

市域快线预制钢弹簧浮置板轨道振动特性研究

郑翔¹, 罗信伟¹, 李平¹, 朱文海²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010; 2. 隔而固(青岛)振动控制有限公司, 山东 青岛 266108)

摘要: 为探究钢弹簧浮置板轨道在市域快线中的适用性, 有效模拟市域列车与浮置板轨道之间的动态相互作用, 进行浮置板轨道结构的参数优化分析。基于车辆-轨道耦合动力学理论, 建立 CRH6 动车-预制钢弹簧浮置板轨道耦合动力学模型, 该模型将车辆视为由车身、车架和轮组组成的多刚体系统, 考虑了各部分的横向、纵向、侧滚、摇头和点头运动。将钢轨视为弹性点支承的伯努利-欧拉梁, 根据实际扣件节点间距布置钢轨支撑点, 考虑左右钢轨的垂向、侧向和转动自由度。将浮置板的垂直方向视为弹性地基上的双向弯曲弹性板, 水平方向视为刚体, 考虑其平移和转动自由。考虑混凝土基础为弹性基础上的双向弯曲弹性板。轮轨之间的法向力由赫兹非线性弹性接触理论确定, 切向力由非线性蠕变理论确定。研究表明, 传统上用于低速线路的预制钢弹簧浮置板式轨道实际上可以用于市域快线乃至市域快线领域, 预制式钢弹簧浮置板轨道可以在满足列车运营安全的前提下达到显著的减振效果。侧置式隔振器的发明是提高浮置板轨道稳定性的新探索, 相比传统单纯增加浮置板轨道厚度, 进而提高轨道质量并提升其稳定性的做法, 采用浮置板侧置隔振器无疑是经济而有效的。因此, 该预制式钢弹簧浮置板轨道能够满足市域快线高速行驶的要求, 同时研究成果可为时速 160 km 预制钢弹簧浮置板道床的动力学设计提供支撑。

关键词: 车辆-轨道耦合动力学; 轨道; 市域快线轨道交通; 新型预制钢弹簧浮置板; 振动特性

中图分类号: U213.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)05-0951-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.05.008

引言

钢弹簧浮置板轨道具有很好的隔振性能并且方便维护更换, 但以往钢弹簧浮置板主要应用于速度较低的城市轨道交通^[1-2]。在现有研究中缺乏将钢弹簧浮置板轨道应用于速度较高线路(160 km/h)的数据支持, 因此将其应用于市域快线轨道交通领域中存在着理论验算缺乏的问题(如广州市轨道交通 18 号、22 号线设计速度为 160 km/h)。

浮置板轨道参数对其减振性能影响较大。在此基础上, 翟婉明等^[3]建立了地铁车辆与钢弹簧浮置板轨道的耦合动力学计算模型, 探讨了浮置板尺寸(厚度和长度)、质量、弹簧刚度和空间布置以及运行速度对耦合系统的影响。丁德云等^[4]针对浮置板轨道的长度、厚度、弹簧刚度、支承间距、扣件刚度进行了其动力性能的研究。韦凯等^[5]针对浮置板的厚度对周围建筑物的振动特性影响也进行了分析与优化。但是已有的研究都是采用的低速度的工况, 并没有过 160 km/h 工况的数据研究。

对钢弹簧浮置板轨道的动力分析通常采用车辆-

轨道耦合动力系统理论。该理论已经相当成熟, 并在相关参数优化分析以及减振分析中常常应用。例如, Hussein^[6]提出了一种新的地铁不连续浮置板轨道建模方法, 用傅里叶级数表达了列车荷载作用下轨道与隧道两个子模型之间的耦合关系, 发现所研究的浮置板轨道显示出良好的振动响应。程珊等^[7]构建了车辆-浮置板轨道-桥梁耦合模型, 从时频域的角度对钢弹簧刚度和浮置板密度进行分析, 并进行了浮置板轨道的参数优化设计。蔡成标等^[8]通过对广州地铁采用的浮置板轨道, 建立了车辆-轨道耦合动力学模型, 并重点对浮置板轨道过渡段进行了动力学分析。同样, 其研究工况速度较低, 同时研究对象也是传统的钢弹簧浮置板轨道, 其研究内容具有一定局限性。

本文研究了一种新型带有侧置隔振器的预制浮置板轨道, 并运用翟婉明院士提出的车辆-轨道耦合动力学已有理论及其仿真技术^[9], 针对快速行车条件下预制钢弹簧浮置板道床的振动特性, 包括车辆运行安全性、乘坐舒适性及轨道结构稳定性、过渡段的优化设计以及减振效果分析, 根据中国铁路动力学性能评价标准进行评估分析, 论证运行速度更高

的市域快线轨道交通采用此种新型预制钢弹簧浮置板的可行性。

1 车辆-浮置板轨道耦合动力学模型

为了能够有效模拟此种新型浮置板轨道与列车之间的动态相互作用,并开展浮置板轨道振动特性仿真,基于车辆-轨道耦合动力学理论^[10],建立市域列车车辆-预制式钢弹簧浮置板轨道耦合动力学模型^[11],如图1所示。由于本文的重点在于应用已有的理论进行新型预制式钢弹簧浮置板的设计验算,因此理论部分暂不进一步阐述。

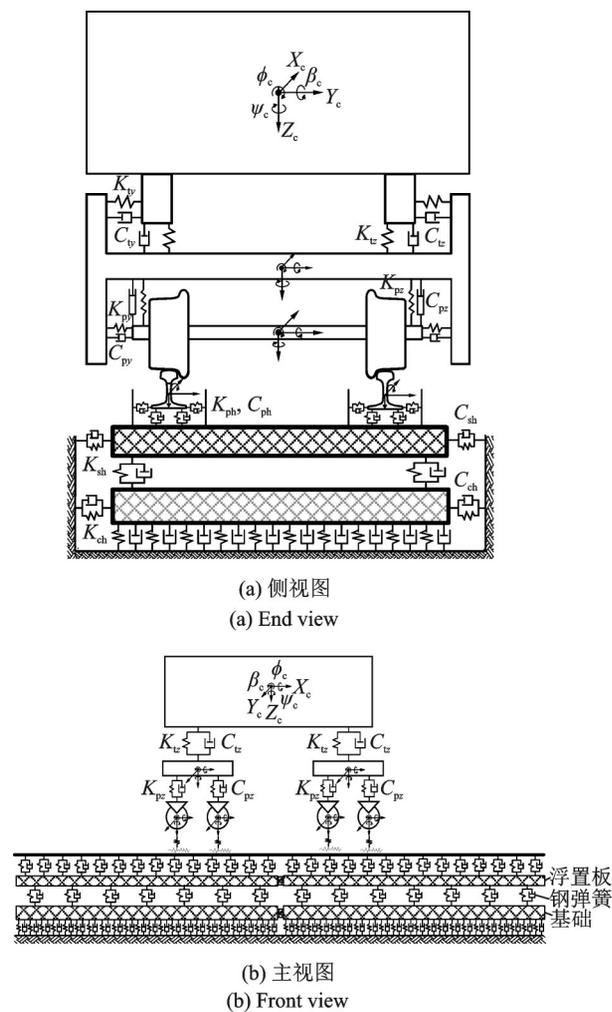


图1 车辆-钢弹簧浮置板轨道耦合动力学模型

Fig.1 Track coupled dynamic model of train steel spring floating slab track

同时,该理论模型已经得到了充分的实验验证,图2为某地铁线路直线浮置板区段道床垂向振动加速度的测试与计算结果,车辆为地铁A型车,浮置板长25 m,地铁列车通过速度约为55 km/h,其结果为浮置板道床某一横断面处的振动响应结果。可见理论模拟值与实测值具有高度的相关性,证明了此模型的可行性。

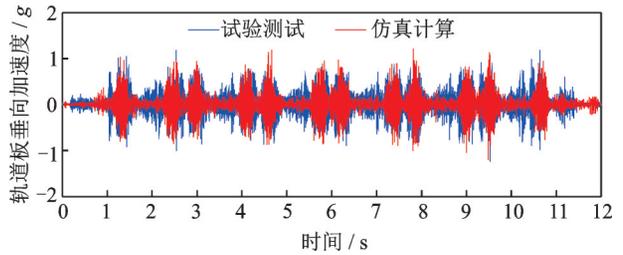


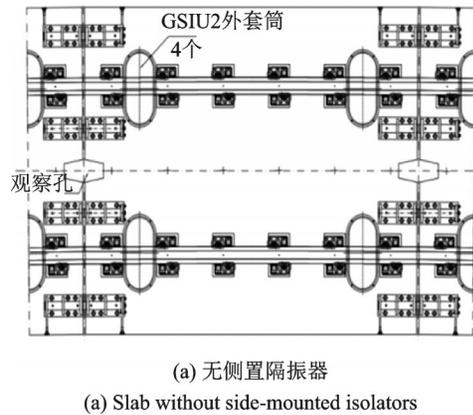
图2 测试与数值仿真的结果比较

Fig.2 Comparison of the results of test and numerical simulation

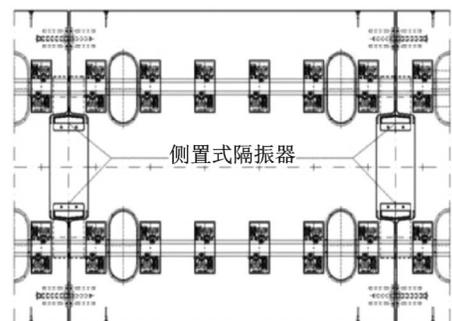
2 动力学分析基本参数

本文研究了两种不同长度的新型预制式钢弹簧浮置板轨道,其中较短的轨道常应用于3.6 m-GSIU(双筒)、4.8 m-GSIU(双筒)预制钢弹簧浮置板轨道结构,其侧置隔振器的安装位置如图3所示。为减小接缝相邻浮置板的垂向错动,本文提出增加侧置隔振器的浮置板刚度过渡改进方案,即在原有浮置板两端各增加一个侧置隔振器,如图3所示,其中3.6 m浮置板轨道安设有4个外套筒,4.8 m浮置板轨道安设有6个外套筒。

为了整体偏于安全,车辆考虑CRH6城际动车组的动车满载参数,车辆部分基本参数如表1所示,浮置板道床部分基本计算参数如表2所示。



(a) 无侧置隔振器
(a) Slab without side-mounted isolators



(b) 有侧置隔振器
(b) Slab with side-mounted isolators

图3 预制钢弹簧浮置板轨道结构

Fig.3 Novel prefabricated steel spring floating slab track

表 1 CRH6 城际动车组部分关键参数

Tab. 1 Part of the key parameters of CRH6 intercity electric multiple-unit

名称	量值	单位
车体质量	372000	kN
车体点头转动惯量	1426.8	kN·m ²
构架质量	27000	kN
构架点头转动惯量	14800	kN·m ²
轮对质量	19350	kN
轮对点头转动惯量	1500	kN·m ²
一系钢弹簧垂向刚度(每轴箱)	1.3	MN/m
一系垂向阻尼(每轴箱)	9.8	kN·s/m
空气弹簧垂向刚度	0.22	MN/m
二系垂向阻尼	9.8	kN·s/m
转向架中心距	17500	mm
轴距	2500	mm
车轮滚动圆横向跨距	1493	mm
车轮滚动圆直径	860	mm
轮对内侧距	1353	mm
车轮外形	LMA	

表 2 轨道部分基本参数

Tab. 2 Basic parameters of rail

名称	量值	单位
钢轨弹性模量	2.059	10 ⁵ MPa
钢轨泊松比	0.3	
钢轨密度	7.83	10 ³ kg/m ³
钢轨外形	CN60	
扣件垂向刚度	3.0	10 ⁴ kN/m
扣件横向刚度	2.0	10 ⁴ kN/m
扣件垂向阻尼	75.0	kN·s/m
扣件横向阻尼	50.0	kN·s/m
扣件间距	0.600	m
浮置板长度	3.6, 4.8	m
浮置板宽度	2.9	m
浮置板厚度	0.55	m
浮置板杨氏模量	3.9	10 ⁴ MPa
浮置板泊松比	0.24	
浮置板密度	2.5	10 ³ kg/m ³
基础等效刚度	5.1	10 ⁷ kN/m
基础等效阻尼	35.0	kN·s/m
隔振器垂向刚度	1.32	10 ⁴ kN/m
隔振器横向刚度	0.98	10 ⁴ kN/m
隔振器垂向阻尼	20 (3.6 m), 50 (4.8 m)	kN·s/m
隔振器横向阻尼	40.0	kN·s/m
隔振器纵向间距	2.4 (3.6 m), 1.8 (4.8 m)	m
侧置隔振器垂向刚度	2.08	10 ⁴ kN/m
侧置隔振器横向刚度	0.98	10 ⁴ kN/m
侧置隔振器垂向阻尼	100.0	kN·s/m
侧置隔振器横向阻尼	40.0	kN·s/m

3 轨道板减振性能评估与过渡段优化分析

3.1 新型预制浮置板道床的减振性能分析

表 3 和 4 给出了城际动车组车辆以 200 km/h 通过整体道床与预制钢弹簧浮置板道床时 1-80 Hz 内地基板(浮置板下方基础结构)总 Z 振级的计算结果,图 4 给出了 200 km/h 运行速度下 4-200 Hz 分频

表 3 3.6 m 预制浮置板 1-80 Hz 总 Z 振级 (dB)

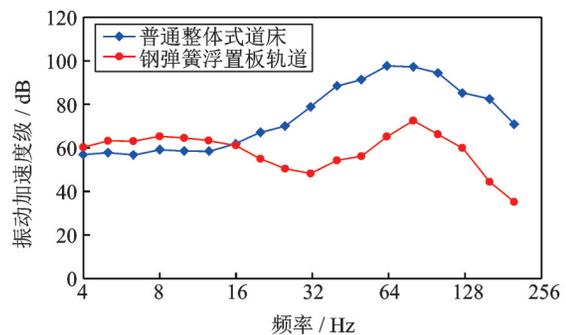
Tab. 3 1-80 Hz total Z vibration level of 3.6 m prefabricated floating slab (dB)

轨道类型	普通整体道床	浮置板道床	差值
140 km/h	99.90	68.28	31.62
160 km/h	102.68	69.85	32.83
200 km/h	106.43	71.10	35.33

表 4 4.8 m 预制浮置板 1-80 Hz 总 Z 振级 (dB)

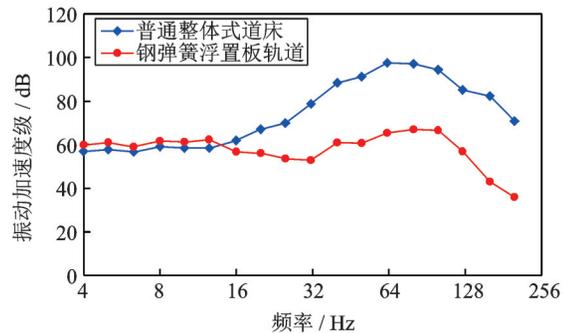
Tab. 4 4.8 m prefabricated floating slab 1-80 Hz total Z vibration level (dB)

轨道类型	普通整体道床	浮置板道床	差值
140 km/h	99.90	71.96	27.94
160 km/h	102.68	72.18	30.50
200 km/h	106.43	73.75	32.68



(a) 3.6 m 长预制浮置板与整体道床地段隧道壁铅垂向 Z 振级

(a) Vertical Z vibration level of the tunnel wall in the section of 3.6 m long prefabricated floating slab and monolithic track bed



(b) 4.8 m 长预制浮置板与整体道床地段隧道壁铅垂向 Z 振级

(b) 4.8 m long prefabricated floating slab and monolithic track bed section tunnel wall vertical Z vibration level

图 4 200 km/h 浮置板与整体道床地段隧道壁铅垂向 Z 振级
Fig. 4 Vertical Z vibration level of the tunnel wall at 200 km/h floating slab and monolithic track bed

Z振级的计算结果,图5给出了插入损失(隧道壁处钢弹簧浮置板道床与普通道床响应的Z振级落差)的计算结果。

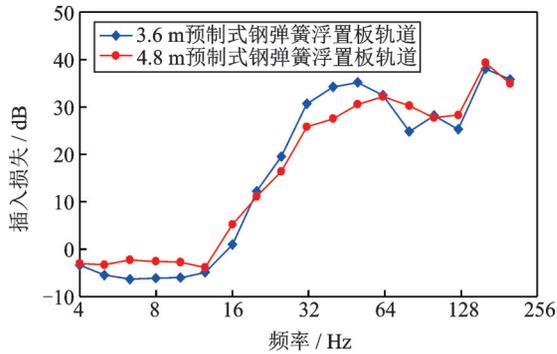


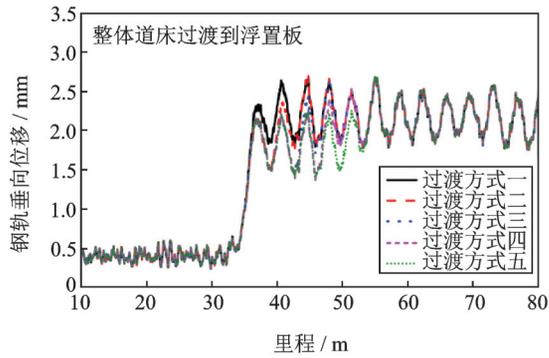
图5 200 km/h 预制浮置板与整体道床地段隧道壁插入损失
Fig. 5 Tunnel wall insertion loss of 200 km/h prefabricated floating slab and monolithic track bed

计算结果表明,200 km/h运营速度条件下,3.6 m 预制钢弹簧浮置板处隧道壁的1-80 Hz总Z振级比普通整体道床低31-36 dB;4.8 m 预制钢弹簧浮置

板处隧道壁的1-80 Hz总Z振级比普通整体道床低33 dB。也就是说,时速200 km/h运营条件下新型预制钢弹簧浮置板道床的减振效果十分显著。

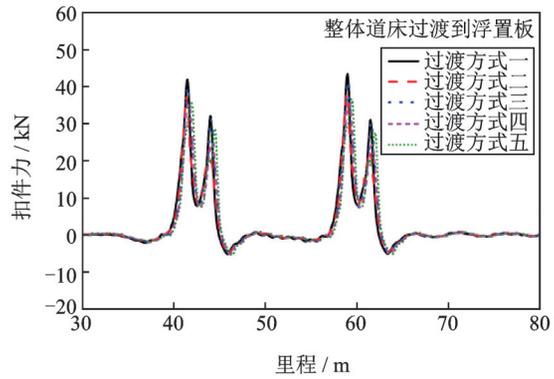
3.2 新型预制浮置板道床的刚度过渡方式优化分析

图6-7分别给出了3.6 m和4.8 m长预制钢弹簧浮置板道床5种不同过渡方式下城际动车组车辆以200 km/h通过整体道床与浮置板道床过渡区时车轮下方钢轨垂向位移与扣件力的时程响应结果。其中,过渡板与正常浮置板的区别在于隔振器设置间距不一样,因此两种板的刚度不一样,过渡板的刚度要大于正常浮置板,以实现刚度过渡。过渡方式一至过渡方式五表示分别设置1-5块过渡板,由图可知,钢轨位移和整体道床上扣件压力及浮置板道床上的扣件拉力均随着过渡板数量的增加而呈降低趋势。总体而言,过渡方式四(设置4块过渡板)既能有效降低过渡区钢轨垂向位移的波动,也能使过渡区扣件作用力较小。



(a) 车轮下方钢轨垂向位移

(a) Vertical displacement of the rail under the wheel

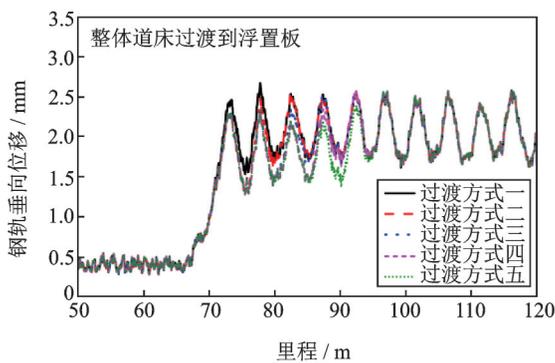


(b) 过渡区域整体道床上扣件力

(b) Fastening force on the overall track bed in the transition zone

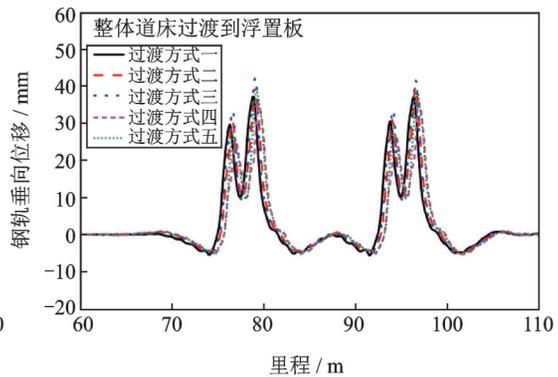
图6 列车200 km/h下3.6 m 预制浮置板板过渡段振动特性分析

Fig. 6 Vibration analysis of 3.6 m prefabricated floating slab transition zone at 200 km/h of train



(a) 车轮下方钢轨垂向位移

(a) Vertical displacement of the rail under the wheel



(b) 过渡区域整体道床上扣件力

(b) Fastening force of the overall ballast on the transition zone

图7 列车200 km/h下4.8 m 预制浮置板板过渡段振动特性分析

Fig. 7 Vibration characteristics of a 4.8 m prefabricated floating slab transition zone at 200 km/h of train

4 轨道板参数对振动特性的影响分析

4.1 轨道板长度对浮置板振动特性影响分析

以长度为3.6和4.8 m预制钢弹簧浮置板道床为研究对象,对比分析CRH6动车以不同速度、不同半径线路上运行的安全性、平稳性、舒适性及道床自身的稳定性。各计算工况表述如下:“直线-140”、“直线-160”、“直线-200”分别表示动车以140,160,200 km/h通过直线地段;“曲线-140”、“曲线-160”分别表示动车以140,160 km/h通过 $R=1100$ m和 $R=1500$ m的曲线地段;“ $L=3.6$ m”、“ $L=4.8$ m”分别表示长度为3.6,4.8 m的预制钢弹簧浮置板道床。其中的平稳性指标具体指车体垂向、水平向振动加

速度的最大值及司机室振动加权加速度有效值^[12-13],本文采用Sperling指标^[14]。各计算工况下,轮轨安全性指标的计算结果如表5所示,车辆平稳性与舒适性指标如表6所示。从中可见:

(1)动车在3.6 m和4.8 m预制浮置板道床上运行时,其动力学性能基本一致,3.6 m预制浮置板的稳定性略低于4.8 m预制浮置板。

(2)当动车以140,160,200 km/h运行在3.6和4.8 m预制浮置板道床的直线区段,以140,160 km/h通过3.6和4.8 m预制浮置板道床的曲线段($R=1100,1500$ m)时,轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数、轮重减载率四项轮轨安全性指标均小于合格限值,车体垂向加速度均低于合格限值,平稳性指标为“优”,舒适度评级为“舒适”。

表5 轮轨安全性指标

Tab. 5 Safety indicators of wheel-rail

计算 工况	轮轴横向力/kN		轮轨垂向力/kN		脱轨系数		轮重减载率	
	$L=3.6$ m	$L=4.8$ m						
直线-140	12.331	12.188	76.143	77.956	0.184	0.186	0.155	0.158
直线-160	12.913	12.890	79.518	80.343	0.182	0.187	0.187	0.179
直线-200	14.979	13.598	88.942	90.019	0.198	0.196	0.281	0.269
曲线-140	29.434	29.592	86.295	89.322	0.309	0.315	0.302	0.294
曲线-160	28.538	28.423	86.950	87.968	0.290	0.291	0.336	0.310
限值 ^[12-13]	60.92		250		1.0		0.90	

表6 车辆平稳性与舒适性指标

Tab. 6 Indicators of vehicle stability and comfort

计算 工况	车体横向加速度/ g		车体垂向加速度/ g		横向平稳性指标		垂向平稳性指标	
	$L=3.6$ m	$L=4.8$ m	$L=3.6$ m	$L=4.8$ m	$L=3.6$ m	$L=4.8$ m	$L=3.6$ m	$L=4.8$ m
直线-140	0.032	0.034	0.047	0.042	1.707	1.708	1.549	1.558
直线-160	0.033	0.036	0.053	0.048	1.945	1.947	1.823	1.826
直线-200	0.040	0.040	0.057	0.053	2.002	2.005	1.870	1.871
曲线-140	0.058	0.057	0.045	0.041	2.117	2.115	1.619	1.626
曲线-160	0.067	0.065	0.049	0.045	2.185	2.181	1.649	1.652
限值 ^[12-13]	0.10		0.15		2.5(优)		2.5(优)	

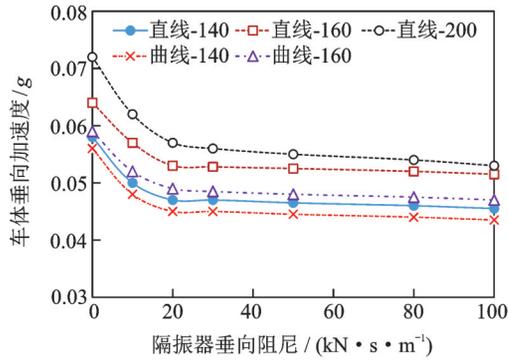
4.2 轨道板垂向支承阻尼对浮置板振动特性影响分析

为了清晰体现浮置板垂向支承阻尼(隔振器垂向阻尼)对车辆-轨道动力学特性的影响,分析过程中不设侧置隔振器,取隔振器垂向阻尼变化范围为0-100 kN·s/m,其他参数不变,按上述五种工况计算动车运行在3.6和4.8 m预制钢弹簧浮置板道床上的动力响应。计算结果表明:随着隔振器垂向阻尼增加,车体垂向加速度(如图8所示)、浮置板垂向位移(如图9所示)均呈降低趋势,即适当增加隔振器

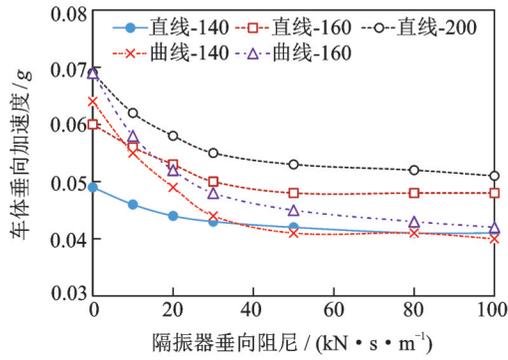
垂向阻尼可降低浮置板和钢轨垂向位移振动响应;基于浮置板垂向振动性能以及钢轨垂向变形,3.6和4.8 m浮置板道床的经济而优选的垂向阻尼取值范围分别为10-30,40-60 kN·s/m。

4.3 侧置隔振器对浮置板振动特性影响分析

为提高浮置板端部的局部刚度,改善浮置板道床的动力性能,在浮置板两端各增加一个侧置隔振器。侧置式隔振器由多个小型钢弹簧组成,高度较低,在其上表面设置了纵向及横向的限位装置,可有

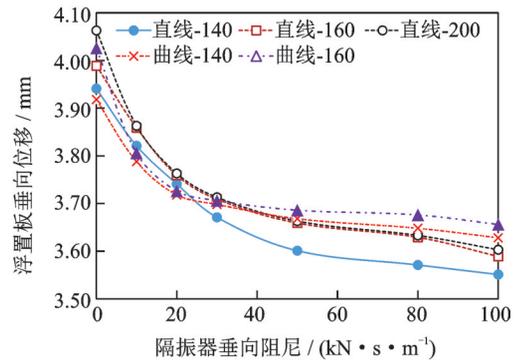


(a) 3.6 m 浮置板
(a) 3.6 m floating slab track

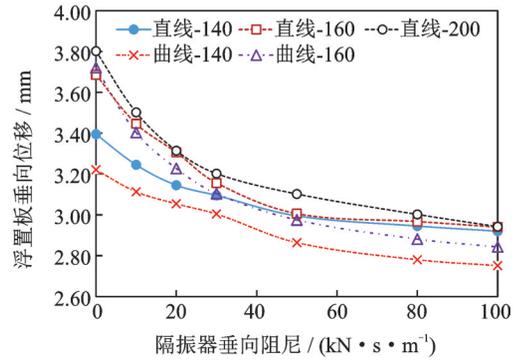


(b) 4.8 m 浮置板
(b) 4.8 m floating slab track

图8 车体垂向加速度随隔振器阻尼变化规律
Fig. 8 Variation of vertical acceleration of the train with damping of vibration isolator



(a) 3.6 m 浮置板
(a) 3.6 m floating slab track



(b) 4.8 m 浮置板
(b) 4.8 m floating slab track

图9 浮置板垂向位移随隔振器阻尼变化规律
Fig. 9 Variation of vertical displacement of the train with damping of vibration isolator

表7 浮置板道床钢轨位移对比

Tab. 7 Comparison of rail displacement of floating slab track bed

计算工况	钢轨垂向位移/mm				钢轨横向位移/mm			
	L=3.6 m		L=4.8 m		L=3.6 m		L=4.8 m	
	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器
直线-140	5.031	2.546	4.002	2.454	0.519	0.253	0.322	0.209
直线-160	5.102	2.582	4.173	2.471	0.523	0.263	0.329	0.218
直线-200	5.331	2.683	4.446	2.540	0.745	0.356	0.588	0.375
曲线-140	5.316	2.670	4.305	2.603	0.624	0.320	0.397	0.292
曲线-160	5.340	2.698	4.307	2.601	0.787	0.303	0.385	0.286
最大变化幅度/%	49.77		40.78		63.66		39.45	

表8 浮置板位移对比

Tab. 8 Comparison of displacement of floating slab track bed

计算工况	浮置板垂向位移/mm				浮置板横向位移/mm			
	L=3.6 m		L=4.8 m		L=3.6 m		L=4.8 m	
	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器	无侧置 隔振器	有侧置 隔振器
直线-140	3.741	2.016	2.995	1.849	0.252	0.118	0.127	0.104
直线-160	3.759	2.033	3.006	1.850	0.347	0.125	0.196	0.111
直线-200	3.763	2.039	3.102	1.859	0.503	0.217	0.385	0.244
曲线-140	3.718	1.990	2.864	1.772	0.152	0.195	0.289	0.145
曲线-160	3.726	1.999	2.975	1.789	0.241	0.170	0.241	0.103
最大变化幅度/%	46.48		40.07		68.01		43.64	

效控制浮置板的竖向及横向位移。分别考虑不设侧置隔振器(如图3(a)所示)和设置侧置隔振器(如图3(b)所示),其他参数如表7-8所示,按上述五种工况计算动车运行在3.6和4.8 m预制钢弹簧浮置板道床上的动力响应。计算结果表明:

对于3.6和4.8 m钢弹簧浮置板道床,增设侧置隔振器后,轨道变形及振动响应指标均明显减小,即增加侧置隔振器显著提高了浮置板道床自身的稳定性。特别地,增设侧置隔振器能大大降低浮置板轨道的垂向动态位移。在当前3.6和4.8 m预制浮置板的设计基础上各增设4个侧置隔振器,在各计算工况下,钢轨最大垂向位移分别从5.340,4.446 mm降低至2.698,2.603 mm,最大降低幅度分别约为50%,40%;而浮置板最大垂向位移分别从3.763,3.102 mm降低至2.039,1.859 mm,最大降低幅度分别约为47%,40%。类似地,增设侧置隔振器之后,钢轨、浮置板横向位移降幅也可达40%-68%。

5 结 论

研究表明,传统上用于低速线路的预制钢弹簧浮置板式轨道实际上可以用于市域快线,本文的新型预制式钢弹簧浮置板轨道可以达到显著的减振效果。该研究是对新型预制钢弹簧浮置板轨道在市域快线领域中应用的探索性研究。通过以上分析,可以得出以下结论:

(1)新型预制钢弹簧浮置板轨道可用于市域快线,既能满足浮置板轨道的位移与振动要求,又能有效降低噪声。该分析结果可以为在市域快线上推广此种新型预制钢弹簧浮置板轨道提供理论支持。

(2)长度为3.6和4.8 m的预制钢弹簧浮置板的动力性能相当,尽管前者的减振性能略低于后者,但是由于曲线通常采用较短长度预制钢弹簧浮置板轨道,因此当较短的新型预制式钢弹簧浮置板轨道用于曲线地段时,车辆-轨道耦合动力的减振效果将会减少,但仍在工程项目的可接受范围内。

(3)浮置板轨道过渡段钢轨位移和整体道床上扣件压力及浮置板道床上的扣件拉力均随着过渡板数量的增加而呈降低趋势。但并不是过渡板的数量越多越好,当过渡板数量达到一定时,钢轨垂向位移和过渡区扣件力反而会增加。因此,正确选择过渡板数量,不仅可以取得较好的减振效果,同时还能取得较好的经济效果。

(4)当城际动车组在3.6或4.8 m长预制钢弹簧浮置板轨道直线段上以140,160和200 km/h的速度运行,在曲线段上以140和160 km/h的速度运行时($R=1100$ m和 $R=1500$ m),轮轴横向力、轮轨垂直力、脱轨系数和车轮减重率均小于规定的极限值。

车体横向和垂向加速度均低于规定的极限值。另外,其稳定性指标为“优秀”,舒适度为“舒适”。分析结果颠覆了传统的看法,即钢弹簧浮置板轨道只能用于低速线路。本文研究中的新型预制式钢弹簧浮置板轨道取得了很好列车安全效果,可为该新型预制浮置板轨道在市域快线乃至市域快线上的应用提供理论依据。

(5)适当增加浮置板轨道的垂直支撑阻尼可以改善车辆的垂直动力性能,减少轨道的垂直位移,并降低浮置板轨道的振动响应。综合考虑了车辆的动态性能和轨道的稳定性,可见对于3.6和4.8 m长的预制浮置板轨道隔振器,垂直阻尼的最佳范围为10-30 kN和40-60 kN·s/m。在此范围内选择隔振器阻尼可获得良好的隔振效果,并可节省工程投资。

(6)该新型预制式钢弹簧浮置板在接合处增加侧装式隔振器,可以大大提高浮置板的稳定性,并适当降低车辆的垂直振动响应。侧装式隔振器的发明是提高浮置板轨道稳定性的新探索,相比传统单纯增加浮置板轨道厚度,进而提高轨道质量并提升其稳定性的做法,采用浮置板侧置隔振器无疑是经济而有效的。

参考文献:

- [1] Huang K, Bai H B, Li D W, et al. Coupling dynamic analysis of floating slab track in the urban rail transit[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 253-255: 2047-2051.
- [2] Ling L, Li X, Yin J, et al. Vibration characteristics of damping pad floating slab on the long-span steel truss cable-stayed bridge in urban rail transit[J]. Engineering Structures, 2019, 191:92-103.
- [3] Zhai W M, Xu P, Wei K. Analysis of vibration reduction characteristics and applicability of steel-spring floating-slab track[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(4): 215-222.
- [4] 丁德云,刘维宁,李克飞,等. 钢弹簧浮置板轨道参数研究[J]. 中国铁道科学,2011,32(1):30-35.
Ding Deyun, Liu Weining, Li Kefei, et al. Study on the track parameters of steel spring floating slab[J]. China Railway Science, 2011,32(1): 30-35.
- [5] 韦凯,周顺华,翟婉明,等. 地铁-建筑物合建结构中钢弹簧浮置板轨道基频优选影响因素[J]. 中国铁道科学,2011,32(4):8-13.
Wei Kai, Zhou Shunhua, Zhai Wanming, et al. Influencing factors of base frequency optimization of steel spring floating slab track in subway-building joint structure[J]. China Railway Science, 2011,32(4): 8-13.
- [6] Hussein M F M. 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, 321:363-374.

- [7] 程 珊,刘林芽,王少锋. 高架钢弹簧浮置板轨道减振特性研究及参数优化[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(5):146-150.
Cheng Shan, Liu Linya, Wang Shaofeng. Vibration reduction study and parameter optimization of steel spring floating slab tracks in metro viaducts[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(5): 146-150.
- [8] 蔡成标, 刘增杰, 赵汝康. 浮置板轨道过渡段的动力学设计[J]. 铁道建筑, 2003, (12): 41-44.
Cai Chengbiao, Liu Zengjie, Zhao Yukang. Dynamic design of transition zone of floating slab track[J]. Railway Construction, 2003, (12): 41-44.
- [9] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学 [M]. 第四版. 北京: 科学出版社, 2015.
Zhai Wanming. Vehicle-track Coupled Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] 翟婉明, 夏 禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Zhai Wanming, Xia He. Train-track-bridge Dynamic Interaction: Theory and Engineering Application [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [11] 蔡成标, 颜 华, 姚 力. 遂渝线无砟轨道动力学性能研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(8):39-43.
Cai Chengbiao, Yan Hua, Yao Li. Study on dynamic performance of ballastless track of Suining-Chongqing railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 24(8): 39-43.
- [12] 中华人民共和国铁道部. GB/T 5599-1985, 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京:1985.
The Ministry of Railways of the People's Republic of China. GB/T 5599-1985, Railway vehicles-specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test [S]. Beijing: 1985.
- [13] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2360-1993, 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准[S]. 北京:1993.
The Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB/T 2360-1993, Test method and evaluation standard for dynamic performance test of railway locomotive [S]. Beijing: 1993.
- [14] 蔡成标, 徐 鹏. 弹性支承块式无砟轨道结构参数动力学优化设计[J]. 铁道学报, 2011, 33(1):73-79.
CAI Chengbiao, XU Peng. Dynamic optimization design of the structural parameters of low vibration track [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1):73-79.

Vibration performance of a prefabricated steel-spring floating-slab track for urban express rail transit

ZHENG Xiang¹, LUO Xin-wei¹, LI Ping¹, ZHU Wen-hai²

(1.Guangzhou Metro Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, China;

2.Gerb (Qingdao) Vibration Control Co. Ltd., Qingdao 266108, China)

Abstract: In order to explore the applicability of the steel spring floating slab track in urban express rail transit, the dynamic interaction between the CRH6 train and the floating slab track was simulated effectively, and the parameter optimization analysis of the floating slab track structure was also performed. Based on the vehicle-track coupled dynamics theory, the CRH6 train-precast steel spring floating slab track coupled dynamic model was established. In the model, the vehicle is regarded as a multi-rigid body system consisting of a car body, a frame and a wheel set. Meanwhile, the lateral, vertical, side-rolling, head-shaking, and the nodding movements of each part are considered. Regarding the rail as the Bernoulli-Euler beam supported by the elastic points, the rail support points are arranged according to the actual fastener node spacing, and the vertical, lateral and rotational degrees of freedom of the left and right strand rails. The vertical direction of the floating slab is regarded as a two-way bending elastic sheet on an elastic foundation, and the horizontal direction of the floating slab is regarded as a rigid body, considering its translational and rotational freedom; the concrete foundation is also regarded as a two-way bending elastic sheet on the elastic foundation. The normal force between the wheel and rail is determined by the Hertz nonlinear elastic contact theory, and the tangential force is determined by the nonlinear creep theory. Research shows that the traditional prefabricated steel spring floating slab track used for low-speed lines can be used in the urban express rail transit and the high-speed railways. The prefabricated steel spring floating slab track for this project can achieve significant vibration reduction effects under the premise of train operation safety. The invention of the side-mounted vibration isolator is an exploration to improve the stability of the floating slab track. Compared with the traditional method of increasing the thickness of the floating slab track to improve the quality and the stability of the track, the floating slab side-mounted vibrator is economical and effective. Therefore, the novel prefabricated steel spring floating slab track can meet the requirements of the urban express rail transit and even high-speed railways. Moreover, the research results can provide support for the dynamic design of the prefabricated steel spring floating slab beds at speeds of 160 km/h.

Key words: vehicle-track coupled dynamics; track; urban express rail transit; novel prefabricated steel spring floating slab; vibration performance

作者简介: 郑 翔(1982-),男,硕士,高级设计师。电话:18024665512;E-mail:zheng_x_gzdsjy@126.com

通讯作者: 李 平(1987-),男,硕士,高级工程师。电话:19118867946;E-mail:1877043690@qq.com