系统进行垂向振动特性分析。

关键词:车辆单元;无砟轨道—桥梁单元;耦合系统;振动分析;高速列车

中图分类号:U213.2

文献标识码:A

国内外对于车辆—轨道系统动力学及车辆—桥梁系统动力学的研究已经相当深入,但是由于各自不同的目的,将车辆、轨道和桥梁作为一个整体系统加以研究的却不多见。从上世纪 80 年代起,国内外学者对快速列车和重载列车引起的地面振动及对周围环境的影响进行了较多研究,提出了一些计算方法和计算模型。如在 1994 年,日本的 Fujikake^[1]和松浦章夫^[2]分别就交通车辆引起的结构振动发生机理、振动波在地下和地面的传播规律及其对周围居民的影响进行了研究,提出了环境振动水平的预测方法。日本铁道技术研究所还就新干线高速列车对环境振动的影响进行了现场测试,分析了车辆、轨道、桥梁等不同部位的振动特点,并研究了不同类型屏障的隔振效果。而对于高架轨道系统诱发环境振动特性的研究,源自于 1999 年开始动工修建的台湾高速铁路,经过台南高科技园区的一段高架轨道振动超标,从而引起了国内外学者对高架轨道诱发环境振动的关注并开始研究。台湾成功大学教授朱圣浩等^[3-4]采用有限元的方法,在建立车辆—桥梁—大地耦合振动的三维有限元模型时,将列车以动轮单元模拟,大地采用三维块体单元模拟,分析了高架轨道引起的周边建筑物的振动。本文建立了车辆单元模型、轨道—桥梁单元模型,推导了车辆—轨道—桥梁耦合系统的振动方程,并在 Matlab 软件中编制了程序,最后通过一个实例分析了高速列车—无砟轨道—桥梁耦合系统垂向振动特性。

1 车辆单元模型

本文的模型是在雷晓燕教授的车辆—轨道—地基耦合系统模型^[5-7]的基础上建立的。图 1 为车辆单元模型,在整车模型中,车体和转向架考虑沉浮振动和点头振动,车轮考虑沉浮振动,每节钢轨上两个节点考虑竖向位移和转角,整车模型有 26 个自由度。

图 1 中, M_c , J_c 为车体的质量与转动惯量; M_t , J_t 为转向架的质量与转动惯量; k_{s1} , k_{s2} 为车辆一、二系悬挂刚度; c_{s1} , c_{s2} 为车辆一、二系悬挂阻尼; M_{w_i} ($i=1, 2, 3, 4$) 表示第 i 个车轮的质量; k_c 为轮轨间接触刚度; v_c , θ_c 为车体沉浮振动的竖向位移、车体点头振动的角位移; v_i , θ_i ($i=t_1, t_2$) 表示前、后转向架沉浮振动的竖向位移、点头振动的角位移; v_i ($i=w_1, w_2, w_3, w_4$) 为第 i 个车轮的竖向位移; v_{c_i} ($i=1, 2, 3, 4$) 为第

收稿日期: 2010-04-27

基金项目: 国际科技合作与交流专项项目(2010DFA82340); 国家自然科学基金项目(50978099)

作者简介: 利远翔(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道动力学。

i 个轮轨接触处钢轨的竖向位移。

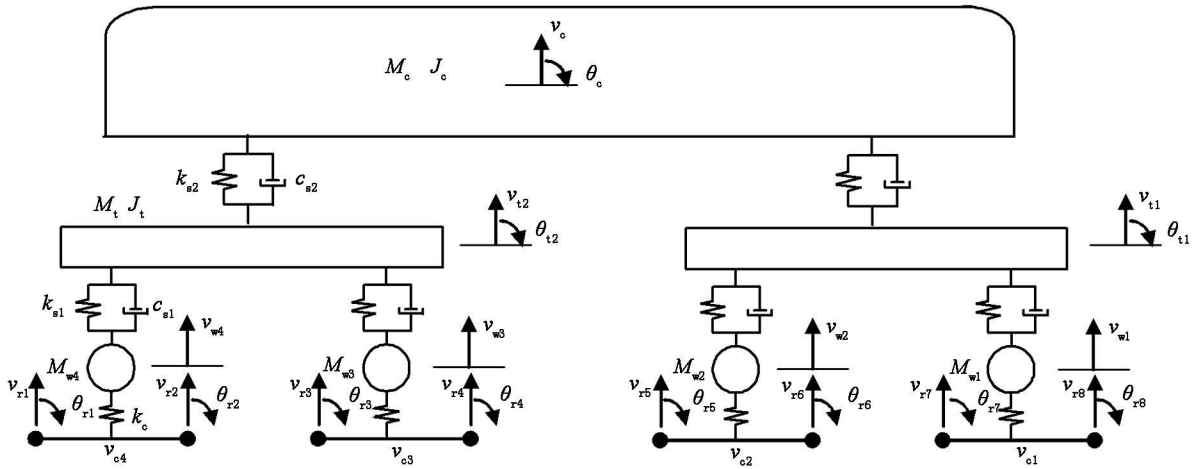


图 1 车辆单元模型

从图 1 中我们可以定义车辆单元的节点位移向量为

$$\mathbf{a}^e = \left\{ v_{r1} \ \theta_{r1} \ v_{r2} \ \theta_{r2} \ v_{r3} \ \theta_{r3} \ v_{r4} \ \theta_{r4} \ v_{r5} \ \theta_{r5} \ v_{r6} \ \theta_{r6} \ v_{r7} \ \theta_{r7} \ v_{r8} \ \theta_{r8} \ v_c \ \theta_c \ v_{t1} \ v_{t2} \ \theta_{t1} \ \theta_{t2} \ v_{w1} \ v_{w2} \ v_{w3} \ v_{w4} \right\}^T \quad (1)$$

为了建立车辆单元的有限元方程,可以运用 Hamilton 原理,即

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{a}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{a}} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\mathbf{a}}} = 0 \quad (2)$$

其中: L 为 Lagrange 函数, $L = T - \Pi$; T 为动能; Π 为势能; R 为耗散能。

通过列出车辆单元的弹性势能、动能和耗散能可推导出车辆单元的刚度矩阵 \mathbf{k}_u^e 、质量矩阵 \mathbf{m}_u^e 和阻尼矩阵 \mathbf{c}_u^e [6-7]。

将以上形成的车辆单元刚度矩阵 \mathbf{k}_u^e 、质量矩阵 \mathbf{m}_u^e 和阻尼矩阵 \mathbf{c}_u^e 代入公式(2)Hamilton 方程可得车辆单元的有限元方程如下:

$$\mathbf{M}_u \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{C}_u \dot{\mathbf{a}} + \mathbf{K}_u \mathbf{a} = \mathbf{Q}_u \quad (3)$$

2 轨道—桥梁单元模型

四层轨道—桥梁单元模型如图 2 所示,将轨道结构和桥梁简化为四层梁模型,从上到下分别为钢轨、轨道板、混凝土支承层和桥梁。模型仅考虑沉浮和点头振动,共有 16 个自由度。图 2 中 v_1, v_5 表示钢轨的竖向位移; θ_1, θ_5 表示钢轨的转角;轨下垫层的支承弹性系数和阻尼系数分别用 k_{sy1} 和 c_{sy1} 表示; v_2, v_6 表示轨道板的竖向位移; θ_2, θ_6 表示预制轨道板的转角;轨道板下沥青水泥砂浆层的支承弹性系数和阻尼系数分别用 k_{sy2} 和 c_{sy2} 表示; v_3, v_7 表示混凝土板支承层的竖向位移; θ_3, θ_7 表示混凝土板支承层的转角;底座混凝土板支承层下桥梁的支承弹性系数和阻尼系数分别用 k_{sy3} 和 c_{sy3} 表示; v_4, v_8 表示桥梁单元的竖向位移; θ_4, θ_8 表示桥梁单元的转角。

从图 2 中我们可以定义轨道—桥梁单元的节点位移向量为

$$\mathbf{a}^e = \left\{ v_1 \ \theta_1 \ v_2 \ \theta_2 \ v_3 \ \theta_3 \ v_4 \ \theta_4 \ v_5 \ \theta_5 \ v_6 \ \theta_6 \ v_7 \ \theta_7 \ v_8 \ \theta_8 \right\}^T \quad (4)$$

同样为了建立轨道—桥梁单元的有限元方程,利用 Hamilton 原理,通过列出轨道—桥梁单元的弹性势能、动能和耗散能可推导出轨道—桥梁单元的刚度矩阵 \mathbf{k}^e 、质量矩阵 \mathbf{m}^e 和阻尼矩阵 \mathbf{c}^e 。

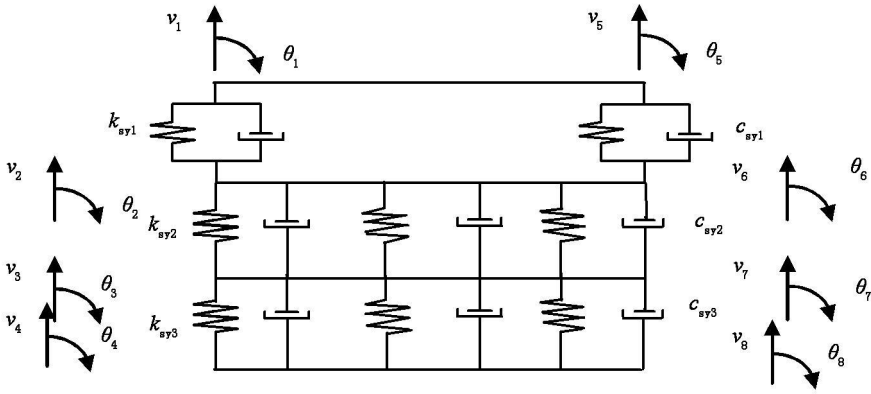


图2 板式轨道-桥梁单元模型

2.1 轨道-桥梁单元的弹性势能

轨道单元的势能包括钢轨的弯曲势能, 预制轨道板的弯曲势能, 底座混凝土板支承层的弯曲势能, 桥梁的弯曲势能, 离散支承弹簧的势能以及连续支承弹簧的势能。

(1) 钢轨的弯曲势能

钢轨上任意一点的位移可表示为

$$v_r = N_1 v_1 + N_2 \theta_1 + N_3 v_5 + N_4 \theta_5 = \begin{Bmatrix} N_1 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_3 & N_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \mathbf{a}^e = \mathbf{r}^T \mathbf{a}^e \quad (5)$$

其中位移插值函数为

$$\begin{aligned} N_1 &= 1 - \frac{3}{l^2} x^2 + \frac{2}{l^3} x^3 & N_2 &= -x + \frac{2}{l} x^2 - \frac{1}{l^2} x^3 \\ N_3 &= \frac{3}{l^2} x^2 - \frac{2}{l^3} x^3 & N_4 &= \frac{1}{l} x^2 - \frac{1}{l^2} x^3 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Pi_r = \frac{1}{2} \int \sigma \epsilon d\Omega = \frac{1}{2} \mathbf{a}^{eT} \int E_r I_r \left[\frac{d^2 N_r^T}{dx^2} \right]^T \left[\frac{d^2 N_r^T}{dx^2} \right] dx \mathbf{a}^e = \frac{1}{2} \mathbf{a}^{eT} \mathbf{k}_r^e \mathbf{a}^e \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{k}_r^e = \frac{E_r I_r}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & -6l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & -6l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6l & 2l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & 12 & 6l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对称

\mathbf{k}_r^e 是钢轨单元的弯曲刚度矩阵。

同理可以推导出预制轨道板单元的弯曲刚度矩阵 \mathbf{k}_s^e 、底座混凝土板支承层单元的弯曲刚度矩阵 \mathbf{k}_b^e 、桥梁单元的弯曲刚度矩阵 \mathbf{k}_f^e 、离散支承弹簧的刚度矩阵 \mathbf{k}_{lc}^e 、第一层连续支承弹簧的刚度矩阵 \mathbf{k}_{1c}^e 、第二层连续支承弹簧的刚度矩阵 \mathbf{k}_{2c}^e 和第三层连续支承弹簧的刚度矩阵 \mathbf{k}_{3c}^e 。

2.2 轨道-桥梁单元的动能

轨道单元的动能包括钢轨的弯曲动能, 预制轨道板的弯曲动能, 底座混凝土板支承层的弯曲动能以及桥梁单元的弯曲动能。

(1) 钢轨的弯曲动能

$$\dot{v}_r = N_1 \dot{v}_1 + N_2 \theta_1 + N_3 \dot{v}_5 + N_4 \theta_5 = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_3 & N_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{a}}^e = \mathbf{r}_r^e \dot{\mathbf{a}}^e \quad (9)$$

$$T_r = \frac{1}{2} \int \rho_r \dot{v}_r^2 d\Omega = \frac{1}{2} \int \rho_r \left(\mathbf{N}_r^T \dot{\mathbf{a}}^e \right)^T \left(\mathbf{N}_r^T \dot{\mathbf{a}}^e \right) d\Omega = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{a}}^{eT} \mathbf{m}_r^e \dot{\mathbf{a}}^e \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{m}_r^e = \frac{\rho_r I_r}{420} \begin{bmatrix} 156 & -22l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 54 & 13l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -13l & -3l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & 156 & 22l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

对称

\mathbf{m}_r^e 是钢轨单元的质量矩阵。

同理可以推导出预制轨道板单元的质量矩阵 \mathbf{m}_s^e 、底座混凝土板支承层单元的质量矩阵 \mathbf{m}_b^e 和桥梁单元的质量矩阵 \mathbf{m}_f^e 。

2.3 轨道-桥梁单元的耗散能

(1) 比例阻尼

$$\mathbf{c}_b^e = \alpha_r \mathbf{m}_r^e + \beta_r \mathbf{k}_r^e + \alpha_s \mathbf{m}_s^e + \beta_s \mathbf{k}_s^e + \alpha_f \mathbf{m}_f^e + \beta_f \mathbf{k}_f^e + \alpha_b \mathbf{m}_b^e + \beta_b \mathbf{m}_b^e \quad (12)$$

(2) 离散支承弹簧的耗散能

$$R_{lc} = \frac{1}{2} c_{sy1} (\dot{v}_1 - \dot{v}_2)^2 + \frac{1}{2} c_{sy1} (\dot{v}_5 - \dot{v}_6)^2 \quad (13)$$

$$\dot{v}_1 - \dot{v}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{a}}^e = \mathbf{N}_1^T \dot{\mathbf{a}}^e \quad (14)$$

$$\dot{v}_5 - \dot{v}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{a}}^e = \mathbf{N}_2^T \dot{\mathbf{a}}^e \quad (15)$$

$$R_{lc} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{a}}^{eT} \left\{ c_{sy1} \mathbf{N}_1 \mathbf{N}_1^T + c_{sy1} \mathbf{N}_2 \mathbf{N}_2^T \right\} \dot{\mathbf{a}}^e = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{a}}^{eT} \mathbf{c}_{lc}^e \dot{\mathbf{a}}^e \quad (16)$$

$$\mathbf{c}_{1c}^e = \begin{bmatrix} c_{sy1} & 0 & -c_{sy1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{sy1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & c_{sy1} & 0 & -c_{sy1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & c_{sy1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

\mathbf{c}_{1c}^e 是离散支承弹簧的阻尼矩阵。

同理可以推导出第一层连续支承弹簧的阻尼矩阵 \mathbf{c}_{2c}^e 、第二层连续支承弹簧的刚度矩阵 \mathbf{k}_{3c}^e 和第三层连续支承弹簧的刚度矩阵 \mathbf{k}_{4c}^e 。

2.4 轨道—桥梁单元的运动方程

将以上形成的轨道—桥梁单元刚度矩阵 \mathbf{k}^e 、质量矩阵 \mathbf{m}^e 和阻尼矩阵 \mathbf{c}^e 代入公式(2)Hamilton方程可得板式轨道—桥梁单元四层梁的有限元方程如下

$$\mathbf{M}_T \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{C}_T \dot{\mathbf{a}} + \mathbf{K}_T \mathbf{a} = \mathbf{Q}_T \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_T &= \sum_e \mathbf{m}^e = \sum_e \left(\mathbf{m}_r^e + \mathbf{m}_s^e + \mathbf{m}_f^e + \mathbf{m}_b^e \right) \\ \mathbf{K}_T &= \sum_e \mathbf{k}^e = \sum_e \left(\mathbf{k}_r^e + \mathbf{k}_s^e + \mathbf{k}_f^e + \mathbf{k}_b^e + \mathbf{k}_{1c}^e + \mathbf{k}_{2c}^e + \mathbf{k}_{3c}^e + \mathbf{k}_{4c}^e \right) \\ \mathbf{C}_T &= \sum_e \mathbf{c}^e = \sum_e \left(\mathbf{c}_b^e + \mathbf{c}_{1c}^e + \mathbf{c}_{2c}^e + \mathbf{c}_{3c}^e + \mathbf{c}_{4c}^e \right) \\ \mathbf{Q}_T &= \sum_e \mathbf{Q}_f^e \end{aligned} \quad (19)$$

3 车辆—轨道—桥梁耦合系统有限元方程

考虑车辆—无砟轨道—桥梁耦合系统的有限元方程包含两种单元,即无砟轨道—桥梁单元和车辆单元,相应的单元刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵分别为 \mathbf{K}_u , \mathbf{M}_u , \mathbf{C}_u 见(3)和 \mathbf{K}_T , \mathbf{M}_T , \mathbf{C}_T 见(19)。利用标准有限元的集成方法可形成车辆—无砟轨道—桥梁耦合系统的总刚度矩阵、总质量矩阵和总阻尼矩阵。最后得到车辆—无砟轨道—桥梁耦合系统的动力有限元方程如下:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{a}} + \mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{Q} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \sum_e \left(\mathbf{M}_T + \mathbf{M}_u \right), \mathbf{C} = \sum_e \left(\mathbf{C}_T + \mathbf{C}_u \right) \\ \mathbf{K} &= \sum_e \left(\mathbf{K}_T + \mathbf{K}_u \right), \mathbf{Q} = \sum_e \left(\mathbf{Q}_T + \mathbf{Q}_u \right) \end{aligned} \quad (21)$$

考虑桥梁支承处的边界条件,即桥墩沿竖直方向的位移为零,车辆—无砟轨道—桥梁耦合系统动力有

限元方程数值解的实现,可通过直接积分法,如 Newmark 数值积分法。

4 车辆一轨道一桥梁耦合系统算例以及分析

对上述车辆一无砟轨道一桥梁耦合系统有限元模型运用 Matlab 编制了计算程序,并进行了实例计算。现利用编制的程序分析高速列车一无砟轨道一桥梁耦合系统垂向振动特性。考虑 8 跨连续梁的情况,桥梁跨度 32 m,整个桥长 256 m,列车时速 300 km·h⁻¹,混凝土支承块间距 0.65 m,时间步长 0.001 s。车辆、轨道和桥梁结构的参数见表 1 和表 2。为简化计算,不计轨道随机不平顺。

通过仿真分析可以得出轮轨接触力、钢轨竖向位移、桥梁竖向位移等时程曲线图,分别见图 3~图 7。

表 1 和谐号高速动车 CRH3 车辆结构参数

参数	取值	参数	取值
车体质量 M_c/kg	40 000	二系弹簧刚度 $K_{s2}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.8×10^6
构架质量 M_t/kg	3 200	一系阻尼系数 $C_{s1}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0×10^5
轮对质量 M_w/kg	2 400	二系阻尼系数 $C_{s2}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	1.2×10^5
车体点头惯量 $J_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	5.47×10^5	固定轴距 $2l_1/\text{m}$	2.5
构架点头惯量 $J_t/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	6 800	构架中心距离 $2l_2/\text{m}$	17.375
一系弹簧刚度 $K_{s1}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	2.08×10^6	轮轨接触弹簧刚 $K_c/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.325×10^9

表 2 CRTS II 型板式无砟轨道和桥梁结构参数

参 数	取值	参 数	取值
钢轨截面积 A_r/m^2	$0.774\ 5\times 10^{-2}$	底座密度 $\rho_f/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500
钢轨弹性模量 E_r/Pa	2.1×10^{11}	桥梁截面积 A_b/m^2	9.877
钢轨惯性矩 I_r/m^4	$0.321\ 7\times 10^{-4}$	桥梁惯性矩与弹性模量之积 $E_b I_b/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	2.3×10^8
钢轨密度 $\rho_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800	桥梁密度 $\rho_b/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500
轨道板截面积 A_s/m^2	0.225 0	垫板的支承弹性模量 $k_{sy1}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	6×10^7
轨道板弹性模量 E_s/Pa	3.9×10^{10}	CA 砂浆的支承弹性模量 $k_{sy2}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.9×10^9
轨道板惯性矩 I_s/m^4	8.5×10^{-5}	桥梁的支承弹性模量 $k_{sy3}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^8
轨道板密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500	垫板阻尼系数 $c_{sy1}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	4.77×10^4
底座截面积 A_f/m^2	0.442 5	CA 砂浆的阻尼系数 $c_{sy2}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	8.3×10^4
底座弹性模量 E_f/Pa	3×10^{10}	桥梁的阻尼系数 $c_{sy3}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	2.48×10^5
底座惯性矩 I_f/m^4	$33.187\ 5\times 10^{-4}$	轨枕间距 L_w/m	0.65

从时程曲线图可以看出:轮轨接触力保持在 70 kN 左右,从钢轨竖向位移时程曲线图中可以明显的看出四个轮对与钢轨接触时的四个峰值,而且在钢轨竖向加速度时程曲线图中也可以看出四个峰值。还可看出钢轨位移时程曲线与桥梁时程曲线图相比较,前者的振动位移比后者的大,在轨道一桥梁单元模型中的四层梁中,从上到下位移呈递减的趋势。钢轨和桥梁的振动加速度也呈现相同的规律。

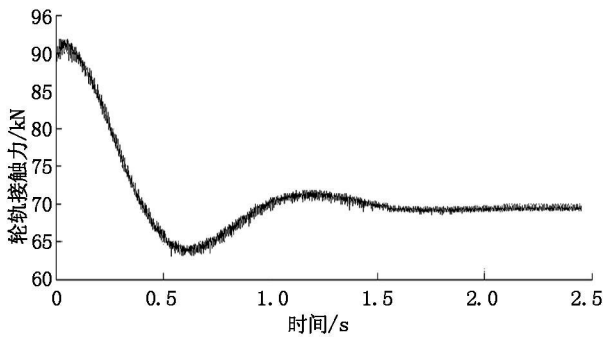


图3 轮轨接触力时程曲线

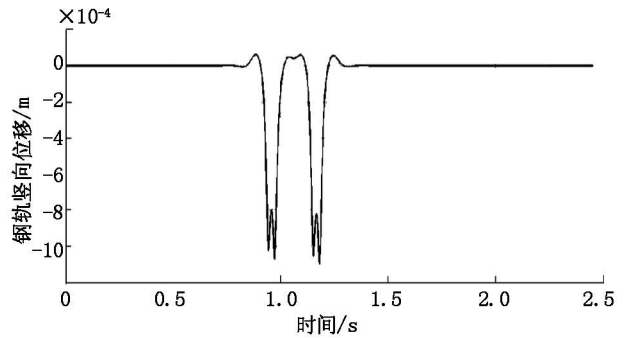


图4 钢轨竖向位移时程曲线

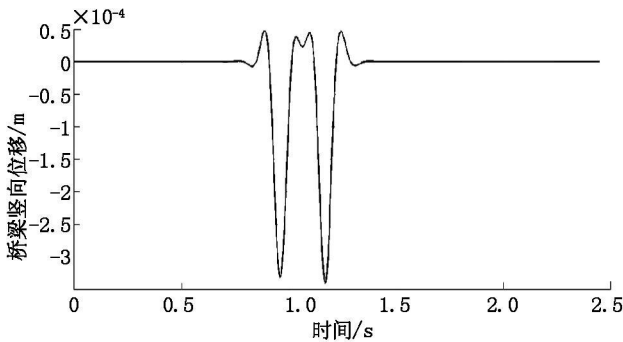


图5 桥梁竖向位移时程曲线

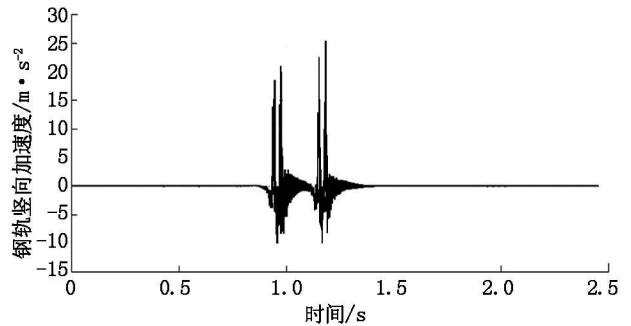


图6 钢轨竖向加速度时程曲线图

5 结论

通过建立车辆单元模型和轨道—桥梁四层梁单元模型,利用拉格朗日方程推导出整个耦合系统的刚度、质量和阻尼矩阵,最后得出耦合系统的振动方程。相对于其它复杂的车辆—轨道—桥梁耦合动力学模型,该方法思路清晰,借助于 Matlab 软件使得程序编制容易实现,计算时效快且能反映轨道—桥梁振动的基本规律和特点。

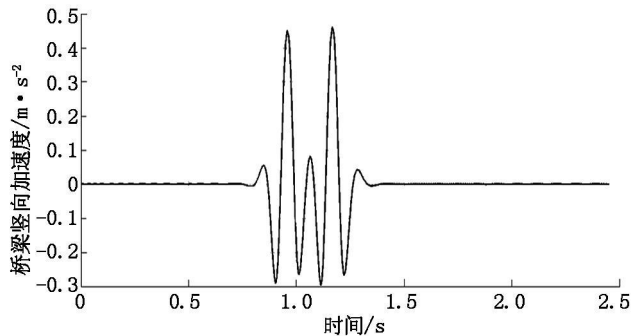


图7 桥梁竖向加速度时程曲线图

参考文献:

[1] FUJIKAKE T. A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 111(2):357-360.

[2] 松浦章夫. 高速铁路车辆与桥梁相互作用[J]. 铁道技术研究资料, 1974, 31(5):14-17.

[3] JU SHENHAW, LIN HUNGTA. Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(4):993-1002.

[4] JU SHENHAW, LIN HUNGTA. A simple finite element model for vibration analyses induced by moving vehicles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(12):1232-1256.

[5] 雷晓燕. 现代铁路理论研究[M]. 北京:中国铁道出版社, 2006.

[6] 雷晓燕, 张斌, 刘庆杰. 列车—轨道系统竖向动力学的车辆轨道单元模型[J]. 振动与冲击, 2009, 29(3):168-173.

[7] 雷晓燕, 张斌, 刘庆杰. 轨道过渡段动力特性的有限元分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5):15-21. (下转第26页)

[10] 蒋根谋. 建筑施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

Simulation Analysis of Main Structure Construction Process in High-rise Building

Yuan Tingwei¹, Jiang Genmou¹, YangKe²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. China Railway ERJU Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The construction process of standard layer in high-rise building has a characteristic of circular construction. There is limitation to prepare plans using traditional methods. The paper applies ABC simulating system in simulation of constructing high-rise buildings, and integrates advantages of CPM network technology into simulating of modeling stage to make model more practical in the constructing process. Through simulation analysis, the construction period and resource utilization are obtained. Through sensitivity analysis, the optimized mechanical configuration parameters are gained. Construction examples show that it is effective to adapt this modeling method to simulate construction process.

Key words: ABC; CPM; high-rise building; standard layer; construction simulation

(责任编辑 王建华)

(上接第 20 页)

Characteristic Analysis of Vibration for Coupling System of High-Speed Train-Ballastless Track-Bridge System

Li Yuanxiang, Lei Xiaoyan, Zhang Bin

(Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on kinetic characteristics of vehicle-ballastless track-bridge system, new types of vehicle and track-bridge elements are presented. Stiffness matrix, mass matrix and damping matrix of these two kinds of elements are deduced by finite element method and the Lagrange equation. The track system is separated into vehicle element and track-bridge element. Each car is taken as a vehicle element and track-bridge element is taken as a four layer beam element. Finally, an application example of the vibration characteristics of the entire system is analyzed.

Key words: vehicle element; ballastless-track-bridge element; coupling system; vibration analysis; high speed train

(责任编辑 刘棉玲)