

# 地铁轨道结构减振性能的仿真分析

耿传智, 余庆

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 200331)

**摘要:** 采用减振轨道结构是轨道交通最为有效的减振技术措施. 不同的轨道结构和参数直接影响减振效果. 通过建立车辆-轨道系统动力分析模型, 仿真分析了不同地铁轨道结构动力参数变化对减振性能的影响.

**关键词:** 轨道结构; 振动; 动力仿真; 动力学

**中图分类号:** U 211.3

**文献标识码:** A

## Shock Absorption Analysis of Subway Rail Track Structure

GENG Chuangzhi, YU Qing

(Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 200331, China)

**Abstract:** Choosing reasonable track structure is the most effective method to reduce vibration in this field. The performance of vibration reduction depends on the type of track structure and their parameters. By establishing a metro vehicle-track system dynamic model, an analysis is made of different dynamic performance parameters of track structure, and the impact of track dynamic parameters on the vibration elimination performance.

**Key words:** track structure; vibration; dynamical simulation; dynamics

轨道结构在车辆-轨道-隧道土层环境振动体系中, 不但是产生地铁运行振动的根源之一<sup>[1]</sup>, 同时也是这一振动的传递载体, 其结构参数(质量、刚度、阻尼等)直接决定了振动传播的大小. 合理选择轨道结构的型式和结构参数, 是减振降噪的根本途径. 本文通过建立3种轨道轮轨动力仿真模型, 分析不同轨道结构及参数对减振性能的影响, 用于指导轨道结构设计和选型.

## 1 地铁车辆-轨道结构的振动分析

### 1.1 振动分析模型

根据地铁轨道结构的特点, 运用车辆-轨道交互作用动力学原理<sup>[2]</sup>, 建立了地铁车辆-轨道结构动力交互作用模型, 如图1—3所示.

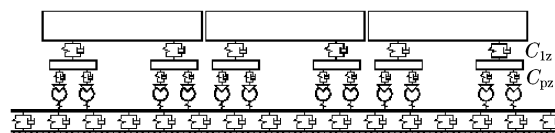


图1 车辆-弹性扣件轨道动力学分析模型

Fig.1 Metro vehicle- elastic fastener track dynamic analytic model

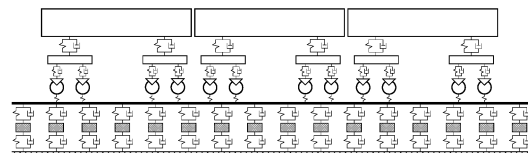


图2 车辆-弹性支承块轨道结构动力学分析模型

Fig.2 Metro vehicle-elastic supporting block track dynamic analytic model

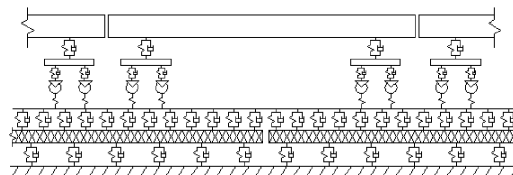


图3 地铁车辆-浮置板轨道动力学分析模型

Fig.3 Metro vehicle-floating slab track dynamic analytic model

模型中, 将钢轨视为弹性点支承基础上的 Bernoulli-Euler 梁; 钢轨支承点按实际扣件节点间距

收稿日期: 2009-10-27

基金项目: 上海市科委项目(03DZ12018)

第一作者: 耿传智(1963—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道结构与减振降噪技术. E-mail: gengchzh@163.com

布置;扣件及轨下垫板、橡胶套靴及块下垫板简化为两层均布的线性弹簧和黏滞阻尼;弹性支承块简化为一质量体,混凝土基础视为刚性;浮置板纵向视为有阻尼的弹性支承上的短梁;轨下橡胶垫块和浮置板下弹性支座以均布的线性弹簧和黏滞阻尼表示<sup>[3]</sup>.

将车体视为具有一、二系悬挂的由车体、转向架及轮对组成的刚性系统;并假设车体前后、左右对称,转向架构架左右对称;悬挂系统阻尼考虑为黏性阻尼<sup>[4]</sup>.因此,车体具有 10 个自由度,即车体垂向运动、点头运动、前后转向架构架的垂向和点头运动、4 个轮对的垂向运动.通过对各个刚体逐一应用 D'Alembert 原理可以获得系统振动微分方程<sup>[5]</sup>.

## 1.2 地铁轨道结构的动力方程

地铁轨道一般采用轨枕埋入式整体道床<sup>[6]</sup>,轨道的弹性主要靠钢轨扣件来提供,由于道床与隧道壁间完全联结在一起没有弹性,因此,整体道床轨道结构的振动主要是钢轨的振动.

钢轨模型如图 4 所示.

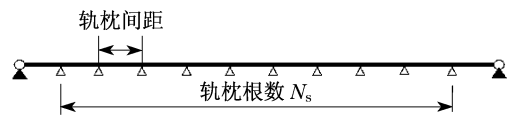


图 4 钢轨分析模型

Fig.4 Rail analytic model

钢轨振动微分方程为四阶偏微分方程.为了进行数值分析,需将其转化为二阶常微分方程组,为此采用 Ritz 法.引入钢轨正则振型坐标,应用简支梁的正则振型函数,最后得到钢轨振型坐标微分方程组的详细形式为

$$\ddot{q}_k(t) + \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_k(x_i) \sum_{h=1}^M Y_h(x_i) \dot{q}_h(t) + \frac{EI}{m_r} \left( \frac{k\pi}{l} \right)^4 q_k(t) + \sum_{i=1}^N K_{pi} Y_k(x_i) \sum_{h=1}^M Y_h(x_i) q_h(t) - \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_k(x_i) \dot{Z}_{si}(t) - \sum_{i=1}^N K_{pi} Y_k(x_i) Z_{si}(t) = \sum_{j=1}^4 p_j(t) Y_k(x_{wj}) \quad k = 1-M \quad (1)$$

式中:  $q_k(t)$ ,  $q_h(t)$  均为钢轨正则振型坐标;  $C_{pi}$  为扣件阻尼;  $K_{pi}$  为扣件刚度;  $Z_{si}(t)$  为第  $i$  个支承块位移;  $EI$  为钢轨抗弯刚度;  $m_r$  为钢轨单位长度质量;  $l$  为轨道计算长度;  $x_i$  为轨枕支点坐标;  $Y_k(x_i) = \sqrt{\frac{2}{m_r l}} \sin \frac{k\pi x_i}{l}$ ,  $Y_k(x_i)$ ,  $Y_h(x_i)$  均为所求钢轨振型;  $p_j(t)$  为车轮对钢轨的动作用力;  $x_{wj}$

为各车轮的运动坐标,  $j = 1, 2, 3, 4$ .

对于弹性支承块轨道结构,钢轨的模型与上述相同,钢轨与支承块以及支承块与基础之间线性弹簧和黏性阻尼连接.将钢轨位移表达式代入并整理得支承块振动微分方程为

$$M_{si} \ddot{Z}_{si}(t) + (C_{pi} + C_{bi}) \dot{Z}_{si}(t) + (K_{pi} + K_{bi}) Z_{si}(t) - C_{pi} \sum_{h=1}^M Y_h(x_i) \dot{q}_h(t) - K_{pi} \sum_{h=1}^M Y_h(x_i) q_h(t) = 0 \quad i = 1-N \quad (2)$$

式中:  $M_{si}$  为支承块质量;  $C_{bi}$  为橡胶套靴阻尼;  $K_{bi}$  为橡胶套靴刚度.

对于浮置板振动微分方程,现将浮置板沿轨道中心线纵向切割并当作梁处理,简化为图 5 所示模型.

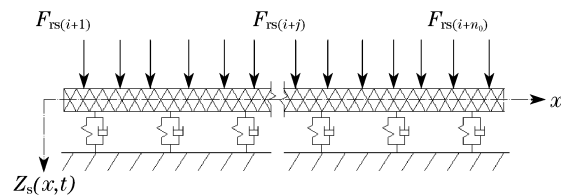


图 5 第  $i$  块浮置板振动分析模型

Fig.5 The  $i$ th floating slab track analytic model

图 5 中,浮置板支承在有阻尼的弹性支座上,此即浮置板振型坐标二阶常微分方程组 ( $n = 1-N$ ) 的基本形式.

$$\ddot{T}_n(t) + \frac{Cl_s}{M_s} \dot{T}_n(t) + \frac{K + EI \beta_n^4}{M_s} l_s \cdot T_n(t) = \sum_{j=1}^{n_0} \frac{F_{rsj}(t)}{M_s} X_n(x_j) \quad (3)$$

式中:  $T_n(t)$  为广义坐标;  $l_s$  为轨道板长度;  $M_s$  为浮置板质量;  $K, C$  分别为浮置板下弹簧支座沿长度方向的分布刚度和分布阻尼;  $\beta_n$  为引入的自由梁正交函数系  $\{X_n\}$  内常数;  $F_{rsj}(t)$  为钢轨支点反力.

## 1.3 轮轨接触模型<sup>[1,7]</sup>

轮轨垂向作用力由著名的赫兹非线性弹性接触理论所确定,当轮轨界面存在位移不平顺输入时,轮轨力表达式变为

$$p_j(t) = \begin{cases} p_0^{2/3} + \frac{1}{G} [Z_{wj}(t) - Z_r(x_j, t) - \eta(t)]^{3/2} & j = 1-4 \\ 0 & \text{轮轨脱离时} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $p_0$  为静轮载;  $G$  为轮轨接触常数;  $Z_{wj}(t)$  为

时刻第  $j$  个车轮的位移;  $Z_r(x_j, t)$  为第  $j$  个轨枕处钢轨位移;  $\eta(t)$  为轮轨表面几何不平顺。

#### 1.4 轨道不平顺模型

由于现阶段没有实测城市轨道交通不平顺谱,本文采用美国联邦铁路管理局 FRA 提出的轨道功率谱密度公式<sup>[8]</sup>,引用美国六级轨道谱进行计算,结果作为轮轨系统激励输入,表达式为

$$S_v(\Omega) = \frac{KA_v\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (5)$$

式中:  $K$  为系数,  $K = 0.25$ ;  $A_v$  为表征不平顺程度的参数,  $A_v = 0.0339 \text{ cm}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ ;  $\Omega_c$  为截断波数,  $\Omega_c = 0.8245 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\Omega$  为空间波数。

#### 1.5 仿真模型微分方程组数值解的实现

车辆-轨道交互作用动力学方程为<sup>[2]</sup>

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{P\} \quad (6)$$

式中:  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  分别为车辆-轨道交互作用系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;  $\{X\}$ ,  $\{\dot{X}\}$ ,  $\{\ddot{X}\}$  分别为车辆-轨道交互作用系统的广义位移矢量、广义速度、广义加速度;  $\{P\}$  为交互作用系统广义荷载矢量。

上述非线性动力学微分方程组所含自由度较多,必须采用一种既保证精度又有较快运算速度的高效解法。本文采用预测-校正 Newmark 数值积分法。其基本思路为:首先引入积分参数  $\varphi$  和  $\psi$ ,对称地构造一类新的显式积分格式来预测位移和速度,进而计算加速度预测值;然后采用 Newmark 公式校正位移和速度,并再次利用导出公式求得加速度校正值。

## 2 地铁车辆-轨道结构动力模型计算参数

地铁车辆采用 A 型车,参数按满载计。行车速度考虑 40, 60, 80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  3 种情况。钢轨类型为 60 轨,扣件间隔为 0.60 m;扣件动刚度取值为 6.25, 12.5, 25, 50  $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;阻尼均为  $7.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。弹性支承块轨道结构中,块下垫层动刚度考虑 12, 25, 50  $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  3 种情况,阻尼均为  $7.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,支承块质量取 100 kg。浮置板单块长度为 30 m,每块浮置板下设 34 个弹性支座,每个弹性支座动刚度按 6.67, 8, 10, 20  $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  4 种情况计算。每个弹性支座阻尼取值为  $7.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

## 3 轨道结构减振性能分析结果

### 3.1 弹性钢轨扣件减振性能动力分析结果

图 6 给出了钢轨振动加速度、轮轨力、钢轨位移以及扣件支点反力随扣件刚度和列车运行速度变化的关系曲线。

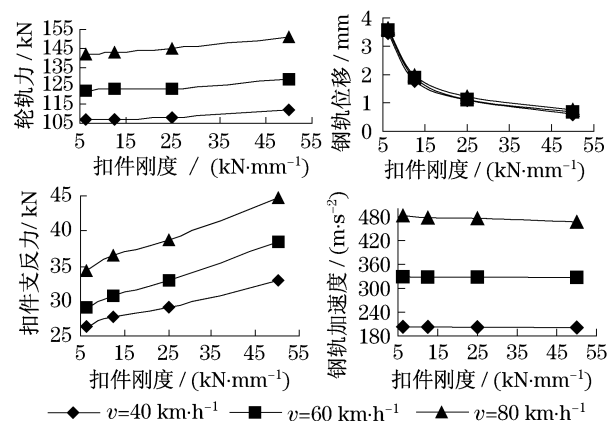


图 6 扣件刚度对轨道结构动力指标的影响

Fig.6 Dynamic index curve of fastener stiffness effect on track structure

由图 6 可以看出,钢轨扣件刚度增大,钢轨振动加速度、钢轨位移减小,而轮轨力、扣件支点反力增大。随着列车运行速度的增大,钢轨加速度、轮轨冲击力和扣件支反力增大。

### 3.2 弹性支承块轨道结构动力性能分析结果

列车一定速度运行时,不同轨道刚度组合条件下的弹性支承块轨道结构的钢轨振动加速度、钢轨位移、支承块振动加速度、支承块位移、轮轨力和支承块下橡胶套靴支点反力(即基础压力)随刚度匹配变化曲线见图 7,8。

由图 7,8 可以看出,支承块下刚度增大,轮轨力、支点反力也增大。

### 3.3 浮置板轨道结构动力性能分析结果

从图 9—11 可以看出,弹性支座刚度对轮轨力影响较小;支座刚度增大,支座反力增大。

图 10 中,扣件刚度在小于 25  $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,轮轨力有所增大,但只增大 1% 左右;扣件刚度在大于 25  $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,轮轨力、支点反力增大。因此在浮置板轨道中扣件刚度不宜过小。

## 4 对比分析与结论

扣件刚度为 25.0  $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,3 种不同轨道

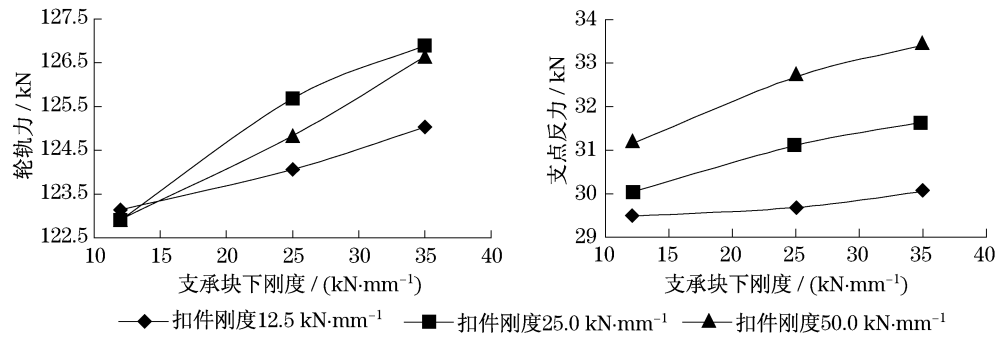


图 7 支承块下刚度对动力学指标的影响

Fig.7 Stiffness of elastic supporting block effect on dynamic index

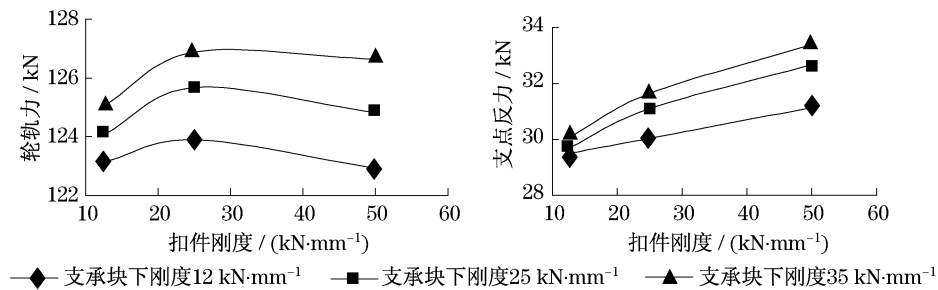


图 8 扣件刚度对动力学指标的影响

Fig.8 Stiffness of fastener effect on dynamic index

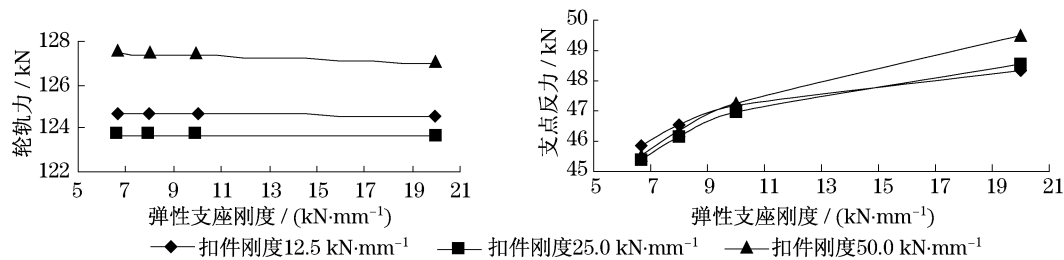


图 9 浮置板弹性支座对动力学指标的影响

Fig.9 Elastic of vibration isolation effect on dynamic index curve

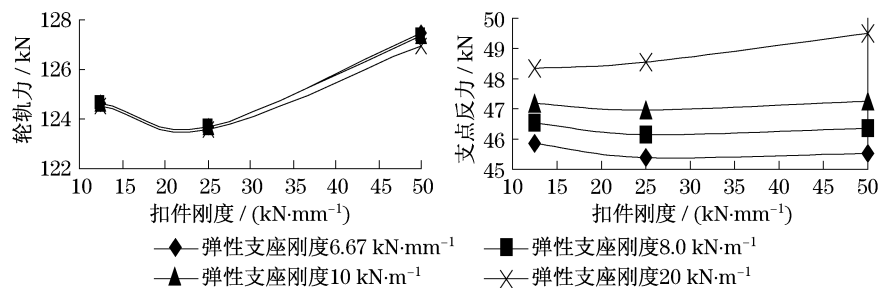


图 10 扣件刚度对浮置板轨道动力学指标的影响

Fig.10 Stiffness of fastener effect on floating slab track dynamic index

结构每延米传递到隧道上的作用力的比较结果见表 1 及图 12。

扣件刚度为  $25.0 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 浮置板的支座刚度为  $6.67 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 弹性支承块的块下垫层动刚度为  $25 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  时, 车辆传递到隧道上的力, 普通

轨道结构最大, 弹性支承块次之, 浮置板轨道最小。当行车速度为  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 采用弹性支承块轨道比弹性扣件轨道传递到隧道的力减少约 10%, 采用浮置板轨道可以减少 20%; 当行车速度为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 采用弹性支承块轨道比弹性扣件轨道传递到

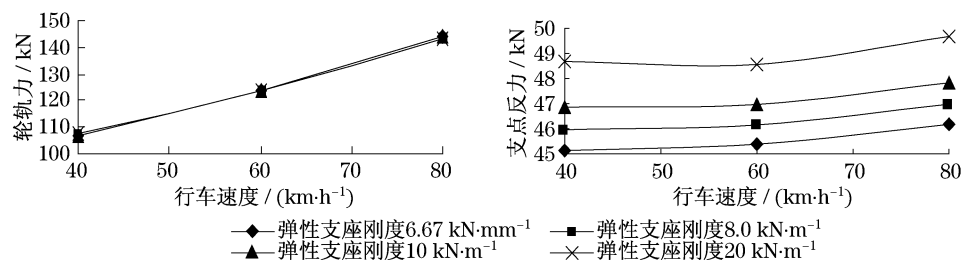


图 11 运行速度对浮置板轨道各动力学指标的影响

Fig.11 Vehicle's velocity effect on dynamic index

表 1 3 种轨道结构传递到隧道上的力

Tab.1 Force of tunnel with three different track structures

速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	轨道支点传递力/kN			轨道每延米的传递力/kN		
	浮置板 轨道	弹性 支承块	长轨枕 埋入式	浮置板 轨道	弹性 支承块	长轨枕 埋入式
40	45.134	26.870	29.134	37.612	44.783	48.557
60	45.387	31.110	32.883	37.823	51.850	54.805
80	46.170	33.370	38.697	38.475	55.670	64.495

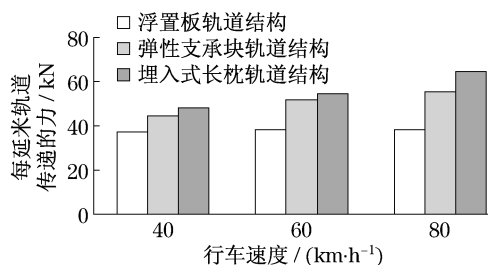


图 12 三种轨道结构对轨道每延米传递力的影响

Fig.12 Influence of force transfer with three different track structures

隧道的力减少约 5%，采用浮置板轨道可以减少 30%；当行车速度为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时，采用弹性支承块轨道比弹性扣件轨道传递到隧道的力减少约 15%，采用浮置板轨道可以减少 40%。

上述分析结果表明：

降低弹性扣件刚度，可以减小轮轨冲击力及传递基础的反应力，从而提高隔振效率。

通过扣件刚度和支承块刚度合理匹配，可以减小轮轨力及传递基础的反应力。

随着速度的增加，弹性扣件与弹性支承块轨道结构每延米传递到隧道壳体上的力增加较大，而浮置板轨道增加不明显。浮置板轨道结构的减振效果最好，弹性支承块轨道次之。

#### 参考文献：

- [1] 雷晓燕, 圣小珍. 铁路交通噪声与振动[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
LEI Xiaoyan, SHENG Xiaozhen. Railway traffic noise and

vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004.

- [2] 翟婉明. 车辆-轨道交互作用动力学[M]. 第 2 版. 北京: 中国铁道出版社, 2002.  
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Press, 2002.
- [3] 上海地铁总公司, 同济大学. 轨道减振器扣件的设计研究报告[R]. 上海: 上海地铁总公司, 同济大学, 1996.  
Shanghai Metro Corporation, Tongji University. The design and survey report of rail mitigated fastener[R]. Shanghai: Shanghai Metro Corporation, Tongji University. 1996
- [4] Cai Z, Raymond G P. Modeling the dynamic response of railway track to wheel/rail impact loading[J]. Structure Engineering and Mechanics, 1994, 2(1): 95.
- [5] 翟婉明. 铁道车辆在刚性及弹性轨道模型上的振动模拟分析[J]. 铁道车辆, 1994(1): 15.  
ZHAI Wanming. The analysis of the vehicle vibration on the rigid track and elastic track[J]. Railroad Vehicle, 1994(1): 15.
- [6] 焦金红. 浮置板轨道结构及其动力性能的研究[M]. 上海: 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 2002.  
JIAO Jinhong. The research on floating slab track structure and dynamic performance [M]. Shanghai: Tongji University. Institute of Railway & Urban Rail Transit, 2002.
- [7] 西南交通大学, 铁道部科学研究院, 兰州铁道学院. 轨道刚度对轨道和列车动力性能影响的仿真分析[R]. 成都: 西南交通大学, 2002.  
Southwest Jiaotong University, China Academy of Railway Sciences, Lanzhou Railway College. The analyse on the stiffness of rail exert an influence of rail and vehicle dynamic performance [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [8] 肖俊恒, 赵汝康, 杜功立. 高架桥无碴轨道用小阻力弹性扣件的研究设计[J]. 铁道建筑, 2002(9): 18.  
XIAO Junheng, ZHAO Rukang, DU Gongli. The design and research on little resistance fastener using on viaduct unballasted track[J]. Railway Construction, 2002(9): 18.