

文章编号:1005-0523(2021)06-0106-08



## 地铁曲线地段钢弹簧浮置板轨道横向位移特性研究

刘锦辉<sup>1</sup>, 师多佳<sup>2,3</sup>, 刘文武<sup>4</sup>

(1. 深圳市地铁集团有限公司, 广东 深圳 518038; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;  
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 4. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

**摘要:**为保证钢弹簧浮置板在服役期间的安全性,对某新建地铁线路钢弹簧浮置板轨道2个相邻的曲线断面同时布置测点,测试了不同时速下钢轨和浮置板的横向位移,同时建立了动力学仿真模型模拟最不利工况。测试和仿真结果表明:钢轨和浮置板的横向位移受车速的改变的影响不大,但随着曲线半径的减小,钢轨和浮置板的横向位移会增大。当线路开始投入使用,列车荷载的增大以及线路不平顺的恶化导致轮轨间横向作用力增强,进而导致钢轨和浮置板的横向位移增大。

**关键词:**地铁;钢弹簧浮置板;横向位移;现场测试;动力学仿真

中图分类号:U231;TB53

文献标志码:A

本文引用格式:刘锦辉,师多佳,刘文武. 地铁曲线地段钢弹簧浮置板轨道横向位移特性研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(6):106-113.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.06.002

## Analysis on Transverse Displacement of Steel Spring Floating Plate Track at Curved Section

Liu Jinhui<sup>1</sup>, Shi Duoia<sup>2,3</sup>, Liu Wenwu<sup>4</sup>

(1. Shenzhen Metro Group Co., LTD., Shenzhen 518038, China; 2. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 4. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., LTD., Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety of steel spring floating plate during service period, two adjacent curve sections of steel spring floating plate track of a new subway line were arranged at the same time to test the transverse displacements of rail and floating plate at different speeds, and a dynamic simulation model was established to simulate the most unfavorable working conditions. The test and simulation results show that the transverse displacement of rail and floating plate is not affected by the change of speed, but the transverse displacement of rail and floating plate increases with the decrease of curve radius. When the line is put into use, the increase of the train load and the deterioration of the irregularity of the line lead to the increase of the transverse force between the wheel and rail, which causes the increase of the transverse displacement of the rail and the floating plate.

**Key words:** subway; steel spring floating plate; transverse displacement; field test; dynamic simulation

**Citation format:** LIU J H, SHI D J, LIU W W. Analysis on transverse displacement of steel spring floating plate track at curved section[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 106-113.

收稿日期:2021-08-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978585);高速铁路基础研究联合基金项目(U1734207);四川省应用基础研究项目(2020YJ0214)

随着城市化的快速发展,城市人口急剧增多,城市交通拥堵现象日益严重,轨道交通的快捷、舒适、安全以及运量大等特点很好地解决了这一问题,但随着城市轨道交通线路的增多,线路服役时间的增长,轨道交通带来的振动和噪声问题影响着沿线的居民<sup>[1-3]</sup>。按照位置减振方式可以分为钢轨振动控制、轨下减振、枕下减振和道床下减振,道床下减振原理是在上部轨道结构与基础之间加入弹性体,道床会产生惯性运动衰减振动。按照弹性体的不同,道床下减振有减振垫浮置板、橡胶支座浮置板和钢弹簧浮置板,其中钢弹簧浮置的减振效果最好。

钢弹簧浮置板具有的高效的减振性能使其得以大量的使用<sup>[4]</sup>,但在曲线段轮轨作用关系更为复杂,国内外对钢弹簧浮置板在曲线地段的动力特性研究较少<sup>[5]</sup>。钢弹簧浮置板轨道较普通整体道床在钢轨和浮置板处的振动幅值会增大,尤其是在曲线地段,良好的减振效果的前提是需要保证钢弹簧浮置板轨道的安全性。郑玄东<sup>[6]</sup>测试了曲线段的钢弹簧浮置板轨道的位移,包括内外侧钢轨的垂向及横向位移、浮置板中部及端部的垂向及横向位移,但其运行速度最高仅为 60 km/h。葛辉等<sup>[7]</sup>现场测试了直线段钢弹簧浮置板的钢轨和浮置板的垂向位移,列车运行速度最高到 117 km/h,并通过仿真计算最不利工况下的钢轨和浮置板的垂向位移,但未对横向位移进行测试和分析。

本文通过现场测试速度分别为 80, 100, 110, 120 km/h 下曲线半径为 1 200 m 和 2 500 m 的钢弹簧浮置板轨道钢轨和浮置板的横向位移,并建立了车辆-轨道-浮置板耦合动力学模型,除了计算了上述工况外,还模拟了线路投入使用后的最不利工况<sup>[8]</sup>,以保证线路行车的安全性。

## 1 钢弹簧浮置板横向位移测试

### 1.1 试验概况

以某新建地铁线路曲线段的钢弹簧浮置板为研究对象,为保证其投入使用后的安全性,对曲线段的钢弹簧浮置板的钢轨及浮置板的横向位移进行现场测试。试验地点为隧道区,铺设无砟轨道,钢轨为无缝焊接轨,扣件类型为 DZIII-1 型扣件,地铁车辆为 8 卡 A+型电动列车编组,线路的最高运行速度为 140 km/h。

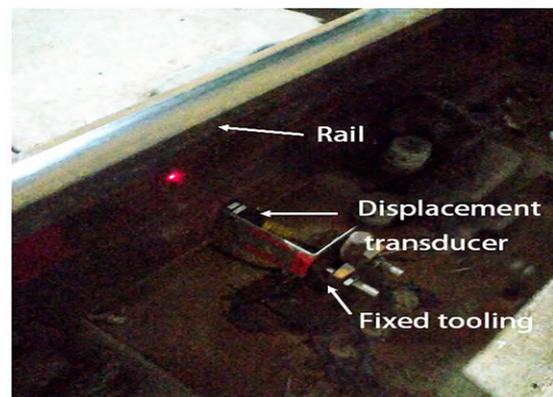
### 1.2 试验仪器

测试仪器采用高精度 16 通道 INV3060S 型双核采集仪,测量位移的传感器为 KEYENCE IL-065 型激光传感器,量程为 10 mm。本次试验采用移动电源进行供电,使用电脑离线采样功能。

### 1.3 测点布置

测试轨道断面 2 个,包括:曲线半径 1 200 m 区段 (DK45+700)、曲线半径 2 500 m 区段 (DK46+300),两个相邻的测试断面同时布置仪器同时测量。

测试内容包括内轨钢轨横向位移、钢弹簧浮置板横向位移,两个测试断面的钢轨和浮置板测点均位于曲线内侧。钢轨处由于工装安装高度限制,实际测试位置为轨腰附近。现场布置图如图 1 所示。



(a) Rail test position



(b) Test position of floating board

图 1 现场布置图  
Fig.1 Site layout plan

## 2 测试结果及分析

线路处于试运行阶段,通过列车共 40 趟,速度为 80, 100, 110, 120 km/h 列车各 10 趟。

选取各速度下结果较好的数据,曲线半径为

1 200 m 测试各速度下的钢轨和浮置板动态横向位移典型时程如图 2、图 3 所示。位移时程图中,向曲线内侧移动时位移为正值,向曲线外侧移动时位移为负值,计算位移最大值时取各动态位移的绝对值最大值。

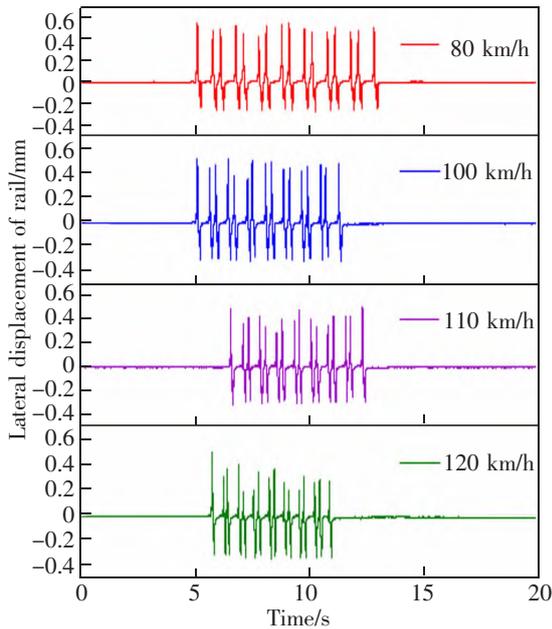


图 2 曲线半径 1 200 m 钢轨横向位移

Fig.2 Rail lateral displacement with curve radius of 1 200 m

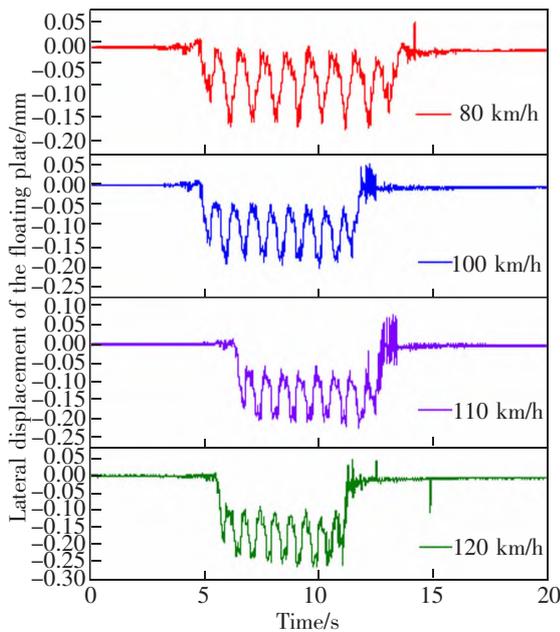


图 3 曲线半径 1 200 m 浮置板横向位移

Fig.3 Floating plate lateral displacement with curve radius of 1 200 m

曲线半径为 2 500 m 测试各速度下的钢轨和浮置板动态横向位移典型时程如图 4、图 5 所示。

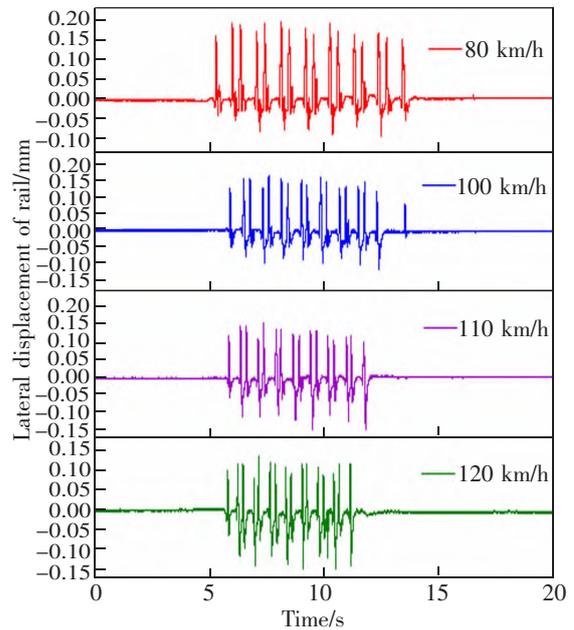


图 4 曲线半径 2 500 m 钢轨横向位移

Fig.4 Rail lateral displacement with curve radius of 2 500 m

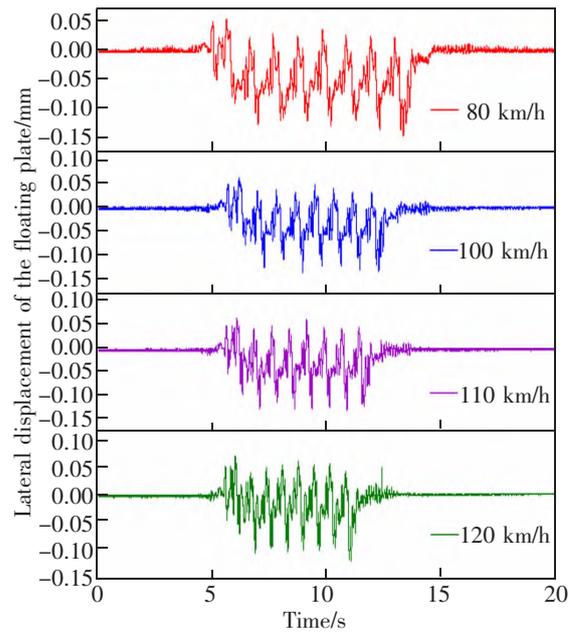


图 5 曲线半径 2 500 m 浮置板横向位移

Fig.5 Floating plate lateral displacement with curve radius of 2 500 m

从图 6 可以明显地看到,测试断面曲线半径为 1 200 mm 时在各速度级别下的钢轨位移均大于曲线半径为 2 500 mm 时的钢轨位移,各个速度平均相差值为 0.352 m,这是因为曲线半径越小,列车在经过曲线路段时造成的横向轮轨力越大,会导致更大的横向位移。而对于浮置板的横向位移,虽然也有上述的现象,但是各个速度平均相差值

对比钢轨仅为其 1/4,为 0.083 m。这是因为相比于轮轨力直接作用于钢轨,作用在浮置板的横向作用力经过了钢弹簧及扣件的传递,造成了横向力部分衰减,导致其横向位移差较小。从列车行驶速度的角度来看,钢轨及浮置板的横向位移受车速的影响相较于受曲线半径的影响不大,这是由于受到了地铁列车行驶速度限值的影响,仅考虑了

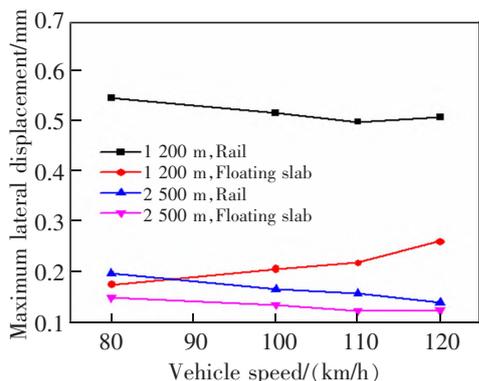


图6 各速度下横向位移最大值

Fig.6 Maximum lateral displacement at various speeds

车速为 80~120 km/h 的 5 组工况,但也足以说明在地铁正常运营过程中车速对于钢轨和浮置板横向位移的影响并不明显。

### 3 仿真计算及分析

为模拟线路正常运行之后轨道状态的变化对刚弹簧浮置板横向位移的影响,采用分层建模的思想,利用多刚体软件建立车辆-钢轨扣件-浮置板-钢弹簧-基底板体系<sup>[9-10]</sup>。

#### 3.1 相关参数

车辆系统主要由车体、转向架、轮对和一系、二系悬挂组成,将车体、转向架和轮对考虑为刚体,不考虑它们的弹性变形<sup>[11-12]</sup>,车辆参数采用地铁 A 型列车,为简化计算,采用两节编组,主要车辆参数如表 1 所示。

钢弹簧浮置板轨道结构由钢轨、扣件、浮置板、钢弹簧及混凝土基底组成,各结构相关参数如表 2 所示。

表 1 主要车辆参数

Tab.1 Main vehicle parameters

Vehicle parameter name	Item	Value
Vehicle structure parameter	Car body mass/t	41.86
	Bogie frame quality/t	2.72
	Radius of wheel-set/m	0.42
	Mass of wheel-set/t	1.78
	Half of the fixed moment of the vehicle/m	7.85
	Fixed half of wheelbase/m	1.25
	Wheel tread type (GB 449-2003)	LM wear type tread
Primary vertical spring	Transverse stiffness/(kN/m)	5 000
	Vertical stiffness/(kN/m)	1 384
	Longitudinal stiffness/(kN/m)	5 000
	Transverse damping/(N·s/m)	15
	Vertical damping/(N·s/m)	1 300
	Longitudinal damping/(N·s/m)	15
Secondary vertical spring	Transverse stiffness/(kN/m)	158
	Vertical stiffness/(kN/m)	355
	Longitudinal stiffness/(kN/m)	158
	Transverse damping/(N·s/m)	2 300
	Vertical damping/(N·s/m)	1 300
	Longitudinal damping/(N·s/m)	2 300
Wheel/Rail contact	Contact stiffness/(kN/m)	2 000

表 2 各轨道结构相关参数  
Tab.2 Related parameters of each track structure

Track structure	Item	Value
60-type rail	Elastic modulus/GPa	206
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	7 850
	Poisson's ratio	0.3
Fasteners	Vertical stiffness/(kN/mm)	35
	Vertical damping/(kN·s/m)	9.898
Floating slab	<i>l</i> × <i>w</i> × <i>h</i> /(m×m×m)	24.97×3.6×0.42
	Elastic modulus/GPa	32.5
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500
	Poisson's ratio	0.2
Steel-spring	Vertical stiffness/(N/m)	5.33(GZQRH60V) 7.50(GZQRH61V)
	Vertical damping/(kN·s/m)	35
Substrate	Elastic modulus/GPa	31.5
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500
	Poisson's ratio	0.2
	Vertical stiffness/(N/m)	1×10 <sup>8</sup>
	Vertical damping/(N·s/m)	1×10 <sup>6</sup>

建立 2 块长度相等的浮置板模型，浮置板与基底之间的钢弹簧采用多体动力学的线性弹簧模拟<sup>[13-15]</sup>，2 个测试断面的钢弹簧浮置板结构如图 7 所示，板长 24.97 m，两板缝中线距为 25 m，板厚为 420 mm，板侧布置 8 个 GZQRH60V 型液体阻尼钢弹簧隔振器，竖向刚度为 5.33 kN/mm，板中布置 40 个 GZQRH61V 型液体阻尼钢弹簧隔振器，竖向刚度 7.50 kN/mm，钢轨内侧隔振器中心线距轨道中心线 450 mm，钢轨内侧隔振器中心线距轨道中心

线 980 mm。

### 3.2 模型验证

为验证仿真模型的准确性，分别建立了曲线半径为 1 200 m 和 2 500 m 的钢弹簧浮置板轨道模型<sup>[16-17]</sup>，其中图 8 为曲线半径为 1 200 m 时多体动力学软件中所建立的车辆-轨道-刚弹簧浮置板模型，由于此次测试的地铁线路还未投入运营，仿真时按空载计算，新建线路的平顺性较好，轨道不平顺按美国六级谱考虑，如图 9 所示。

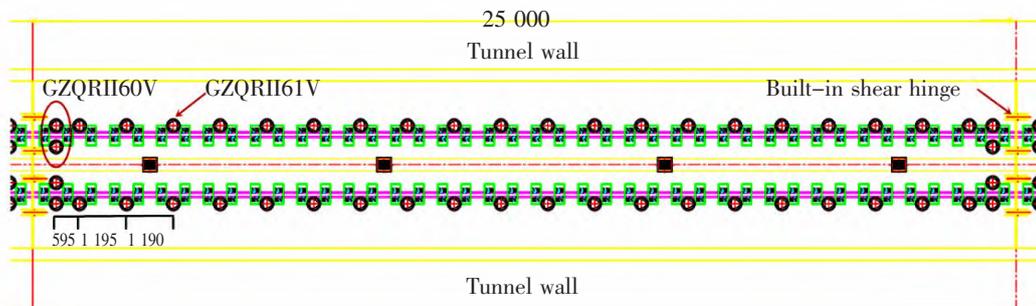


图 7 钢弹簧浮置板轨道结构(单位:mm)  
Fig.7 Steel spring floating slab track structure(Unit:mm)



图 8 车辆-轨道-浮置板仿真模型  
Fig.8 Vehicle-track-floating slab simulation model

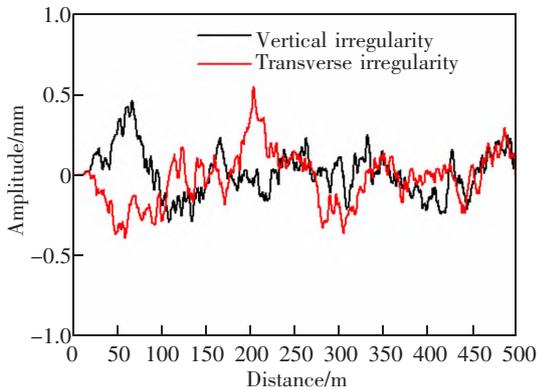


图 9 美国六级谱

Fig.9 American six-level spectrum

图 10、图 11 为仿真得到的两种曲线半径下不同速度的钢轨和浮置板的横向位移。图 12 给出了不同速度下横向位移最大值的数值模拟值与实测值的结果对比。结果显示,数值模拟值与实测值能较好匹配,数值模拟结果也表明钢轨和浮置板的横向位移受速度的影响较小,但与曲线半径有关,曲线半径越小,钢轨和浮置板的横向位移越大。

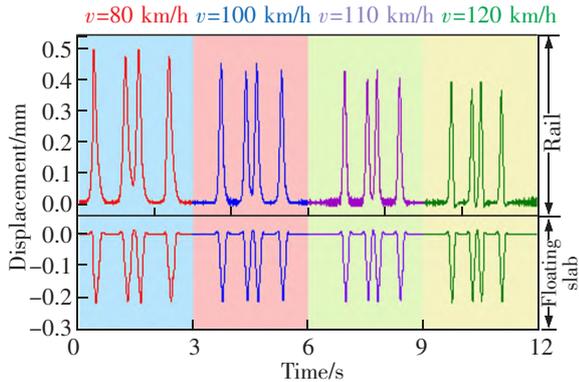


图 10 曲线半径 1 200 m 钢轨、浮置板横向位移

Fig.10 Transverse displacement of rail and floating slab with curve radius of 1 200 m

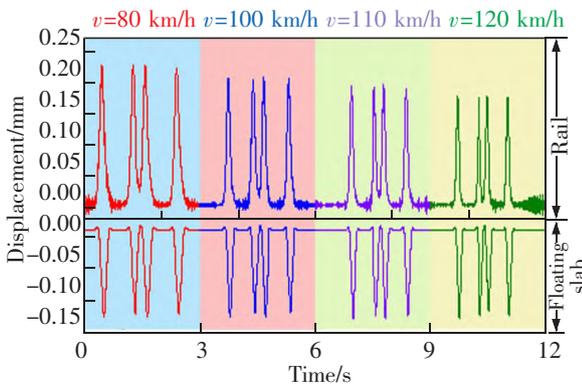


图 11 曲线半径 2 500 m 钢轨、浮置板横向位移

Fig.11 Lateral displacement of rail and floating slab with curve radius of 2 500 m

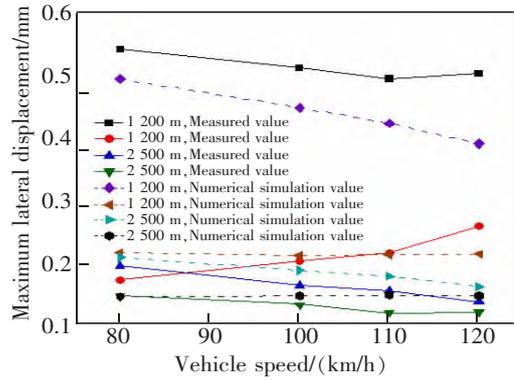


图 12 数值模拟与实测横向位移最大值对比图

Fig.12 Comparison of numerical simulation and measured maximum lateral displacement

### 3.3 最不利情况模拟

考虑地铁正式运营之后,车辆荷载的不断加,轨道不平顺的急剧恶化,仿真计算地铁线路在最不利行车条件下的钢弹簧浮置板轨道钢轨和浮置板的横向位移,轨道谱取美国五级谱,轴重改为 140 kN,车速取 120 km/h,其它参数仍按表 1 和表 2 设置,如图 13 所示。

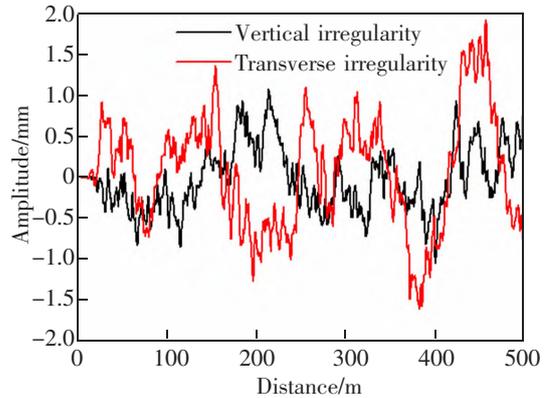


图 13 美国五级谱

Fig.13 American five-level spectrum

由图 14 可知,最不利工况下钢轨和浮置板的最大横向位移分别为 1.576 mm 和 1.990 mm,目前国内并没有相关规范对浮置板轨道的横向位移进行限制,《浮置板轨道技术规范》(CJJ/T 191-2012)<sup>[18]</sup>也仅对浮置板轨道的钢轨和浮置板的垂向位移有明确的限值,但在曲线段的仍需考虑轨道结构的横向位移不能过大,以免影响行车安全性及平稳性,在浮置板减振轨道结构中常需设置横向限位结果,如凸形挡台、剪力铰等<sup>[19-21]</sup>。

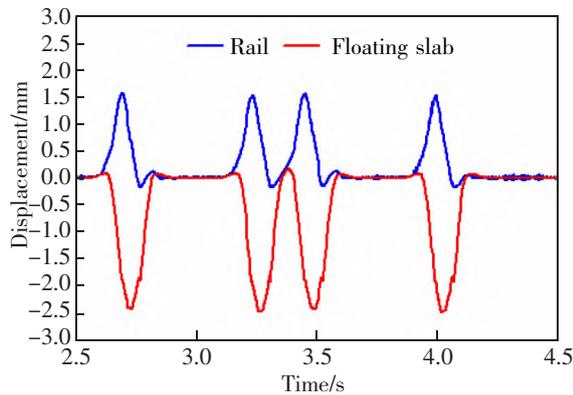


图 14 最不利工况钢轨横向位移

Fig.14 The lateral displacement of the rail under the most unfavorable conditions

#### 4 结论

通过现场实测和动力学仿真钢弹簧浮置板轨道两个曲线断面下不同时速的钢轨和浮置板的横向位移,得到以下结论:

1) 车速的改变对钢弹簧浮置板轨道的钢轨和浮置板的横向位移没有太大影响,但曲线半径越小,轮轨横向作用越大,钢轨和浮置板的横向位移越大;

2) 由于列车荷载的增加及不平顺的恶化,导致轮轨之间的横向作用力加强,进而导致钢轨与浮置板的横向位移增大;

3) 当线路投入使用后,需定期检查轨道的平顺性,制定合理的打磨周期,保证线路平顺性。

#### 参考文献:

[1] 蒋崇达,雷晓燕. 地铁运营下钢弹簧浮置板轨道减振分析[J]. 华东交通大学学报,2012,29(5):23-28.  
JIANG C D,LEI X Y. Vibration reduction analysis of steel spring floating slab track under subway operation[J]. Journal of East China Jiaotong University,2012,29(5):23-28.

[2] THOMPSON D. Railway noise and vibration:mechanisms, modelling and means of control[J]. Railway Gazette International,2010,166(2):85.

[3] RAFAL B,BOGUSLAW N. Identification of the vibration environment of railway infrastructure[J]. Procedia Engineering,2017,187:556-561.

[4] 邹彦,刘扬,马晓云,等. 预制短板浮置板轨道减振特性研究[J]. 华东交通大学学报,2017,34(1):33-39.  
ZOU Y,LIU Y,MA X Y,et al. Research on vibration reduction characteristics of prefabricated short slab floating slab track[J]. Journal of East China Jiaotong University,2017,

34(1):33-39.

- [5] 王刘翀,刘冬娅,易强,等. 曲线地段钢弹簧浮置板轨道振动特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(3):610-619.  
WANG L C,LIU D Y,YI Q, et al. Experimental study on vibration characteristics of steel spring floating slab track in curved section[J].China Railway Science,2019,16(3):610-619.
- [6] 郑玄东. 预制钢弹簧浮置板动态位移现场实测分析[J]. 隧道与轨道交通,2019(S2):72-76.  
ZHENG X D. Field measurement analysis of dynamic displacement of prefabricated steel spring floating plate[J]. Tunnel and Rail Transit,2019(S2):72-76.
- [7] 葛辉,王平. 钢弹簧浮置板轨道位移实测与分析[J]. 路基工程,2017(4):27-31.  
GE H,WANG P. Track Displacement measurement and analysis of steel spring floating slab[J]. Roadbed Engineering,2017(4):27-31.
- [8] 张世杰. CRTSⅢ型板式无砟轨道减振过渡段动力特性分析[J]. 华东交通大学学报,2021,38(1):8-16.  
ZHANG S J. Dynamic characteristics analysis of vibration absorption transition section of CRTSⅢ plate-type ballastless track[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(1):8-16.
- [9] 邹锦华,王荣辉,魏德敏. 车辆/轨道系统动力相互作用模型及试验研究[J]. 广东工业大学学报,2010,27(2):6-11.  
ZOU J H,WANG R H,WEI D M. Dynamic interaction model and experimental study of vehicle/track system[J]. Journal of Guangdong University of Technology,2010,27(2):6-11.
- [10] ZHAO C Y,WANG L C,LIU D Y,et al. Vibration control mechanism of the metabarrier under train load via numerical simulation[J]. Journal of Vibration and Control,2019,25:19-20.
- [11] ZHAO C Y,ZHENG J Y,SANG T,et al. Computational analysis of phononic crystal vibration isolators via FEM coupled with the acoustic black hole effect to attenuate railway-induced vibration[J]. Construction and Building Materials,2021,283(4):122802.
- [12] 徐金辉,王平,汪力,等. 轨道高低不平顺敏感波长的分布特征及其影响因素的研究[J]. 铁道学报,2015,37(7):72-78.  
XU J H,WANG P,WANG L, et al. Study on the distribution characteristics of sensitive wavelength of orbit height irregularity and its influencing factors[J]. Acta Railway Sinica,2015,37(7):72-78.
- [13] 党雄,李小珍,张迅,等. 轨道结构形式对箱梁中高频振动的的影响研究[J]. 土木工程学报,2017,50(8):68-77.  
DANG X,LI X Z,ZHANG X, et al. Influence of track structure on high frequency vibration of box girder[J]. China Civil Engineering Journal,2017,50(8):68-77.
- [14] CHAN S P,COX H L,BENFIELD W A. Transient analysis of forced vibrations of complex structural-mechanical systems[J]. Aeronautical Journal,2016,66(619):457-460.

- [15] 农兴中,李祥,刘堂辉,等. 浮置板下声子晶体隔振器带隙特性研究[J]. 西南交通大学学报,2019,54(6):1203-1209.  
NONG X Z,LI X,LIU T H, et al. Research on band gap characteristics of phononic crystal isolator with floating plate[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019,54(6):1203-1209.
- [16] 李响,任尊松,徐宁. 地铁小半径曲线段钢弹簧浮置板轨道的钢轨波磨研究[J]. 铁道学报,2017,39(8):70-76.  
LI X,REN Z S,XU N. Research on rail wave grinding of steel spring floating slab track in small radius curve section of subway[J]. Acta Railway Sinica,2017,39(8):70-76.
- [17] 陈阳,周文祥,王晨晨,等. 机车曲线通过的动态模拟方法研究[J]. 铁道机车车辆,2019,39(3):20-24.  
CHEN Y,ZHOU W X,WANG C C,et al. Research on dynamic simulation method of locomotive curve passing[J]. Railway Locomotive and Vehicle,2019,39(3):20-24.
- [18] 中华人民共和国行业标准. 浮置板轨道技术规范:CJJ/T 191-2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
INDUSTRIAL STANDARD OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Technical Specification for Floating Slab Track: CJJ/T 191-2012 [S]. Beijing:China Architecture and Building Press,2012.
- [19] 徐凌雁,赵陆青. 板式轨道凸形挡台检算[J]. 铁道标准设计,2006(S1):158-162.  
XU L Y,ZHAO L Q. Plate track convex baffle check[J]. Railway Standard Design,2006(S1):158-162.
- [20] 蒋吉清,王永安,等. 基于剪力铰的浮置板轨道减振性能优化分析[J]. 中国铁道科学,2017,38(4):15-23.  
JIANG J Q,WANG Y A,et al. Optimization analysis of vibration reduction performance of floating slab track based on shear hinge[J]. China Railway Science,2017,38(4):15-23.

- [21] HUSSEIN M F,HUNT H E. A numerical model for calculating vibration due to a harmonic moving load on a floating-slab track with discontinuous slabs in an underground railway tunnel[J]. Journal of Sound and Vibration,2009,321(1):363-374.



第一作者:刘锦辉(1978—),男,高级工程师,毕业于西南交通大学土木工程专业。研究方向为轨道交通轨道工程减振降噪、预制装配式轨道结构、轮轨关系等。主(参)编标准规范3项,发表论文6篇,获授权发明专利8项。获中国城市轨道交通科学技术进步奖特等奖1项,中国建筑材料联合会·中国硅酸盐学会建筑材料科技进步一等奖1项,广东省优秀工程勘察设计奖科学技术奖二等奖等省级奖项4项。E-mail:2219911099@qq.com。



通信作者:师多佳(1998—),男,硕士研究生,研究方向为轨道交通减振降噪。E-mail:517762917@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)