

文章编号:1005-0523(2011)05-0041-05

# 客运专线车一线一桥垂向耦合系统振动的特性

陈松,雷晓燕,房建

(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:**近年来,高速铁路在我国得到了快速发展,由高速列车引起的线、桥振动问题越发突出。针对客运专线车一线一桥系统的特点,利用有限元方法建立了车辆—无砟轨道—桥梁耦合模型。鉴于模型的复杂性,将该模型分为列车—无砟轨道系统和无砟轨道—桥梁系统两个子系统来研究,两个子系统通过轮轨相互作用力耦合。根据Hamilton原理,可推导出两个子系统的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵。利用有限元对号入座的方法,将子系统的矩阵组装,建立出车一线一桥系统动力学方程,运用Newmark- $\beta$ 方法求解动力学方程。同时,利用Matlab语言编写了相应的程序。利用我国最新的车辆和轨道参数作为实例,研究我国客运专线垂向耦合振动响应。

**关键字:**客运专线;车辆单元;无砟轨道;桥梁单元;耦合系统;振动特性

**中图分类号:**U213.2

**文献标志码:**A

随着我国国民经济的不断快速发展,交通成为制约发展的主要瓶颈,因此发展高速、重载铁路势在必行。而高架线路作为客运专线的主要形式(以京沪高铁为例,全线有73%的部分是桥梁结构),高速列车通过高架桥梁引起结构的振动问题成为当前的研究热点,各国专家在理论和应用方面都做了大量的工作。20世纪80年代起,国内外学者已经比较深入的研究了高速列车和重载列车的车辆—轨道系统动力学,提出了许多计算模型和计算方法。华东交通大学雷晓燕教授<sup>[1-3]</sup>提出了车辆—轨道—桥梁垂向耦合振动模型,利用有限元法建立了耦合振动方程,运用Newmark- $\beta$ 方法求解动力学方程。台湾成功大学朱圣浩教授等<sup>[4-5]</sup>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,将列车模拟为动轮单元,大地采用三维块体单元模拟,研究了高架轨道引起周边建筑物的环境振动。日本学者佐藤裕等<sup>[6]</sup>在考虑计算高频振动和模拟轨道不平顺引起的动力响应开发了比较完善的模型。Sato<sup>[7]</sup>使用他的集总参数模型“半车—轨道”研究了轨道动力响应及轮轨接触振动的产生和传播。以上文献分析中,车辆—轨道—桥梁耦合模型通常考虑有砟轨道,针对无砟轨道的情况并不多见,特别是将车辆、无砟轨道和桥梁作为一个大系统考虑。本文基于这些情况建立了高速列车—无砟轨道—桥梁耦合系统,并将这一大系统分为车辆—无砟轨道、无砟轨道—桥梁两个子系统,这两个子系统通过轮轨相互作用力耦合,得到大系统的动力学方程。用Newmark- $\beta$ 方法求解动力学方程,并利用Matlab语言编制了相应的程序代码。

## 1 车辆单元模型

基于雷晓燕教授的车辆—轨道—地基耦合系统模型<sup>[1-3]</sup>,本文对车辆单元做了以下假设:将每节车厢以单轮为单元分成4个独立动轮单元,每个动轮单元考虑一、二系弹簧(如图1),这样可以有效减小模型的自由度,简化计算。在单轮模型中,车体、转向架和车轮考虑只沉浮振动,每段钢轨单元上两个节点考虑竖向位移和转角,因此单轮模型有7个自由度。如图1所示, $m_c$ 表示车体的质量; $m_t$ 表示转向架的质量; $k_{s1}$ ,  $k_{s2}$ 表示车辆一、二系悬挂刚度; $c_{s1}$ ,  $c_{s2}$ 分别表示车辆一、二系悬挂阻尼; $m_w$ 表示车轮的质量; $k_c$ 表示轮轨间接接触刚度; $v_c$ 为车体沉浮振动的位移; $v_t$ 为转向架沉浮振动的位移; $v_w$ 表示车轮的竖向位移; $v_1$ ,  $v_2$ 表

收稿日期:2011-07-30

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

作者简介:陈松(1987—),男,硕士研究生,研究方向为车辆轨道动力学。

示钢轨两端的竖向位移;  $\theta_1, \theta_2$  表示钢轨两端的转角。如图1, 设钢轨1点和2点距离为  $l$ , 轮轨接触点3点离1点距离为  $x$ 。可以将单轮单元的节点位移向量  $\mathbf{a}_u^e$  表示:

$$\mathbf{a}_u^e = [v_1 \quad \theta_1 \quad v_2 \quad \theta_2 \quad v_w \quad v_t \quad v_c]^T \quad (1)$$

假定梁的位移模式:

$$v = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x^3 \quad (2)$$

因此可以得出其插值函数:

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

将单元中各个节点的位移使用单元位移向量和插值函数表示, 运用Hamilton原理:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{a}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{a}} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\mathbf{a}}} = 0 \quad (4)$$

式中:  $L$  为Lagrange函数,  $L = T - V$ ;  $T$  为动能;  $V$  为势能;  $R$  为耗散能。

因此可以单轮单元的动能、势能和耗散能, 最后得出动轮单元的质量矩阵  $\mathbf{m}_u^e$ 、刚度矩阵  $\mathbf{k}_u^e$  和阻尼矩阵  $\mathbf{c}_u^e$ 。

为了更好模拟真实情形, 本文考虑两节车厢, 根据以上车辆单元假设, 其动力学方程可通过单轮单元叠加得到。

## 2 无砟轨道—桥梁单元模型

我国最新客运专线基本上使用无砟轨道, 大部分采用CRTS II板式轨道, 因此本文轨道模型采用CRTS II板式无砟轨道, 将轨道—桥梁结构简化为一层离散、三层连续的四层梁单元模型(图2), 分别为钢轨、轨道板、混凝土垫层和桥梁。模型考虑各个节点的沉浮和点头振动, 共有16个自由度。图2中:  $v_1, v_5$  表示钢轨的竖向位移,  $\theta_1, \theta_5$  分别表示钢轨的转角,  $c_{sy1}$  和  $k_{sy1}$  分别表示轨下垫层的阻尼系数和支承弹性系数;  $v_2, v_6$  分别表示轨道板的竖向位移,  $\theta_2, \theta_6$  分别表示预制轨道板的转角,  $c_{sy2}$  和  $k_{sy2}$  分别表示轨道板下CA砂浆层的阻尼系数和支承弹性系数;  $v_3, v_7$  表示混凝土垫层的竖向位移,  $\theta_3, \theta_7$  表示混凝土垫层的转角,  $c_{sy3}$  和  $k_{sy3}$  分别表示混凝土垫层下桥梁的阻尼系数和支承弹性系数;  $v_4, v_8$  表示桥梁单元的竖向位移,  $\theta_4, \theta_8$  表示桥梁单元的转角。

从图2中我们可以定义无砟轨道—桥梁模型的节点位移向量:

$$\mathbf{a}_1^e = \{v_1 \quad \theta_1 \quad v_2 \quad \theta_2 \quad v_3 \quad \theta_3 \quad v_4 \quad \theta_4 \quad v_5 \quad \theta_5 \quad v_6 \quad \theta_6 \quad v_7 \quad \theta_7 \quad v_8 \quad \theta_8\}^T \quad (5)$$

同样为了建立无砟轨道—桥梁单元的有限元方程, 推导出插值函数, 利用Hamilton原理, 得出无砟轨道—桥梁单元的弹性势能、动能和耗散能再推导出无砟轨道—桥梁单元的刚度矩阵  $\mathbf{k}_1^e$ 、质量矩阵  $\mathbf{m}_1^e$  和阻尼矩阵  $\mathbf{c}_1^e$ 。

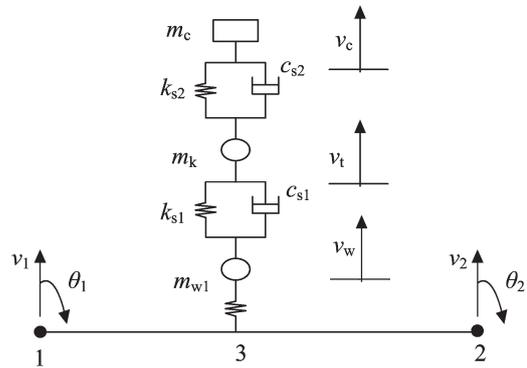


图1 车辆单轮模型  
Fig.1 Model of vehicle single wheel

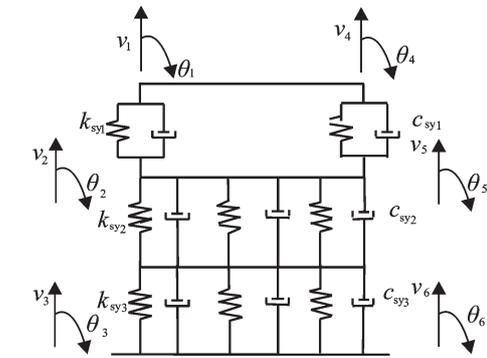


图2 CRTS II板式轨道简化模型  
Fig.2 CRTS II slab track and simplified model

### 3 车辆—无砟轨道—桥梁耦合系统有限元方程

通过前两部分得两个子系统的动力学方程,两个子系统通过轮轨相互作用力耦合,相互作用力遵循赫兹公式,得出大系统动力学方程。相应得出大系统单元的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵,分别为  $k_u$ ,  $m_u$ ,  $c_u$  和  $k_l$ ,  $m_l$ ,  $c_l$ 。最后得出车辆—无砟轨道—桥梁竖向耦合系统的动力学有限元方程:

$$m\ddot{a} + c\dot{a} + ka = Q \quad (8)$$

式中:

$$m = \sum_e (m_u + m_l), c = \sum_e (c_u^e + c_l^e), k = \sum_e (k_u^e + k_l^e) \quad (9)$$

式中: $Q$ 为耦合系统的荷载向量; $a$ 为耦合系统的位移向量。运用Newmark- $\beta$ 方法解动力学方程,在Matlab软件中编制程序,实现解动力学方程。

### 4 车辆—无砟轨道—桥梁耦合系统竖向振动分析

将以上得到的动力学方程可利用Newmark- $\beta$ 方法求解,通过Matlab语言编写软件实现。模型参数根据我国最新客运专线的车辆和无砟轨道参数确定,列车时速取为  $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

在轮轨动力学计算中,常用的不平顺谱有3种:美国的轨道谱、德国的轨道谱和我国干线铁路轨道谱,但它们都是有砟轨道不平顺谱。由于我国客运专线(特别是高速铁路)主要采用无砟轨道,因此在车辆轨道系统耦合振动中选择不平顺轨道谱是一个非常困难的问题,至今也没有比较统一的观点,只能从国内外现有的3种铁路轨道谱中做出选择。根据无砟轨道特性和我国无砟轨道的规范,在这里选择使用相对最合理的德国低干扰谱,利用Matlab程序,根据我国最新的动车CRH3-380的技术参数(表1)和CRTS II板式轨道的技术参数(表2)得到车辆—轨道—桥梁的竖向振动响应。主要技术指标为轮轨力;钢轨和轨道结构的位移、速度和加速度。

表1 和谐号高速动车CRH3车辆结构参数

Tab.1 Structure parameters of "Harmony" CRH3 high-speed train

参数	取值	参数	取值
车体质量 $m_c$ /kg	40 000	二系弹簧刚度 $k_{s2}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$0.8\times 10^6$
构架质量 $m_g$ /kg	3 200	一系阻尼系数 $c_{s1}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$1.0\times 10^5$
轮对质量 $m_w$ /kg	2 400	二系阻尼系数 $c_{s2}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$1.2\times 10^5$
车体点头惯量 $J_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$5.47\times 10^5$	固定轴距/m	2.500
构架点头惯量 $J_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	6 800	构架中心距离/m	17.375
一系弹簧刚度 $k_{s1}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$2.08\times 10^6$	轮轨接触弹簧刚 $k_c/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$1.325\times 10^9$

表2 CRTS II型板式无砟轨道和桥梁结构参数

Tab.2 CRTS II ballastless track plate and bridge structure parameters

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

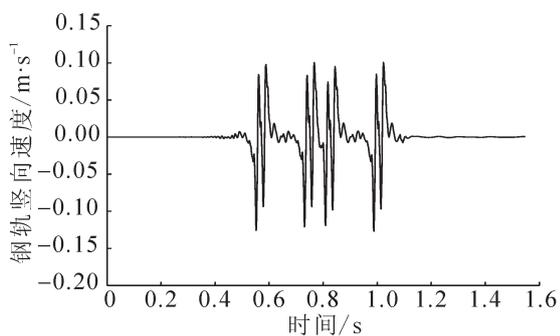


图3 轮轨接触力

Fig.3 Interaction forces of wheel rail

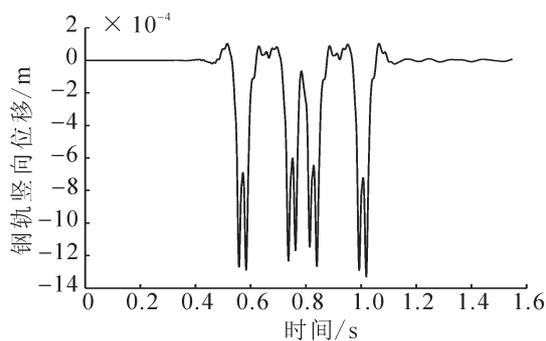


图4 钢轨竖向位移

Fig.4 Vertical displacement of rail

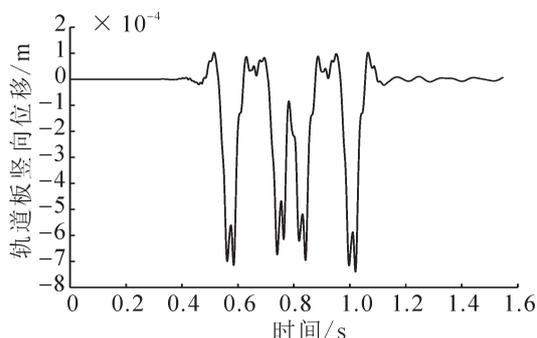


图5 轨道板竖向位移

Fig.5 Vertical displacement of orbital plate

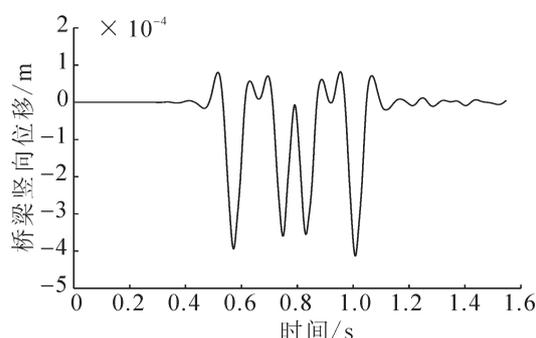


图6 桥梁竖向位移

Fig.6 Vertical displacement of bridge

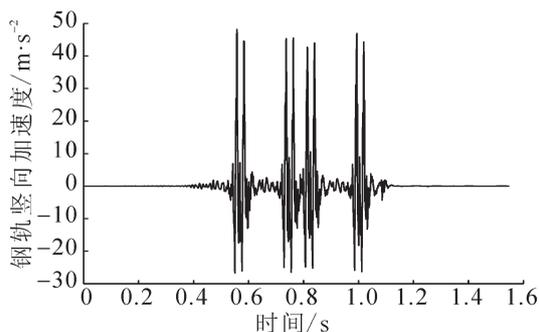


图7 钢轨竖向加速度

Fig.7 Vertical acceleration of rail

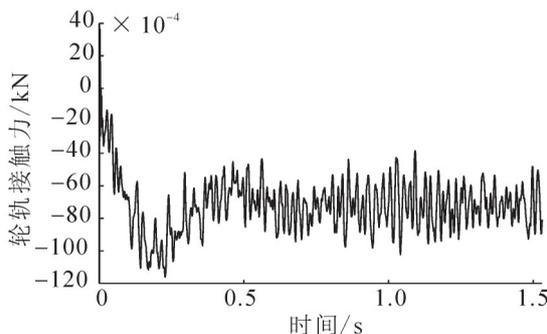


图8 钢轨竖向速度

Fig.8 Vertical speed of rail

对于图3,为轮轨接触力,图中当解稳定后可以看出来力在72 kN附近以20 kN的幅值抖动,在列车时速为300  $\text{kN}\cdot\text{h}^{-1}$ 时这个波动范围并不是很大,这主要是由于不平顺样本采用了幅值不大于4 mm的德国低干扰谱。这也解释了我国高铁规范中线路高低不平顺幅值为4 mm。

对于图6~8,为位移响应图,对于钢轨的位移响应可以看出明显的8个轮,在与轨道板、桥梁的位移响应相比可以明显得出响应幅值在明显减小。图7~8,为钢轨的加速度与速度响应图,也可明显看出有8个轮,图4,图7和8为钢轨振动响应。

## 5 结论

通过对车辆模型的单轮简化,可以明显降低模型的复杂性,为在电子计算速度没有特别明显进步的情况下完成整车模型提供了可能性。对于轨道部分,考虑了4层梁单元,这为研究扣件、轨下垫层、CA砂浆层对减振降噪的影响提供了依据。本文在考虑高铁的特性下使用了最能反应无砟轨道高低不平顺的德国低干扰谱,从轮轨力中可以与规范相互验证正确性,得出了列车时速在300  $\text{kN}\cdot\text{h}^{-1}$ 情况下的动力特性,为我

国高铁设计和运行提供一些理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 雷晓燕. 现代铁路理论研究[M]. 北京:中国铁道出版社,2006:51-66.
- [2] 雷晓燕. 高速列车诱发地面波与轨道强振动研究[J]. 铁道学报,2006,28(3):78-82.
- [3] 雷晓燕,张斌,刘庆杰. 列车—轨道系统竖向动力分析的车辆轨道单元模型[J]. 振动与冲击,2009,29(3):168-173.
- [4] 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.
- [5] JU SHENHAW, LIN HUNGTA. A simple finite element model for vibration analyses induced by moving vehicles, International Journal for Numerical Method in Engineering [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 68 (12) : 1232-1256.
- [6] 佐藤裕. 轨道力学[M]. 卢肇英,译. 北京:中国铁道出版社,1981:33-45.
- [7] 佐藤吉彦. 新轨道力学 [M]. 徐涌,等,译. 北京:中国铁道出版社,2001:54-61.

## Vibration Characteristics of the Passenger Line Bridge Vertical Coupling System

Chen Song, Lei Xiaoyan, Fang Jian

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

**Abstract:** The high-speed train system provides us a swift communication. But the dynamic behavior of bridges caused by high-speed trains has become an important issue. Aiming to the vehicles-track-bridge dynamical characteristics of passenger-lines, based on the previous literatures, the finite-element model of vehicle-unballast track-bridge is proposed. Because of the complicity of the whole model, in this paper, two subsystems are investigated. The first subsystem is vehicle-unballast track model. The second subsystem is unballast track-bridge model. These two subsystems can be coupled via wheel and rail interaction forces. Using Hamilton theory, the stiffness matrix, mass matrix and damping matrix for these two subsystems can be deduced. The total stiffness matrix, total mass matrix and total damping matrix for vehicle and track coupling system can be formulated by the usual assembling technique the finite element method. The dynamical finite element equations can be solved by Newmark- $\beta$  method. At same time, the analyzed program is realized by Matlab. By comparison with the literature, it shows they indicate good agreement. Secondly, taking China new vehicles and unballast track as an example, vertical of China passenger-line is investigated.

**Key words:** passenger-line; finite element model of train; unballast track; finite element model of bridge; coupling system; vibration characteristics