

文章编号: 1005-8451 (2009) 06-0004-04

## 移动荷载作用下桥上无砟轨道动力分析

李明鑫, 周小林, 褚卫松

(中南大学 土木建筑工程学院, 长沙 410075)

**摘要:** 桥上无砟轨道越来越多地应用于高速铁路。目前, 桥上无砟轨道结构动力计算理论还不够完善, 现采用有限元方法, 把移动荷载和轨道结构以及桥梁看成一个系统, 对板式无砟轨道在移动荷载作用下的动力性能进行分析, 并通过 MATLAB 编程实现, 计算结果符合无砟轨道结构和桥梁基本原理。

**关键词:** 移动荷载; 无砟轨道; 桥梁; 动力分析

中图分类号: U231.9 文献标识码: A

### Dynamic analysis of ballastless track on bridge subjected to moving load

LI Ming-xin, ZHOU Xiao-lin, CHU Wei-song

(Civil Architectural Engineering College, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Ballastless track on the bridge was increasingly used in high-speed railway. At present, the theoretical calculation of the ballastless track on the bridge was not enough to analyze the dynamic performance, the finite element method was used to analyze the dynamic performance of the system of slab track and bridge. And through MATLAB, the results were in line with the basic principles of the ballastless track and bridge.

**Key words:** moving load; ballastless track; bridge; dynamic analysis

桥梁是高速铁路上的重要基础设施, 与普通铁路相同, 多跨简支梁桥是高速铁路最为普遍采用的桥梁结构型式。列车高速通过桥梁时, 结构产生的振动, 不但影响结构的安全性和使用性, 还会对车辆本身的安全性和平稳性产生影响, 因此, 研究桥上无砟轨道振动具有十分重要的意义。

本文以板式轨道为载体, 取轨道相邻两扣件之间的部分为一个单元, 其中钢轨模拟为连续弹性点支承的 Euler 梁, 轨道垫层模拟为线弹簧和阻尼器, 轨道板在模型中作为 Euler 梁来处理, 垫层砂浆模拟为线性均布面弹簧和阻尼器, 桥梁被模拟为 Euler 梁, 采用 4 个移动荷载作用模拟车辆。应用弹性系统动力学势能不变值原理和形成矩阵的“对号入座”法则建立了系统竖向振动矩阵方程, 并应用 MATLAB 语言编制了相应的计算分析程序。

### 1 竖向振动模型的建立

在图 1 模型中车辆由 4 个移动荷载模拟, 假定所有向下的竖向位移为正, 顺时针方向的转角位

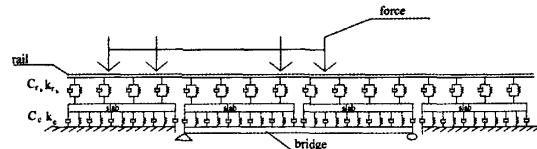


图 1 竖向振动分析模型

移为正。取轨道相邻两扣件之间的部分为一个单元, 目的使模型具有精度高、功能强的特点, 同时又不使模型过分复杂, 遵循了以下原则和假定:

(1) 采用连续分布参数轨道模型而不用简化的等效集中参数轨道模型。

(2) 钢轨采用 Euler 梁模型而不采用 Timoshenko 梁模型。

(3) 钢轨通过轨道垫层与轨道板连接, 轨道垫层模拟为线弹簧和粘滞阻尼器, 其竖向弹性系数为  $K_c$ , 阻尼系数为  $C_c$ 。

(4) 轨道板采用砂浆垫层全面支承, 砂浆模拟为线性均布面弹簧和粘滞阻尼器, 其竖向刚度系数为  $K_d$ , 阻尼系数为  $C_d$ 。

### 2 系统动力学方程的建立

本文运用形成矩阵的“对号入座”法则, 在弹

收稿日期: 2008-12-15

作者简介: 李明鑫, 在读硕士研究生; 周小林, 副教授。

性系统动力学总势能不变值原理<sup>[1]</sup>基础上计算每个单元的势能，然后按对单元势能变分，根据形成矩阵的“对号入座”法则得到单元刚度矩阵。

## 2.1 轨道板与桥梁之间面弹簧的总势能

### 2.1.1 轨道板与桥梁之间面弹簧的弹性变形能

因为梁单元的节点是定义在中线上的，所以这里将轨道板下面弹簧转化为沿其对称轴X轴的线弹簧，于是其弹性变形能可表示为：

$$U_{kc} = \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{2} K_c (y_s - y_b)^2 dx = \{\delta\}_c^T [K_c]^e \{\delta\}_c \quad (1)$$

式(1)中， $y_s$ 、 $y_b$ 分别表示对应点上轨道板和桥梁中心线上点的竖向位移。

### 2.1.2 轨道板与桥梁之间面弹簧的竖向阻尼力势能

采用和轨道板与桥梁之间面弹簧的弹性变形能相类似的方法，可以得到轨道板与桥梁之间面弹簧的竖向阻尼力势能为：

$$U_b = \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} C_c (y_s - y_b) \cdot (y_s - y_b) dx = \{\delta\}_c^T [C_c]^e \{\delta\}_c \quad (2)$$

## 2.2 桥梁单元总势能计算

### 2.2.1 桥梁弹性变形能

桥梁的弹性变形能：

$$U_b = \int_0^{\frac{L}{2}} E_b I_b [y_b''(x)]^2 dx \quad (3)$$

式(3)中： $E_b$ 为桥梁梁弹性模量； $I_b$ 为桥梁梁对水平轴的惯性矩； $y_b''(x)$ 为桥梁梁单元内某点的曲率。对 $U_b$ 进行变分，可以得到桥梁梁单元的弯曲刚度矩阵 $[K_b]^e$ ，即

$$\delta U_b = \delta \{\delta_b\}^T [k_b]^e \{\delta_b\}^e \\ \{\delta_b\}^e = [y_{bi} \quad y'_{bi} \quad y_{bj} \quad y'_{bj}] \quad (4)$$

式(4)中： $\{\delta_b\}^e$ 为单元的节点位移矢量列阵， $\delta \{\delta_b\}^e$ 为 $\{\delta_b\}^e$ 的一阶变分转置。

### 2.2.2 桥梁的惯性力势能

与钢轨惯性力势能类似，可以得到桥梁的惯性力势能：

$$V_b = \int_0^{\frac{L}{2}} \bar{m}_b \ddot{y}_b(x) y_b(x) dx \quad (5)$$

式(5)中： $\bar{m}_b$ 为桥梁梁单元单位长度质量， $\ddot{y}_b(x)$ 为桥梁梁单元内某点加速度。对 $V_b$ 进行变分，可以得到桥梁梁单元的质量矩阵 $[M_b]^e$ ，即

$$\delta V_b = \delta \{\delta_b\}^T [m_b]^e \{\ddot{\delta}_b\}^e \\ \{\ddot{\delta}_b\}^e = [\ddot{y}_{bi} \quad \ddot{y}'_{bi} \quad \ddot{y}_{bj} \quad \ddot{y}'_{bj}] \quad (6)$$

式(6)中， $\{\ddot{\delta}_b\}^e$ 为单元的节点加速度矢量列阵。

### 2.2.3 桥梁Rayleigh阻尼

前文形成了桥梁梁单元的刚度矩阵和质量矩阵，从而就可以进一步考虑桥梁梁单元的阻尼特性。实际工程中，影响结构阻尼的因素很多，一般难以精确描述，因此在实际计算中，人们通常用结构体系的刚度矩阵和质量矩阵的线性组合来体现结构阻尼特性，即Rayleigh阻尼，其计算公式表述为： $[C] = \alpha [M] + \beta [K]$ ， $\alpha$ 、 $\beta$ 可由下式确定：

$$\alpha = \frac{2(\lambda_i \omega_i - \lambda_j \omega_j)}{(\omega_j - \omega_i)(\omega_j + \omega_i)} \omega_i \omega_j \quad (7)$$

$$\beta = \frac{2(\lambda_i \omega_i - \lambda_j \omega_j)}{(\omega_j - \omega_i)(\omega_j + \omega_i)} \quad (8)$$

式(7)、(8)中， $\omega_i$ 、 $\omega_j$ 分别为结构的第*i*个和第*j*个固有频率， $\lambda_i$ 、 $\lambda_j$ 分别为结构的第*i*个和第*j*个振型的阻尼比，即实际阻尼与该振型的临界阻尼的比值，阻尼比的数值与结构类型、材料性质和振型有关，约在0.02~0.20范围内变化，一般通过对实际结构的测试获得<sup>[2]</sup>。

钢轨和轨道板的单元刚度、质量、阻尼矩阵以及移动荷载作用下单元的外力势能在文献<sup>[2-3]</sup>中有详细论述，这里不再赘述。

## 2.3 系统竖向振动有限元方程建立

本文将轨道结构视为有限单元模型的集合，设在*t*时刻计算长度上有*N*个荷载，则在*t*时刻轨道上荷载总势能变分为：

$\delta \Pi_v = \delta \Pi_{v1} + \delta \Pi_{v2} + \dots + \delta \Pi_{vN}$ ，这里认为：当第一荷载进入计算长度至最后一个荷载离开计算长度都将荷载的势能变分计入 $\delta \Pi_v$ 中。

系统在*t*时刻的竖向振动总势能的变分为：

$$\delta \Pi = \delta \Pi_t + \delta \Pi_v \quad (9)$$

由弹性系统动力学总势能不变值原理 $\delta \Pi=0$ 和前面所述形成矩阵的“对号入座”法则，即可直接形成系统在*t*时刻的总体刚度矩阵 $[K]$ ，总体质量矩阵 $[M]$ ，总体阻尼矩阵 $[C]$ ，及总体荷载列阵 $\{P\}$ 。

对系统总势能 $\Pi$ 变分后，由形成矩阵的“对号入座”法则，即可得出*t*时刻系统竖向振动的矩阵方程：

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P\} \quad (10)$$

式(10)中， $[M]$ 质量矩阵； $[C]$ 阻尼矩阵； $[K]$ 刚度矩阵； $\{\delta\}$ 位移列阵； $\{P\}$ 荷载列阵。

### 3 计算结果分析

本文计算采用的参数如表1和表2。

表1 无轨道结构参数

轨道弹性模量(Pa)	2.06E11
轨道截面抗弯惯性矩( $m^4$ )	2.037E-5
轨道单位长度质量(kg)	2 × 51.514
轨道板单位长度质量(kg)	2 × 557.81
轨道板弹性模量(Pa)	2.1E10
截面抗弯惯性矩( $m^4$ )	2 × (6.6874E-4)
CA砂浆弹性模量(Pa)	2E8 ~ 6E8
CA砂浆厚度(m)	0.02 ~ 0.05
板下基础单位长度等效弹性系数 $K_b$ (N/m <sup>2</sup> )	2 × (6.25E7)
板下基础单位长度等效阻尼系数 $C_b$ (N · s/m <sup>2</sup> )	8.3E4
扣件系统等效阻尼比	2 × 6E7
弹性系数 $K_d$ (N/m)	2 × 7.5E4
扣件系统等效阻尼比	0.025

表2 桥梁的参数<sup>[4]</sup>

长度(m)	32.6
单位长度质量(kg)	3.6 E4
弹性模量(Pa)	2.943E10
截面抗弯惯性矩( $m^4$ )	8.72
一阶自振频率(rad/s)	25.67
二阶自振频率(rad/s)	102.7
阻尼比	0.025

32 m 跨度简支梁上轨道板布置<sup>[4]</sup>采用 3.92 m、4.856 m 两种长度的轨道板，沿桥跨方向的布置为：

3 920 (扣件间距 570) +80+4856 (扣件间距 617) +80+4 856++80+4 856+80+4 856+80+3 920=32 600 mm。相邻轨道板间隔 80 mm。轨道长度选为 33.25 m。

本文采用 4 个集中力运行在表面平顺的钢轨上，每个集中力的大小  $f=156\ 800\ N$ ，中间两个集中力相距 15.5 m，两侧两个集中力相距均为 2.5 m，运行速度  $v=85\ m/s$ ；用 Newmark  $\beta$  法解此运动方程，钢轨、轨道板和桥梁的动力响应如图 2。

图 2~图 5 是轨道结构在移动荷载作用下的动力响应，从图中容易看出，当车轮碾压到钢轨上方时，钢轨位移和轨道板位移出现峰值，钢轨位移和轨道板位移曲线中包含有一明显的低频振动成分，真实反映了轨道结构下部桥梁结构的振动情况。轨道结构在 85 m/s 的运行速度下处于安全状态。

图 6~图 7 是桥梁结构的动力响应。

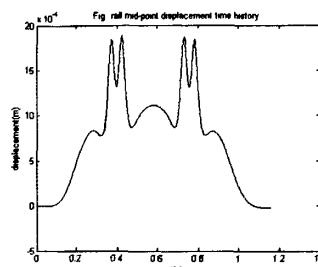


图 2 钢轨中点位移时程曲线

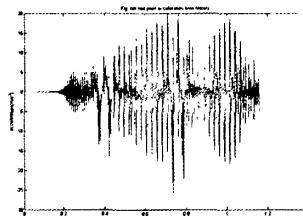


图 3 钢轨中点加速度时程曲线

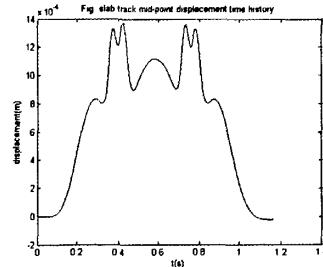


图 4 轨道板位移时程曲线

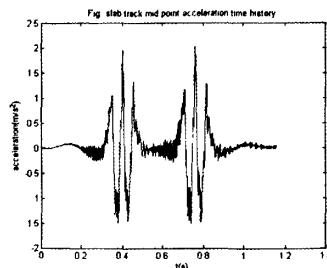


图 5 轨道板加速度时程曲线

### 4 结束语

本文建立的移动荷载—无砟轨道—桥梁动力学模型，采用有限单元法把整个系统进行离散，运用弹性系统动力学总势能不变原理，对号入座形成竖

文章编号: 1005-8451 (2009) 06-0007-03

## 基于智能计算的数据分析方法的研究与设计

井海明<sup>1</sup>, 赵宁<sup>1</sup>, 兰海波<sup>2</sup>

(1.石家庄铁道学院 计算机与信息工程分院, 石家庄 050043;

2.石家庄铁道学院 成人教育学院, 石家庄 050043)

**摘要:** 研究智能演化技术问题和数据分析问题, 结合程序设计自动化和离散性数据, 运用 GEP 算法的知识编程, 处理太阳黑子, 降水量等数据。通过遗传程序设计描绘数据规律并预测数据发展趋势, 实现数据的准确拟合。

**关键词:** 智能演化; 程序设计自动化; 离散性数据; GEP 算法

中图分类号: TP3

文献标识码: A

### Research and design of data analysis method based on intelligence computation

JING Hai-ming<sup>1</sup>, ZHAO Ning<sup>1</sup>, LAN Hai-bo<sup>2</sup>

(1.School of Computing and Informatics, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China

2.School of Adult Education, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In this paper, it was mainly studied on the problem of the intelligence evolution technology and data analysis. Combined with the programming design of automatically and discrete data, it was use the knowledge programme of GEP arithmetic, to process the data of macula and rainfall, etc. It was described the rule of data and forecast the data's developing trend to implement the data fitting correctly.

**Key words:** intelligence evolution; procedure design; automation discrete data; GEP algorithm

自计算机出现以来, 计算机科学的一个重要

收稿日期: 2008-12-03

基金项目: 河北省教育厅基金资助项目 (739001)

作者简介: 井海明, 讲师; 赵宁, 讲师。

目标是让计算机自动进行程序设计, 即只要明确地告诉计算机要解决的问题, 而不需要告诉它如何去做。遗传程序设计 (Genetic Programming) 便是在该领域的一种尝试。

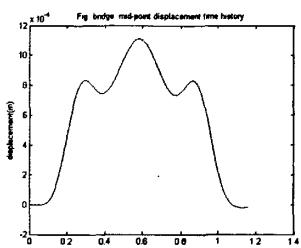


图 6 桥梁跨中位移时程曲线

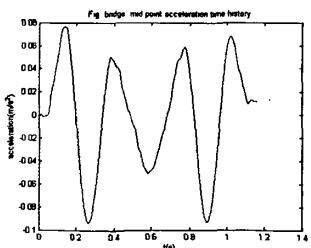


图 7 桥梁跨中加速度时程曲线

向振动方程, 采用 Newmark $\beta$  法解此运动方程, 通过 MATLAB 编程实现, 计算结果可靠, 利用此模型能够计算移动荷载作用下桥上无砟轨道的动力响应, 为桥上铺设无砟轨道提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变值原理[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28 (1): 1-3.
- [2] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 姜平, 曾庆元. 移动荷载作用下板式轨道的有限元分析[J]. 交通运输工程学报, 2004 (1): 29-33.
- [4] 姜平, 曾庆元. 车辆-轨道-桥梁系统竖向运动方程的建立[J]. 铁道学报, 2004 (5): 71-80.
- [5] 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]. 西南交通大学, 2004.