

侧置式剪力铰连接条件下列车 - 钢弹簧浮置板 动力性能的耦合分析

孟 伟¹, 刘 洋¹, 张 宁², 杜振兴³

(1. 隔而固(青岛)振动控制有限公司, 山东 青岛 266108; 2. 隔而固(青岛)结构设计
事务所有限公司, 山东 青岛 266108; 3. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266525)

摘要: 为了研究侧置式剪力铰连接条件下, 预制钢弹簧浮置板轨道结构的稳定性及剪力铰受力状况, 文章基于国内某轨道交通线路预制钢弹簧浮置板道床工程应用实例, 通过 Universal Mechanism 动力学仿真软件建立 4 套侧置式剪力铰连接条件下列车 - 钢弹簧浮置板动力耦合分析模型, 分析了列车在 120 km/h 速度下通过直线段、曲线半径 $R=800$ m, 超高 120 mm 曲线段和超高 105 mm 曲线段 3 种工况下各位置剪力铰受力及轨道结构的稳定性。研究表明: 1) 列车通过直线段时板中剪力铰受力明显大于板边剪力铰, 板中两套剪力铰受力基本一致, 板边两套剪力铰受力基本一致。左侧和右侧钢轨下轨道板垂向位移基本相同且满足限值要求; 2) 列车通过曲线段时板中剪力铰受力明显大于板边剪力铰, 左轨(外轨)侧剪力铰受力明显大于右轨(内轨)侧剪力铰。左轨(外轨)下轨道板垂向位移大于右轨(内轨)下轨道板垂向位移且满足限值要求。

关键词: 轨道交通; 钢弹簧浮置板; 剪力铰; 轨道结构稳定性

中图分类号: TU921

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2025)10 - 0031 - 06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.10.122

Coupling analysis of dynamic performance of train-steel spring floating slab under side mounted shear dowels connection conditions

MENG Wei¹, LIU Yang¹, ZHANG Ning², DU Zhenxing³

(1. GERB(Qingdao) Vibration Control Co., Ltd., Qingdao 266108, Shandong, China; 2. GERB(Qingdao) Structural Design Co., Ltd., Qingdao 266108, Shandong, China; 3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, China)

Abstract: In order to study the structure stability of prefabricated steel spring floating slab track and stress condition of shear dowel under side mounted shear dowels connection conditions, based on the application example of a prefabricated steel spring floating slab track bed project on a domestic rail transit line, the stability of prefabricated steel spring floating slab track structure and the stress state of shear hinges under the condition of side mounted shear hinge connection are studied. A dynamic coupling analysis model of the train steel spring floating slab under four sets of side mounted shear dowels connection conditions is established using universal mechanism dynamic simulation software. The force of the shear dowel at each position and the stability of the track structure are analyzed under three working conditions of the train passing through a straight section, a curve radius $R=800$ m, a cant 120 mm curve section, and a cant 105 mm curve section at a speed of 120 km/h. Research has shown that when a train passes through a straight section, the force on the shear dowel in the slab is significantly greater than that on the edge of the slab. The force on the two sets of shear dowel in the

收稿日期: 2025 - 04 - 16

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2024QE441)

作者简介: 孟 伟(1991—), 男, 工程师, 从事轨道交通隔振道床方面的研究。

slab is basically the same, and the force on the two sets of shear dowel on the edge of the slab is basically the same. The vertical displacement of the track bed under the left and right rails is basically the same and meets the limit requirements; When the train passes through the curved section, the force on the shear dowel in the middle of the slab is significantly greater than that on the edge of the slab, and the force on the shear dowel on the left rail (outer rail) side is significantly greater than that on the right rail (inner rail) side. The vertical displacement of the lower track bed of the left rail (outer rail) is greater than that of the lower track plate of the right rail (inner rail) and meets the limit requirements.

Key words: rail transit; steel spring floating slab; shear dowel; stability of track structure

近二十年间,我国城市轨道交通系统呈现高速发展态势,极大地便利了人们的出行,推动了城市的高效运转。然而,地铁运行引发的振动与噪声污染问题也日益凸显。近年来,为了进一步减少地铁振动对周边居民日常生活的影响,地铁建设单位积极探索新技术,采取了多种针对轨道专业的减振降噪措施,在众多方案中,具有独特隔振性能的钢弹簧浮置板系统凭借突出优势,在工程应用中崭露头角^[1-3]。其中,预制钢弹簧浮置板充分体现了装配式的建筑理念,既能提升板体质量,又能加快施工速度,逐渐成为浮置板系统的主流选择,为城市轨道交通隔振系统开拓了新方向。预制钢弹簧浮置板往往受制于当下的施工工艺,其板长一般不大于 6.0 m,致使钢弹簧浮置板系统刚度连续性显著降低,即板缝显著增多。板缝处恰恰为刚度突变位置,直接导致列车通过时产生参数激励^[4],诱发振动产生的能量在板端出现叠加效应,导致该位置动力响应会被放大^[5]。因此工程上常在板缝处设置剪力铰以协调板端变形,减小这种不利影响。本工程建设单位提出预制板间用侧置式剪力铰连接。

目前,国内学者对浮置板系统的动力特性和隔振性能做了大量研究,但专门针对侧置式剪力铰受力及其轨道结构稳定性研究尚不完善。吴磊^[6]通过仿真分析表明剪力铰的作用随着其刚度的增大而增大。刘文武等^[7]采用 ABAQUS 数值分析软件研究了预制式浮置板分别应用上置式剪力铰、侧置式剪力铰、中置式剪力铰时浮置板板端位移,结果表明,上置式、侧置式剪力铰板端位移比中置式小。杨建近等^[1]通过建立列车-钢弹簧浮置板动力耦合有限元分析模型,分析了剪力铰对隔振系统的动力学影响,研究表明,剪力铰的设置可有效缓解列车通过板缝时轮轨冲击,对隔振效果有一定的作用。葛辉

等^[8]充分借助某地铁线路采集的一手实测数据,并结合有限元模拟数据,针对列车以多种不同车速通过钢弹簧浮置板区段时,浮置板垂向位移的动态变化进行了对比。其研究结论指出,浮置板垂向位移受列车速度变动的的影响极小,呈现出不敏感状态。李贵阔等^[9]基于轮轨-浮置板耦合动力分析模型,着重研究在差异化速度情况下浮置板垂向位移的变化特征。研究表明,浮置板的垂向位移与行车速度有一定的关联性。

本研究以国内某轨道交通预制钢弹簧浮置板项目为工程背景,应用 Universal Mechanism 软件建立了 4 套侧置式剪力铰连接条件下列车-钢弹簧浮置板动力耦合分析模型,分析列车在 120 km/h 速度下通过直线段、曲线半径 $R=800$ m, 超高 120 mm 曲线段和超高 105 mm 曲线段 3 种工况下各位置剪力铰受力及轨道结构的稳定性。验证了侧置式剪力铰应用于预制钢弹簧浮置板系统的技术可行性,为本工程及相似工程设计提供一定理论依据。

1 工程概况

国内某城市轨道交通十四号线二期工程线路长度为 11.9 km,全部采用地下敷设。包括地下车站共计 8 座(包括 3 座换乘站),平均站间距为 1.5 km。车辆采用国内标准 B 型车,轴重 14 t,6 辆编组,设计最高行车速度为 120 km/h。采用弹条 III 型分开式扣件,轨下净空 70 mm,隧道类型为圆形,结构高度为 880 mm。特殊减振地段,即隧道壁振动级插入损失 ≥ 15 dB 地段采用预制钢弹簧浮置板道床。

4.8 m 预制钢弹簧浮置板标准板规格型号: 4 770 mm \times 2 700 mm \times 370 mm(长 \times 宽 \times 厚)。每块标准板布置 8 个隔振器,刚度:隔振器 A(板端一组)12.5 kN/mm;隔振器 B(板中两组)7.4 kN/mm。

预制钢弹簧浮置板之间采用4套侧置式剪力铰连接。其平面布置如图1所示。

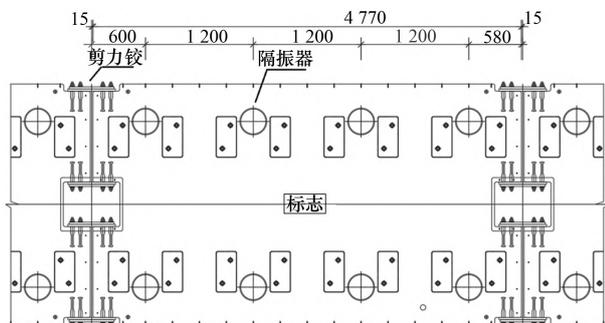


图1 4.8 m 标准预制板平面图 mm

本文选取其中3个区段的3种典型工况进行研究。

区段1: 直线段(工况一)。

区段2: 曲线半径 $R=800$ m, 线路超高 120 mm (工况二)。

区段3: 曲线半径 $R=800$ m, 线路超高 105 mm (工况三)。

2 钢弹簧浮置板系统理论分析模型

钢弹簧浮置板系统是典型的质量+阻尼+弹簧 ($m-c-k$) 系统。该系统工作原理在于巧妙利用了浮置板系统自身质量所产生的惯性力, 去抵消列车运行中产生的动荷载, 从而实现振动隔离的目的。

基于轮轨-浮置板耦合动力学理论, 以国内外广泛应用的轮轨动力学仿真检算模型为依据, 建立如图2所示的包括地铁车辆系统与钢弹簧浮置板系统耦合的理论模型。图中 K 为广义刚度, C 为广义阻尼。因该模型涉及的参数是广义的, 所以在此处未加解释, 下文将对涉及到的具体参数进行解释。

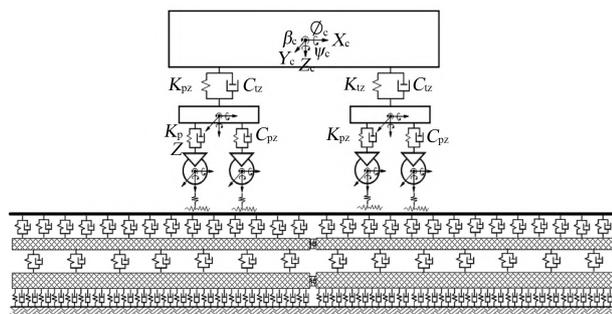


图2 轮轨-浮置板耦合理论模型示意

根据动力学基本原理, 可建立地铁车辆的动

力学方程为

$$M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = F \quad (1)$$

式中: M 为地铁车辆质量, kN; C 为地铁车辆阻尼, $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{mm}$; K 为地铁车辆的刚度, kN/mm ; \ddot{Z} 为地铁车辆的加速度, m/s^2 ; \dot{Z} 为地铁车辆的速度, m/s ; Z 为地铁车辆的位移, mm ; F 为地铁车辆自重和运行荷载组成的荷载, kN。

将地铁车辆与钢弹簧浮置板耦合, 可建立钢弹簧浮置板系统的动力学方程如下。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \quad (2)$$

式中: m 为该系统的质量, kN; \ddot{x} 为该系统的垂向加速度, m/s^2 ; c 为该系统的阻尼, $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{mm}$; \dot{x} 为该系统的垂向速度, m/s ; k 为该系统的垂向刚度, kN/mm ; x 为该系统的垂向位移, mm ; F_0 为该系统的总荷载, kN。

3 有限元数值分析

3.1 轮轨-浮置板动力耦合模型

UM (universal mechanism) 作为多体动力学领域专业仿真工具, 采用递归算法与 Haug 数值积分方法, 可实现复杂机械系统运动学/动力学行为的非线性时变特性高精度解算, 适用于多自由度刚体系统级复杂的刚柔耦合系统的分析, 尤其在轨道交通车辆与轨道动力学分析等领域有广泛应用。

本文基于钢弹簧浮置板系统理论分析模型, 应用 UM 软件构建了地铁车辆-钢弹簧浮置板, 即车辆子系统-轨道子系统动力耦合分析模型。其中车辆子系统由每节列车车体、转向架、轮对以及一系和二系的弹簧-阻尼悬挂装置构成, 形成一个多自由度振动系统, 所有部件均视为刚体 (忽略弹性变形)。轨道子系统中, 预制钢弹簧浮置板系统采用 Flexible Railway Track 模块模拟, 钢轨采用 3D Timoshenko 梁模拟, 扣件采用弹簧-阻尼单元模拟。因钢弹簧浮置板板厚度较板跨度及板宽度小得多, 故浮置板以面外变形为主 (垂向变形), 其面内刚度可视为无穷大。将浮置板被视为柔性体, 钢弹簧隔振器采用弹簧-阻尼模拟。浮置板之间考虑了剪力铰的作用, 本文将根据欧拉-伯努利梁理论计算纵向拉伸、剪切、弯曲刚度及其弯曲对剪切的影响, 因剪力铰主要以受剪、受弯为主, 故不考虑扭转变形。轨道模型参数如表1所示。

表 1 轨道模型参数

名称	数值	单位
钢轨弹性模量	2.059×10^{11}	Pa
钢轨泊松比	0.300	—
钢轨密度	7.830×10^3	kg/m^3
钢轨外形	CN60	—
扣件垂向刚度	40.000	kN/mm
扣件横向刚度	40.000	kN/mm
扣件垂向阻尼	20.000	$\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$
扣件垂向刚度	20.000	$\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$
扣件间距	0.600	m
轨道板长度	4.800	m
轨道板宽度	2.700	m
轨道板厚度	370.000	mm
轨道板瑞利阻尼	0.020	—
轨道板杨氏模量	3.5×10^{10}	Pa
轨道板泊松比	0.200	—
轨道板密度	2500.000	kg/m^3
隔振器 A 垂向刚度	12.500	kN/mm
隔振器 A 横向刚度	12.200	kN/mm
隔振器 B 垂向刚度	7.400	kN/mm
隔振器 B 横向刚度	7.100	kN/mm

本文应用 UM 软件建立了 4 套侧置式剪力铰连接条件下地铁列车-钢弹簧浮置板动力耦合分析模型,如图 3 所示。

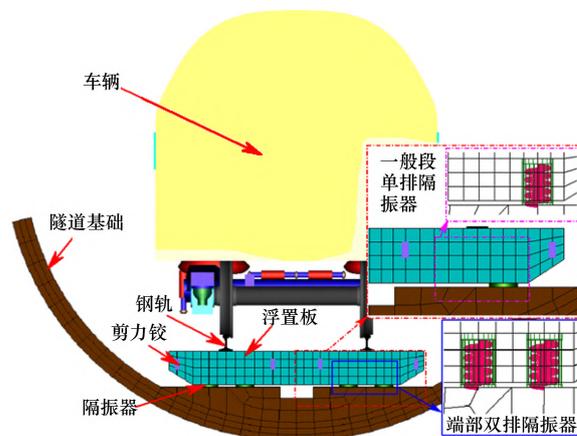


图 3 有限元数值分析模型

3.2 各工况下剪力铰受力分析

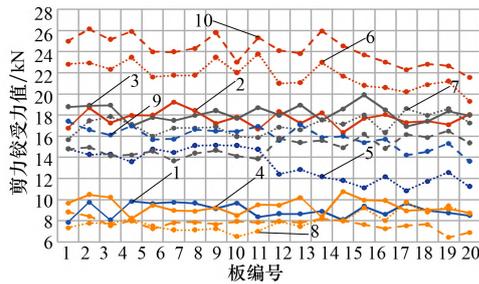
以每个工况区段中的 20 块预制钢弹簧浮置板为考察对象,各工况下剪力铰受力分析数据如表 2 所示。

以表 2 数据为依托,绘制各工况下各工况下剪力铰受力折线图如图 4 所示。

表 2 各工况下剪力铰受力分析结果

板编号	工况一				工况二				工况三			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	7.838	16.767	18.755	9.656	14.818	22.817	15.671	7.330	17.392	24.988	14.762	8.795
2	9.744	18.683	18.886	10.444	14.245	22.947	17.432	7.575	16.579	26.154	14.941	8.410
3	8.079	17.256	18.931	10.212	14.307	22.337	17.826	7.725	16.107	25.130	14.118	7.518
4	9.832	17.975	16.949	8.163	13.560	23.444	17.135	8.183	16.966	25.921	14.221	7.966
5	9.619	17.946	17.780	9.463	14.785	21.601	16.000	7.457	15.673	23.995	14.566	7.217
6	9.736	19.235	17.464	8.965	14.449	21.741	16.759	7.097	15.721	23.995	13.629	7.808
7	9.639	18.397	17.965	8.895	15.087	21.741	16.759	7.097	16.624	24.302	14.365	7.855
8	9.146	17.207	18.402	9.223	15.148	23.438	16.865	7.236	16.490	28.783	14.640	7.653
9	9.663	17.812	17.681	8.493	15.089	21.987	15.929	6.500	16.441	23.013	14.094	7.910
10	8.359	16.659	18.695	9.500	14.723	23.785	15.885	7.000	16.921	25.313	13.836	7.832
11	8.635	18.340	17.975	9.466	12.411	20.985	16.846	7.917	15.598	24.101	15.778	7.910
12	8.641	17.236	18.951	10.196	12.835	21.074	16.594	7.452	17.063	23.835	15.367	7.832
13	8.896	18.214	17.518	8.346	12.144	22.955	17.557	8.142	15.885	25.972	15.590	8.197
14	8.060	16.345	18.578	10.744	11.782	21.694	17.097	7.940	15.977	24.555	14.899	7.898
15	9.365	17.663	19.886	9.947	11.119	20.773	18.007	9.208	15.394	23.704	16.186	7.635
16	8.603	18.043	18.502	9.882	12.155	20.574	16.295	7.999	15.713	23.023	14.802	7.233
17	9.634	18.294	16.916	8.929	10.832	20.178	18.607	9.725	14.209	22.292	16.157	7.524
18	8.930	17.414	17.384	9.026	11.722	20.875	17.974	8.795	14.516	22.816	15.872	7.640
19	8.744	17.086	18.360	9.096	12.577	21.177	18.610	9.362	15.309	22.647	16.492	6.423
20	8.464	18.057	17.950	8.736	11.216	19.309	17.246	8.632	13.591	21.555	15.330	6.873

注:剪力铰编号从左向右依次为 a、b、c、d;表中单位均为 kN。



1—工况一 a; 2—工况一 b; 3—工况一 c; 4—工况一 d;
5—工况二 a; 6—工况二 b; 7—工况二 c; 8—工况二 d;
9—工况三 a; 10—工况三 b。

图4 各工况下剪力铰受力折线

由图4可知:

(1) 工况一条件下, a、d处剪力铰受力基本一致、b、c处剪力铰受力基本一致。

(2) 工况二条件下, b处剪力铰受力明显大于c处, a处剪力铰受力明显大于d处, 即左轨侧剪力铰明显大于右轨侧。因工况二位于曲线半径 $R=800\text{ m}$, 超高 120 mm 地段, 列车全速通过时由于超高设置不足, 不能全面平衡列车离心力, 导致左轨(外轨)侧受力较大。

(3) 工况三条件下, b处剪力铰受力明显大

于c处, a处剪力铰受力明显大于d处, 即左轨侧剪力铰明显大于右轨侧。其原因与工况二相同。

(4) 工况三各位置剪力铰受力明显大于工况二对应位置处剪力铰受力。工况二、三均位于曲线半径 $R=800\text{ m}$ 地段, 但工况三超高设置小于工况二, 导致列车全速通过时对外轨的冲击更大, 剪力铰受力亦更大。

(5) 综合三种工况下各位置处剪力铰受力情况分析可知, b处剪力铰受力明显大于a处, c处剪力铰受力明显大于d处。即靠近钢轨侧的剪力铰受力更大。进一步分析可知, 位于板中位置处的剪力铰对协调板缝两端相邻浮置板的垂向位移差发挥了更大的作用。

3.3 各工况下轨道结构稳定性分析

以每个工况区段中的20块预制钢弹簧浮置板为考察对象, 各工况下轨道结构稳定性分析数据见表3。其中轨道结构稳定性限值按现行《浮置板轨道技术规范》(CJJ/T 191—2012)第3.2.4条执行, 即浮置板最大垂向位移限值为 3 mm 。

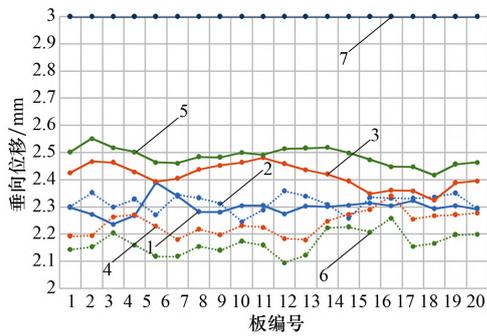
以表3数据为依托, 绘制各工况下浮置板最

表3 各工况下浮置板最大垂向位移分析结果

mm

板编号	工况一		工况二		工况三		限值
	左轨	右轨	左轨	右轨	左轨	右轨	
1	2.297 3	2.301 3	2.426 0	2.192 2	2.502 2	2.143 0	3.000 0
2	2.272 7	2.351 3	2.467 0	2.194 0	2.551 2	2.152 3	
3	2.236 2	2.299 2	2.462 9	2.263 4	2.518 0	2.203 2	
4	2.267 8	2.327 7	2.429 1	2.271 4	2.502 4	2.159 5	
5	2.389 3	2.271 0	2.393 2	2.229 0	2.464 2	2.117 1	
6	2.339 2	2.344 4	2.404 0	2.180 1	2.460 7	2.117 2	
7	2.281 3	2.332 3	2.437 7	2.217 8	2.483 5	2.154 7	
8	2.280 3	2.312 2	2.452 9	2.197 4	2.482 2	2.139 4	
9	2.304 5	2.245 3	2.462 9	2.230 3	2.500 1	2.173 1	
10	2.305 6	2.288 7	2.480 6	2.224 7	2.491 1	2.158 7	
11	2.274 0	2.357 9	2.458 2	2.183 4	2.514 2	2.094 3	
12	2.303 0	2.339 3	2.436 3	2.178 3	2.515 5	2.122 4	
13	2.306 2	2.308 9	2.419 8	2.246 8	2.519 0	2.189 2	
14	2.300 7	2.257 5	2.394 5	2.272 7	2.499 3	2.225 6	
15	2.314 3	2.334 8	2.348 6	2.289 8	2.473 5	2.207 6	
16	2.303 9	2.331 4	2.361 4	2.341 5	2.448 2	2.258 6	
17	2.323 2	2.330 9	2.358 6	2.255 0	2.447 3	2.154 1	
18	2.292 5	2.336 0	2.324 7	2.267 4	2.417 2	2.165 6	
19	2.304 6	2.350 0	2.388 2	2.270 0	2.456 7	2.197 0	
20	2.290 7	2.293 9	2.395 2	2.277 6	2.464 1	2.198 8	

大垂向位移折线图如图 5 所示。



1—工况一左轨；2—工况一右轨；3—工况二左轨；
4—工况二右轨；5—工况三左轨；
6—工况三右轨；7—限值。

图 5 各工况下浮置板最大垂向位移折线图

由图 5 可知：

(1) 工况一条件下，左右轨下浮置板的垂向位移基本一致。

(2) 工况二条件下，左轨下浮置板垂向位移明显大于右轨下浮置板垂向位移。这是因为工况二位于曲线半径 $R = 800$ m，超高 120 mm 地段，列车全速通过时由于超高设置不足，导致左轨受力较右轨大。

(3) 工况三条件下，左轨下浮置板垂向位移亦明显大于右轨下浮置板垂向位移。其原因与工况二相同。

(4) 工况三左轨下浮置板垂向位移大于工况二左轨下浮置板垂向位移，这是由于工况三超高设置小于工况二，列车轮对对左轨冲击更剧烈，导致左轨下浮置板位移更大。

(5) 综合三种工况数据分析可知，曲线地段由于限界的影响，超高往往设置不足，不能全面平衡列车离心力，导致左轨受到的轮轨冲击更剧烈。

4 结 论

(1) 列车通过直线段时板中剪力铰受力明显大于板边剪力铰，板中两套剪力铰受力基本一致，板边两套剪力铰受力基本一致。左侧右侧钢轨下轨道板垂向位移基本相同。

(2) 列车通过曲线段时，板中剪力铰受力明显大于板边剪力铰，左轨侧剪力铰受力及浮置板垂向位移明显大于右轨侧剪力铰及浮置板垂向位移。

(3) 列车通过曲线段时，工况三条件下列车轮对对左轨的冲击大于工况二。建议在满足限界条件下尽可能设置与车速相匹配的超高，或依据实设超高对列车实行限速通过。

(4) 线路投入运营后，运营维保单位应重点关注超高设置不足地段因轮轨冲击过大导致外侧钢轨波磨严重的的情况。

(5) 仿真检算结果表明，在三种工况下，浮置板在工况二条件下出现最大垂向位移，其位移值为 2.551 2 mm，小于限值 3 mm。该预制钢弹簧浮置板系统采用侧置式剪力铰连接是可行的。

参考文献：

- [1] 杨建近,朱胜阳,翟婉明. 浮置板剪力铰对列车-轨道耦合系统动力学行为的影响[J]. 振动与冲击, 2019,38(11):1-8.
- [2] ZHAI W, XU P. Analysis of vibration reduction characteristics and applicability of steel-spring floatingslab track[J]. Journal of Modern Transportation, 2011,19(4):215-222.
- [3] MA L, LIU W. A numerical train-floating slab track coupling model based on the periodic-Fourier-modal method[J]. Proc. Inst. Mech. Eng. Part F - J. Rail Rapid Transit, 2018,232(1):315-334.
- [4] 周顺华,张小会,杨新文等. 轨道交通隧道基底刚度对共建结构的振动影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(6):887-893.
- [5] LI Z G, WU T X. On vehicle/track impact at connection between a floating slab and ballasted track and floating slab track's effectiveness of force isolation[J]. Vehicle System Dynamics, 2009,47(5):513-531.
- [6] 吴磊. 地铁车辆-钢弹簧浮置板轨道耦合动态行为的研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [7] 刘文武,赵才友,贺利工,等. 预制式浮置板轨道隔振器/剪力铰设计参数优化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(11):4497-4506.
- [8] 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.
- [9] 李贵阔,刘帅. 行车速度对浮置板轨道结构振动的影响[J]. 科技创新,2015(22):87.