

文章编号: 1000-4750(2011)03-0191-07

列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型

徐 鹏, *蔡成标

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘 要: 建立了列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型。模型中, 充分考虑了机车车辆、有砟轨道、路基的空间特性、时变特性及相互作用, 对路基系统, 采用连续体建模的方法, 并利用 Galerkin 法进行了离散。通过仿真计算与秦沈线综合试验实测结果进行比较, 验证了模型的可靠性。以运行速度为 200km/h 的 CRH2 动车组作用为例分析了路基的动力特性, 得出了基床表面变形、应力的动态响应结果, 动变形、动应力沿路基纵向和横向的分布。该模型实现了列车-有砟轨道-路基耦合振动系统的快速计算, 可用于研究列车、有砟轨道、路基之间的动力相互作用及对路基动力特性进行详细分析。

关键词: 列车; 轨道; 路基; 耦合动力学; 动力响应

中图分类号: U270.1; U213.1; U213.2 **文献标识码:** A

SPATIAL DYNAMIC MODEL OF TRAIN-BALLAST TRACK-SUBGRADE COUPLED SYSTEM

XU Peng, *CAI Cheng-biao

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A dynamic model of a train-ballast track-subgrade coupled system is established. In the model, spatial and time varying characteristics and interactions between the rolling stock, ballast track and subgrade are fully considered. The subgrade are modeled based on continuum theory and then be discretized by utilizing one of Galerkin methods. The model is reliable by comparing the calculation results with the test results in Qin-Shen passenger line. When the CRH2 EMUs passing at a speed of 200km/h, the dynamic characteristics of subgrade are studied and analyzed. The dynamic responses such as the deformation and stress of subgrade surface, the dynamic deformation and stress distribution along the longitudinal and lateral directions are obtained. Such a model performs a fast calculation for the train-ballast track-subgrade coupled system, which can be used to study dynamic interactions between a train, ballast track and subgrade and make a detailed analysis about the dynamic characteristics of subgrade.

Key words: train; track; subgrade; coupled dynamics; dynamic response

车辆、轨道、路基系统动力性能和参数的合理匹配是高速列车行车安全的重要保证, 而其中路基是最不稳定也是最需要研究的环节^[1]。Knothe 和 Grassie 教授早在 1995 年就指出^[2-3], 充分考虑路基和结构物振动的有效动态分析模型是今后的主要

研究问题之一。我国目前由于缺乏合理的动态计算模型, 路基的设计计算方法仍以静态或准静态为主, 无法满足高速铁路路基结构设计的需要。近年来许多学者开展了车辆轨道路基系统动力学的研究, 有的对车辆模型和轮轨关系作了较多简化, 有

收稿日期: 2009-09-14; 修改日期: 2010-01-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAG12A01-A03-1); 国家 973 计划项目(2007CB714700); 全国博士学位论文作者专项资金项目(2007B56); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010XS35)

作者简介: 徐 鹏(1985-), 男, 湖北潜江人, 博士生, 从事铁路大系统动力学研究(E-mail: gslzxupeng@126.com);

*蔡成标(1963-), 男, 浙江东阳人, 研究员, 博士, 博导, 从事铁路大系统动力学研究(E-mail: cbcai@swjtu.cn).

的局限于垂向动力学分析^[4-6]，整个系统动力学的研究还不完善。

本文从系统工程角度出发，运用车辆动力学、轨道动力学、路基动力学、轮轨空间接触几何关系、赫兹非线性弹性接触理论、蠕滑理论等建立列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型，充分考虑了整个系统的空间特性、时变特性、耦合作用，其中对路基系统采用连续体建模的方法，选取满足边界条件的连续光滑可微解析函数对偏微分方程进行离散化，将三维问题转化为一维问题求解，大大缩短了计算时间，在普通微机上即可实现列车-有砟轨道-路基空间耦合系统动力学响应的快速计算。

1 列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型

1.1 列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型

图 1 为列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型。将机车车辆视为由车体、构架及轮对组成的多刚体系统，考虑车体、前后构架及轮对的垂向、横向、点头、侧滚、摇头自由度以及车辆悬挂系统中的非线性因素。轮轨之间的法向作用力由赫兹非线性弹性接触理论确定，切向蠕滑力先由 Kalker 线性蠕滑理论确定，再根据 Johnson- Vermeulen 理论作非线性修正。将钢轨视为弹性点支承基础上的 Bernoulli-Euler 梁，分别考虑左股钢轨、右股钢轨

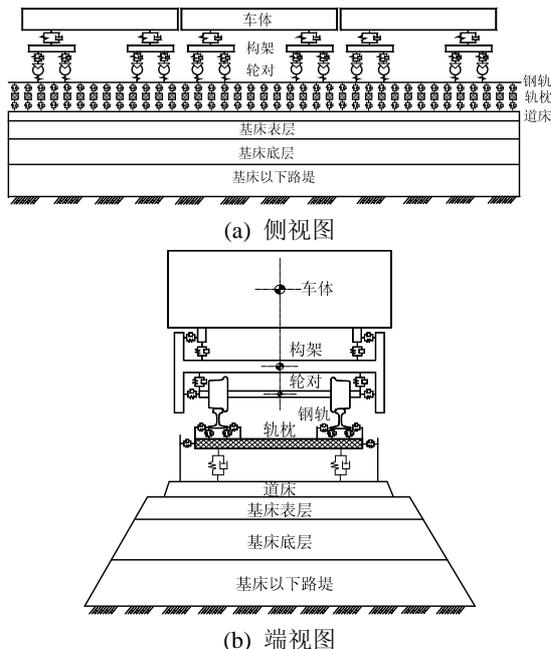


图 1 列车-有砟轨道-路基耦合动力学模型
Fig.1 Dynamic model of train-ballast track-subgrade coupled system

的垂向、横向及转动自由度，钢轨支承点间隔为扣件间距。轨枕按扣件间距布置，每一轨枕考虑其垂向、横向及转动自由度。将道床和路基视为空间层状弹性体，分为道床层、基床表层、基床底层及基床以下路堤。限于篇幅，机车车辆及轨道动力学方程、轮轨相互作用关系参考文献[7-8]。

1.2 道床及路基动力学方程

将道床及路基视为空间层状弹性体(如图 2)，取典型层，其弹性动力学方程为^[9]：

$$\begin{cases} r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} = (I + G) \frac{\partial q}{\partial x} + G \nabla^2 u \\ r \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c \frac{\partial v}{\partial t} = (I + G) \frac{\partial q}{\partial y} + G \nabla^2 v + F_y \\ r \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} = (I + G) \frac{\partial q}{\partial z} + G \nabla^2 w + F_z \end{cases} \quad (1)$$

式中：

$$F_y = \sum_{i=1}^{N_b} F_{sHi}(t) d(x - x_{bi}) d(y - y_{bi}) d(z - z_{bi}) \quad (2)$$

$$F_z = \sum_{i=1}^{N_b} F_{sVi}(t) d(x - x_{bi}) d(y - y_{bi}) d(z - z_{bi}) \quad (3)$$

r 为质量密度； c 为阻尼系数； u 、 v 、 w 为 x 方向、 y 方向、 z 方向的位移分量； F_{sHi} 和 F_{sVi} 为第 i 根轨枕作用于道床的横向力和垂向力； x_{bi} 、 y_{bi} 、 z_{bi} 为第 i 根轨枕与道床作用点的位置； N_b 为总的枕下离散支承点数； d 为 Dirac 函数； I 和 G 为拉梅常数，与弹性模量 E 、泊松比 n 有： $I = En / [(1+n)(1-2n)]$ ， $G = E / (2+2n)$ ； q 为体积应变， $q = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z$ ； ∇^2 为拉普拉斯算子， $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ 。

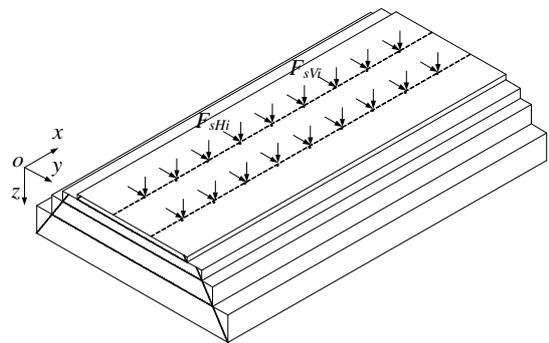


图 2 道床及路基受力示意图
Fig.2 Force analysis of ballast and subgrade

1.3 边界条件

取有限长道床及路基为研究对象如图 3 所示，其中 $x=0$ 和 $x=a$ 两端面为简支，满足 $v=w=0$ ， $S_x=0$ ；

$y=0$ 和 $y=b$ 两端面为自由边界。为消除动力计算时的边界效应, 本文计算时在取道床及路基长度为 100m 的基础上考虑前后两端各延伸 50m, 故总的计算长度为 200m, 即 $a=200\text{m}$ 。

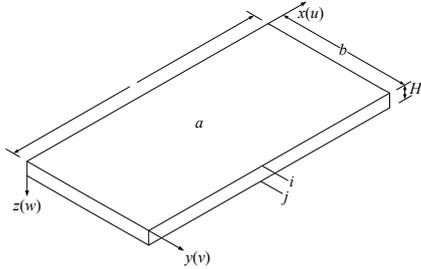


图 3 典型层

Fig.3 Typical layer

1.4 Galerkin 离散

基于 Galerkin 法^[10-11], 建立满足边界条件的位移函数:

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} [(1-\xi)U_{mn}^i(t) + \xi U_{mn}^j(t)] X_m(x) Y_n(y) \\ v(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} [(1-\xi)V_{mn}^i(t) + \xi V_{mn}^j(t)] X_m(x) Y_n'(y) \\ w(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} [(1-\xi)W_{mn}^i(t) + \xi W_{mn}^j(t)] X_m(x) Y_n(y) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $X_m(x)=\sin(m\pi x/a)$; $Y_1(y)=1$; $Y_2(y)=\sqrt{3}(1-2y/b)$; $Y_n(y)=\cosh\alpha_n y + \cos\alpha_n y - \beta_n(\sinh\alpha_n y + \sin\alpha_n y)$, $n>2$; $\alpha_n=(2n-3)\pi/(2b)$, $\beta_n=(\cosh\alpha_n b - \cos\alpha_n b)/(\sinh\alpha_n b - \sin\alpha_n b)$, $n>2$; $\xi=z/H$ 。

将式(4)代入式(1), 方程两端同乘以相应的权系数并沿着典型层的体域积分, 利用三角函数的正交性, 整理可得描述典型层振动问题的常微分方程组:

$$M_e^m \ddot{a}_e^m + C_e^m \dot{a}_e^m + K_e^m a_e^m = F_e^m \quad (5)$$

式中:

$$M_e^m = \begin{bmatrix} \bar{M}_e^{m1m1} & \bar{M}_e^{m1m2} & \dots & \bar{M}_e^{m1mN_y} \\ \bar{M}_e^{m2m1} & \bar{M}_e^{m2m2} & \dots & \bar{M}_e^{m2mN_y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{M}_e^{mN_y m1} & \bar{M}_e^{mN_y m2} & \dots & \bar{M}_e^{mN_y mN_y} \end{bmatrix};$$

$$C_e^m = \begin{bmatrix} \bar{C}_e^{m1m1} & \bar{C}_e^{m1m2} & \dots & \bar{C}_e^{m1mN_y} \\ \bar{C}_e^{m2m1} & \bar{C}_e^{m2m2} & \dots & \bar{C}_e^{m2mN_y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{C}_e^{mN_y m1} & \bar{C}_e^{mN_y m2} & \dots & \bar{C}_e^{mN_y mN_y} \end{bmatrix};$$

$$K_e^m = \begin{bmatrix} \bar{K}_e^{m1m1} & \bar{K}_e^{m1m2} & \dots & \bar{K}_e^{m1mN_y} \\ \bar{K}_e^{m2m1} & \bar{K}_e^{m2m2} & \dots & \bar{K}_e^{m2mN_y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{K}_e^{mN_y m1} & \bar{K}_e^{mN_y m2} & \dots & \bar{K}_e^{mN_y mN_y} \end{bmatrix};$$

$$a_e^m = [\bar{a}_e^{m1} \quad \bar{a}_e^{m2} \quad \dots \quad \bar{a}_e^{mN_y}]^T;$$

$$F_e^m = [\bar{F}_e^{m1} \quad \bar{F}_e^{m2} \quad \dots \quad \bar{F}_e^{mN_y}]^T;$$

$$\bar{a}_e^{mn} = [U_{mn}^i, V_{mn}^i, W_{mn}^i, U_{mn}^j, V_{mn}^j, W_{mn}^j]^T;$$

$$\bar{F}_e^{mn} = [0, F_1, F_2, 0, 0, 0]^T;$$

$$\bar{M}_e^{mnmq} = \frac{\rho H}{6} \begin{bmatrix} 2R_1 & 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 \\ & 2R_2 & 0 & 0 & R_2 & 0 \\ & & 2R_1 & 0 & 0 & R_1 \\ & & & 2R_1 & 0 & 0 \\ & & & & 2R_2 & 0 \\ & & & & & 2R_1 \end{bmatrix};$$

$$\bar{C}_e^{mnmq} = \frac{cH}{6} \begin{bmatrix} 2R_1 & 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 \\ & 2R_2 & 0 & 0 & R_2 & 0 \\ & & 2R_1 & 0 & 0 & R_1 \\ & & & 2R_1 & 0 & 0 \\ & & & & 2R_2 & 0 \\ & & & & & 2R_1 \end{bmatrix};$$

$$\bar{K}_e^{mnmq} = \begin{bmatrix} k_{11} & \dots & k_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{61} & \dots & k_{66} \end{bmatrix};$$

$$m=1-N_x, \quad n=1-N_y, \quad q=1-N_y;$$

$$k_{11} = \frac{H}{3} A_4 B_1 d_1 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3 + \frac{1}{H} A_3 B_1 d_3;$$

$$k_{12} = \frac{H}{3} A_2 B_2 d_2 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3;$$

$$k_{13} = -\frac{1}{2} A_2 B_1 d_2 - \frac{1}{2} A_3 B_1 d_3;$$

$$k_{14} = \frac{H}{6} A_4 B_1 d_1 + \frac{H}{6} A_3 B_3 d_3 - \frac{1}{H} A_3 B_1 d_3;$$

$$k_{15} = \frac{H}{6} A_2 B_2 d_2 + \frac{H}{6} A_3 B_3 d_3;$$

$$k_{16} = \frac{1}{2} A_2 B_1 d_2 - \frac{1}{2} A_3 B_1 d_3;$$

$$k_{21} = \frac{H}{3} A_2 B_4 d_2 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3;$$

$$k_{22} = \frac{H}{3} A_1 B_5 d_1 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3 + \frac{1}{H} A_1 B_3 d_3;$$

$$k_{23} = -\frac{1}{2} A_1 B_4 d_2 - \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3;$$

$$\begin{aligned}
k_{24} &= \frac{H}{6} A_2 B_4 d_2 + \frac{H}{6} A_3 B_3 d_3; \\
k_{25} &= \frac{H}{6} A_1 B_3 d_1 + \frac{H}{6} A_3 B_3 d_3 - \frac{1}{H} A_1 B_3 d_3; \\
k_{26} &= \frac{1}{2} A_1 B_4 d_2 - \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3; \\
k_{31} &= k_{13}, \quad k_{32} = -\frac{1}{2} A_1 B_2 d_2 - \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3; \\
k_{33} &= \frac{1}{H} A_1 B_1 d_1 + \frac{H}{3} A_1 B_3 d_3 + \frac{H}{3} A_4 B_1 d_3; \\
k_{34} &= -\frac{1}{2} A_2 B_1 d_2 + \frac{1}{2} A_3 B_1 d_3; \\
k_{35} &= -\frac{1}{2} A_1 B_2 d_2 + \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3; \\
k_{36} &= -\frac{1}{H} A_1 B_1 d_1 + \frac{H}{6} A_1 B_3 d_3 + \frac{H}{6} A_3 B_1 d_3; \\
k_{41} &= k_{14}, \quad k_{42} = \frac{H}{6} A_2 B_2 d_2 + \frac{H}{6} A_3 B_3 d_3; \\
k_{43} &= k_{34}, \quad k_{44} = \frac{H}{3} A_4 B_1 d_1 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3 + \frac{1}{H} A_3 B_1 d_3; \\
k_{45} &= \frac{H}{3} A_2 B_2 d_2 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3; \\
k_{46} &= \frac{1}{2} A_2 B_1 d_2 + \frac{1}{2} A_3 B_1 d_3; \\
k_{51} &= \frac{H}{6} A_2 B_4 d_2 + \frac{H}{6} A_3 B_3 d_3, \quad k_{52} = k_{25}; \\
k_{53} &= -\frac{1}{2} A_1 B_4 d_2 + \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3; \\
k_{54} &= \frac{H}{3} A_2 B_4 d_2 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3; \\
k_{55} &= \frac{H}{3} A_1 B_3 d_1 + \frac{H}{3} A_3 B_3 d_3 + \frac{1}{H} A_1 B_3 d_3; \\
k_{56} &= \frac{1}{2} A_1 B_4 d_2 + \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3; \\
k_{61} &= k_{16}, \quad k_{62} = \frac{1}{2} A_1 B_2 d_2 - \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3; \\
k_{63} &= k_{36}, \quad k_{64} = k_{46}, \quad k_{65} = \frac{1}{2} A_1 B_2 d_2 + \frac{1}{2} A_1 B_3 d_3; \\
k_{66} &= \frac{1}{H} A_1 B_1 d_1 + \frac{H}{3} A_1 B_3 d_3 + \frac{H}{3} A_3 B_1 d_3; \\
A_1 &= \int_0^a X_m X_m dx; \quad A_2 = \int_0^a X_m X_m'' dx; \\
A_3 &= \int_0^a X_m' X_m' dx; \quad A_4 = \int_0^a X_m'' X_m'' dx; \\
B_1 &= \int_0^b Y_n Y_q dy; \quad B_2 = \int_0^b Y_n Y_q' dy; \\
B_3 &= \int_0^b Y_n' Y_q' dy; \quad B_4 = \int_0^b Y_n'' Y_q'' dy;
\end{aligned}$$

$$B_5 = \int_0^b Y_n'' Y_q'' dy; \quad R_1 = A_1 B_1; \quad R_2 = A_1 B_3;$$

$$d_1 = \lambda + 2G; \quad d_2 = \lambda; \quad d_3 = G。$$

第 1 层有

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N_b} F_{sHi} X_m(x_i) Y_n'(y_i), \quad F_2 = \sum_{i=1}^{N_b} F_{sVi} X_m(x_i) Y_n(y_i),$$

其它层 $F_1 = F_2 = 0$ 。特别地，式(1)的右端含有非自伴随微分算子， \bar{K}_e^{mnmq} 为非对称阵^[11]。

1.5 位移协调及整体求解

如图 4 所示，以第 1 层和第 2 层为例，给出在对接面域 S (长、宽分别为 S_a 、 S_b) 处的 z 方向位移连续性条件：

$$\begin{aligned}
\sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} {}^{(1)}W_{mn}^j(t) {}^{(1)}X_m(x) {}^{(1)}Y_n(y) = \\
\sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} {}^{(2)}W_{mn}^i(t) {}^{(2)}X_m(x) {}^{(2)}Y_n(y), \quad x, y \in S \quad (6)
\end{aligned}$$

式(6)两端同乘以 ${}^{(1)}X_m(x) {}^{(1)}Y_n(y)$ ，沿对接面域 S 积分，并利用三角函数的正交性得到 z 方向位移协调条件：

$${}^{(1)}W_{mn}^j(t) = \sum_{q=1}^{N_y} {}^{(2)}W_{mq}^i(t) / S_b \int_0^{S_b} {}^{(1)}Y_n(y) {}^{(2)}Y_q(y) dy \quad (7)$$

同理可建立 x 方向、 y 方向的位移协调条件，最终得到第 1 层含 j 结面未知变量列阵 $\mathbf{a}_{(1)}^j$ 与第 2 层含 i 结面未知变量列阵 $\mathbf{a}_{(2)}^i$ 的位移协调方程：

$$\mathbf{a}_{(1)}^j = \mathbf{T} \mathbf{a}_{(2)}^i \quad (8)$$

式中： \mathbf{T} 为变换矩阵，元素由各方向位移协调条件确定。

对各层单元矩阵进行组装，并利用各层间的位移协调方程消除非独立变量^[12]，得到仅含独立变量的道床及路基的运动方程：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{a}} + \mathbf{K}\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad (9)$$

对车辆、轨道、路基的运动方程进行数值积分，就可求得相应的动力学响应。本文采用 Newmark- β 法进行求解。

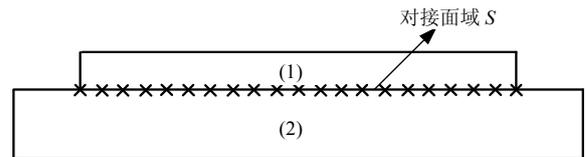


图 4 位移协调

Fig.4 Displacement coordination

2 模型验证

2.1 路基刚度矩阵验证

路基刚度矩阵元素表达式较为繁琐，本文通过 Boussinesq 课题初步进行验证。矩形竖向局部荷载作用于弹性半空间表面的(Boussinesq 课题)最大位移解为^[13]:

$$w_{\max} = \frac{2(1-\nu^2)p}{E} \sqrt{l_a l_b / \pi} \quad (10)$$

式中： E 为弹性模量； ν 为泊松比； l_a 、 l_b 为荷载作用面长度及宽度； p 为荷载压力。

为消除边界效应，取长为 50m，宽为 50m，高为 15m 的弹性体，划分成 6 层(3×2m+3×3m)，每层 $E=180\text{MPa}$ ， $\nu=0.3$ ，作用于弹性体表面荷载条件为 $l_a=l_b=1\text{m}$ ， $p=100\text{kN/m}^2$ ，计算结果如表 1 所列。

表 1 矩形荷载作用下表面最大位移

Table 1 Maximum surface displacement under the rectangular load

方法	本文模型	Boussinesq 解	FEM 法
表面最大位移/mm	0.566	0.571	0.588

由计算结果可以看出，三者相差不大，本文模型结果比解析解稍小，FEM 法结果(ANSYS 有限元软件计算得到)比解析解稍大，因此路基刚度矩阵是正确的。

2.2 模型验证

为了掌握建成后路基结构的动力特性，秦沈线开展了三次综合试验，试验车分别为神州号(轴重 22.5t)、先锋号(轴重 14.5t)、中华之星(轴重 19.5t)，现场压力传感器埋设在钢轨支点正下方的路基表面，压力盒直径为 18cm，测试结果为压力盒面积上的压力平均值。文献[4]将列车模拟为移动轮载，轨道及路基结构采用 ABAQUS 有限元软件建模，将计算结果与秦沈线测试结果进行了对比。本文选取表 2 所列道床及路基参数^[4,7]及机车车辆实际结构参数，采用秦沈线实测轨道不平顺，进行仿真计算，得到相同条件下的结果如表 3 所列。

表 2 计算参数

Table 2 Calculation parameters

结构	厚度/m	密度/ (kg/m^3)	弹性模量/ MPa	泊松比	阻尼/ ($\text{N}\cdot\text{s/m}$)
道床	0.3	2000	250	0.30	58800
基床表层	0.6	1950	180	0.25	31150
基床底层	1.9	1800	110	0.25	31150
基床以下路堤	5	1700	50	0.25	31150

表 3 路基面动应力、动变形实测与计算结果

Table 3 Comparison of test and calculation results for dynamic stress and deformation

试验 列车	速度/ (km/h)	秦沈线路 基面实测值 ^[4]		本文 计算结果		文献[4] 计算结果	
		动应力/ kPa	动变形/ mm	动应力/ kPa	动变形/ mm	动应力/ kPa	动变形/ mm
		神州号	160	68.4	0.75	70.8	0.59
	200	74.9	0.82	74.8	0.62	80.3	0.63
	160	38.8	0.29	47.6	0.39	50.0	0.40
先锋号	200	41.9	0.30	52.2	0.42	51.7	0.40
	250	42.9	0.32	58.6	0.43	56.0	0.42
中华之星	200	71.8	0.37	66.9	0.54	69.6	0.55
	250	72.9	0.40	71.4	0.56	72.5	0.57
	300	74.1	0.44	75.1	0.59	75.3	0.60

由表 3 可见，由于本文与文献[4]采用相同的理论计算参数进行计算，两者结果较为接近。然而由于理论计算参数与实际结构参数存在差异且理论模型只能近似反映实际，因此本文及文献[4]计算结果与实测相比，有的有所偏大，有的有所偏小。总的来说，三者结果具有较好的一致性，验证了本文模型的可靠性。

3 算例分析

以我国目前主型动车组 CRH2 为例(编组方式为 4 动+4 拖、动车轴重 13.5t、拖车轴重 12t)分析车辆、轨道、路基之间的动力相互作用，行车速度 200km/h，轨道不平顺为德国低干扰谱，波长范围 1m—30m，道床与路基结构参数同表 2。图 5、图 6 为头车车体心盘处垂向加速度及轮轨垂向力时程曲线；图 7、图 8 为动车组通过时基床表面动变形及动应力时程曲线；图 9—图 16 给出了某一时刻前两节车辆下方道床和路基动力响应。

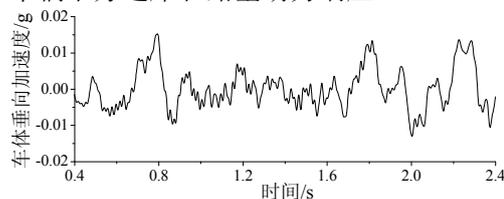


图 5 头车车体心盘处垂向加速度

Fig.5 Carbody vertical acceleration of head car

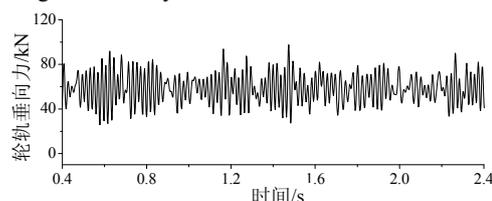


图 6 头车轮轨垂向力

Fig.6 Wheel-rail vertical force of head car

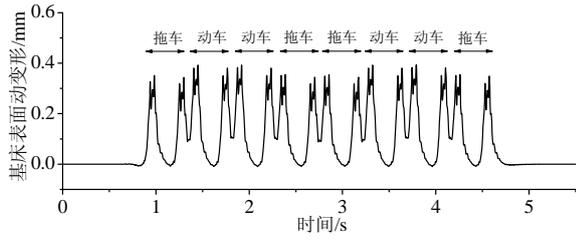


图7 基床表面动变形时程曲线

Fig.7 Dynamic deformation time history of subgrade surface

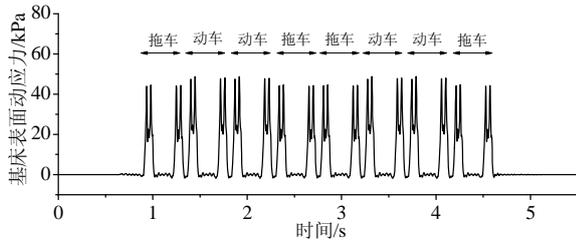


图8 基床表面动应力时程曲线

Fig.8 Dynamic stress time history of subgrade surface

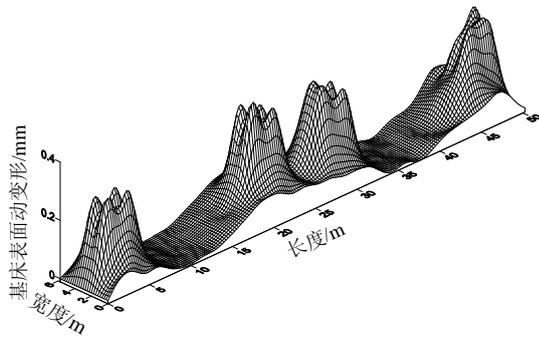


图9 基床表面动变形

Fig.9 Dynamic deformation of subgrade surface

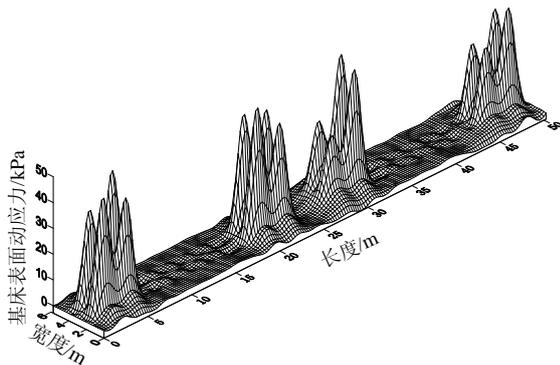


图10 基床表面动应力

Fig.10 Dynamic stress of subgrade surface

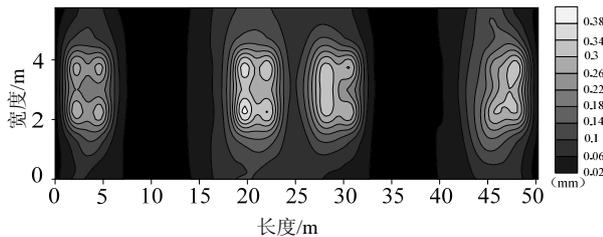


图11 基床表面动变形分布

Fig.11 Dynamic deformation distribution of subgrade surface

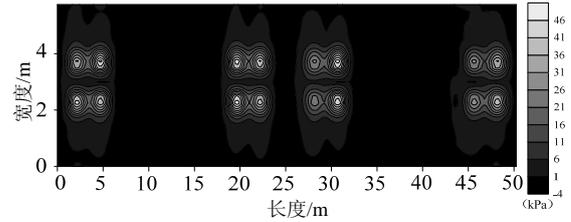


图12 基床表面动应力分布

Fig.12 Dynamic stress distribution of subgrade surface

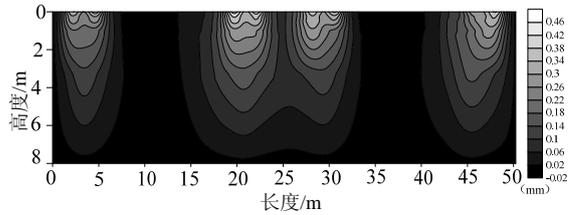


图13 道床及路基纵断面动变形分布

Fig.13 Dynamic deformation longitudinal distribution

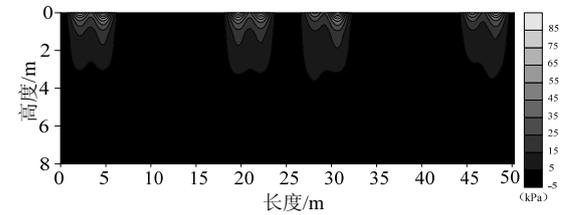


图14 道床及路基纵断面动应力分布

Fig.14 Dynamic stress longitudinal distribution

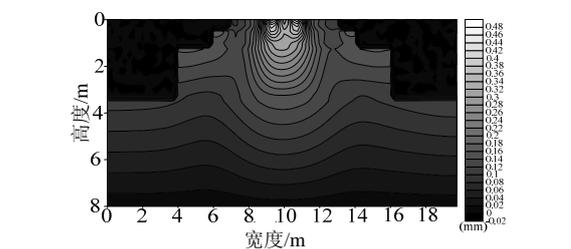


图15 道床及路基横断面动变形分布

Fig.15 Dynamic deformation lateral distribution

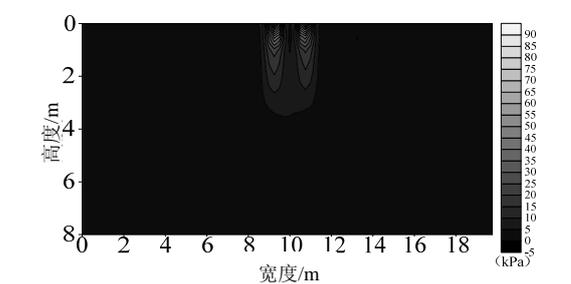


图16 道床及路基横断面动应力分布

Fig.16 Dynamic stress lateral distribution

由计算结果可以看出:

1) 头车车体心盘处垂向加速度峰值为 0.015g, 头车轮轨垂向力为 25.4kN—97.5kN。

2) 基床表面动变形和动应力分布表明, 最大动变形和动应力发生在车轮所在位置; 基床表面最大

动变形为 0.39mm, 最大动应力为 49.2kPa; 道床表面最大动变形为 0.48mm, 最大动应力为 93.2kPa。

3) 动变形随深度衰减较慢, 动应力随深度衰减较快; 纵断面场分布图清楚地显示出前后转向架所处的位置, 单个转向架产生动应力沿线路纵向影响范围约为 5m; 横断面场分布图清楚地显示出左右车轮所处的位置, 动应力横向影响范围约为 4m。

4) 道床表面下 3.0m 范围内动变形等值线比较密集; 道床表面下 1.0m 范围内动应力等值线比较密集, 为道床和基床表层所覆盖的范围; 道床表面下 1.0m 处的最大动应力为 25.7kPa, 为表面的 28%, 说明道床和基床表层可起到良好的衰减作用。

4 结论

将机车车辆、有砟轨道、路基视为相互影响和相互作用的耦合大系统, 建立了较为完善的列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型。由于采用解析函数对道床及路基层状弹性体的动力学方程进行离散, 将三维问题转化为一维问题求解, 实现了列车-有砟轨道-路基耦合振动系统的快速计算, 为详细研究列车、有砟轨道、路基之间的动力相互作用提供了有效的方法。

参考文献:

- [1] 苏谦. 高速铁路路基空间时变耦合系统动力分析模型及其应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
Su Qian. A spatial-timing-coupled dynamic model for railway subgrade of high speed line and its applications [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001. (in Chinese)
- [2] Knothe K. Past and future of vehicle/track interaction [J]. Vehicle System Dynamic Supplement, 1995, 45(24): 1—3.
- [3] Grassie S L. Review of workshop: aims and open questions [J]. Vehicle System Dynamic Supplement, 1995, 45(24): 380—386.
- [4] 董亮, 赵成刚, 蔡德钧, 张千里, 叶阳升. 高速铁路路基的动力响应分析方法[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 231—236, 240.
Dong Liang, Zhao Chenggang, Cai Degou, Zhang Qianli, Ye Yangsheng. Method for dynamic response of subgrade subjected to high-speed moving load [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 231—236, 240.

- (in Chinese)
- [5] 梁波, 张艳美, 韩自力. 京秦提速工程车-路动力仿真与试验的对比研究[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 159—164.
Liang Bo, Zhang Yanmei, Han Zili. Dynamic computer simulation and experimental investigation of the vehicle-subgrade system for the speed enhancement and remoulding engineering of the Jing-Qin railway line [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 159—164. (in Chinese)
- [6] 苏谦, 蔡英. 高速铁路路基结构空间时变系统耦合动力分析[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(5): 509—513.
Su Qian, Cai Ying. A spatial time-varying coupling model for dynamic analysis of high speed railway subgrade [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(5): 509—513. (in Chinese)
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Zhai Wanming. Vehicle-track coupling dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [8] 蔡成标. 高速铁路列车-线路-桥梁耦合振动理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
Cai Chengbiao. Theory and application of train-track-bridge coupling vibration in high-speed railways [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese)
- [9] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Xu Zhilun. Theory of elasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
Cao Zhiyuan. Vibration theory of plates and shells [M]. Beijing: China Railway Press, 1989. (in Chinese)
- [11] Meirovitch L. Computational methods in structural dynamics [M]. Alphen aan den Rijn, the Netherlands: Sijthoff & Noordhoff International Publishers B.V., 1980.
- [12] 王永岩. 动态子结构方法理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Wang Yongyan. Theory and application of dynamic substructure method [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [13] 宰金珉. 复合桩基础理论与应用研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.
Zai Jinmin. Theory and application of composite pile foundation [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2007. (in Chinese)