

水泥沥青砂浆劣化对板式轨道动力学性能的影响

向俊, 赫丹, 曾庆元

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 基于高速列车-板式轨道系统空间振动分析理论, 研究板式轨道水泥沥青砂浆(CAM)填充层的劣化(如脱层、开裂、脆化与碎裂等)引起的轨道板悬空现象对板式轨道振动响应的影响。研究表明: 与CAM正常工作状态相比, CAM劣化造成轨道板悬空, 从而引起轨道板加速度增大10多倍, 位移增大20多倍; 钢轨对轨道板的压力急剧增大, 且出现拉力现象; 随着速度的提高, 系统其他动力响应值也迅速增大。故在板式轨道养护维修中, 应严格控制CAM病害。

关键词: 板式轨道; 水泥沥青砂浆; 高速列车; 劣化; 振动

中图分类号: U213.2⁺42

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)03-0791-06

Effect of cement asphalt mortar disease on dynamic performance of slab track

XIANG Jun, HE Dan, ZENG Qing-yuan

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: According to the analysis theory of spatial vibration of high-speed train and slab track system, the effect of voided slab induced by deteriorations of cement asphalt mortar (CAM) layer, such as delamination, cracking, embrittlement and cataclasm, etc, on vibration responses of the slab track was studied. The results show that, compared to the normal work condition of the CAM, the slab accelerations increase by ten times and the slab displacements increase by twenty times during the action of the voided slab induced by the CAM deterioration. The pressures between rails and slabs increase rapidly and the tensile forces appear. With the increase of velocity, the other dynamic responses of the system increase rapidly. Thus, the CAM deteriorations should be strictly controlled during the slab track maintenance.

Key words: slab track; cement asphalt mortar; high-speed train; deterioration; vibration

板式无碴轨道以其极大的优越性在日本高速铁路中得到广泛应用^[1-3]。2001年板式无碴轨道首次铺设在我国秦沈线的狗河特大桥与双河特大桥上。2003年底在赣龙线枫树排隧道内铺设了板式无碴轨道的试铺段。在实际运营过程中, 发现板式轨道中的水泥沥青砂浆(CAM)填充层出现了严重过早劣化, 主要表现为脱层、开裂、脆化与碎裂等严重病害, 甚至出现了CAM层与上部轨道板界面分离的现象, 造成轨道板悬空。国内外铁路科技人员对板式轨道在高速列车作用下的

动力响应进行了探讨^[4-10], 但是, 有关水泥沥青砂浆劣化对板式轨道动力响应的影响的研究很少。为此, 本文作者就此种病害对板式轨道动力学性能的影响进行研究。

1 高速列车-板式轨道系统空间振动分析理论

Xiang等^[11-14]提出了高速列车-板式轨道系统空间

收稿日期: 2008-08-10; 修回日期: 2008-11-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714706); 国家自然科学基金资助项目(50678176); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0866)

通信作者: 向俊(1968-), 男, 湖南沅陵人, 博士, 教授, 从事车轨(桥)系统振动及列车脱轨研究; 电话: 0731-2656645; E-mail: jxiang@mail.csu.edu.cn

振动分析理论, 其主要内容包括列车模型、板式轨道模型、系统振动方程组的建立、激振源、方程求解等。

1.1 列车振动模型

列车中的每节车辆(包括机车)离散为 7 个刚体系统(1 个车体、2 个转向架和 4 个轮对), 各刚体之间通过线性弹簧和粘滞阻尼器相连。车体与转向架分别有 6 个自由度, 每个轮对有纵向位移和横向位移 2 个自由度, 这样, 每节车辆共有 26 个自由度^[15-16]。有了此位移模式, 即可导出第 j 辆车的空间振动势能 Π_{Vj} ^[15-16]。

1.2 板式轨道振动模型

板式轨道结构如图 1 所示, 该结构具有明显的层状构造特点, 从上往下依次为钢轨—扣件—轨道板—CAM 填充层—混凝土底座—路基, 并且, 在轨道板之间设有凸型挡台, 以抵抗轨道板的纵向位移、横向位移及作用力。

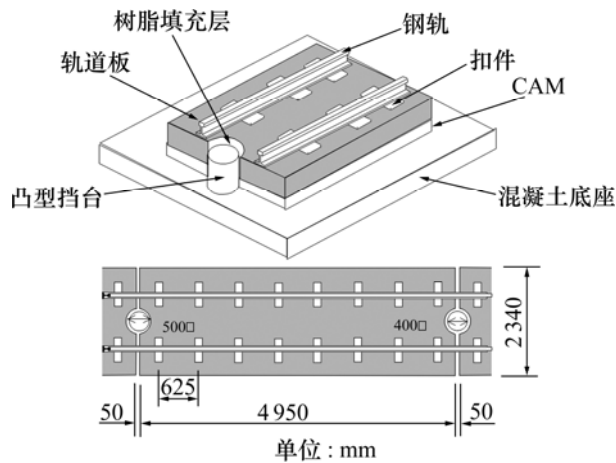


图 1 板式轨道结构示意图

Fig.1 Sketch map of slab track structure

向俊等^[12-14]针对板式轨道构造特点, 提出了竖向振动模型。Xiang 等^[11]在此基础上, 提出了空间振动模型, 但未考虑混凝土底座的振动。本文作者基于上述研究, 建立考虑底座振动的板式轨道空间振动模型, 如图 2 所示, 并采用如下假定:

- a. 取相邻 2 个扣件间的板式轨道为 1 个轨段单元;
- b. 将钢轨视为 Euler 梁; 扣件系统模拟为线性弹簧及粘滞阻尼器; 将轨道板及混凝土底座视为弹性薄板。CAM 及路基面均模拟为面弹簧及粘滞阻尼器;
- c. 取如下变位参数来描述轨段单元的节点位移:

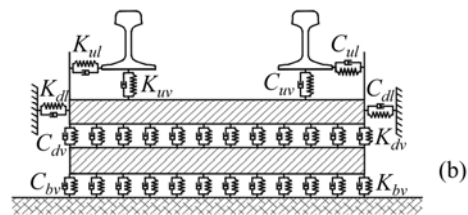
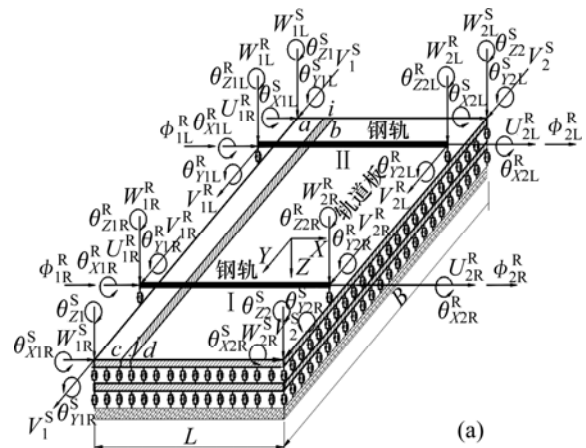
$$\{\delta\}_e = \begin{Bmatrix} \{\delta_1\} \\ \{\delta_2\} \end{Bmatrix}_{56 \times 1} \quad (1)$$

其中:

$$\{\delta_1\} = [U_{1L}^R, V_{1L}^R, W_{1L}^R, \theta_{X1L}^R, \theta_{Y1L}^R, \theta_{Z1L}^R, \phi_{1L}^R, U_{1R}^R, V_{1R}^R, W_{1R}^R, \theta_{X1R}^R, \theta_{Y1R}^R, \theta_{Z1R}^R, \phi_{1R}^R, V_1^S, W_{1L}^S, \theta_{X1L}^S, \theta_{Y1L}^S, \theta_{Z1}^S, W_{1R}^S, \theta_{X1R}^S, \theta_{Y1R}^S, W_{1L}^B, \theta_{X1L}^B, \theta_{Y1L}^B, W_{1R}^B, \theta_{X1R}^B, \theta_{Y1R}^B]^T; \quad (2)$$

$$\{\delta_2\} = [U_{2L}^R, V_{2L}^R, W_{2L}^R, \theta_{X2L}^R, \theta_{Y2L}^R, \theta_{Z2L}^R, \phi_{2L}^R, U_{2R}^R, V_{2R}^R, W_{2R}^R, \theta_{X2R}^R, \theta_{Y2R}^R, \theta_{Z2R}^R, \phi_{2R}^R, V_2^S, W_{2L}^S, \theta_{X2L}^S, \theta_{Y2L}^S, \theta_{Z2}^S, W_{2R}^S, \theta_{X2R}^S, \theta_{Y2R}^S, W_{2L}^B, \theta_{X2L}^B, \theta_{Y2L}^B, W_{2R}^B, \theta_{X2R}^B, \theta_{Y2R}^B]^T. \quad (3)$$

式中: 上标 R, S 和 B 分别表示钢轨、轨道板和底座的位移; 下标 1 和 2 分别表示 X 轴方向上轨段单元的左端节点和右端节点; 下标 L 和 R 分别表示 Y 轴方向上轨段单元的左边和右边; U, V 和 W 分别表示沿 X, Y 和 Z 轴方向的线位移; θ 表示转角位移; ϕ 表示钢轨扭转角沿 X 轴方向的变化率。



(a) 三视图; (b) 端视图

图 2 板式轨道轨段单元模型

Fig.2 Track segment element model of slab track

在确定了单元节点位移参数后, 就可以按照一定的插值方法得到单元内部任意点处的位移表达式。下面研究单元中轨道板及底座上任意 1 点竖向位移的插值方法。如图 2 所示, 在轨道板中任取一单位宽度的横向有限条 $abcd$, 则该横向有限条上任意 1 点的竖向位移可用其两端点 i 和 j 的变位参数并采用 Hermite 三

次方插值函数插值得到;而*i*和*j*两端点处的变位参数又可用轨段单元的节点变位参数插值得到,其中,线位移采用 Hermite 三次方插值函数插值得到,转角采用线性插值得到。

有了上述位移模式,就可以导出轨段单元中钢轨、轨道板和混凝土底座的弹性变形成及惯性力势能、弹簧的弹性变形成和阻尼器的阻尼力势能。将上述单元中的势能相加,即可得到第*i*个轨段单元的空间振动总势能 Π_{Ti} 。则对于划分了 N_z 个轨段单元的板式轨道空间,其振动总势能为

$$\Pi_T = \sum_{i=1}^{N_z} \Pi_{Ti} \quad (4)$$

1.3 系统振动矩阵方程的建立及其求解

设在*t*时刻轨道的计算长度上有*M*辆车,则此时轨道上列车空间振动总势能可以写为:

$$\Pi_V = \sum_{j=1}^M \Pi_{Vj} \quad (5)$$

将式(4)与式(5)相加,即可得出高速列车-板式轨道时变系统在*t*时刻的空间振动总势能为:

$$\Pi = \Pi_V + \Pi_T \quad (6)$$

根据弹性系统动力学总势能不变值原理^[17]及形成系统矩阵的“对号入座”法则^[18],即可形成系统在*t*时刻的空间振动矩阵方程为:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P\} \quad (7)$$

式中, $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 分别为系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{\ddot{\delta}\}$ 、 $\{\dot{\delta}\}$ 、 $\{\delta\}$ 和 $\{P\}$ 分别为系统的加速度、速度、位移和荷载列阵。以轨道竖向几何不平顺为系统竖向振动的激振源,以列车构架人工蛇行波为此系统横向振动的激振源。对式(7)采用 Wilson- θ 数值积分法进行求解。

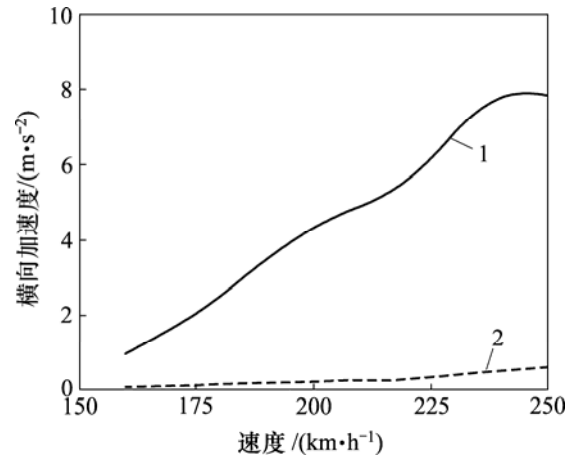
2 计算结果与分析

2.1 计算结果

计算时,取板式轨道计算长度 200 m, CAM 填充层失效情况设置在轨道中间 98.75~101.25 m 处轨道板下,在此范围内轨道板处于悬空状态,在相应的计算模型中,表现为此处轨道板下面的支承弹簧刚度系数为 0。高速列车编组采用 1 动+4 拖。

采用前述分析理论,计算了板式轨道在高速列车

分别以 160, 180, 200, 220, 240 和 250 km/h 等速度下的动力响应,并对 CAM 填充层正常与失效工作状态下的板式轨道动力响应最大值进行比较。这里只列出一些代表性的计算结果,例如,轨道横向加速度(图 3)、轨道横向位移(图 4)、轨道竖向加速度(图 5)、轨道竖向位移(图 6)等。同时,还列出车速为 250 km/h 时系统部分振动响应时程曲线,例如钢轨对轨道板的压力(图 7)、轮轨竖向力(图 8)等。



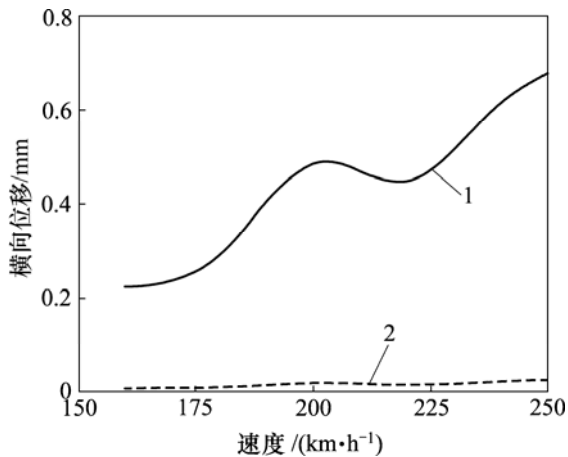
1—CAM 失效; 2—CAM 正常

图 3 轨道板横向加速度最大值与行车速度的关系

Fig.3 Relationship between maximum lateral slab acceleration and speed

由图 3 可见,在 CAM 正常工作条件下,当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时,轨道板横向加速度最大值从 0.117 m/s² 增大到 0.594 m/s²;在 CAM 失效条件下,当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时,轨道板横向加速度最大值从 0.97 m/s² 增大到 7.87 m/s²。可见,当 CAM 正常工作时,轨道板横向加速度最大值随车速的提高而平缓增加。但是,当 CAM 失效时,轨道板横向加速度最大值随车速的提高而急剧增大。在车速为 250 km/h 时,CAM 失效引起的轨道板横向加速度最大值为 CAM 正常工作状态下的 13.2 倍。

由图 4 可见,在 CAM 正常工作条件下,当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时,轨道板横向位移最大值从 0.012 mm 增大到 0.027 mm;在 CAM 失效条件下,当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时,轨道板横向位移最大值从 0.024 mm 增大到 0.678 mm。可见,当 CAM 正常工作时,轨道板横向位移最大值随车速的提高而缓慢变化。但是,当 CAM 失效时,轨道板横向位移最大值随车速的提高而大幅度增大。在车速为 250 km/h 时,CAM 失效状态下的轨道板横向



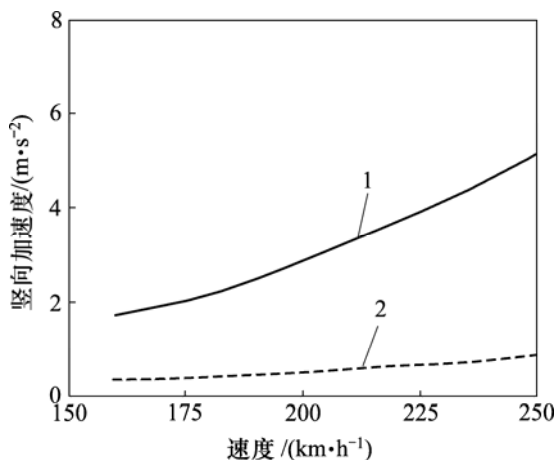
1—CAM 失效; 2—CAM 正常

图 4 轨道板横向位移最大值与行车速度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between maximum lateral slab displacement and speed

位移最大值是 CAM 正常工作状态下的 25.1 倍, 极大地破坏了高速铁路所要求的高平顺性。

由图 5 可见, 在 CAM 正常工作条件下, 当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时, 轨道板竖向加速度最大值从 0.404 m/s^2 增大到 0.915 m/s^2 ; 在 CAM 失效条件下, 当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时, 轨道板竖向加速度最大值从 1.748 m/s^2 增大到 5.176 m/s^2 。可见, 当 CAM 正常工作时, 轨道板竖向加速度最大值随车速的提高而变化不大。但是, 当 CAM 失效时, 轨道板竖向加速度最大值随车速的提高而迅速增大。在车速为 250 km/h 时, CAM 失效引起的轨道板竖向加速度最大值比为 CAM 正常工作状态下的 5.6 倍。

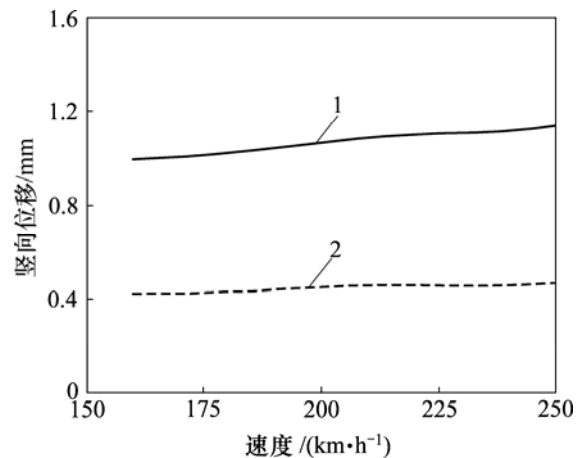


1—CAM 失效; 2—CAM 正常

图 5 轨道板竖向加速度最大值与行车速度的关系

Fig. 5 Relationship between maximum vertical slab acceleration and speed

由图 6 可见, 在 CAM 正常工作条件下, 当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时, 轨道板竖向位移最大值从 0.427 mm 增大到 0.470 mm; 在 CAM 失效条件下, 当车速从 160 km/h 提高到 250 km/h 时, 轨道板竖向位移最大值从 0.992 mm 增大到 1.137 mm。可见, 当 CAM 正常工作时, 轨道板竖向位移最大值随车速的提高而变化很小。但是, 当 CAM 失效时, 轨道板竖向位移最大值随车速的提高有一定的增大。在车速为 250 km/h 时, CAM 失效状态下的轨道板竖向位移最大值是 CAM 正常工作状态下的 2.4 倍。

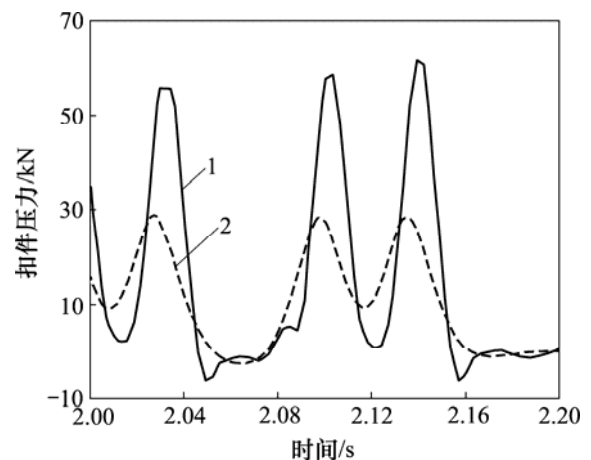


1—CAM 失效; 2—CAM 正常

图 6 轨道板竖向位移最大值与行车速度的关系

Fig. 6 Relationship between maximum vertical slab displacement and speed

图 7 所示为钢轨对轨道板的竖向压力时程曲线。由图 7 可见, 当 CAM 失效时, 钢轨对轨道板的压力与 CAM 正常工作时的压力相比成倍地增大, 而且压



1—CAM 失效; 2—CAM 正常

图 7 $v=250 \text{ km/h}$ 时钢轨对轨道板的压力时程曲线

Fig. 7 Time history curves of pressure between rail and slab when v is 250 km/h

力出现了较大的负值,这说明钢轨与轨道板之间的扣件出现了拉力现象。

图8所示为动车车轮与钢轨之间的轮轨竖向相互作用力时程曲线。由图8可见,当CAM失效时,轮轨竖向力与CAM正常工作时的竖向力相比急剧增大,而且出现了轮轨力为0即完全减载的情况,对行车安全性极为不利。

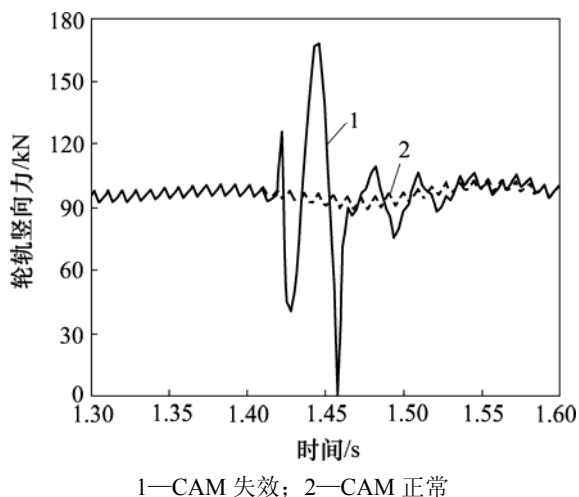


图8 $v=250$ km/h 时动车轮轨竖向力时程曲线

Fig.8 Time history curves of vertical force between wheel and rail of motor car when v is 250 km/h

2.2 讨论与分析

a. CAM 填充层劣化对轨道板振动加速度影响剧烈,且随着车速提高,其影响程度急剧增大。例如,当车速为 250 km/h 时,CAM 填充层劣化引起的轨道板横向加速度是 CAM 正常工作状态下的 13.2 倍。随着轨道板加速度的急剧增大,将进一步增大轨道板与 CAM 填充层之间的相互作用力,加剧 CAM 填充层的破损程度,从而形成恶性循环。

b. CAM 填充层的劣化极大地增加了轨道板的位移。例如,当车速为 250 km/h 时,CAM 填充层劣化引起的轨道板横向位移是 CAM 正常工作状态下的 25.1 倍。板式轨道部件位移增大,加剧了轨道几何形位的变化,必然破坏高速铁路所要求的高平顺性,从而极大地降低高速列车运行的安全性及舒适性。

c. CAM 填充层劣化引起的钢轨对轨道板的压力与 CAM 正常工作状态下的压力相比更大,且出现了拉力现象,这将导致扣件螺栓松动且往上拔出,从而容易导致扣件失效。

d. CAM 填充层劣化引起的轮轨竖向力与 CAM 正常工作状态下的轮轨竖向力相比急剧增大,而且出现完全减载现象,威胁行车安全。

3 结论

a. CAM 填充层劣化导致轨道板出现悬空现象,对高速列车-板式轨道系统振动响应的影响相当大,不但加剧了板式轨道结构本身的振动,而且进一步导致板式轨道结构部件被损坏,增大了轨道结构几何形位的变化,严重降低高速列车运行的安全性、平稳性和舒适性。

b. 建议在仔细分析板式轨道 CAM 填充层劣化原因的基础上,从水泥沥青砂浆的组成原理、原材料、制备工艺、性能指标及其检测方法等各方面,进行全方位的试验研究,以期获得满足我国无碴轨道技术要求的高质量、高耐久性的水泥沥青砂浆。

参考文献:

- [1] 赵国堂. 高速铁路无碴轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
ZHAO Guo-tang. High-speed railway ballastless track[M]. Beijing: China Railway Press, 2005.
- [2] 何华武. 无碴轨道技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
HE Hua-wu. Ballastless track technology[M]. Beijing: China Railway Press, 2005.
- [3] 卢祖文. 解决关键技术, 发展无碴轨道[J]. 中国铁路, 2005(1): 16-19.
LU Zu-wen. Resolve the key technology and develop ballastless track[J]. Chinese Railways, 2005(1): 16-19.
- [4] Verbic B. Investigating the dynamic behavior of rigid track[J]. Railway Gazette International, 1997, 153(9): 585-586.
- [5] Esveld C. Modern railway track[M]. 2nd ed. Delft: Tu Dulf Press, 2001.
- [6] Diehl R J, Nowack R, Holzl G. Solutions for acoustical problems with ballastless track[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 899-906.
- [7] Van Lier S. The vibra-acoustic modeling of slab track with embedded rails[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 805-817.
- [8] Cui F, Chew C H. The effectiveness of floating slab track system: Part I. Receptance methods[J]. Applied Acoustics, 2000(61): 441-453.
- [9] 翟婉明, 韩卫军, 蔡成标, 等. 高速铁路板式轨道动力特性研究[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 65-69.
ZHAI Wan-ming, HAN Wei-jun, CAI Cheng-biao, et al. Dynamic properties of high-speed railway slab tracks[J]. Journal

- of the China Railway Society, 1999, 21(6): 65-69.
- [10] 蔡成标, 翟婉明, 王开云. 高速列车与桥上板式轨道动力学仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 57-60.
CAI Cheng-biao, ZHAI Wan-ming, WANG Kai-yun. Dynamics simulation of interactions between high-speed train and slab track laid on bridge[J]. China Railway Science, 2004, 25(5): 57-60.
- [11] XIANG Jun, HE Dan, ZENG Qing-yuan. Analysis theory of spatial vibration of high-speed and slab track system[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(1): 121-126.
- [12] 向俊, 赫丹, 曾庆元. 横向有限条与无砟轨道板段单元的车轨系统竖向振动分析法[J]. 铁道学报, 2007, 29(4): 64-69.
XIANG Jun, HE Dan, ZENG Qing-yuan. Analysis method of vertical vibration of train and ballastless track system with the lateral finite strip and slab segment element[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(4): 64-69.
- [13] 向俊, 赫丹. 高速列车与博格板式轨道系统竖向振动分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 1-5.
XIANG Jun, HE Dan. Analysis model of vertical vibration of high-speed train and Bögl slab track system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 1-5.
- [14] 向俊, 曹晔, 刘保钢, 等. 客运专线板式无砟轨道动力设计参数[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(5): 981-986.
XIANG Jun, CAO Ye, LIU Bao-gang, et al. Dynamic parameters of slab track of passenger transport line[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(5): 981-986.
- [15] XIANG Jun, LI De-jian, ZENG Qing-yuan. Simulation of spatially coupling dynamic response of train-track time-variant system[J]. Journal of Central South University of Technology, 2003, 10(3): 226-230.
- [16] 曾庆元, 向俊, 周智辉, 等. 列车脱轨分析理论与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
ZENG Qing-yuan, XIANG Jun, ZHOU Zhi-hui, et al. Analysis theory and application of train derailment[M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [17] 曾庆元, 郭向荣. 列车桥梁时变系统振动分析理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
ZENG Qing-yuan, GUO Xiang-rong. Theory of analysis of vibration of train-bridge time-variant system and its application[J]. Beijing: China Railway Press, 1999.
- [18] 曾庆元, 杨平. 形成系统矩阵的“对号入座”法则与桁梁空间分析的桁段有限元法[J]. 铁道学报, 1986, 8(2): 48-59.
ZENG Qing-yuan, YANG Ping. The “set-in-right-position” rule for formulating dynamic system matrix and the finite element method of truss section for spatial analysis of truss girder[J]. Journal of the China Railway Society, 1986, 8(2): 48-59.