

市域快线现浇钢弹簧浮置板轨道动力性能研究*

李平¹, 罗信伟¹, 朱文海²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司 广州, 510000) (2. 隔而固(青岛)振动控制有限公司 青岛, 266108)

摘要 为了验证长度为 25 m 现浇钢弹簧浮置板轨道在市域快线轨道交通中的适用性, 基于车辆-轨道耦合动力学理论, 建立 CRH6 动车-现浇钢弹簧浮置板轨道耦合动力学模型及其数值方法。通过仿真计算, 对快速行车条件下现浇浮置板道床与列车的耦合动力学性能进行仿真分析, 评估长为 25 m 现浇钢弹簧浮置板道床高速行驶的安全性、舒适性和稳定性, 重点研究了现浇浮置板隔振器空间布置和厚度对系统动力性能的影响。研究表明: 隔振器布置越密, 道床自身的稳定性越好; 现浇钢弹簧浮置板道床厚度变化对城际动车组的运行安全性指标和乘坐舒适性指标影响不大; 增加浮置板厚度, 能够略微提升车辆的运行平稳性; 当城际动车组运行时, 平稳性和舒适度评级等指标均满足限值, 即现浇浮置板轨道能够满足市域快线行车的要求。该研究结果可为时速为 160 km 及以上的现浇钢弹簧浮置板道床的动力学设计提供支撑。

关键词 市域快线; 现浇钢弹簧浮置板轨道; 动力性能; 车辆-轨道耦合系统

中图分类号 U213.2; TH6

引言

随着我国轨道交通的飞速发展, 城市化进程的进一步加速, 大部分经济较发达城市都需要一种介于干线铁路和一般低速城市轨道交通之间的线路系统, 用于进一步加紧中心城区和郊区的联系。因此, 时速为 160 km 及以上的市域快线得以迅速发展, 并用于满足城市居民中、长距离的出行要求^[1]。由于发展市域快线轨道交通给环境造成了较大程度的影响, 尤其是列车运营引起的振动噪声问题尤为突出^[2-3], 因此亟需一种高效减振措施用于解决日益严重的振动噪声问题^[4]。

浮置板轨道是目前公认的减振效果最好的一种城市轨道交通减振形式之一, 在世界范围内得到了广泛应用^[5-6]。目前, 在我国浮置板轨道施工中, 现浇浮置板轨道使用较多。马龙祥等^[7]进行了预制短板型式与现浇长板型式浮置板轨道的对比分析, 表明现浇长型浮置板轨道结构具有更好的低频荷载的分摊承载能力, 同时对隔振器的损耗也更小。袁俊等^[8]发现现浇浮置板相对预制浮置板有更好的隔振效果。郭亚娟^[9]等通过建立浮置板轨道有限元模型, 验证了隔振器的空间设置对浮置板的减振效果具有较大影响。程珊等^[10]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^[11]基于广州地铁采用的浮置板轨道, 建立了车辆-轨道耦合动力模型, 并重点对浮置板轨道过渡段进行了动力学分析。目前, 在我国已有的研究与工程实践中, 现浇钢弹簧浮置板主要用于中低速轨道交通线路, 缺少用于较高速快线(时速为 160 km 及以上)的经验^[12-13], 同时也缺乏相关文献对现浇浮置板用于市域快线轨道交通的行车安全性及稳定性的影响分析。

笔者建立车辆-浮置板轨道耦合动力学模型, 通过其仿真技术对快速行车条件下(时速为 160 km 及以上)市域快线现浇钢弹簧浮置板道床的轮轨动力学性能进行分析, 包括现浇浮置板隔振器空间布置和现浇板厚度对行车安全性及浮置板稳定性的影响, 最终根据计算结果, 评估优化方案下现浇钢弹簧浮置板道床上城际动车组的运行安全性以及浮置板稳定性能。

1 现浇钢弹簧浮置板轨道计算模型

1.1 车辆-浮置板轨道耦合动力学模型

基于车辆-轨道耦合动力学理论^[14], 建立车辆-

* 广州市越秀区科技工业和信息化局科技计划资助项目(2017-GX-024)

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-11-19

浮置板轨道耦合动力学模型,如图 1 所示。该模型将 CRH6 视为多刚体系统,该系统由车体、构架及轮对组成,同时系统的每个部位都考虑其平移与侧滚运动。轨道模型采用弹性点支承基础,支承点按扣件节点间距布置。浮置板采用弹性基础上的薄板模型;混凝土基础也视为弹性地基上的双向弯曲弹性薄板。轮轨之间的相互作用充分考虑其非线性因素^[15-16]。

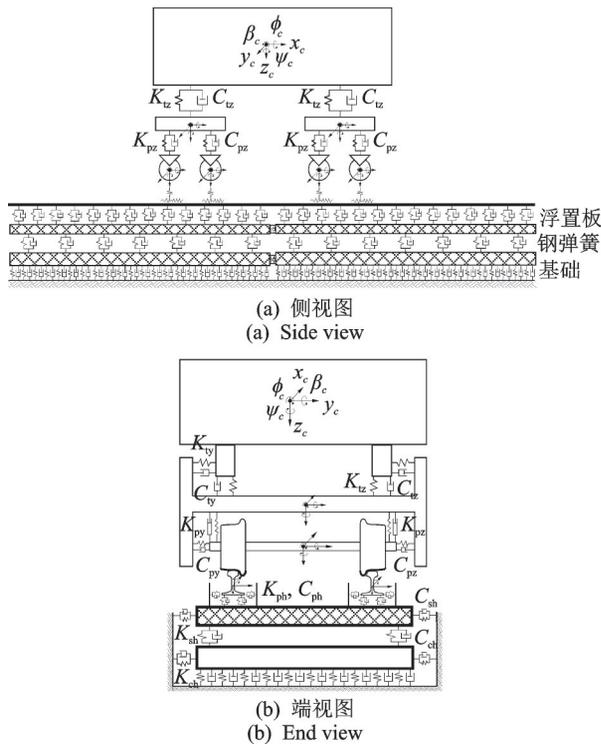


图 1 车辆-浮置板轨道耦合动力学模型

Fig.1 Vehicle-track coupled dynamic model for floating slab track

1.2 车辆动力学方程

车辆模型由车体、构架及轮对组成,需要同时考虑三者的振动,其运动方程如式(1)~(3)所示。

轮对运动方程为

$$M_w \left(\ddot{Y}_{wi} + \frac{V^2}{R_{wi}} + r_0 \ddot{\phi}_{sewi} \right) = -F_{yfl_i} - F_{yfr_i} + F_{L_yi} + F_{R_yi} + N_{L_yi} + N_{R_yi} + M_w g \phi_{sewi} \quad (1)$$

构架运动方程为

$$M_t \left[\ddot{Y}_t + \frac{V^2}{R_t} + (r_0 + H_{tw}) \ddot{\phi}_{seti} \right] = -F_{yfl(2i-1)} + F_{yfl(2i)} - F_{yfr(2i-1)} + F_{yfr(2i)} - F_{ytRi} + M_t g \phi_{seti} \quad (2)$$

车体运动方程为

$$M_c \left[\ddot{Y}_c + \frac{V^2}{R_c} + (r_0 + H_{tw} + H_{bt} + H_{cb}) \ddot{\phi}_{sec} \right] = M_c g \phi_{sec} - F_{yR1} - F_{yR2} + F_{yL1} + F_{yL2} + F_{yR1} + F_{yR2} \quad (3)$$

其中: M_c 为车体质量; M_t 为构架质量; M_w 为轮对质量; H_{cb} 为列车车体的质心点与二系悬挂系统上端平面的距离; H_{bt} 为二系悬挂系统下端平面与列车构架质心点的距离; H_{tw} 为列车构架质心点与列车轮对质心点的距离; F_{L_yi}, F_{R_yi} 为第*i*轮对左、右轮所受蠕滑力在*y*轴上的分量($i=1\sim 4$); N_{L_yi}, N_{R_yi} 为第*i*轮对左、右轮所受法向力在*y*轴上的分量($i=1\sim 4$); F_{yfl_i}, F_{yfr_i} 为一系悬挂左右横向力($i=1\sim 4$); F_{yL_i}, F_{yR_i} 为二系悬挂左右横向力($i=1\sim 2$); F_{yR_i} 为二系横向止挡的横向力($i=1\sim 2$); M_{R_i} 为抗侧滚力矩($i=1\sim 2$); ϕ_{sewi} 为第*i*位轮对中心位置外侧钢轨的超高角度值; ϕ_{seti} 为第*i*个列车构架中心位置外侧钢轨的超高角度值; ϕ_{sec} 为列车车体中心位置外侧钢轨的超高角度值; R_{wi} 为第*i*位轮对中心位置线路中心线曲率半径; r_0 为车轮的名义滚动半径^[17]。

1.3 轨道动力学方程

轨道模型由钢轨及浮置板组成,需要同时考虑两者的振动,其运动方程如式(4)~(6)所示。

钢轨动力学方程为

$$E_r J_{ry} \frac{\partial^4 z_r(x, t)}{\partial x^4} + \rho_r A_r \frac{\partial^2 z_r(x, t)}{\partial t^2} = - \sum_{i=1}^{N_s} F_{rVi}(t) \delta(x - x_{Fi}) + \sum_{j=1}^{N_w} P_{Vj}(t) \delta(x - x_{Pj}) \quad (4)$$

$$\ddot{q}_{zk}(t) + \frac{E_r I_y}{\rho_r A_r} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^4 q_{zk}(t) = - \sum_{i=1}^{N_s} F_{rVi} Z_k(x_{Fi}) + \sum_{j=1}^{N_w} P_{Vj} Z_k(x_{Pj}) \quad (k=1\sim N_z) \quad (5)$$

其中: E_r, G_r 分别为 60 型钢轨的弹性模量和剪切模量; A_r, ρ_r 分别为 60 型钢轨的横截面积和质量密度; J_{ry}, J_{rz} 分别为 60 型钢轨横断面相对于水平轴和垂直轴的惯性矩; J_{r0}, J_{rt} 分别为 60 型钢轨截面的极惯性矩和扭转惯性矩; N_s, N_w 分别为计算长度中的承轨槽数和轮轴数; $F_{rVi}, F_{rti}, F_{rti}$ 分别为第*i*个支点的垂向反作用力、横向反作用力和扭转反作用力; P_{Vj}, P_{Hj}, P_{Tj} 分别为第*j*个车轮作用产生的 60 型钢轨垂直力值、横向力值和扭矩值; x_{Fj}, x_{Pj} 分别为 60 型钢轨的第*i*个支点的*x*坐标值、第*j*个列车轮对处的*x*坐标值^[18]。

浮置板动力学方程为

$$\frac{\partial^4 z_s(x, y, t)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z_s(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + 2 \frac{\partial^4 z_s(x, y, t)}{\partial y^4} + \frac{C_s}{D_s} \frac{\partial z_s(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\rho_s h_s}{D_s} \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{D_s} \left[\sum_{i=1}^{N_p} P_{rVi}(t) \delta(x - x_{Pi}) \delta(y - y_{Pi}) - \sum_{j=1}^{N_f} F_{sVj}(t) \delta(x - x_{Fj}) \delta(y - y_{Fj}) - \sum_{k=1}^{N_c} F_{cVk}(t) \delta(x - x_{Ck}) \delta(y - y_{Ck}) \right] \quad (6)$$

其中： P_{rVi} 为轨道板上第*i*个钢轨扣结点的垂向力； F_{sVj} 为轨道板下第*j*个钢弹簧隔振器的垂向反力； F_{cVk} 为浮置板之间第*k*个剪力铰的垂向剪切力； $z_s(x, y, t)$ 为浮置板的垂向位移或挠度； x_{Pi}, y_{Pi} 分别为浮置板上第*i*个钢轨扣结点的位置； x_{Fj}, y_{Fj} 分别为浮置板下第*j*个钢弹簧隔振器的位置； x_{Ck}, y_{Ck} 分别为浮置板之间第*k*个剪力铰的位置； $h_s, \rho_s, C_s, E_s, \nu_s, D_s$ 依次为浮置板的厚度、密度、阻尼系数、弹性模量、泊松比和弯曲刚度^[19]。

1.4 轮轨相互作用原理

车辆-浮置板轨道耦合动力系统是一个动态交

互系统,轮轨关系是车辆子系统和轨道子系统之间的链接^[14]。在上述车辆轨道动力学方程中,只要确定了轮轨相互作用力,就可以应用数值模拟方法,通过编写计算程序来进行车辆轨道系统的动力学模拟分析^[19]。在本研究中,采用轮轨接触原理确定了轮轨接触几何形状,并根据该方法进一步计算了轮轨法向力和轮轨蠕变力。在计算轮轨力之后,可以将上述值代入车辆和轨道的动力学方程中,作为CRH6车轮的反作用力和现浇钢弹簧浮置板轨道的外部负载进行相关动力学分析。

2 现浇浮置板轨道动力学分析计算参数

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,CRH6城际动车组与现浇钢弹簧浮置板轨道部分关键参数如表1所示。

为了对比隔振器的布置对车辆-轨道耦合系统的影响,隔振器3-3布置与隔振器2-2布置的现浇钢弹簧浮置板轨道结构分别如图2,3所示。其中,隔振器3-3布置是指每隔3个扣件或者承轨槽布置一个隔振器,隔振器2-2布置是指每隔2个扣件或者承

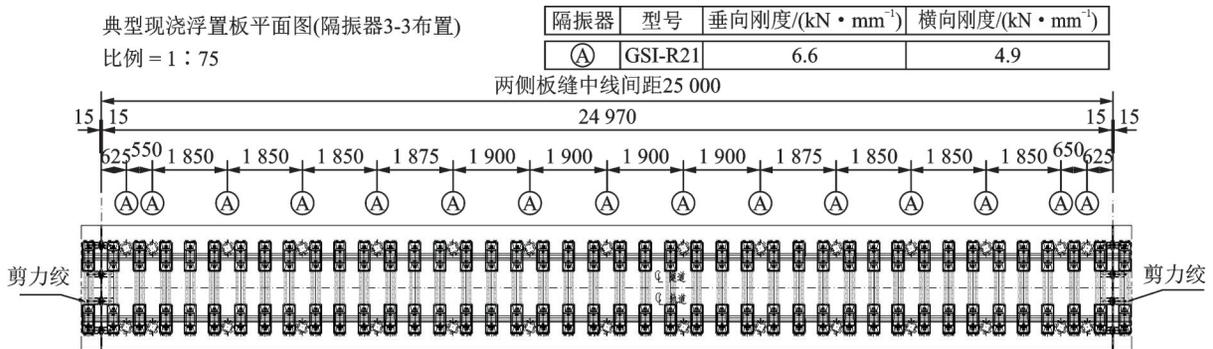


图2 隔振器3-3布置现浇浮置板平面图(单位:mm)

Fig.2 Vibration isolator 3-3 layout of the cast-in-place floating slab (unit: mm)

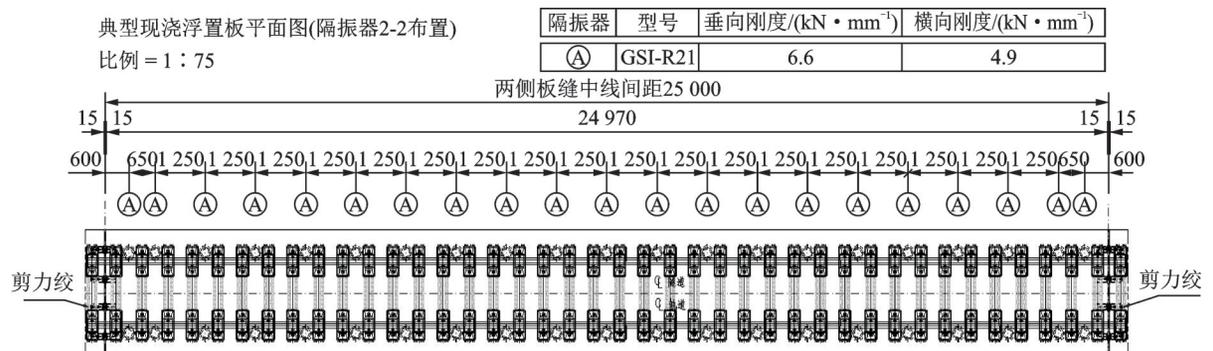


图3 隔振器2-2布置现浇浮置板平面图(单位:mm)

Fig.3 Vibration Isolator 2-2 layout of cast-in-place floating slab (unit: mm)

表 1 CRH6 城际动车组与现浇钢弹簧浮置板轨道部分关键参数

Tab.1 Part of the key parameters of CRH6 intercity electric multiple-unit and cast-in-place steel spring floating slab track

参数	数值
车体质量/t	37.2
车体点头转动惯量/($t \cdot m^2$)	1 426.8
构架质量/t	2.7
构架点头转动惯量/($t \cdot m^2$)	1.48
轮对质量/t	1.935
轮对点头转动惯量/($t \cdot m^2$)	0.15
一系钢簧垂向刚度(每轴箱)/($MN \cdot m^{-1}$)	1.3
一系垂向阻尼(每轴箱)/($kN \cdot s \cdot m^{-1}$)	9.8
空气簧垂向刚度/($MN \cdot m^{-1}$)	0.22
二系垂向阻尼/($kN \cdot s \cdot m^{-1}$)	9.8
转向架中心距/mm	17 500
轴距/mm	2 500
车轮滚动圆横向跨距/mm	1 493
车轮滚动圆直径/mm	860
轮对内侧距/mm	1 353
钢轨弹性模量/Pa	2.059×10^{11}
钢轨泊松比	0.3
钢轨密度/($kg \cdot m^{-3}$)	7.83×10^3
钢轨外形	CN60
扣件垂向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	3.0×10^7
扣件横向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	2.0×10^7
扣件垂向阻尼/($N \cdot s \cdot m^{-1}$)	7.5×10^4
扣件横向阻尼/($N \cdot s \cdot m^{-1}$)	5.0×10^4
扣件间距/m	0.625
轨道板长度/m	25
轨道板宽度/m	3
轨道板厚度/m	0.35, 0.45, 0.55
轨道板弹性模量/Pa	3.9×10^{10}
轨道板泊松比	0.24
轨道板密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2.5×10^3
路基等效刚度/($N \cdot m^{-1}$)	5.1×10^{10}

轨槽布置一个隔振器。

3 现浇浮置板轨道计算结果分析

3.1 车辆-浮置板轨道耦合动力学模型可靠性验证

图 4 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数值仿真的结果比较。浮置板长为 25 m, 为现浇浮置板道床, 地铁列车通过速度约为 55 km/h。由图 4 可轻易分辨地铁车辆从驶来-通

过-驶离过程中振动测点处振动加速度响应。当地铁列车各节车转向架依次通过振动测点时, 浮置板道床振动加速度有明显的波动。仿真计算中, 浮置板道床垂向加速度更能清楚反映各个轮对通过测点的振动状态。

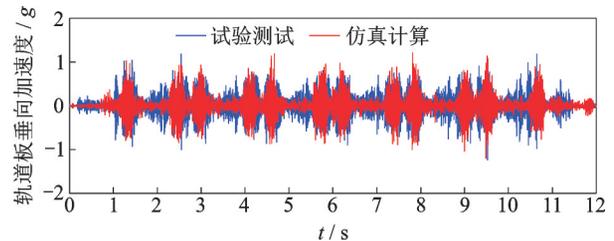


图 4 测试与数值仿真的结果比较

Fig.4 Comparison of the results of test and numerical simulation

图 4 表明, 浮置板道床垂向振动加速度试验测试和仿真计算最大值分别为 1.22 g 和 1.18 g, 有效值分别为 0.172 g 和 0.163 g。仿真计算结果比测试结果略偏小, 但均在可接受误差范围内。上述结果表明, 仿真计算模型能够较好地反映浮置板道床线路的振动响应过程, 笔者所建立的城际列车车辆-浮置板轨道耦合动力学模型能够用于评估快速行车条件下浮置板道床的轮轨动力性能。

3.2 现浇浮置板隔振器设置对于行车安全性及浮置板稳定性的影响

以长度为 25 m 的现浇钢弹簧浮置板道床隔振器 3-3 布置与 2-2 布置为研究对象, 分析 CRH6 动车以不同速度、在不同半径线路上运行的安全性、平稳性、舒适性及浮置板的稳定性, 如表 2~5 所示。其中: 直线-140 表示车辆以 140 km/h 的速度通过直线区段工况, 其他直线工况同理; 曲线-140 表示车辆以 140 km/h 的速度通过半径为 1 100 m 曲线工况; 曲线-160 表示车辆以 160 km/h 的速度通过半径为 1 500 m 曲线工况, 其中曲线外轨超高为 150 mm, 曲线与直线之间的缓和曲线长度为 100 m; “ $L=25$ m, 3-3 间距”和“ $L=25$ m, 2-2 间距”分别表示隔振器以 3-3 和 2-2 间距布置两种长度为 25 m 的现浇钢弹簧浮置板道床; 平稳性指标指车体垂向、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^[20-21], 本研究采用 Sperling 指标^[22]。

由表 2, 3 可知, 隔振器 2-2 和 3-3 间距布置现浇钢弹簧浮置板道床上城际动车组的运行安全性指标与乘坐舒适性指标均相近, 即 2 种工况快速行车条

表2 浮置板道床轮轨安全性指标

Tab.2 Safety indicators of wheel - rail for floating slab track bed

计算 工况	轮轴横向力/kN		轮轨垂向力/kN	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	12.860	13.131	75.320	75.229
直线-160	12.562	12.656	79.071	78.819
直线-200	14.344	14.445	91.426	90.867
曲线-140	29.791	29.644	88.718	88.878
曲线-160	26.815	27.441	87.627	88.023
限值 ^[20-21]	60.92	60.92	250	250
计算 工况	脱轨系数		轮重减载率	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	0.182	0.183	0.174	0.169
直线-160	0.174	0.176	0.202	0.195
直线-200	0.188	0.187	0.258	0.257
曲线-140	0.323	0.323	0.300	0.301
曲线-160	0.289	0.290	0.302	0.311
限值 ^[20-21]	1.0	1.0	0.9	0.9

表3 浮置板道床车辆平稳性与舒适性指标

Tab.3 Indicators of vehicle stability and comfort for floating slab track bed

计算 工况	车体横向加速度/g		车体垂向加速度/g	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	0.034	0.034	0.047	0.046
直线-160	0.034	0.034	0.053	0.053
直线-200	0.040	0.040	0.054	0.057
曲线-140	0.053	0.054	0.045	0.044
曲线-160	0.061	0.062	0.049	0.049
限值 ^[20-21]	0.10	0.10	0.15	0.15
计算 工况	横向平稳性指标		垂向平稳性指标	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	1.712	1.713	1.551	1.559
直线-160	1.951	1.953	1.826	1.833
直线-200	2.002	2.006	1.866	1.886
曲线-140	2.117	2.117	1.630	1.639
曲线-160	2.176	2.183	1.658	1.666
限值 ^[20-21]	2.5(优)	2.5(优)	2.5(优)	2.5(优)

件下,城际动车组的动力学性能相当。

由表4、5可知,隔振器2-2间距布置浮置板道床对应的钢轨位移、浮置板位移及振动加速度均小于隔振器3-3间距布置浮置板道床,这主要由浮置板的支撑刚度及接缝刚度决定^[23]。两种浮置板道床上钢轨的垂向和横向加速度总体相差不大,其说明钢轨振动加速度的大小主要由轮轨作用力决定。上

表4 浮置板道床钢轨振动指标

Tab.4 Vibration indicators of the rail on floating slab track bed

计算 工况	钢轨垂向位移/mm		钢轨垂向加速度/g	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	4.229	3.520	7.894	7.874
直线-160	4.277	3.595	8.754	8.760
直线-200	4.376	3.794	10.433	10.433
曲线-140	4.455	3.654	7.833	7.840
曲线-160	4.487	3.670	8.883	8.887
计算 工况	钢轨横向位移/mm		钢轨横向加速度/g	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	0.323	0.244	0.357	0.338
直线-160	0.407	0.306	0.387	0.395
直线-200	0.591	0.426	0.641	0.660
曲线-140	0.357	0.322	1.110	1.106
曲线-160	0.297	0.349	1.141	1.138

表5 浮置板振动指标

Tab.5 Vibration indicators of floating slab track

计算 工况	浮置板垂向位移/mm		浮置板垂向加速度 均方根值/g	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	3.794	2.764	0.236	0.226
直线-160	3.884	2.775	0.251	0.239
直线-200	3.954	2.831	0.276	0.265
曲线-140	4.006	2.966	0.238	0.227
曲线-160	4.053	2.983	0.266	0.256
计算 工况	浮置板横向位移/mm		浮置板横向加速度 均方根值/g	
	3-3	2-2	3-3	2-2
直线-140	0.182	0.120	0.022	0.022
直线-160	0.223	0.148	0.032	0.029
直线-200	0.466	0.278	0.067	0.055
曲线-140	0.202	0.174	0.038	0.035
曲线-160	0.197	0.185	0.041	0.034

述结果表明,隔振器布置越密,道床自身的稳定性越好。

3.3 现浇浮置板厚度对于行车安全性及浮置板稳定性影响

为了体现浮置板轨道板厚度对车辆-轨道动力学特性影响,分析厚度不同情况下列车稳定性与安全性的变化。在其他参数不变的情况下,给出了350,450和550 mm 3种钢弹簧浮置板道床厚度下,隔振器分别为3-3与2-2布置的现浇长度25 m钢弹

簧浮置板道床的轮轨安全性指标、车体稳定性指标、钢轨垂向振动指标以及浮置板垂向振动指标等计算结果,如表6~9所示。

表 6 轮轨安全性指标

Tab.6 Wheel-rail safety indicators

计算 工况	脱轨系数					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	0.183	0.182	0.182	0.181	0.183	0.183
直线-160	0.175	0.174	0.174	0.178	0.176	0.174
直线-200	0.187	0.188	0.188	0.186	0.187	0.187
曲线-140	0.317	0.323	0.328	0.322	0.323	0.326
曲线-160	0.280	0.289	0.295	0.282	0.290	0.294
计算 工况	轮重减载率					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	0.173	0.174	0.166	0.169	0.169	0.165
直线-160	0.196	0.202	0.198	0.193	0.195	0.195
直线-200	0.243	0.258	0.274	0.246	0.257	0.274
曲线-140	0.291	0.300	0.304	0.295	0.301	0.304
曲线-160	0.309	0.302	0.314	0.313	0.311	0.317

表 7 车体稳定性指标

Tab.7 Vehicle stability indicators

计算 工况	横向平稳性指标					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	1.713	1.712	1.711	1.713	1.713	1.713
直线-160	1.953	1.951	1.945	1.953	1.953	1.951
直线-200	2.003	2.002	1.993	2.006	2.006	2.001
曲线-140	2.118	2.117	2.115	2.117	2.117	2.117
曲线-160	2.181	2.176	2.172	2.185	2.183	2.180
计算 工况	垂向平稳性指标					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	1.565	1.551	1.551	1.556	1.559	1.563
直线-160	1.843	1.826	1.826	1.830	1.833	1.837
直线-200	1.898	1.866	1.872	1.878	1.886	1.898
曲线-140	1.634	1.630	1.638	1.627	1.639	1.649
曲线-160	1.667	1.658	1.664	1.657	1.666	1.676

由表6可知,隔振器2-2和3-3间距布置现浇钢弹簧浮置板道床上,城际动车组的运行安全性指标与乘坐舒适性指标均相近,即对于当前所分析的2种25 m现浇钢弹簧浮置板道床,快速行车条件下的城际动车组的动力学性能相当。

由表7可知,对于隔振器分别为3-3布置与2-2布置的长度为25 m的现浇钢弹簧浮置板道床,其厚度变化对城际动车组的运行安全性与乘坐舒适性指标影响不大。随着钢弹簧浮置板道床厚度的增加,轮轨安全性指标略微有所增大,而车辆平稳性及乘坐舒适性指标稍微有所减小。其原因在于,浮置板厚度的增加使轨道板过渡接缝处轮轨冲击增大,同时轨道板的低频稳定性有所提高。

表 8 钢轨垂向振动指标

Tab.8 Rail vertical vibration indicators

计算 工况	钢轨垂向位移/mm					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	4.920	4.229	3.710	3.767	3.520	3.263
直线-160	4.955	4.277	3.786	3.856	3.595	3.361
直线-200	5.210	4.376	3.930	4.064	3.794	3.541
曲线-140	5.232	4.455	3.874	3.947	3.654	3.396
曲线-160	5.242	4.487	3.898	3.974	3.670	3.422
计算 工况	钢轨垂向振动加速度均方根值/g					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	7.903	7.896	7.882	7.874	7.870	7.871
直线-160	8.754	8.755	8.753	8.757	8.756	8.757
直线-200	10.426	10.424	10.464	10.394	10.424	10.474
曲线-140	7.821	7.832	7.845	7.832	7.834	7.838
曲线-160	8.855	8.882	8.918	8.855	8.884	8.926

表 9 浮置板垂向振动指标

Tab.9 Floating slab vertical vibration indicators

计算 工况	浮置板垂向位移/mm					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	4.487	3.798	3.404	3.260	2.785	2.423
直线-160	4.485	3.936	3.449	3.270	2.797	2.422
直线-200	4.660	4.063	3.637	3.371	2.861	2.608
曲线-140	4.861	4.051	3.417	3.570	3.060	2.612
曲线-160	4.867	4.109	3.525	3.592	3.032	2.657
计算 工况	浮置板垂向加速度均方根值/g					
	3-3			2-2		
	350	450	550	350	450	550
直线-140	0.288	0.245	0.208	0.281	0.234	0.201
直线-160	0.306	0.263	0.222	0.298	0.252	0.214
直线-200	0.356	0.301	0.269	0.340	0.283	0.252
曲线-140	0.297	0.250	0.213	0.283	0.238	0.204
曲线-160	0.322	0.279	0.247	0.315	0.270	0.239

由表8可知,隔振器2-2间距布置浮置板道床对应的钢轨位移、浮置板位移及振动加速度均小于隔振器3-3间距布置浮置板道床,这主要由浮置板的支撑刚度及接缝刚度决定。2种浮置板道床上钢轨的垂向和横向加速度总体相差不大,说明钢轨振动加速度的大小主要由轮轨作用力决定。上述结果表明,隔振器布置越密,道床自身的稳定性越好。

由表9可知,现浇长度为25 m长隔振器3-3布置与2-2布置钢弹簧浮置板道床厚度变化对钢轨垂向和横向振动加速度影响不大。随着钢弹簧浮置板道床厚度的增加,钢轨垂向位移有一定幅度的减小,轨道板垂向、横向位移和垂向、横向加速度有所减小。

4 结 论

1) 隔振器2-2和3-3间距布置的现浇长度为25 m钢弹簧浮置板道床上,城际动车组的运行安全性指标与乘坐舒适性指标均相当。隔振器2-2间距布置浮置板道床对应的钢轨位移、浮置板位移及振动加速度均小于隔振器3-3间距布置浮置板道床,即隔振器布置越密,道床自身的稳定性越好。

2) 现浇钢弹簧浮置板道床厚度变化对城际动车组的运行安全性与乘坐舒适性指标影响不大。增加浮置板厚度,能够略微提升车辆的运行平稳性,即浮置板厚度的增加,使浮置板轨道整体质量增加,从而减小列车经过时轨道板整体的振动响应。

3) 当城际动车组以140,160和200 km/h的时速运行在25 m(3-3间距)和25 m(2-2间距)2种现浇钢弹簧浮置板道床的直线区段时,轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数和轮重减载率这4项轮轨安全性指标均小于合格限值;车体垂横向加速度均低于合格限值,平稳性指标为优级;舒适度评级为非常舒适。

4) 在曲线工况 $R=1\ 100\text{ m}$, $R=1\ 500\text{ m}$ 条件下,当城际动车组以140和160 km/h的速度通过隔振器分别为3-3布置和2-2布置的2种现浇钢弹簧浮置板道床时,轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数和轮重减载率这4项轮轨安全性指标均小于合格限值;车体垂横向加速度低于合格限值,横向和垂向平稳性指标为优级;舒适度评级为舒适。

5) 现浇浮置板轨道能够满足市域快线行车安全性与稳定性的要求,表明现浇浮置板轨道可以用于时速160 km及以上市域快线领域。

参 考 文 献

- [1] 李忍相,冯爱军,万学红.北京市域快线主要技术指标研究[J].都市轨道交通,2014,27(3):27-30.
LI Renxiang, FENG Aijun, WAN Xuehong. Main technical indicators of Beijing regional express railway [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(3): 27-30. (in Chinese)
- [2] 刘加华,练松良.城市轨道交通振动与噪声[J].交通运输工程学报,2002(1):29-33.
LIU Jiahua, LIAN Songliang. Vibration and noise of the urban rail transit [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002(1): 29-33. (in Chinese)
- [3] 马蒙,刘维宁,金浩,等.轨道交通振动对建筑物影响程度的预测方法[J].中国铁道科学,2011,32(2):27-32.
MA Meng, LIU Weining, JIN Hao, et al. Prediction method of the vibration influence on buildings induced by rail transit [J]. China Railway Science, 2011, 32(2): 27-32. (in Chinese)
- [4] 张斌,俞泉瑜,户文成,等.地铁减振措施过渡段减振性能的测试与分析[J].振动、测试与诊断,2013,33(1):138-143.
ZHANG Bin, YU Quanyu, HU Wencheng, et al. Test and analysis of vibration reduction performance of transition section of metro vibration reduction measures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 138-143. (in Chinese)
- [5] 张宝才,徐祯祥.螺旋钢弹簧浮置板隔振技术在城市轨道交通减振降噪上的应用[J].中国铁道科学,2002(3):70-73.
ZHANG Baocai, XU Zhenxiang. Applications of the steel spring floating track bed for vibration and noise control in urban rail traffic [J]. China Railway Science, 2002(3): 70-73. (in Chinese)
- [6] 孙晓静,刘维宁,张宝才.浮置板轨道结构在城市轨道交通减振降噪上的应用[J].中国安全科学学报,2005(8):65-69.
SUN Xiaojing, LIU Weining, ZHANG Baocai. Applications of floating slab track framework for vibration and noise control in urban rail traffic [J]. China Safety Science Journal, 2005(8): 65-69. (in Chinese)
- [7] 马龙祥,刘维宁,姜博龙.预制短型与现浇长型浮置板轨道动力特性及服役性能比较研究[J].土木工程学报,2016,49(9):117-122.
MA Longxiang, LIU Weining, JIANG Bolong. Comparative study on dynamic characteristics and service performances of prefabricated short and cast-in-place long floating slab tracks [J]. China Civil Engineering

- Journal, 2016, 49(9): 117-122. (in Chinese)
- [8] 袁俊, 胡卫兵, 孟昭博, 等. 浮置板轨道结构类型比较及其隔振性能分析[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(2): 223-228.
YUAN Jun, HU Weibing, MENG Zhaobo, et al. Comparison of different models for assessing vibration isolation performances of floating slab track system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2): 223-228. (in Chinese)
- [9] 郭亚娟, 杨绍普, 郭文武. 钢弹簧浮置板轨道结构的动力特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2006, 26(2): 146-150.
GUO Yajuan, YANG Shaopu, GUO Wenwu. Analysis of dynamic characteristics of track structure of steel spring floating slab[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2006, 26(2): 146-150. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 蒋崇达, 雷晓燕. 城市轨道交通钢弹簧浮置板轨道动力特性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2013(3): 34-41.
JIANG Chongda, LEI Xiaoyan. Analysis of the dynamic properties of urban rail transit steel spring floating slab[J]. Modern Urban Transit, 2013(3): 34-41. (in Chinese)
- [13] 魏金成, 何平, 李宇杰. 地铁钢弹簧浮置板轨道的减振效果分析[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(S): 17-25.
WEI Jincheng, HE Ping, LI Yujie. Analysis of vibration reduction effect of metro steel spring floating slab track[J]. China Railway Science, 2012, 33(S): 17-25. (in Chinese)
- [14] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015: 12-22.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 袁菁江, 唐进锋, 刘文峰, 等. 客货共线铁路桥上减振型CRTSⅢ板式无砟轨道减振层刚度动力学影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1614-1621.
YUAN Qingjiang, TANG Jinfeng, LIU Wenfeng, et al. Dynamic effect analysis of damping layer stiffness of vibration reducing CRTS III slab ballastless track on mixed passenger and freight railway bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7): 1614-1621. (in Chinese)
- [17] 王明猛, 朱涛, 王小瑞, 等. 一种逆结构滤波法的轨道车辆轮轨力识别[J]. 振动工程学报, 2019, 32(4): 602-608.
WANG Mingmeng, ZHU Tao, WANG Xiaorui, et al. An inverse structural filter method for wheel-rail contact forces identification of railway vehicles [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(4): 602-608. (in Chinese)
- [18] 张媛. 车辆-轨道-桥梁系统的空间耦合振动及其环境振动[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [19] 耿传智, 余庆. 地铁轨道结构减振性能的仿真分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 39(1): 85-89.
GENG Chuanzhi, YU Qing. Shock absorption analysis of subway rail track structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 39(1): 85-89. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国铁道部. GB/T 5599—1985 铁道车辆力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 1985.
- [21] 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: 中华人民共和国铁道部, 1993.
- [22] 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(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(1): 73-79. (in Chinese)
- [23] 徐琪烽. 有砟轨道沥青混凝土底砟层动力特性及其应用的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.



第一作者简介:李平,男,1987年6月生,硕士、高级工程师。主要研究方向为城市轨道交通轨道设计理论与技术。曾发表《现代有轨电车工程轨道系统特殊设计要点》(《都市轨道交通》2019年第32卷第2期)等论文。
E-mail: 1877043690@qq.com