

基于减振性能的市域铁路弹性支承块 轨道刚度匹配研究*

谢 甜¹ 赵坪锐¹ 章元爱²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 610036, 成都; 2. 中铁西南科学研究院有限公司, 610036, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 目的: 为了降低弹性支承块式无砟轨道市域铁路的振动对周边环境的影响, 需要确定弹性支承块式无砟轨道的扣件刚度和块下刚度组合下的合理取值范围, 使市域铁路下弹性支承块式无砟轨道达到最佳减振效果。方法: 基于车辆-轨道耦合动力学理论, 利用车辆-轨道耦合动力学理论, 分析了不同扣件刚度和块下刚度组合情况下, 市域列车通过时的振动相应时程曲线, 并进一步得到了弹性支承块轨道的道床板频响曲线和分频振级曲线及整体道床的道床板频响曲线和分频振级曲线。通过对比分析, 初步确定弹性支承块轨道结构中扣件刚度和块下刚度的合理取值范围, 结果及结论: 当块下刚度增大时, 弹性支承块轨道道床板的 Z 振级随之增大; 扣件的垂向刚度增大时, 弹性支承块轨道道床板的 Z 振级随之增大, 普通整体道床的 Z 振级也略有增大; 在列车运行速度为 160 km/h, 扣件刚度取值为 60 ~ 80 kN/mm 左右, 块下刚度取值为 80 ~ 110 kN/mm 左右时, 弹性支承块轨道系统可达到较好的减振效果, 最大减振值为 7.79 dB。

关键词 市域铁路; 弹性支承块轨道; 减振性能; 刚度匹配
中图分类号 U213.2: U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.033

Research on City Railway Elastic Bearing Block Track Stiffness Matching Based on Vibration Reduction Performance

XIE Tian, ZHAO Pingrui, ZHANG Yuan'ai

Abstract Objective: To reduce the vibration impact of city railway EBB (elastic bearing block) ballastless track on surrounding environment, it is necessary to determine the reasonable range of fastener stiffness and sub-block stiffness combinations for the EBB ballastless track, which will enable optimal vibration reduction effects for city railway with EBB ballastless track. Method: Based on vehicle-track coupled dynamics theory, the vibration response time-history curves of city railway trains passing under different combinations of fastener stiffness and sub-block stiffness are analyzed. Furthermore, the fre-

quency response curve and frequency division vibration level curve of EBB track bed plate and those of monolithic track bed plate are obtained. Through comparison and analysis, the reasonable range of fastener stiffness and sub-block stiffness in EBB track structure is preliminarily determined. Result & Conclusion: When the sub-block stiffness increases, the Z vibration level of EBB track bed plate increases accordingly; when the fastener vertical stiffness increases, the Z vibration level of EBB track bed plate increases accordingly, and the Z vibration level of common monolithic track bed plate also increases slightly. Under the conditions of train operating speed of 160 km/h, fastener stiffness value around 60-80 kN/mm and sub-block stiffness value around 80-110 kN/mm, the EBB track system can achieve good vibration reduction effects, with a maximum vibration reduction value of 7.79 dB.

Key words city railway; elastic bearing block track; vibration reduction performance; stiffness matching

First-author's address School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610036, Chengdu, China

为降低振动对周边环境的影响, 从轮轨振动的源头采取措施是较为有效的一种措施, 如在轨道系统的扣件、轨枕或道床等位置采取减振措施等^[1]。

轨道结构参数对轨道振动频域分布的影响具有明显的差异, 可根据激振频率的分布特性以及减振参数对频率的敏感特性进行减振参数的合理匹配, 以达到较好的减振效果^[2]。本文建立车辆-轨道耦合动力学计算模型进行动力学仿真计算, 研究不同扣件垂向刚度及弹性支承块垂向刚度组合下弹性支承块轨道结构的振动响应, 进而确定弹性支承块轨道结构中轨下刚度(即扣件垂向刚度)和块下刚度的合理取值。

* 中铁第一勘察设计院集团有限公司科技开发计划项目(院科 19-06)

1 车辆-轨道耦合模型

车辆-轨道耦合模型是一种多刚体和柔性轨道相互作用的刚柔耦合模型。

市域铁路多采用 CRH6 型动车组。该动车组为 8 节编组,具有载客量大、列车起停频率高及快速乘降能力强等特点,可在城际线路和既有客运专线上运行^[3]。在车辆-轨道耦合模型中,CRH6 型动车组的动力学参数如表 1 所示^[3-4]。

表 1 CRH6 型动车组的动力学参数

Tab.1 CRH6 EMU dynamics parameters			
名称	参数取值	名称	参数取值
车体质量/kg	45 000	车辆定距/m	17.5
车体绕 x 轴转动惯量/(kgm ²)	33 832	转向架轴距/m	1.25
车体绕 y 轴转动惯量/(kgm ²)	528 628	车轮半径/m	0.43
车体绕 z 轴转动惯量/(kgm ²)	506 504	一系悬挂纵向刚度/(kN/m)	10 000
构架质量/kg	7 760	一系悬挂横向刚度/(kN/m)	5 000
构架绕 x 轴转动惯量/(kgm ²)	2 058	一系悬挂垂向刚度/(kN/m)	1 200
构架绕 y 轴转动惯量/(kgm ²)	2 936	一系悬挂垂向阻尼/(kNs/m)	15
构架绕 z 轴转动惯量/(kgm ²)	4 716	二系悬挂纵向刚度/(kN/m)	200
轮对质量/kg	1 654	二系悬挂横向刚度/(kN/m)	200
轮对绕 x 轴转动惯量/(kgm ²)	726	二系悬挂垂向刚度/(kN/m)	400
轮对绕 y 轴转动惯量/(kgm ²)	170	二系悬挂垂向阻尼/(kNs/m)	80
轮对绕 z 轴转动惯量/(kgm ²)	726	二系悬挂横向阻尼/(kNs/m)	60

弹性支承块式轨道由钢轨、扣件、轨枕和枕下基础构成。在车辆-轨道耦合模型中,钢轨被视为铁木辛柯梁;扣件采用 Bushing 力元模拟;单个支承块可视为一个刚体,具有 4 个自由度;采用弹簧阻尼元件连接轨枕和道床板;道床板为弹性薄板^[5];利用弹簧阻尼元件实现弹性支承块与下部基础的连接。车辆-轨道耦合模型见图 1。

车辆-轨道耦合模型中,钢轨型号为 CHN60N,道床板采用 C40 混凝土。弹性支承块轨道各部件的结构参数如表 2 所示。

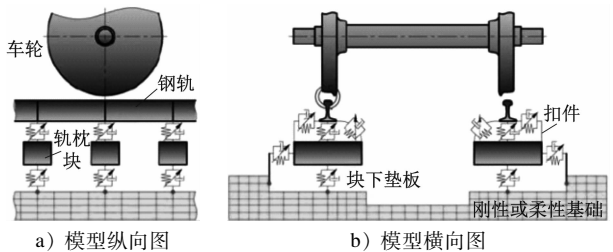


图 1 车辆-轨道耦合模型

表 2 弹性支承块轨道各部件的结构参数取值

Tab.2 Values of structural parameters for EBB track components		
部件	结构参数	取值
扣件	扣件间距/m	0.625
	垂向刚度/(kN/mm)	60
	垂向阻尼/(kNs/m)	50
	横向刚度/(kN/mm)	50
支承块	长/m	0.60
	宽/m	0.29
	高/m	0.20
橡胶套靴	面刚度/((kN/mm)/m ²)	2 000
块下垫板	竖向刚度/(kN/mm)	75
基础(隧道)	基础支承面刚度/(MPa/m)	1 200
道床板	宽/m	2.6
	厚/m	0.3

在车辆-轨道耦合模型中,车辆与下部轨道结构的相互作用通过轮轨间的耦合关系实现,其中轮轨接触采用传统的 Hertz 非线性弹性接触模型来模拟。

在 UM(多体动力学)仿真软件中,准确设置轮轨之间的相互作用关系,选择美国六级轨道谱作为轨道不平顺谱输入,选择 Park 求解方法,即可进行弹性支承块轨道减振的计算。车辆-轨道仿真模型如图 2 所示。

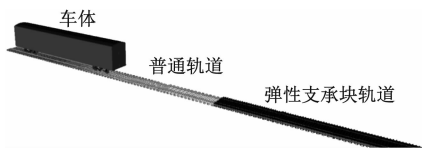


图 2 车辆-轨道仿真模型

Fig.2 Vehicle-track simulation model

2 数据处理和评价方法

对振动进行评价时,由于振动有效值的变化范

围通常高达数百万倍,这给振动描述带来不便,于是引入了振动级(或称振动水平)的概念来替代有效值描述振动大小,对于不同的物理量,振动级可以为加速度级、速度级和位移级^[6]。本文采用Z振级进行评价。

评价环境振动的物理量是加速度振级 L_{VA} , 单位为 dB, 其计算式为:

$$L_{VA} = 20 \lg \left(\frac{a}{a_0} \right)$$

式中:

a ——垂向振动加速度值;

a_0 ——基准加速度值,取 10^{-6} m/s^2 。

将 L_{VA} 按 ISO 2361/1:1997《机械振动与冲击 人体处于全身振动的评价 第1部分》中规定的全身振动Z计权因子修正后即得到垂向振动加速度级(以下简称“Z振级”),记作 L_v , 单位为 dB。

3 时域评价

图3为列车分别通过弹性支承块轨道道床段和无减振的普通整体道床段时,钢轨和道床板的垂向振动加速度时域图。由图3可见,对于同一测点的时域加速度值,两种道床(弹性支承块轨道道床和普通整体道床)的变化趋势基本相同,在时域内不能对振动结果准确评价^[7],因此要从频域角度对刚度匹配进行分析。

4 刚度匹配分析

在不同轨下刚度和块下刚度组合情况下,由车辆-轨道耦合模型仿真得到弹性支承块轨道道床和整体道床的道床板动力响应;对加速度时程进行傅里叶变换^[8],可得到两种道床的频响曲线;对振动加速度的时域数据进行1/3倍频程计算,可得到两种道床的分频振级曲线。

4.1 轨下刚度

保持其他参数不变,改变轨下刚度分析系统各项动力响应。轨下刚度分析范围为60~120 kN/mm,块下胶垫刚度为50 kN/mm,两种道床的分频振级曲线如图4所示。

由图4可见:弹性支承块道床板的振动响应主要集中在0~300 Hz范围内;轨下刚度对道床板的振动响应在频域上的分布基本没有影响;道床板振动响应的峰值主要集中在中心频率为50~60 Hz及115~125 Hz范围内,其Z振级最大值为80.53 dB。

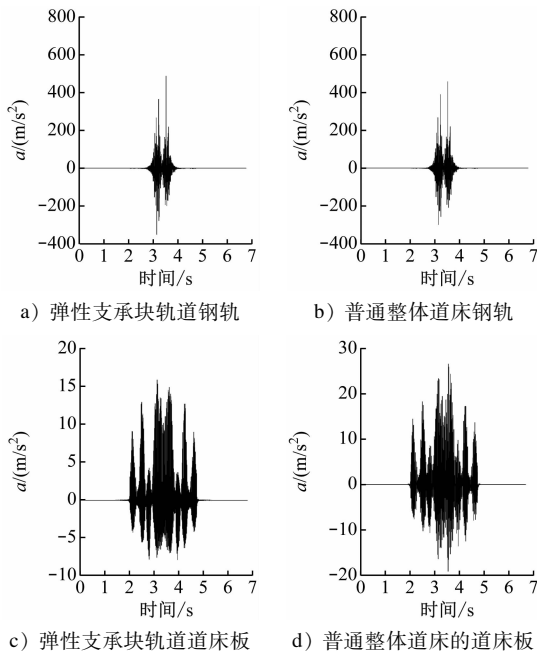


图3 道床板和钢轨的时域加速度值

Fig. 3 Time-domain acceleration values of track bed plates and rails

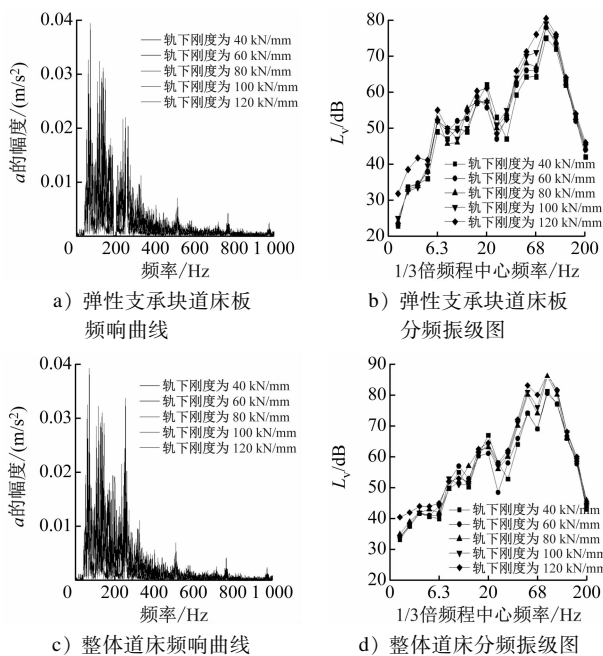


图4 两种道床的振动响应

Fig. 4 Vibration response of two track bed types

整体道床振动响应同样主要集中在0~300 Hz范围内,但轨下刚度对整体道床振动的峰值频率有较大影响,轨下刚度取40 kN/mm时,Z振级峰值主要集中在中心频率250~255 Hz范围内,最大值为81.31 dB,轨下刚度取60,80 kN/mm时,振动响应峰值主要集中在中心频率135~145 Hz范围内,最大值分

别为 82.83、86.52 dB;扣件垂向刚度为 100、120 kN/mm 时,Z 振级峰值主要集中在中心频率 65 ~ 70 Hz 范围内,最大值分别为 87.31、87.5 dB。

4.2 块下刚度分析

保持轨下刚度 80 kN/mm 不变,块下刚度分别取 50、80、110、140 及 170 kN/mm 时,两种道床的分频振级曲线如图 5 所示。

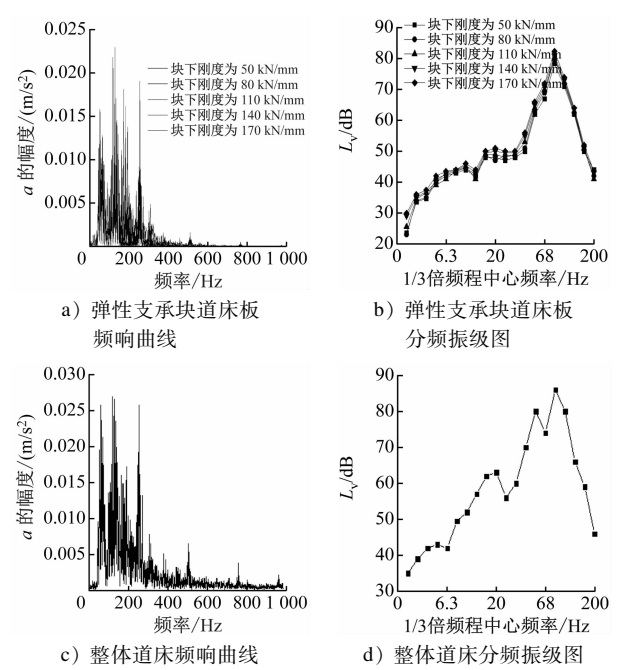


图 5 弹性支承块轨道和普通整体道床振动响应
Fig.5 Vibration response of EBB track and common monolithic track bed

由图 5 可见,保持轨下刚度 80 kN/mm 不变,块下刚度分别取 50、80 及 110 kN/mm 时,道床板 Z 振级的峰值主要集中在中心频率为 55 ~ 65 Hz 及 115 ~ 125 Hz 的范围内,其 Z 振级最大值分别为 78.52、79.03 及 79.31 dB。块下刚度取 140、170 kN/mm 时,道床板 Z 振级的峰值主要集中在中心频率为 120 ~ 125 Hz 的范围内,其 Z 振级最大值分别为 82.0、82.5 dB。

4.3 Z 振级

对不同轨下刚度和块下刚度下两种道床的 1/3 倍频程计算数据,乘以中心频率对应的全身振动 Z 计权因子,计算得到弹性支承块轨道板和普通整体道床的 Z 振级^[9],如表 3 所示。

由表 3 可知,块下刚度增大时,弹性支承块轨道道床板的 Z 振级随之增大;轨下刚度增大时,弹性支承块轨道道床板的 Z 振级随之增大,普通整体道

表 3 弹性支承块轨道板和普通整体道床 Z 振级
Tab.3 Z-vibration levels of EBB track plate and common monolithic track bed

块下刚度/ (kN/mm)	扣件垂向 刚度/(kN/ mm)	普通整体道 床道床板 L_v /dB	弹性支承块 轨道道床板 L_v /dB	L_v 差值/ dB
50	40	80.32	75.49	-4.83
	60	81.43	76.26	-5.17
	80	82.17	76.78	-5.39
	100	82.52	77.56	-4.96
	120	82.89	77.98	-4.91
80	40	81.24	75.79	-5.45
	60	82.46	76.57	-6.29
	80	84.22	77.18	-7.04
	100	84.69	78.75	-5.94
	120	85.05	79.42	-5.36
110	40	82.34	76.31	-6.03
	60	83.25	76.39	-6.86
	80	85.03	77.24	-7.79
	100	85.08	78.93	-6.15
	120	85.34	79.86	-5.48
140	40	82.77	77.64	-5.13
	60	83.78	77.93	-5.85
	80	84.72	78.48	-6.24
	100	84.83	79.46	-5.37
	120	85.51	80.43	-5.08
170	40	82.99	78.05	-4.94
	60	83.72	78.46	-5.26
	80	84.79	78.95	-5.84
	100	84.91	79.78	-5.13
	120	85.60	80.65	-4.95

床的 Z 振级也略有增大。由表 3 还可以看出,块下刚度为 80 ~ 110 kN/mm 时,弹性支承块轨道道床板和普通整体道床的振级差比较大,最大为 7.79 dB,说明列车荷载作用下的振动响应从弹性支承块轨道传递到刚性基础的过程衰减较大,减振效果较好。轨下刚度从 40 ~ 120 kN/mm 范围内变化时,振级差从小到大再到小变化,轨下刚度在 60 ~ 80 kN/mm 时振级差较大,说明在此范围内减振效果比较好。

5 结语

本文建立车辆-轨道耦合动力学计算模型,对采

用不同的扣件垂向刚度及弹性支承块块下垂向刚度组合下弹性支承块轨道的振动响应进行计算。对比分析弹性支承块轨道和整体道床轨道频域曲线,得出振动响应的主要频率范围、有效减振的频率范围或局部振动放大的不利频段。

对于市域铁路弹性支承块轨道,在列车运行速度为 160 km/h 下,当轨下刚度取值为 60 ~ 80 kN/mm,块下刚度取值为 80 ~ 110 kN/mm 时,弹性支承块轨道系统可达到较好的减振效果。最大减振效果值为 7.79 dB。

参考文献

- [1] 聂益国. 整体道床轨道系统振动分析及振动环境影响评价[D]. 济南: 山东大学, 2012.
NIE Yiguo. Vibration analysis and vibration environment impact assessment of monolithic ballast track system[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [2] 汪杰. 地铁钢弹簧浮置板轨道减振参数优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WANG Jie. Study on optimization of vibration reduction parameters of subway steel spring floating slab track[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [3] 中国铁道学会. 市域铁路设计规范: T/CRS C0101—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Chinese Railway Society. Code for design of suburban railway: T/CRS C0101—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [4] 杨旭. 弹性支承块式无砟轨道轴重及速度适用性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
YANG Xu. Study on the applicability of axle load and speed of ballastless track with elastic support block[D]. Shijiazhuang:

Shijiazhuang Tiedao University, 2017.

- [5] 巫江, 江万红, 任娟娟. 长大坡道上弹性支撑块式无砟轨道稳定性研究[C]//中国铁道学会. 中国铁道学会工程分会第七届线路专委会第二次会议论文集. 天津: 中国铁道学会, 2017: 138.
WU Jiang, JIANG Wanhong, REN Juanjuan. Study on stability of elastic support block ballastless track on long and large ramp[C]//China Railway Society. Proceedings of the Second Meeting of the 7th Route Special Committee of the Engineering Branch of China Railway Society. Tianjin: China Railway Society, 2017: 138.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准: JGJ/T 170—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit: JGJ/T 170—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [7] International Organization for Standardization (ISO). Mechanical vibration and shock—evaluation of human exposure to whole-body vibration—part 1: general requirements: ISO 2631-1: 1997[S]. Geneva: ISO, 1997.
- [8] 吴永芳. 轨道减振效果系统评价方法研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 1.
WU Yongfang. Investigation into the evaluation method for vibration damping effect of track systems[J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 1.
- [9] 梁鸿斌. 地铁环境振动实测及减振措施效果研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
LIANG Hongbin. Measurement of subway environmental vibration and study on the effect of vibration reduction measures[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.

(收稿日期: 2021-03-22)

国家重点研发计划“轨道交通调度控制一体化与联程运输技术”项目启动

近日,由北京全路通信信号研究设计院集团有限公司(以下简称“通号院集团”)牵头的“十四五”国家重点研发计划“轨道交通调度控制一体化与联程运输服务技术”项目启动会暨实施方案论证会在京召开。该项目聚焦国家交通强国重大战略,面向区域轨道交通路网运输总体效能提升和联程客运服务质量提高的需求,以实现高速度等级“运行控制自主化、综合调度智能化、运输服务联程化、调度控制一体化、供需匹配精准化”为目标,构建城际/市域轨道交通路网协同运营技术体系和自主化区域轨道交通综合调度指挥与列车运行控制一体化技术体系,研制满足多制式互操作的列车自主运行控制系统,研发区域轨道交通运营与服务大数据云脑平台、运行图动态智能编制系统、区域路网综合调度系统、区域轨道交通智能化客运服务系统,在广东和重庆区域完成示范验证工程。

(来源:光明网)