

地铁线路曲线段减振垫轨道板行车安全 及减振性能研究

张生延^{1,2}

(1. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//高级工程师)

摘 要 为了研究列车通过隧道曲线段时减振垫道床的行车安全性及减振性能,以某地铁线路为研究对象,建立了车辆-轨道-隧道刚柔耦合模型,以模拟不同工况下隧道及列车的振动响应。结果表明:各种工况下车辆的平稳性及行车安全性均满足《高速铁路工程动态验收技术规范》的要求。在小半径曲线($R = 600\text{ m}$)隧道内分别铺设 USM2020 与 USM1000W 两种型号的减振垫,其轨道板道床均具有较好的减振性能,减振效果均超过了 10 dB。对于采用了同一型号的减振垫,随着列车运行速度的增大,其减振效果更为明显。

关键词 地铁线路;曲线段;减振垫轨道板;行车安全;减振性能

中图分类号 U231.1:TB535⁺.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.027

Study on Driving Safety and Vibration Reduction Performance of Track Slabs with Damping Pads in Curve Section of Metro Line

ZHANG Shengyan

Abstract In order to study the driving safety and vibration reduction performance of the vibration-damping track bed when the train passes through the tunnel curve, taking certain metro line as the research object, a vehicle-track-tunnel rigid-flexible coupling model is established to simulate the vibration response of tunnel and train under different working conditions. Results show that the stability and driving safety of vehicles under various working conditions meet the requirements of 'Technical Specifications for Dynamic Acceptance of High-speed Railway Engineering'. Two types of vibration damping pads, USM2020 and USM1000W, are laid in the tunnel with small-radius curve ($R = 600\text{ m}$). The floating slab track bed has good vibration reduction performance, and the reduction effect exceeds 10 dB. For the same type of vibration damping pad, the vibration reduction effect grows more evident with the increase of train running speed.

Key words metro line; curve section; vibration damping track bed; train operation safety; vibration reduction performance

Author's address State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), 710043, Xi'an, China

对于列车运行过程中产生的振动与噪声问题,轨道板轨道结构的减振效果显著。文献[1]认为在一定范围内随着轨道板的厚度增加,钢轨竖向位移和轨道板竖向位移呈减小趋势。文献[2]研究了钢弹簧轨道板轨道不同参数变化对轨道结构的动力传递特性和隔振频率的影响。文献[3]分析了橡胶垫层厚度及弹性模量等参数对轨道板轨道动力特性的影响。文献[4]分析了轨道板板长等不同参数对轨道板振型和减振效果的影响。文献[5]分析了 120 km/h 速度条件下减振垫轨道板轨道的减振效果。文献[6]对短型轨道板轨道的减振性能进行了深入的研究。文献[7]通过对铺设道床的减振效果进行测试评价,为国内城市轨道交通工程减振技术的发展起到了指导性作用。

为了进一步研究列车通过曲线段减振垫道床的行车安全性及减振特性,本文以某地铁线路为研究对象,建立了车辆-轨道-隧道刚柔耦合模型,通过仿真计算得出不同工况下隧道及列车的振动响应。

1 工程概况

1.1 工程条件

本文研究的地铁曲线段均为地下线,曲线段所处地层的土层从上到下依次为素填土(厚度为 2 m)、强风化层(厚度为 6 m)、中风化层(厚度为 6 m)和微风化层(厚度为 25 m)。在轨道板与隧道壁间铺设减振垫,其轨道板主要采用 USM1000W (减振垫刚度 $k = 0.019\text{ N/mm}^3$) 及 USM2020 ($k = 0.020\text{ N/mm}^3$) 两种型号。此外,本文选取的车型为

市域D型车,列车的最高运行速度分别取100 km/h和160 km/h两种情况,计算路线长度为300 m。

基于2种线路情况及不同的 k 值,本文选取了6种工况进行分析,如表1所示。

表1 进行减振垫轨道板测试的6种曲线段线路工况

Tab.1 6 line conditions for vibration reduction track bed testing

工况	最大曲线半径/m	最大曲线超高/mm	曲线段内列车最高运行速度/(km/h)	道床类型	$k/(N/mm^3)$
1	600	195	100	普通道床	
2	600	195	100	USM2020 减振垫	0.020
3	600	195	100	USM1000W 减振垫	0.019
4	1 500	200	160	普通道床	
5	1 500	200	160	USM2020 减振垫	0.020
6	1 500	200	160	USM1000W 减振垫	0.019

1.2 模型介绍

本文通过有限元软件和多体动力学软件联合仿真建立了车辆-轨道-隧道耦合动力学模型,如图1所示。其中,轨道-隧道耦合模型主要由隧道本体、钢轨、扣件、轨道板及减振垫等组成。对各组件的说明如下:①隧道围岩的动弹性模量为22 000 MPa,密度为2 620 kg/m³,动泊松比为0.22,采用弹簧单元模拟并约束其末端;②轨道板、隧道本体采用实体单元模拟,轨道板间设置宽度为20 mm的板缝;③扣件采用三向弹簧阻尼单元模拟,扣件的间距为0.60 m;④减振垫采用弹簧阻尼单元满布于轨道板与隧道的基床间。



图1 车辆-轨道-隧道刚柔耦合模型

Fig.1 Vehicle-track-tunnel rigid-flexible coupling model

1.3 振动响应输入的激振源

本模型采用美国六级谱反演的时程曲线作为振动响应输入的激振源,如图2所示。

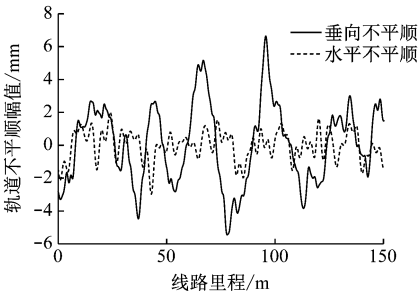


图2 轨道不平顺谱样本

Fig.2 Spectrum sample of orbital irregularity

1.4 动力学评价指标

1.4.1 平稳性要求

列车运行平稳性采用车体平均最大振动加速度这一指标来评定。在列车运行速度 $v\leq140$ km/h时,车体平均最大振动加速度 \bar{A}_{\max} 应符合以下要求:

$$\bar{A}_{\max} \leq 0.000\ 27v + C \tag{1}$$

式中:

- \bar{A}_{\max} ——列车车体平均最大振动加速度,g;
- v ——列车运行速度,km/h;
- C ——常数,取值如表2所示。

表2 不同列车运行平稳性等级下C的取值

Tab.2 Values of constant C at different train running stability levels

列车运行平稳性等级	C的取值	
	车体垂直振动时	车体横向振动时
优	0.025	0.010
良好	0.030	0.018
合格	0.035	0.025

根据TB 10761—2013《高速铁路工程动态验收技术规范》(以下简称“规范”)规定,当 v 达160 km/h时,车体的垂向振动加速度 $a_z\leq1.0$ m/s²,车体的横向振动加速度 $a_y\leq0.6$ m/s²。

1.4.2 行车安全性要求

GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》规定:静态轮重减载率限值取0.65,动态轮重减载率限值取0.80,脱轨系数限值取0.80。

2 设置减振垫轨道板前后的数据对比分析

2.1 行车安全性及平稳性分析

现有研究表明,减振垫的刚度越低,列车的行

车安全性和平稳性越差^[8]。本文以设置了减振垫($k=0.019\text{ N/mm}^3$)的工况3和工况6为例,判断各工况下列车的行车安全性及平稳性是否满足规范的要求。

2.1.1 车体振动加速度

图3为工况3和工况6下车体的垂向振动加速度时程曲线,本文均取加速度向上时为正值。图4为工况3和工况6下车体的横向振动加速度时程曲线,本文均取加速度向右时为正值。

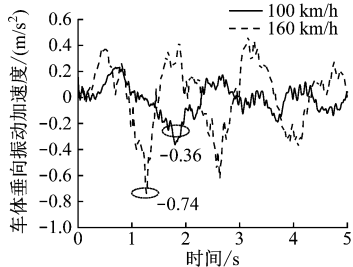


图3 工况3和工况6下车体垂向振动加速度时程曲线对比

Fig.3 Comparison of vehicle body vertical vibration acceleration time-history curves between under working conditions 3 and 6

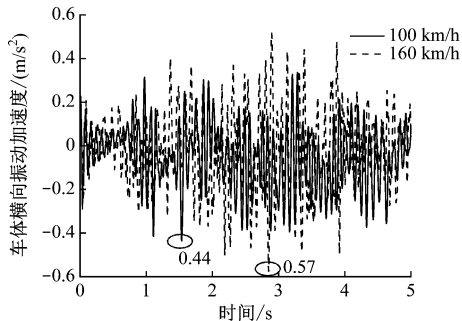


图4 工况3和工况6下车体横向振动加速度时程曲线对比

Fig.4 Comparison of vehicle body lateral vibration acceleration time-history curve between under working conditions 3 and 6

工况3下当 $v=100\text{ km/h}$ 时,由图3~4可得到此时车体的最大垂向振动加速度、最大横向振动加速度分别为 0.36 m/s^2 、 0.44 m/s^2 。由式(1)计算可得,车体平均最大振动加速度为 0.51 m/s^2 ,满足规范要求。

工况6下当 $v=160\text{ km/h}$ 时,由图3~4可得到此时车体的最大垂向振动加速度、最大横向振动加速度分别为 0.94 m/s^2 、 0.57 m/s^2 ,可满足规范要求。

综上所述,工况3和工况6两种工况条件下列车的运行平稳性均满足规范要求。相比而言,工况2和工况5下列车平稳性更高。

2.1.2 行车安全性指标

图5为工况3和工况6下车辆第一轮对左右轮的脱轨系数时程曲线。图6为工况3和工况6下车辆第一轮对左右轮的轮重减载率时程曲线。由图5~6可知,两种工况下的脱轨系数最大值均小于0.80,轮重减载率均小于0.80,满足规范要求。

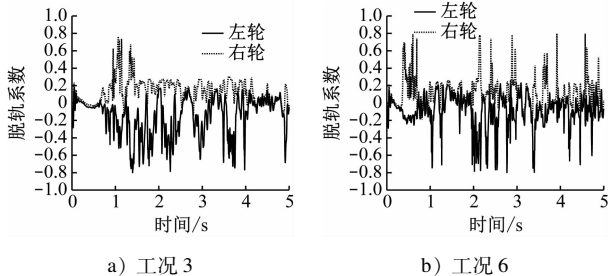


图5 工况3和工况6下车辆第一轮对的脱轨系数

Fig.5 The derailment coefficient of the first wheelset of the vehicle under conditions 3 and 6

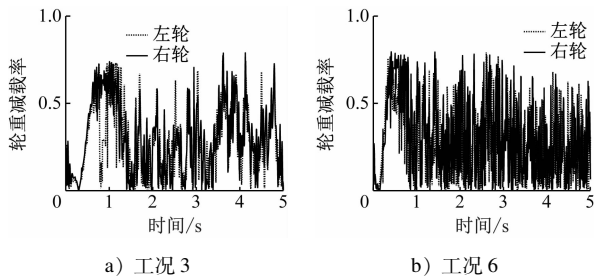


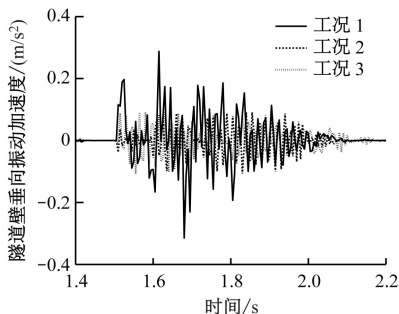
图6 工况3和工况6下车辆第一轮对的轮重减载率

Fig.6 The wheel load reduction ratio of the first wheelset of the vehicle under working conditions 3 and 6

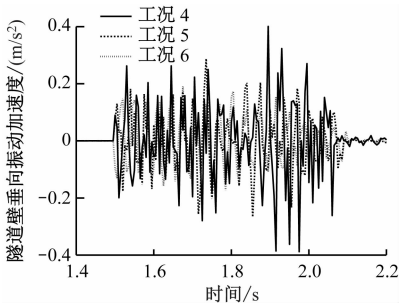
2.2 减振垫轨道板的减振性能分析

2.2.1 不同刚度下减振垫的减振效果

图7为6种工况下列车通过隧道曲线段时隧道壁的垂向振动加速度时程曲线。

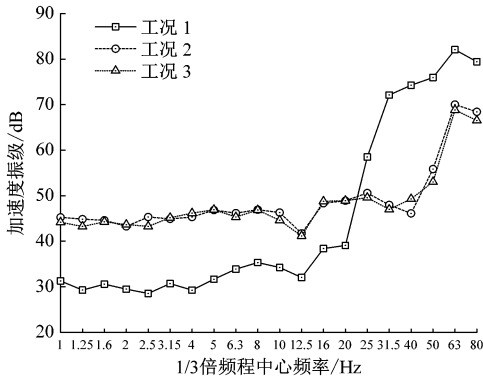


a) 时速100 km的3种工况

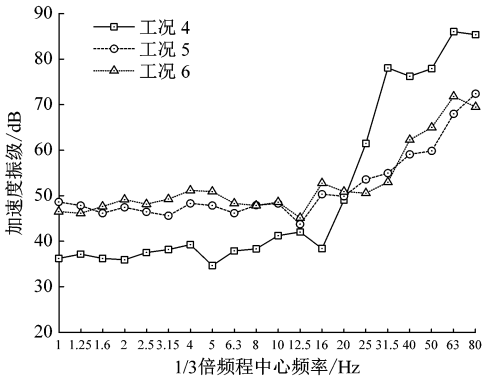


b) 时速 160 km 的 3 种工况

图 7 6 种工况下隧道壁垂向振动加速度时程曲线
Fig. 7 Time-history curve of vertical vibration acceleration of tunnel wall under 6 working conditions



a) 时速 100 km 的 3 种工况



b) 时速 160 km 的 3 种工况

图 8 6 种工况下的隧道壁加速度振级曲线
Fig. 8 Tunnel wall acceleration vibration level curve under 6 working conditions

表 3 不同刚度下的轨道减振效果对比
Tab. 3 Comparison of track vibration reduction effects of track slabs with different stiffnesses

列车最高运行速度/(km/h)	减振垫刚度/(N/mm ³)	隧道壁振级/dB	减振效果/dB
100	0.019	68.9	13.2
		70.1	12.0
		82.1	
160	0.020	71.8	14.3
		72.4	13.7
		86.1	

2.2.2 不同刚度减振垫的垂向位移

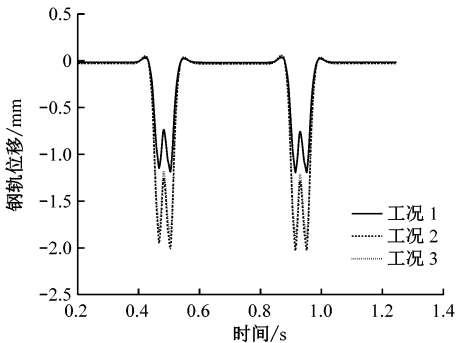
图 9 为 6 种工况下列车通过隧道曲线段时的钢轨位移时程曲线,取位移向上为正值。图 10 为 6 种工况下列车通过隧道曲线段时的轨道板垂向位移时程曲线,取位移向上为正值。

由图 9~10 可知:钢轨位移、轨道板垂向动位移

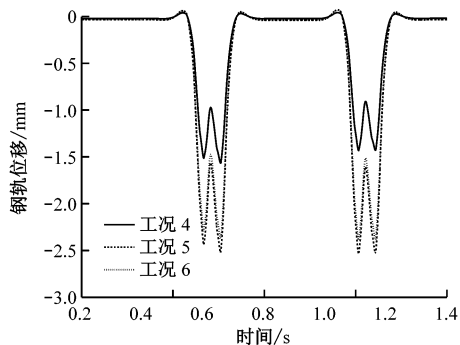
由图 7 可知:普通整体道床隧道壁的振动加速度幅值最大,即工况 1 和工况 4 条件下隧道壁垂向振动加速度最大,其最大值分别为 0.30 m/s²、0.40 m/s²。

图 8 为经 1/3 倍频谱分析后得到的隧道壁加速度振级曲线(中心频率为 1~80 Hz)。表 3 为不同刚度下轨道板轨道的减振效果情况对比。由图 8 和表 3 可知:采用 USM1000W、USM2020 两种型号的减振垫,其减振效果相当。对于采用了同一型号的减振垫,列车运行速度越大,减振垫轨道板轨道的减振效果越好。

随减振垫的刚度增大而减小。对于采用了同一型号的减振垫,列车的运行速度越大,钢轨位移、轨道板垂向动位移越大。例如,工况 3 下的钢轨位移、轨道板垂向动位移分别为 2.01 mm、1.72 mm;工况 6 下的钢轨位移、轨道板垂向动位移分别为 2.54 mm、1.85 mm。根据 CJJ/T 191—2012《轨道板轨道技术规范》,轨道板轨道在列车额定荷载作用下的钢轨位移、轨道板垂向动位移不应大于 4 mm、3 mm,由



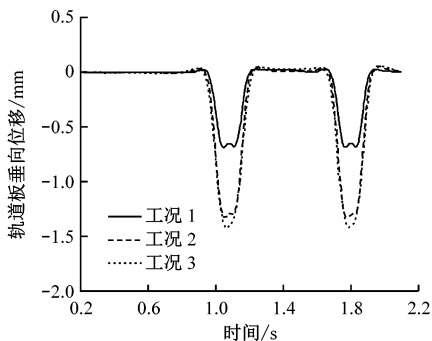
a) 时速 100 km 的 3 种工况



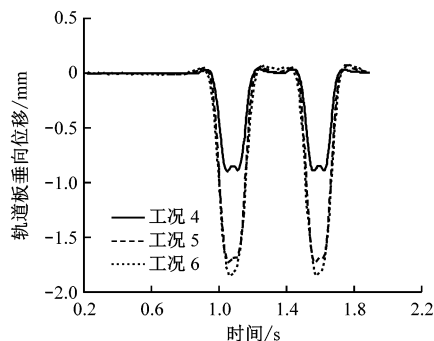
b) 时速 160 km 的 3 种工况

图 9 6 种工况下的钢轨位移时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of rail displacement under 6 working conditions



a) 时速 100 km 的 3 种工况



b) 时速 160 km 的 3 种工况

图 10 6 种工况下轨道板垂向位移时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of vertical displacement of track slab under 6 working conditions

此,6 种工况下的钢轨位移、轨道板垂向动位移均满足规范要求。

3 结论

1) 采用 USM2020 和 USM1000W 两种减振垫的轨道板道床,其行车安全性及平稳性均满足《高速铁路工程动态验收技术规范》的要求。

2) 在小半径曲线 ($R = 600 \text{ m}$) 条件下铺设 USM2020 和 USM1000W 两种减振垫,其轨道板道床的减振效果均大于 10 dB,具有较好的减振效果。

3) 6 种工况下的钢轨位移、轨道板垂向动位移均满足《轨道板轨道技术规范》的要求。

参考文献

- [1] ESMAEILI M, MOHAMMADZADEH S, MEHRALI M. Dynamic response of the coupled vehicle-floating slab track system using finite element method[J]. International Journal of Transportation Engineering, 2016, 4(1): 9.
- [2] CUI F, CHEW C H. The effectiveness of floating slab track system—part I. Receptance methods[J]. Applied Acoustics, 2000, 61(4): 441.
- [3] 谷爱军,张宏亮. 钢弹簧轨道板轨道结构在不同频段的隔振效率[J]. 噪声与振动控制, 2009(1): 39.
GU Aijun, ZHANG Hongliang. Analyses of vibration isolation effect in different frequency band for steel-spring floating slab track[J]. Noise and Vibration Control, 2009(1): 39.
- [4] 蒋崇达,雷晓燕. 钢弹簧轨道板轨道结构谐响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2013(11): 25.
JIANG Chongda, LEI Xiaoyan. Analysis of harmonic response of steel spring floating slab track structure[J]. Urban Mass Transit, 2013(11): 25.
- [5] 杨文茂. 120 km/h 地铁减振垫轨道板动力学特性分析及减振垫刚度取值研究[J]. 铁道标准设计, 2014(11): 28.
YANG Wenmao. Research on dynamic characteristics of metro damping pad floating slab and selection of damping pad stiffness at 120 km/h[J]. Railway Standard Design, 2014(11): 28.
- [6] 王颖轶,刘学文,黄醒春. 短型轨道板轨道减振系统振动响应分析——板下结构参数[J]. 上海交通大学学报, 2013(10): 1552.
WANG Yingyi, LIU Xuewen, HUANG Xingchun. Vibration response analysis of the short floating slab track system—board structure parameters[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013(10): 1552.
- [7] 张波,张涛. 城市轨道交通工程聚氨酯轨道板减振道床技术应用研究[J]. 铁道标准设计, 2014(7): 45.
ZHANG Bo, ZHANG Tao. Research on technical application of vibration-absorbing track bed containing polyurethane floating slab used in urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2014(7): 45.
- [8] 孔凡兵. 地铁轨道减振细分级和隔振理论研究[J]. 铁道学报, 2019(12): 132.
KONG Fanbing. Study on detailed classification of subway rail vibration and vibration isolation theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2019(12): 132.

(收稿日期: 2020-06-11)