

文章编号:1005-0523(2012)05-0023-05

地铁运营下钢弹簧浮置板轨道减振分析

蒋崇达,雷晓燕

(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:计算模型分为两个部分,列车荷载通过多体动力学软件SIMPACK求得。然后,以有限元软件ANSYS为平台,建立了轨道-隧道-大地三维有限元模型。通过谐响应稳态扫频技术,从频域角度分析定点谐荷载下钢弹簧浮置板轨道引起的大地振动;通过瞬态分析,从时域分析列车荷载下引起的大地振动。结论表明:从频域角度来看,钢弹簧浮置板在接近自身固有频率处会引发地面共振,但影响范围不大;对于中高频有着很好的减振效果。从时域的角度来看,钢弹簧浮置板对应的地表振动远小于整体道床,转频域后其轨道振动分布可按谐响应计算结果解释。

关键词:城市轨道交通;轨道;减振措施;环境竖向振动

中图分类号:U213.9+12

文献标志码:A

进入新世纪以来的城市化发展,其规模和人口持续攀升,现有的地面交通远远满足不了大中城市的人员流动,城市轨道交通凭借其运量大、准时、安全可靠、候车环境舒适等优势得到了广泛的运用。但伴之而来的地铁运营所引发的环境振动问题成为难以治愈的顽疾。钢弹簧浮置板轨道已在我国得到大量运用。以刚开通的杭州地铁1号线为例,线路全长53 km,其中有4.597 km运用了钢弹簧浮置板隔振技术。目前,各学者针对钢弹簧浮置板轨道做了大量的研究^[1-3]。多针对轨道本身进行了细致分析,对其引发的大地振动并未详细计算。本文以有限元软件ANSYS为平台,建立了轨道-隧道-大地耦合有限元模型,列车荷载通过多体动力学软件SIMPACK模拟。分别从频域和时域的角度分析钢弹簧浮置板轨道引发的大地振动。

1 计算模型及参数

1.1 列车荷载的模拟

采用多体动力学软件SIMPACK建立的地铁B型车的精细化MBS模型。车体、转向架、轮对均为刚体模型,共42个自由度;空气弹簧、轴向弹簧、横向减震器、横向止档等均根据相应力元单元模拟并连接上述刚体模型;轮对采用LM车轮踏面,车辆参数见文献[4]。建立的单节B型车模型见图1。轨道不平顺选用美国6级谱,通过频域法模拟后导入SIMPACK,采用软件中09号不平顺单元模拟。时间步长0.005 s,车速80 km·h⁻¹。通过计算,第1轮对的垂向荷载(5 s)如图2所示。

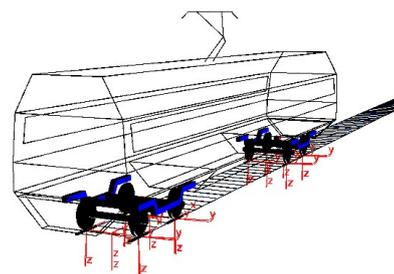


图1 地铁B型车MBS模型
Fig.1 The subway B type car MBS model

收稿日期:2011-09-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50978099);江西省优势科技创新团队计划项目([2010]210)

作者简介:蒋崇达(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为轨道动力学。

1.2 轨道-隧道-大地计算模型

钢轨类型为CHN60,采用考虑Beam188梁单元进行网格划分;扣件采用Combin14弹簧阻尼单元,刚度 $50 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、阻尼 $5\times 10^4 \text{ Ns}\cdot\text{m}^{-1}$ (本文将整体道床考虑为单层轨道,取两轨道扣件相同);浮置板采用Shell63单元进行网格划分,将其截面等效为面积相等的矩阵截面(厚0.4 m,宽3.2 m),采用C40混凝土;钢弹簧支座只考虑竖向振动,采用Combin14弹簧阻尼单元进行网格划分,刚度为 $6.9 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,阻尼为 $7.5\times 10^4 \text{ Ns}\cdot\text{m}^{-1}$ 。隧道及土体参数来源于文献[2]。衬砌采用Shell63单元,弹性模量为 $3.5\times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比0.25,密度 $2\ 500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。整体道床基础厚度为0.635,浮置板基础厚度为0.328,采用Solid45单元,弹性模量为 $2.85\times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比0.2,密度 $2\ 500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。土层采用Solid45单元,尺寸:竖向60 m、横向100 m、纵向120 m。土体边界采用等效粘弹性边界。根据上述参数及单元,建立的计算模型见图3。本文整体结构的阻尼比综合混凝土和土体^[5],取0.04。谐响应分析时,系统阻尼比取0.04;瞬态分析时ANSYS采用瑞利阻尼^[6],本文瑞利阻尼系数取 $\alpha=3.590\ 4$ 、 $\beta=1.818\ 9\text{e}-4$ 。

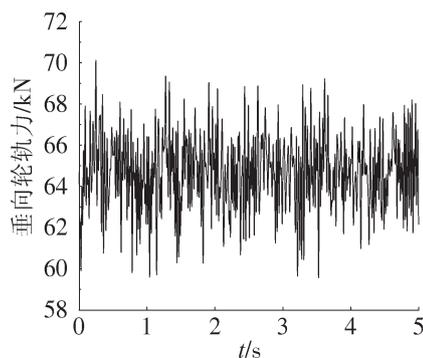
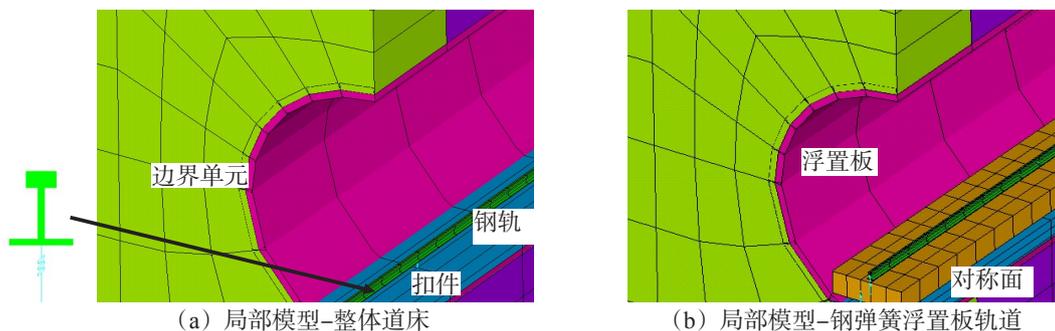


图2 $v=80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 轮轨力

Fig.2 $v=80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ wheel/rail force



(a) 局部模型-整体道床

(b) 局部模型-钢弹簧浮置板轨道

图3 两种轨道形式的轨道-隧道-大地计算模型

Fig.3 Two kinds of orbital forms of orbit - tunnel - the earth calculation model

2 谐响应分析

根据单自由度隔振原理可知^[7],固有频率决定了结构的隔振效果。基于ANSYS模态分析可知上述两种轨道基频分别为182 Hz,9.1 Hz;可以初步判断整体道床仅对257 Hz以上的外力开始隔振,

钢弹簧浮置板则对应于12.86 Hz。事实上,轨道作为多自由度系统其含多个共振频率,且轨道的受力形式为局部型加载。采用上述模型很难定量判断其工作频段及不利频率。因此,有必要将轨道-大地作为耦合的大模型进行频域计算,为工程实际提供参考依据。采用稳态解扫频技术可快速判断结构响应与频率的关系,进而判别各轨道隔振能力。本文,加载点取中心断面处的钢轨节点,荷载幅值为72 kN,频段为0~100 Hz。经计算,提取0,30,60,96 m结果,如图4所示。

由图4可以得出以下结论:

1) 整体道床于0~100 Hz内同样有着较大的衰减,其实质反映的是土体自身对外力的衰减;本文土质中,最不利频率为5 Hz左右,60 m处对20~40 Hz的外力有着较大的共振现象。

2) 两种轨道结果于13 Hz左右有一交叉点,大致为钢弹簧浮置板基频的1.414倍;若根据单自由度隔振理论,刚好为其工作频段的开始。

3) 对于13 Hz以内,由于包含了钢弹簧浮置板的基频(9 Hz)故其结构响应要大于整体道床;共振现象

随着离轨道中心线距离的增大而减小并最终趋于相等;沿距离来看,30 m以内的共振现象衰减比例更大。

4) 对于大于13 Hz的频段,钢弹簧浮置板的结构响应明显更小。60 m左右,由于土体自身的影响,钢弹簧浮置板于20~40 Hz处也略有放大。

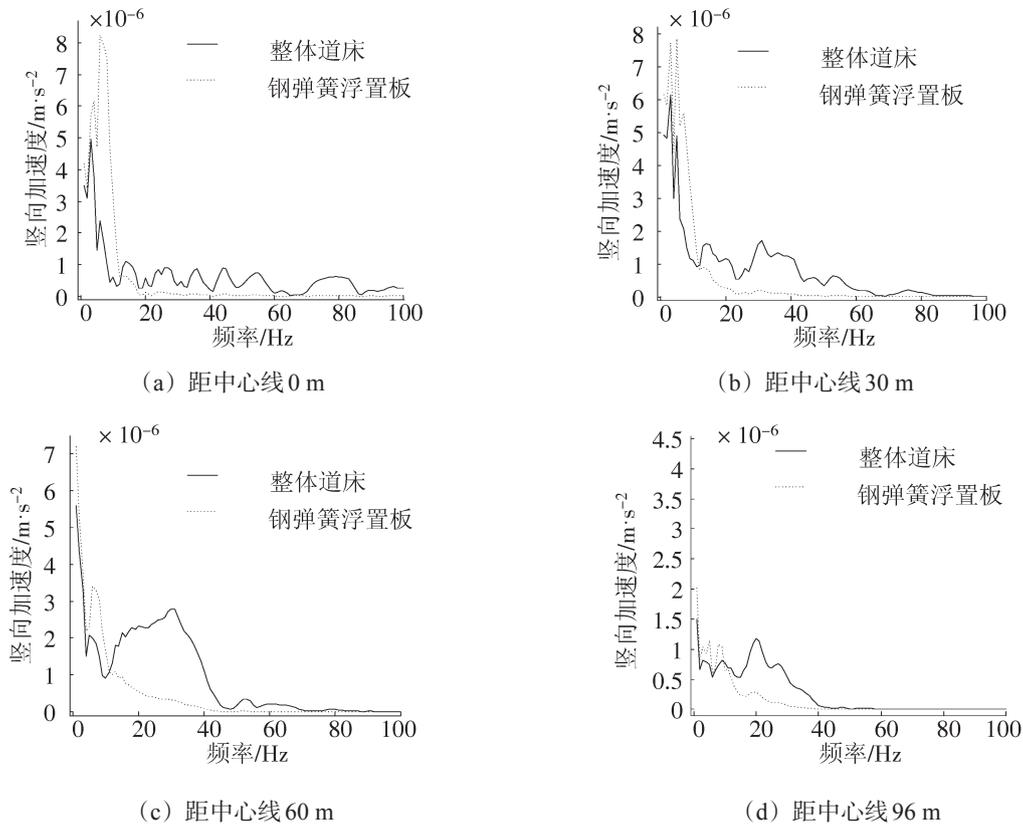


图4 加速度响应-激振频率关系图

Fig.4 Acceleration response-vibration frequency relationship diagram

3 瞬态分析

前面采用的是定点同幅值谐荷载下的扫频分析,而列车运行所引发的轮轨力在各个频段上的幅值是不同的。故有必要进行时域计算,对比两种轨道所诱发的大地振动。

3.1 振动评价指标

采用振动加速度级 L_a 对振动水平进行评价^[8],计算方法如式(1)所示。

$$L_a = 20 \lg(a_{\text{rms}}/a_0) \quad (1)$$

式中: L_a 为振动加速度级, dB; a_{rms} 为1/3倍频程中心频率对应的振动加速度有效值, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; a_0 为基准加速度,取 $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

3.2 算例分析

考虑到模型较大,车速较低,列车荷载仅考虑2节车地铁车辆。时间步长0.005 s,车速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。浮置板板厚考虑3种:0.3,0.5,0.7 m,分别对应结构固有频率11.2,8.1,6.67 Hz。经计算,输出数据为距轨道中心线0,30,60,96 m的竖向加速度时程曲线。限于篇幅仅给出0 m处的时域结果,结果如图5所示。

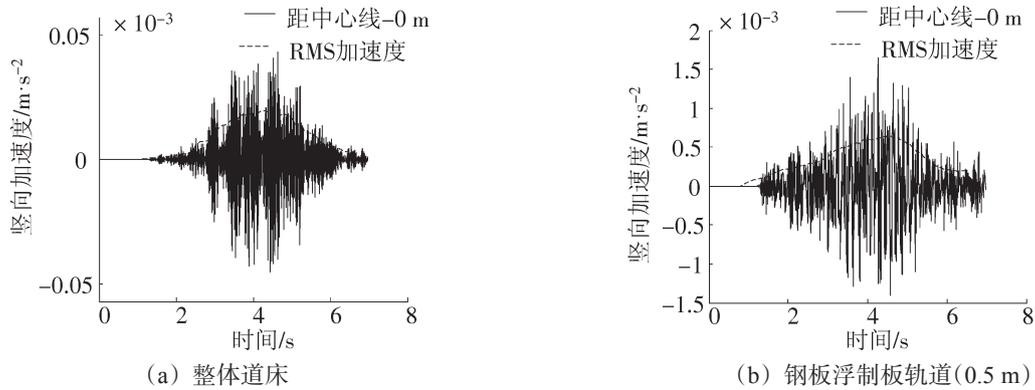


图5 地表振动加速度对比(0 m)

Fig.5 The surface vibration acceleration contrast (0 m)

根据图5均方根加速度(root mean square, RMS)可知,采用钢弹簧浮置板轨道可以大大的降低列车诱发的大地振动。从图形来看,钢弹簧浮置板轨道比整体道床更容易事先振动,靠近衬砌附近的土体可以更多的参与振动进而将能量扩散。

对4个拾取点的振动时程进行1/3倍频程分析,以分析各频段内两种轨道引起的地表振动水平分布,结果如图6所示。

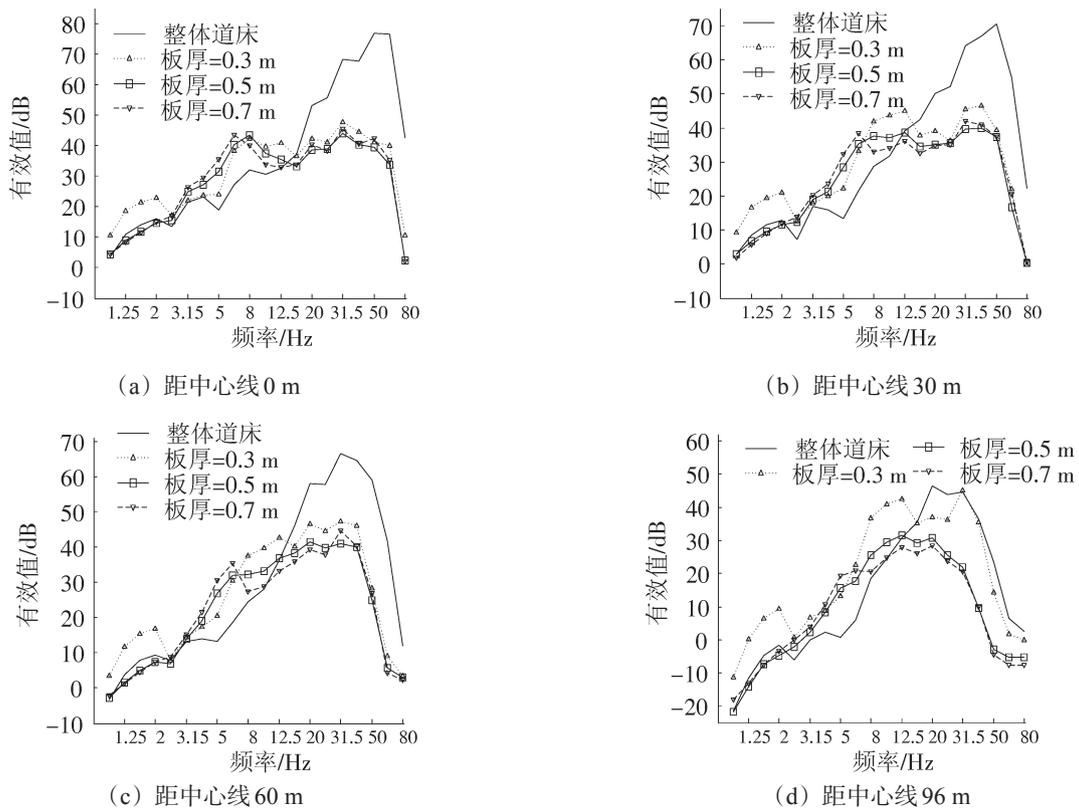


图6 地表振动加速度1/3倍频程对比

Fig.6 The surface vibration acceleration 1/3 octave contrast

图6中横坐标的增加幅度为 $2\Delta 1/3$ 。由图6可以得出以下结论:

1) 采用整体道床时,列车运行诱发的大地振动主频大致分布于30~60 Hz范围内。由于土体的作用,一方面高频振动得到了部分衰减,另一方面在30~60 Hz的共振区域内隔振效果欠佳。

2) 当浮置板轨道板厚大于0.3 m后,在小于3 Hz的频段内,两种轨道诱发的振动水平相当。

3) 对于3 Hz至 $\sqrt{2}$ 倍固有频率的频段,由于处于钢弹簧浮置板基频范围内,其对应的振动响应要大于整体道床。距离越大,基频处的放大现象越不明显。对于3 Hz~基频的频段其衰减要小于基频 $\sim\sqrt{2}$ 倍固有频率Hz频段。

4) 降低浮置板轨道的固有频率,可以扩大浮置板轨道的工作频段,从而实现较好的低频隔振。

5) 整体道床沿线路方向的衰减要大于钢弹簧浮置板轨道。因为在靠近线路中心处,钢弹簧浮置板轨道能更好的将能量均摊。

6) 浮置板轨道的最大衰减量可达40 dB,发生在距轨道中心线0 m处50 Hz的频率。随着距轨道中心线距离的增大,衰减趋于稳定,达到25 dB左右。

4 结论

本文通过数值计算,可以得出以下结论:

1) 建立轨道-大地耦合模型,采用谐响应的分析方法。可量化的判断轨道的工作频段及不利频率,进而为后面时域分析提供依据。

2) 由于土体和轨道的共同作用,钢弹簧浮置板轨道基本上仅受基频引发的共振放大。那么对其设计的重点应放在保证结构安全的情况下如何降低系统1阶固有频率,可对不同方案在中高频的略微隔振差别不予考虑。

3) 钢弹簧浮置板基频处的共振现象影响范围不大,对于3 Hz~基频的频段很难得到衰减。由于土体的作用,30~60 Hz频段仍有共振现象。土体本身特性对地表振动分布起到了较大影响。总体看来,采用钢弹簧浮置板轨道可以很好对中高频外力进行衰减,最大衰减可达40 dB。

4) 经过比对,钢弹簧浮置板减振效果显著,值得大力推广应用。

参考文献:

- [1] DEYUN DING, WEINING LIU. Low frequency vibration tests on a floating slab track in an underground Laboratory[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2011, 12(5): 345-359.
- [2] 孙晓静. 地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D]. 北京:北京交通大学, 2008: 118-143.
- [3] 吴天行. 轨道减振器与弹性支承块或浮置板轨道组合的隔振性能分析[J]. 振动工程学报, 2007, 5(2): 489-493.
- [4] 赵雷. B型城市轨道交通车辆转向架低动力作用仿真研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010: 21-22.
- [5] 黄宗明, 白绍良. 结构地震反应时程分析中的阻尼问题评[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 12(2): 95-105.
- [6] 克拉夫, 彭津. 结构动力学[M]. 北京:科学出版社, 1981: 183-186.
- [7] 丁文镜. 减振理论[M]. 北京:清华大学出版社, 1988: 18-28.
- [8] 刘腾, 雷晓燕. 高速铁路沿线地面环境振动特性的实测与分析[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(4): 19-22.
- [9] 雷晓燕. 有限元法[M]. 北京:中国铁道出版社, 2000: 30-71.

The Vibration Damping Analysis of Steel Spring Floating Slab Tracks in Subway Operations

Jiang Chongda, Lei Xiaoyan

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

Abstract: In this paper the proposed calculation model is made up of two parts: the train load obtained from the multibody dynamics software SIMPACK; the track-tunnel-earth three-dimensional finite element model established on the platform of finite element software ANSYS. Through the harmonic response steady state sweep technology, the paper firstly analyzes the earth vibration caused by the steel spring floating slab tracks from the perspective of frequency domain under the point harmonic load; then in view of time domain transient analysis it discusses the earth vibration under the train load. The study shows that from the perspective of frequency domain the steel spring floating slab close to inherent frequency places may cause ground resonance with a limited impact range; while for high frequency places it has a large damping effect. In light of time domain, the surface vibration corresponding to steel spring floating slabs is far less than the whole ballast bed. The track vibration distribution can be illustrated according to harmonic response calculation after the frequency domain is changed.

Key words: urban rail transit; track; vibration reducing measure; vertical vibration of environment

(上接第22页)

[15] JERRY EVANS. Application of the hall hydraulic radial arm bush to a 200 km/h inter-city coach[C]//Stockholm & Manchester: 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Tracks, 2011: 1-6.

Simulation of Rubber Nodal Points with Mechanical Semi-active Control

Liu Gaoming, Shen Gang

(The Urban Mass Transit & Railway Research Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Research of rubber nodal points is to overcome the contradiction between vehicle stability and curve passing, and the controllability of longitudinal restraint for axle box guidance is the key technical problem. Now an innovative semi-active control mechanism of rubber nodal points is put forward for axle box guidance, which could compromise the contradiction for railway vehicles. The mechanism is studied by means of SIMPACK to simulate and analyze its dynamic indices in different computing work conditions, which can reflect vehicles stability and curving performance. The final simulation shows the new mechanism may solve the problem of contradiction between vehicle stability and curve passing, but its feasibility and reliability need to be verified further in actual projects.

Key words: wheel-rail wear; rubber nodal point; semi-active control; optimization design; SIMPACK