

地铁钢弹簧浮置板轨道结构特殊工况振动分析

张 辉¹ 王金刚¹ 李驰宇¹ 王旭蕊²

(1. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司,310004,杭州;2. 石家庄铁道大学土木工程学院,050043,石家庄//第一作者,工程师)

摘 要 钢弹簧浮置板是目前地铁工程中广泛应用于特殊减振地段的轨道结构。在实际工程建设中,受机器状态、地质情况以及操作人员水平限制等因素的影响,盾构施工的区间隧道往往会产生较大偏差,导致钢弹簧浮置板轨道结构高度不足,甚至调线调坡后仍然存在轨道结构高度不足的问题。因此,需要改变钢弹簧浮置板的结构尺寸或隔振器布置方式来解决该问题,同时也带来了钢弹簧浮置板减振性能的改变。以合肥某地铁工程为依托,利用有限元方法对特殊结构尺寸、特殊隔振器布置方式下的钢弹簧浮置板结构进行了模态分析,获取了其在不同工况下的振动特性。

关键词 地铁;钢弹簧浮置板;振动特性;隔振器;有限元方法

中图分类号 U211.3; U213.2⁺41

DOI 10.16037/j.1007-869x.2020.07.008

Vibration Analysis of Metro Steel Spring Floating Slab Track in Special Working Conditions

ZHANG Hui, WANG Jingang, LI Chiyu, WANG Xurui

Abstract Steel spring floating slab track is a kind of track structure widely used in special vibration damping areas for metro engineering. In actual constructions, due to the influences of machine state, geological condition and operator level limit, large deviations often occur in the interval tunnels with shield construction, which leads to insufficient orbital height of steel spring floating slab track. This problem exists even after the slope adjustment. Therefore, it is necessary to

change the structural size of steel spring floating slab track or the layout of vibration isolators, but at the same time, it also brings the change of vibration reduction performance of steel spring floating slab track. Based on a metro project in Hefei City, the finite element method is used to conduct a modal analysis of steel spring floating slab track structure in special structural dimensions and special vibration isolator arrangement schemes, so as to obtain the vibration characteristics of slab track under different working conditions.

Key words metro; steel spring floating slab track; vibration characteristics; vibration isolator; finite element method

First-author's address CREEC East China Survey and Design Co., Ltd., 310004, Hangzhou, China

1 钢弹簧浮置板隔振机理简介

地铁列车于轨道结构上运行时,轮轨发生滚动接触,同时受到轨道不平顺的影响,轮轨间会产生高频的冲击力和低频的响应力,从而产生强烈的振动并沿着轨道结构向隧道传递^[1-2]。钢弹簧浮置板减振轨道是将具有一定质量和刚度的混凝土道床板浮置于钢弹簧隔减器上,构成质量-弹簧-隔振系统,可有效达到隔振减振的目的。

从结构组成上看,钢弹簧浮置板主要由基底、浮置板、隔振器、轨枕、扣件以及钢轨等组成^[3]。钢弹簧浮置板横断面如图 1 所示。

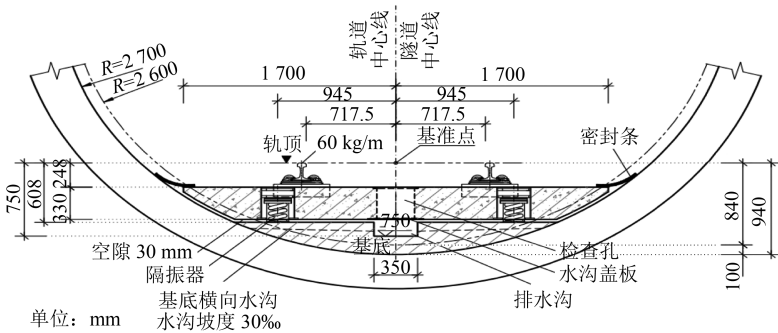


图 1 钢弹簧浮置板横断面图

钢弹簧浮置板通过钢弹簧和钢套筒组成的隔振器减振。隔振效率通常用隔振系数 η 和隔振效率 E 来衡量^[4-6]：

$$\begin{cases} \eta = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \\ E = (1 - \eta) \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中：
 ξ ——阻尼比；
 λ ——激振频率与系统固有频率的比值。

2 轨道结构高度不足的处理方案

合肥某地铁区间根据测量单位提供的断面数据，盾构隧道轨道结构高度在其设计值附近上下波动：向下波动最大为 0.164 m，位于 YSK24+624 里程附近；此项波动会造成接触网结构安装空间不足。向上波动最大为 0.079 m，位于 YSK24+931 里程附近；此项波动会造成轨道结构高度不足。特别是在 YSK24+931 和 YSK24+961 这 30 m 的范围内，由于施工人员操作不当，出现偏差后，不及时上报，自行强行纠偏造成盾构隧道由轨道结构高度低于设计值 0.079 m 迅速变为高于设计值 0.125 m，从而出现较为严重的错台现象。调线调坡后^[7]，仍有大量断面的轨道结构高度不满足原设计要求，最大不足量为 0.093 m。为保证钢弹簧浮置板减振效果，根据 3 种不同的轨道结构高度拟定不同的调整方案。

1) 轨下道床高度 ≥ 840 mm 时，采用标准道床型式；

2) 轨下道床高度 ≥ 780 mm 且 < 840 mm 或者水平侵限时，采用内移钢弹簧（隔振器）位置的措施；

3) 轨下道床高度 ≥ 745 mm 且 < 780 mm 时，采用减薄浮置板厚度同时内移钢弹簧（隔振器）位置的措施，以减少道床整体高度。浮置板质量不够时，在浮置板顶部、钢轨之间增加“凸台”，以确保减振效果。

调整后的钢弹簧浮置板参数如表 1 所示。

表 1 调整后的钢弹簧浮置板参数

方案	隔振器中心位置/mm	浮置板厚度/mm
方案 1	945	330
方案 2	800	330
方案 3	760	330
方案 4	760	260
方案 5	760	260

注：隔振器中心位置的数据为距线路中心线的距离；方案 5 在浮置板顶部与钢轨之间增加凸台

3 钢弹簧浮置板振动分析

3.1 钢弹簧浮置板有限元模型

钢轨与轨枕以弹簧连接替代 DTⅥ2 型扣件，设置相同的刚度等参数；轨枕与浮置板采用绑定约束连接，并对两部件的位移等特性进行约束；隔振器弹簧以设置刚度及阻尼比的弹簧部件进行仿真。

在有限元模型网格划分上，对于钢轨、扣件、基底等非研究对象采用 200 mm 的网格尺寸进行粗略划分。而对于本文的研究对象浮置板结构，起初采用 100 mm 的网格进行划分，但造成了最后试算时网格大变形引起的不收敛问题而中断。最后，秉承严谨的研究态度，为增加数值计算的准确性，在牺牲部分时间的基础上采用了 20 mm、30 mm、40 mm 尺寸的网格划分进行试算，结果表明这 3 种尺寸的试算结果均能计算完整且计算结果差值不大于结果数量级的 5%。最后，将浮置板的网格划分尺寸定为 40 mm。

钢弹簧浮置板有限元模型如图 2 所示。钢弹簧浮置板有限元模型的有关参数见表 2。

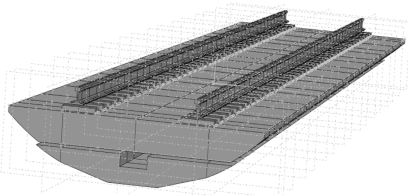


图 2 钢弹簧浮置板有限元模型

表 2 钢弹簧浮置板有限元模型参数

部件名称	参数	取值
钢轨	质量/(kg/m)	60
	长度/m	25
浮置板	厚度/mm	330
	密度/(kg/m ³)	2 400
	弹性模量/MPa	3.25×10 ⁴
隔振器	垂直刚度/(N/m)	6.66×10 ⁶
	阻尼比	0.07
基底	密度/(kg/m ³)	2 400
	弹性模量/MPa	3.25×10 ⁴

3.2 隔振器中心位置对振动特性的影响

受区间隧道断面尺寸的影响，在轨道结构高度不足的情况下，为了保证轨道板厚度不变，必须通过调整隔振器的横向位置以确保隔振器能安装到位。常用的调整方法是减小隔振器中心到线路中心的位置。根据表 1 中的方案 1、方案 2、方案 3，浮置板厚度为 330 mm，隔振器中心距线路中心的距离

分别为 945 mm、800 mm、760 mm。本文共提取了浮置板 8 阶振动数据。不同隔振器中心位置的浮置板振动特性见表 3。浮置板结构模态示意图如图 3 所示。3 种不同方案下浮置板前 8 阶固有频率随振动阶数变化曲线如图 4 所示。

从表 3 及图 4 可知,浮置板系统的固有频率随振动阶数的增加呈上升趋势。但在实际振动研究中,一般只研究前几阶模态。从浮置板的前 3 阶固有频率上看,隔振器横向间距的变化对浮置板的振动特性影响较小。根据施工现场情况,隔振器中心位于距离线路中心线为 800 mm 及 800 mm 以下的位置正处于钢轨下方,因此也为隔振器安装及后期养护维修带来了不便。

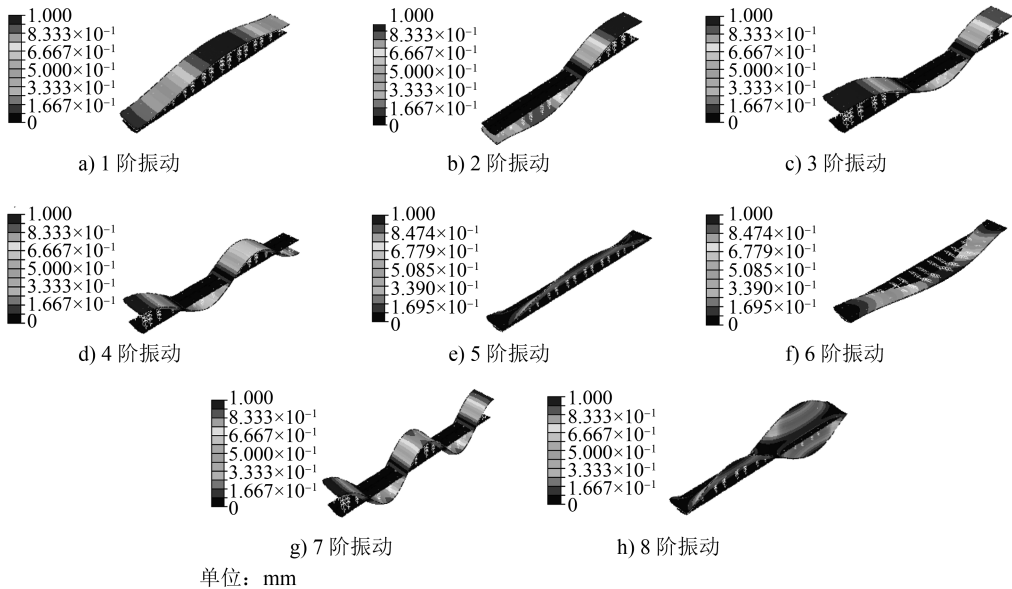


图 3 浮置板结构模态示意图

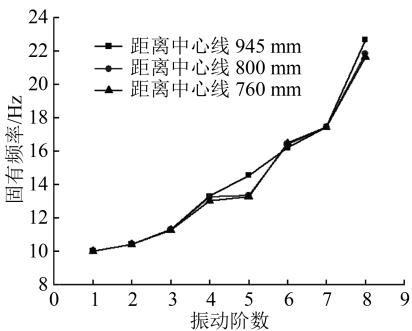


图 4 三种工况下浮置板前 8 阶固有频率随振动阶数变化曲线图

图 3 则展示了浮置板 1~8 阶模态下的振型。由图 3 可知,1~4 阶振型符合其形态从近似弓形到愈加密集的正弦周期曲线的规律。5 阶及以上振型

表 3 不同隔振器中心位置时浮置板的振动特性

振动阶数	不同隔振器中心位置时浮置板的振动固有频率/Hz		
	945 mm	800 mm	760 mm
1	10.012	10.014	10.012
2	10.418	10.416	10.414
3	11.295	11.287	11.284
4	13.296	13.280	13.029
5	14.552	13.343	13.275
6	16.210	16.428	16.481
7	17.451	17.433	17.428
8	22.680	21.851	21.645

发生了突变,但是在工程中几乎不会发生,此处不做过多研究。

3.3 浮置板厚度对振动特性的影响

在盾构施工偏差较大的影响下,当调线调坡或者减小基底厚度仍然存在轨道结构高度不足时则需要削减浮置板的厚度。根据表 1 中的方案 3 及方案 4,隔振器中心距离线路中心线为 760 mm,浮置板厚度从 330 mm 削减为 260 mm。不同厚度浮置板振动特性见表 4。

由表 4 可知,随着浮置板厚度的减小,浮置板各阶振动固有频率增大。260 mm 厚浮置板的低阶固有频率比 330 mm 厚浮置板的低阶固有频率增大了约 1 Hz。

表 4 不同厚度浮置板振动特性

振动阶数	不同厚度浮置板的振动固有频率/Hz	
	厚度为 330 mm 时	厚度为 260 mm 时
1	10.012	11.012
2	10.414	11.350
3	11.284	12.037

根据式(1)获得两种厚度的浮置板的隔振效率,如图 5 所示。由于列车运行时产生的激振频率均高于轨道结构的固有频率。因此,从图 5 中可以看出,削减浮置板厚度会降低其隔振效率。由此亦可得出,浮置板的低阶固有频率越低,其减振性能越好。

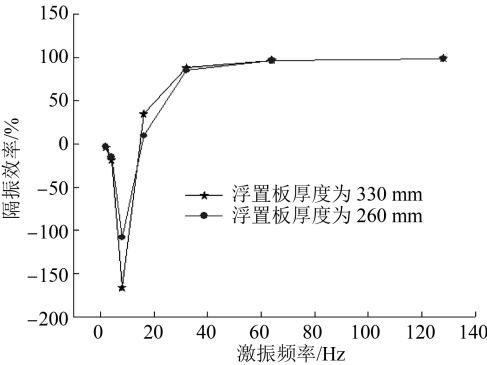


图 5 不同厚度浮置板的隔振效率

3.4 增设凸台浮置板振动特性分析

为满足工程要求,在降低轨道结构高度的同时,提出了在浮置板中心部位增设凸台的方案,如图 6 所示。此方案中隔振器中心距线路中心线距离为 760 mm,浮置板厚度为 260 mm,增设厚度为 180 mm、宽度为 900 mm 的凸台,即表 1 中的方案 5。260 mm 厚增设凸台后的浮置板振动特性与 330 mm 厚无凸台的浮置板振动特性对比见表 5。

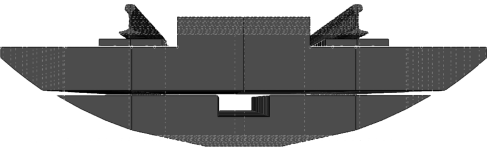


图 6 增设凸台的钢弹簧浮置板有限元模型

260 mm 厚增设凸台的浮置板振动特性与 260 mm 厚无凸台的浮置板振动特性对比见表 6。

由表 5 及表 6 数据可得,260 mm 厚同时增设凸台浮置板的低阶固有频率与 330 mm 厚无凸台浮置板相比低阶固有频率有所提高,但差值很小;与 260 mm 厚无凸台浮置板相比,260 mm 厚增设凸台浮置板的低阶固有频率有所降低,且差值较大。根据 3.3

节中结论“浮置板的低阶固有频率越低,减振性能越好”,因此削减浮置板厚度同时增设凸台可保持浮置板较好的隔振性能。

表 5 260 mm 厚增设凸台的浮置板与 330 mm 厚无凸台的浮置板振动特性对比

振动阶数	260 mm 厚有凸台浮置板固有频率/Hz	330 mm 厚无凸台浮置板固有频率/Hz	差值/Hz
1	10.089	10.012	0.077
2	10.521	10.414	0.107
3	11.497	11.284	0.213

表 6 260 mm 厚增设凸台的浮置板与 260 mm 厚无凸台的浮置板振动特性对比

振动阶数	260 mm 厚有凸台浮置板固有频率/Hz	260 mm 厚无凸台浮置板固有频率/Hz	差值/Hz
1	10.089	11.012	-0.923
2	10.521	11.350	-0.829
3	11.497	12.037	-0.540

4 结语

本文以合肥某地铁工程为依托,采用真实设计参数,利用有限元方法对钢弹簧浮置板结构特殊工况下的振动特性进行建模仿真计算。对比分析了由于轨道结构高度不够问题而采取的几种处理方案,并获得了以下主要结论:

- 1) 隔振器中心距离线路中心线位置在 945 ~ 760 mm 范围内的变化对浮置板的振动特性影响较小;布置隔振器横向位置时应避免将隔振器布置于钢轨下方,以免带来安装及后期养护维修的不便。
- 2) 浮置板的低阶固有频率越低,减振性能越好;采取削减浮置板厚度的方式会降低钢弹簧浮置板的隔振性能。
- 3) 削减浮置板厚度损失的减振性能可通过在浮置板中心部位增设凸台来弥补。260 mm 厚同时增设凸台的浮置板的低阶固有频率与 330 mm 厚无凸台浮置板相近,两方案浮置板振动特性近似一致,因此,削减浮置板厚度同时增设凸台可保持浮置板较好的隔振性能。
- 4) 以改变钢弹簧浮置板结构尺寸或隔振器布置方式来解决地铁工程中轨道结构高度不足的问题时,需综合考虑道床钢筋布置、观察孔设置、信号计轴器设置、轨道排水及后期养护维修等因素。为提高隔振器本身减振性能,应力求在较少削减浮置板厚度或不设凸台的情况下解决上述问题^[8-9]。

(下转第 50 页)

3.4 传感器布置方案

通过构架不同端部实测振动数据以及构架受力分析可知,对于单转向架,非导向轴构架端部振动加速度幅值一直大于导向轴构架端部,同一根轴左右侧构架端部差异不大。因此对于传感器布置建议如下两种方案:方案 1 安装在 1 轴和 4 轴构架端部,方案 2 安装在 2 轴和 3 轴构架端部。对于单辆车辆,两个转向架车轮磨损状态基本相同,无论以哪个方向运行,方案 1 和方案 2 均能够确保测试轴端中有 1 根轴为非导向轴,可检测到构架横向振动加速度最大值。

4 结论

1) 实测数据分析表明,影响首次报警限速持续时间的线路因素主要在车站到岔区,即进、出站道岔附近正线未打磨部分长度、进出站道岔长度(站坪长度)以及工务或电务车间道岔距离车站出站道岔的距离。

2) 在保证车辆运行安全的基础上,以最大限度保证运营秩序为原则,当车辆首次出现报警,若车辆限速值为 200 km/h,建议首次报警限速持续时间不小于 106 s。

3) 构架不同端部实测振动数据以及构架受力分析表明,由于同一转向架前后轮对蛇行运动存在相位差,非导向轴上方构架端部受到导向轴力的叠加影响,其横向振动加速度幅值一直大于导向轴构架端部。因此在传感器布置时可采用 1、4 轴端布置或 2、3 轴端布置。这两种布置方式均可检测到构架横向振动加速度最大值,确保车辆运行安全。

参考文献

- [1] CEN. Railway Applications-Testing for the Acceptance of Running Characteristics of Railway Vehicles-Testing of Running Behaviour and Stationary Tests; DIN EN 14363; 2005 [S]. Berlin: BSI, 2005.
- [2] UIC. Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of Views of their Dynamic Behavior-Safety-Track Fatigue-Ride Quality (2ed edn): UIC Code 518 [S]. Paris: International Union of Railways, 2003.
- [3] 石田, 弘明, 刘克鲜. 铁道车辆脱轨安全性评定标准[J]. 国外铁道车辆, 1996(5): 27.
- [4] The Commission Of The European Communities. Concerning a Technical Specification for Interoperability Relating to 'Rolling stock' Sub-system of The Trans-European High-Speed Rail System: TSI L84/132 [S]. Brussels: Official Journal of the European Union, 2007.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB 5599—1985 [S]. 北京: 商务印书馆, 1985.
- [6] 贾璐. 高速车辆动力学性能评价方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [7] 魏来. 高速列车相关运行安全性问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [8] 姜萍. 最忙碌的高铁线: 京沪高铁发车间隔 5 分钟 [N/OL]. 央广网, (2016-02-01) [2018-06-02]. http://china.cnr.cn/xwwgf/20160201/t20160201_521301606.shtml.
- [9] 张海洋. 车辆运行安全实时检测技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [10] 任尊松, 翟婉明, 王其昌. 轮轨接触几何关系在道岔系统动力学中的应用[J]. 铁道学报, 2011(5): 11.
- [11] 国家铁路局. 铁路线路设计规范: TB 10098—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.

(收稿日期: 2018-08-28)

(上接第 44 页)

参考文献

- [1] 吴磊. 地铁车辆一钢弹簧浮置板轨道藕合动态行为的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [2] 于春华. 城市轨道交通轨道减振设计与研究[J]. 铁道工程学报, 2007(4): 77.
- [3] 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(1): 30.
- [4] 蒋崇达. 内置式钢弹簧浮置板轨道动力特性分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2013.
- [5] 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(2): 146.

- [6] 宋晶. 地铁轨道结构的减振性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [7] 司耀旺. 地铁线路调线调坡设计探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2016(3): 81.
- [8] 刘建利. 钢弹簧浮置板的现有不足分析及优化建议[J]. 都市快轨交通, 2014(6): 97.
- [9] 吴信岑. 浮置板轨道工程施工管理与控制[J]. 中国高新技术企业, 2011(1): 141.

(收稿日期: 2018-08-08)