

地铁线路曲线段钢弹簧隔振器失效对列车运行安全影响分析

朱梅 韩翔宇 尹大伟 李嘉怡 赵树峰

(济南市交通工程质量与安全中心, 250399, 济南)

摘要 [目的]在浮置板轨道小半径曲线段,列车和轨道具有更复杂的动力响应特性。浮置板轨道系统中钢弹簧隔振器不仅起到减振作用,而且还对保证列车安全运行至关重要。因此,有必要深入研究钢弹簧隔振器局部失效对小半径曲线预制式浮置板轨道结构及列车运行安全的影响。[方法]以某地铁线路预制式浮置板轨道为例,采用 ABAQUS 有限元软件建立了车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,并通过实测数据验证了模型的有效性。根据所建立的模型,计算隔振器失效前后列车和轨道结构动态响应,并分析轨道结构及行车安全性指标的变化。此外,讨论了隔振器失效对剪力铰受力情况的影响,并校核了其强度。[结果及结论]轮重减载率和脱轨系数虽然有所增加,但满足相关规范要求,说明列车在隔振器失效时仍可维持运行安全性。隔振器失效导致轨道刚度降低,使得轨道结构动态位移显著增加,超出相关规范限值。上置式剪力铰在隔振器失效后受力显著增大,尽管满足强度要求但仍需加强对其监测。

关键词 地铁;小半径曲线;浮置板轨道;钢弹簧隔振器;行车安全

中图分类号 U213.2⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.031

Impact Analysis of Steel Spring Vibration Isolator Failure in Metro Line Curved Sections on Train Operation Safety

ZHU Mei, HAN Xiangyu, YIN Dawei, LI Jiayi, ZHAO Shufeng

(Jinan Traffic Engineering Quality and Safety Center, 250399, Jinan, China)

Abstract [Objective] In the small-radius curved sections of floating slab tracks, trains and tracks exhibit more complex dynamic response characteristics. The steel spring vibration isolators in the floating slab track system not only play a role in vibration reduction but are also crucial for ensuring the safe operation of trains. Therefore, it is necessary to study thoroughly the impact of the local failure of steel spring vibration isolators on the prefabricated floating slab track structure in small-radius curved section and the operation safety of trains. [Method]

Taking the prefabricated floating slab track of a certain metro line as an example, the ABAQUS finite element software is used to establish a coupled vehicle, floating slab track and tunnel dynamic model, and the validity of the model is verified through measured data. According to the established model, the dynamic responses of the train and the track structure before and after the vibration isolator failure are calculated, and the changes in the track structure and the indicators of train operation safety are analyzed. In addition, the impact of the vibration isolator failure on the force condition of the shear hinges is discussed, and their strength is checked and adjusted. [Result & Conclusion] Although the wheel load reduction rate and the derailment coefficient have increased, they meet the requirements of relevant specifications, indicating that the train can still maintain operation safety when the vibration isolators fail. The failure of the vibration isolators leads to a decrease in the track stiffness, resulting in a significant increase in the dynamic displacement of the track structure, which exceeds the limits specified in relevant specifications. Since the force on the upper-mounted shear hinge will increase significantly after the vibration isolators failure, despite meeting the strength requirements, it is still necessary to strengthen the monitoring of the shear hinge.

Key words metro; small-radius curve; floating slab track; steel spring vibration isolator; train running safety

0 引言

城市轨道交通列车运行中所引起的振动和噪声对沿线环境和居民生活造成的影响,已成为人们关注的焦点,也已成为城市轨道交通建设能否可持续发展的关键因素之一。由于一般减振措施的减振效果有限,列车运行所产生的振动和噪声仍会直接影响到人们的生活和健康,对周围环境在一定程度上也造成了不良影响,因此传统减振技术已不再适用于对减振要求高的特殊地段。为了解决列车

运行中的振动问题,已有多种减/隔振措施应用于城市轨道交通线路中。钢弹簧浮置板系统由于其具有优良的隔振性能已被广泛应用^[1-3],其工作原理为:在轨道板下方插入弹簧从而形成质量-弹簧系统,通过轨道板的惯性质量来抵消由车辆产生的动荷载,只有静荷载和少量残余动荷载传递到轨道基础。此外,板端所设置的剪力铰可以提高浮置板道床的整体性。钢弹簧浮置板道床可分为现浇式、预制式两种,分别对应于长型板和短型板。预制式浮置板道床由于施工高效、便捷,越来越受青睐。然而,预制式浮置板道床纵向尺寸远小于现浇式浮置板,列车通过时变形主要以刚体位移为主,与现浇式浮置板道床的变形特征有着较明显的差异^[4-5]。根据预制式浮置板道床的现场调研,发现了多处剪力铰病害,且多伴随着隔振器失效。因此,预制式浮置板道床隔振器失效对轨道结构和行车安全性的研究迫在眉睫。

目前,相关学者针对地铁浮置板轨道的优化设计开展了大量研究。文献[6]利用 ABAQUS 软件建立了含有钢弹簧失效的车辆-浮置板轨道垂向耦合动力学有限元模型,探究了单个及组合钢弹簧失效对浮置板轨道动态性能的影响,并提出了基于振动传递率函数和奇异值熵理论的钢弹簧失效检测方法。文献[7]通过有限元软件建立了车辆-轨道耦合模型,利用有限元模拟方法,研究分析了钢弹簧断裂对轨道结构振动特性的影响规律。

综上所述,目前针对浮置板轨道隔振器的优化研究大多只考虑了直线段轨道隔振器失效对轨道结构及振动的影响。然而,在实际运营线路中存在大量的曲线地段,隔振器失效对轨道与列车安全性

影响变得不可忽视。文献[8]建立了列车-预制式浮置板轨道刚柔耦合模型,计算了隔振器不同刚度、阻尼工况下,轮轨系统的振动响应,提出了减小板端位移的优化措施。文献[9]考虑地铁浮置板道床开裂等结构损伤对车轨振动的影响,引进道床板抗弯刚度折减系数,建立了浮置板刚度劣化情况下的列车-浮置板轨道-衬砌-土体二维分析模型,并考虑板端剪力铰对浮置板轨道的约束作用。本文拟建立车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,计算和分析小半径曲线预制式浮置板隔振器失效对轨道及列车运行安全的影响。

1 车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型

1.1 模型建立

基于有限元软件 ABAQUS 建立车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,如图 1 所示。

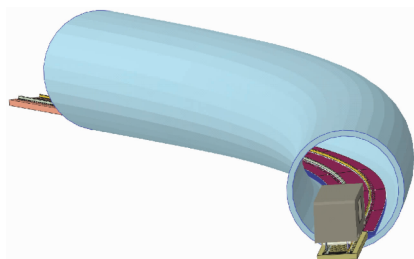


图 1 车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型

Fig. 1 Coupling model of vehicle, floating slab track and tunnel

线路计算条件如图 2 所示。采用半径为 350 m 且长度为 48 m 的圆曲线作为中间计算区,利用长度为 60 m 的缓和曲线连接 29.4 m 直线段,因此轨道结构、隧道总长为 226.8 m,共计 59 块预制浮置板。

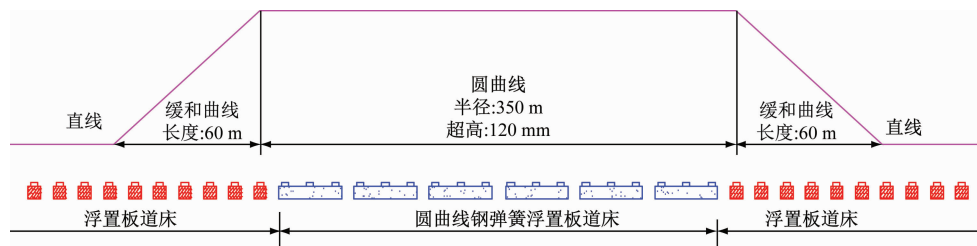


图 2 线路计算条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the line calculation conditions

浮置板轨道系统中的隔振器、剪力铰、扣件均采用连接器代替弹簧阻尼器单元模拟,参数见表 1。土体对隧道壁约束采用均布接地弹簧阻尼单元模拟^[10],刚度取 100 MN/m,阻尼取 3 750 kN · s/m。

车辆模型基于地铁 A 型车尺寸建立,将车体、转向架、轮对等部件视为刚体,如图 3 所示。刚体部件的受力及运动情况通过参考点,即刚体质心进行计算。轮对与转向架间一系悬挂、转向架与车体间

表 1 浮置板轨道系统参数
Tab.1 Parameters of floating slab track

部件	参数	数值
钢轨	弹性模量/MPa	2.06×10^5
	泊松比	0.25
	密度/(t/mm^3)	7.9×10^{-9}
扣件	横向刚度/(N/mm)	25×10^3
	横向阻尼/($N \cdot s/mm$)	60
	垂向刚度/(N/mm)	25×10^3
	垂向阻尼/($N \cdot s/mm$)	25
钢弹簧	垂向刚度/(N/mm)	9.5×10^3
	横向刚度/(N/mm)	8.0×10^3
	横向阻尼/($N \cdot s/mm$)	10
	垂向阻尼/($N \cdot s/mm$)	11.8
浮置板	弹性模量/MPa	3.45×10^4
	泊松比	0.2
	密度/(t/mm^3)	2.5×10^{-9}
剪力铰	弹性模量/MPa	2.06×10^5
	泊松比	0.25
	密度/(t/mm^3)	7.9×10^{-9}

的二系悬挂均采用衬套模拟,并保留该连接器 3 个平动自由度;单节车辆共 7 个刚体、42 个自由度。地铁 A 型车参数见表 2。

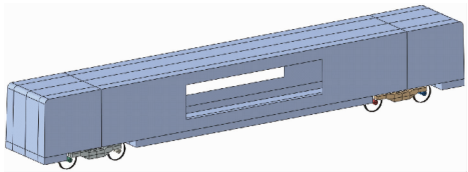


图 3 车辆多刚体模型

Fig.3 Multi-rigid model of the vehicle

轮轨关系应用 Hertz 非线性弹性接触理论,采用参数表的设置方法将轮轨间的接触力 $F(t)$ 与轮轨间的弹性压缩量 $\delta Z(t)$ 关系插值写入:

$$F(t) = \left[\frac{1}{G} \delta Z(t) \right]^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

取磨耗型踏面车轮,则有:

$$G = 3.86R^{-0.115} \times 10^{-8} \tag{2}$$

式中:

t ——车辆运行时间;

G ——轮轨接触常数,单位 $m/N^{2/3}$;

R ——车轮滚动半径,单位 m 。

采用 Abaqus/Explicit 罚函数接触算法。切向

表 2 地铁车辆 A 型车参数

Tab.2 A-typed vehicle parameters

车辆参数	数值
车体质量/kg	54 958
转向架质量/kg	2 721
轮对质量/kg	1 900
车体侧滚惯量/($kg \cdot m^2$)	1.283×10^5
车体点头惯量/($kg \cdot m^2$)	1.940×10^6
车体摇头惯量/($kg \cdot m^2$)	1.674×10^6
转向架侧滚惯量/($kg \cdot m^2$)	2 592
转向架点头惯量/($kg \cdot m^2$)	1 752
转向架摇头惯量/($kg \cdot m^2$)	3 200
轮对侧滚惯量/($kg \cdot m^2$)	720
轮对摇头惯量/($kg \cdot m^2$)	980
一系纵向刚度/(kN/m)	1 783
一系横向刚度/(kN/m)	1 783
一系垂向刚度/(kN/m)	2 140
二系纵向刚度/(kN/m)	2 083
二系横向刚度/(kN/m)	2 083
二系垂向刚度/(kN/m)	2 500
一系纵向阻尼/($kN \cdot s/m$)	49
一系横向阻尼/($kN \cdot s/m$)	49
一系垂向阻尼/($kN \cdot s/m$)	49
二系纵向阻尼/($kN \cdot s/m$)	196
二系横向阻尼/($kN \cdot s/m$)	196
二系垂向阻尼/($kN \cdot s/m$)	196
车轮名义滚动半径/m	0.43
车辆定距/m	15.7
转向架轴距/m	2.5

接触属性用于定义接触界面间的摩擦行为,采用库伦摩擦模型计算轮轨接触界面间的滑动摩擦力 $\tau(t)$,计算公式为:

$$\tau(t) = \mu F(t) \tag{3}$$

式中:

μ ——摩擦因数,取值为 0.4。

采用美国 6 级谱进行拟合,不平顺波长最短波长取值为 0.1 m,最长波长取值为 30.0 m,生成的高低不平顺如图 4 所示。

1.2 模型验证

为了验证所建立的车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型的正确性,分别对比了钢轨、浮置板、隧道壁振动的仿真结果与现场实测结果。该振动测

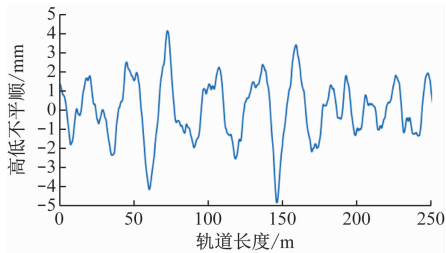


图4 轨道高低不平顺

Fig. 4 Track irregularity

试区段与上述轨道不平顺测试区段为同一区段。仿真计算得到的钢轨、浮置板外侧振动加速度最大值分别为 363.1 m/s^2 和 17.4 m/s^2 , 内侧振动加速度最大值分别为 241.3 m/s^2 和 14.2 m/s^2 。实测得到的钢轨、浮置板外侧振动加速度最大值分别为 358.3 m/s^2 和 16.4 m/s^2 , 钢轨、浮置板内侧振动加速度最大值分别为 238.9 m/s^2 和 13.8 m/s^2 。仿真计算结果与实测结果对比表明, 所建立的车辆-浮置板轨道-隧道耦合模型具有较高的精确度。

2 隔振器失效对轨道结构及行车安全性影响分析

2.1 隔振器失效计算工况

为了探究隔振器失效对轨道结构及行车安全稳定性的影响, 设置两组工况进行比较, 其中常规工况为对照组。由于板端是浮置板轨道结构薄弱环节, 失效工况中, 曲线段中部靠近板缝位置一对隔振器失效, 因此通过设置该对隔振器刚度无穷小来实现隔振器失效。失效隔振器位置如图 5 所示。实测与仿真计算的隧道壁振动加速度如图 6 所示, 实测最大值为 0.14 m/s^2 , 仿真计算最大值为 0.12 m/s^2 。考虑测量传感器存在偶然误差, 以及与真实车辆-轨道-基础耦合的劣化, 可认为本文所建立的有限元计算模型是可靠的。

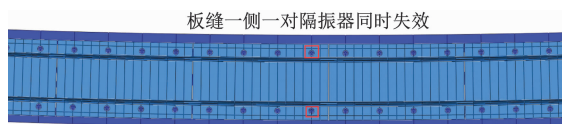


图5 隔振器失效位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the vibration isolator failure locations

2.2 隔振器失效对列车运行安全性指标影响分析

不同工况下的车体垂向加速度如图 7 所示。由图 7 可知, 车辆垂向加速度在隔振器失效工况下显著增大, 由常规工况下的 0.14 m/s^2 增至 0.32 m/s^2 。

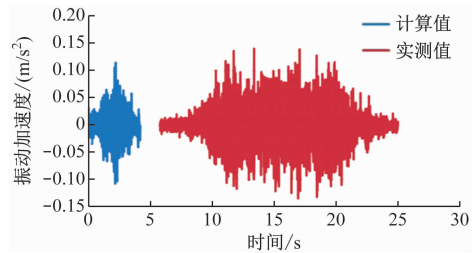


图6 隧道壁振动加速度

Fig. 6 Vibration acceleration of the tunnel wall

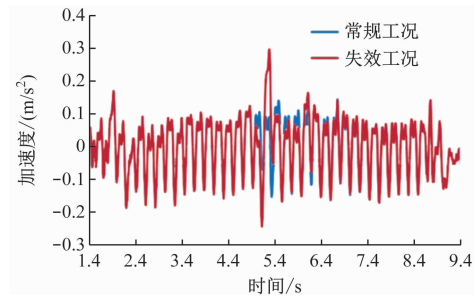


图7 车体垂向加速度

Fig. 7 Vertical acceleration of the car body

不同工况下的脱轨系数和轮重减载率分别如图 8 和图 9 所示。由图 8 可知, 脱轨系数无明显变化, 但由于小半径曲线的缘故, 脱轨系数均为 0.6 左右。由图 9 可知, 轮重减载率由常规工况下的 0.30 增加至失效工况下的 0.45。

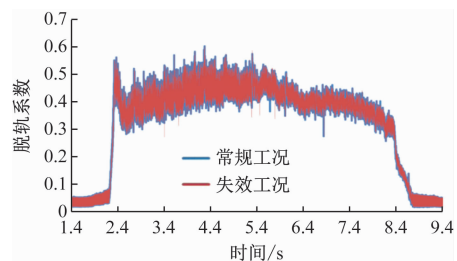


图8 脱轨系数

Fig. 8 Derailment coefficient

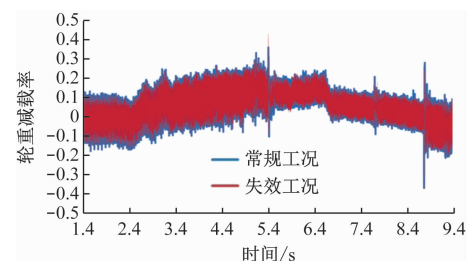


图9 轮重减载率

Fig. 9 Wheel load reduction rate

不同工况下的钢轨位移和轨道板位移如图 10 和图 11 所示。由图 10 可知, 钢轨位移由常规工况

下的 3.8 mm 增加至失效工况下的 5.2 mm,超过了标准^[11]中的限值 4.0 mm。由图 11 可知,轨道板位移由常规工况下的 2.9 mm 增加至失效工况下的 4.2 mm,超过了标准^[11]中的限值 3.0 mm。

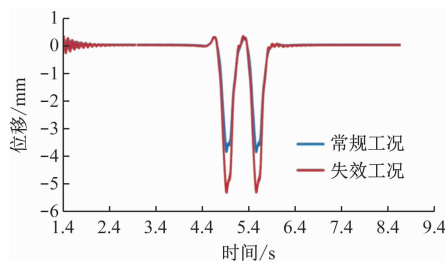


图 10 钢轨位移

Fig. 10 Rail displacement

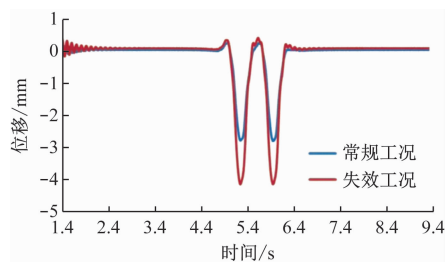


图 11 轨道板位移

Fig. 11 Track slab displacement

基于上述分析,建议在施工阶段加强管理,确保顶升结束后,隔振器无吊空现象。在运营期间加强监测,尤其是对板端隔振器的检测,当出现隔振器失效吊空情况时应立即进行顶升补片。

3 隔振器失效对剪力铰的影响分析

依据所建立的车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,列车在重力作用下运行通过浮置板板缝时,相邻两块轨道板之间会产生垂向位移差,不利于列车运行的安全性,因此常采用剪力铰连接相邻两块轨道板。剪力铰通过承受剪力和弯矩,使相邻轨道板形成一个整体,从而保证预制式浮置板轨道系统安全性。上置式剪力铰平面图如图 12 所示。

3.1 剪力铰受力分析

上置式剪力铰弯矩和剪力时程图分别如图 13 和图 14 所示。由图 13 和图 14 可知:转向架靠近剪力铰时,剪力先缓慢下降为负值(剪力向下),说明浮置板相对向上运动,这与轨道抬起一致;随后剪力逐渐上升,距离剪力铰中心 2 m 左右时,剪力达到最大值。当转向架中心与剪力铰中心重合时,剪力几乎为 0,由于此时剪力铰两侧浮置板端部的垂

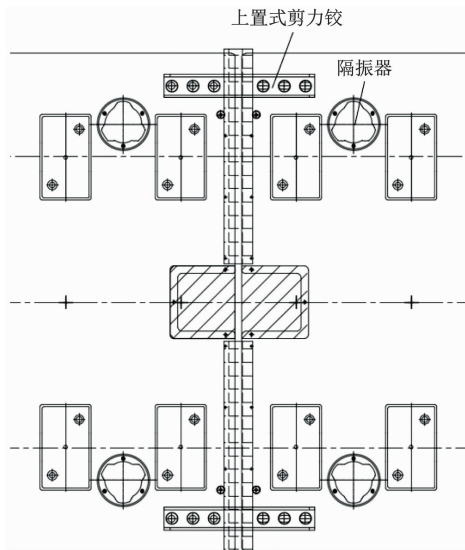


图 12 上置式剪力铰平面图

Fig. 12 Plan view of upper-mounted shear hinges

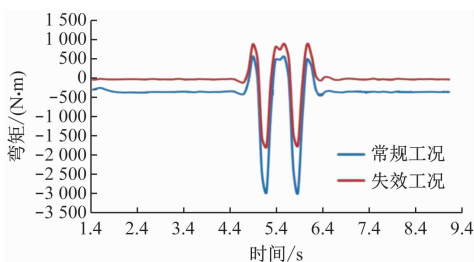


图 13 上置式剪力铰弯矩时程图

Fig. 13 Time-history diagram of the bending moment of upper-mounted shear hinges

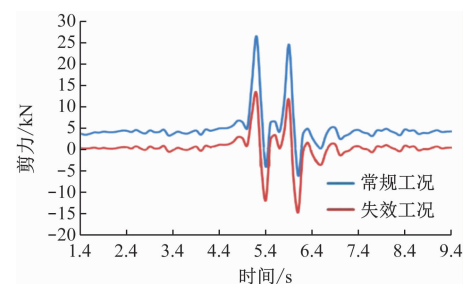


图 14 上置式剪力铰剪力时程图

Fig. 14 Time-history diagram of the shear force of upper-mounted shear hinges

直位移相等,没有位移差,因此剪力为零相当于纯弯矩状态。当转向架中心远离时,剪力情况正好和接近剪力铰时相反,形成一个对称的剪力图。

3.2 剪力铰强度分析

对于塑形较强的实体结构,采用第四强度理论校核。这一理论认为形状改变比能是引起材料屈服破坏的主要因素,只要构件内一点处的形状改变比能达到单向应力状态下的极限值,材料就要发生

屈服破坏。

上置式剪力板和螺栓的 Mises 应力云图分别如图 15 和图 16 所示。由图 15 和图 16 可知,隔振器在常规工况和失效工况下,浮置板中间位置剪力板应力最大值分别为 94.1 MPa 和 145.3 MPa,螺栓应

力最大值分别为 199.7 MPa 和 235.0 MPa。两种工况下剪力铰组件最大应力均小于许用应力。但是考虑到地铁列车开行频次较高,在高频高荷载交变应力下,很容易使剪力铰发生疲劳破坏,因此需要加强运营期间的监测。

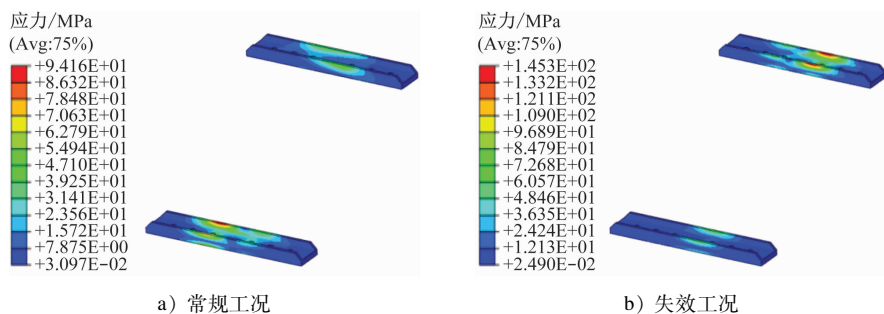


图 15 上置式剪力板 Mises 应力云图

Fig. 15 Mises stress cloud map of upper-mounted shear plates

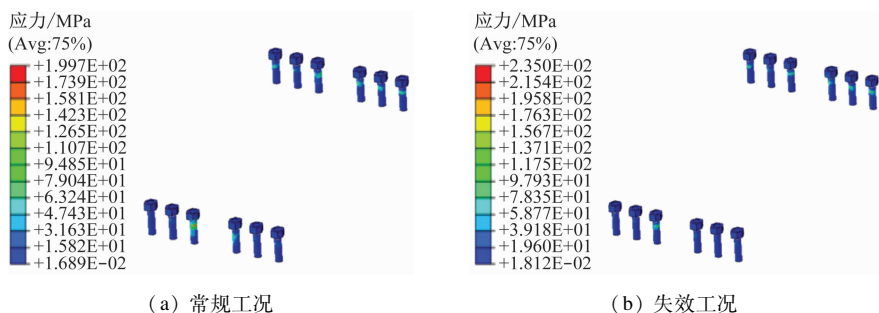


图 16 螺栓 Mises 应力云图

Fig. 16 Mises stress cloud map of bolts

4 结语

根据所建立的车辆-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,计算和分析小半径曲线地段预制式浮置板隔振器失效对轨道结构和列车运行安全的影响,结论如下:

1) 隔振器失效时,车辆轮重减载率和脱轨系数略微增加,但都满足相关规范要求;钢轨与浮置板位移明显增加,超出相关规范限值。

2) 隔振器失效时,剪力铰组件所受应力和弯矩显著增加,应力值也随之增加。

参考文献

- [1] JIN H, WANG H, LI Z, et al. Vibration-reduction optimization of the point-supporting floating-slab track based on local resonance mechanism[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(5/6): 1176.
- [2] ZHOU L, ZHANG T, LUO Y. Parametric study of dynamic vibration absorber with negative stiffness applied to floating slab track[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(9): 3369.
- [3] ZHOU Q, HE Y, LI M, et al. A parametric study on the structural noise radiation characteristics of a steel spring floating slab track[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(9): 16878132221119921.
- [4] ZENG Z, HUANG X, LI Z, et al. Experimental research on vibration-damping effect of combined shear hinge prefabricated steel spring floating slab track[J]. Sensors, 2022, 22(7): 2567.
- [5] 王建立, 陈高峰, 王建, 等. 预制式钢弹簧浮置板的研制与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 39. WANG Jianli, CHEN Gaofeng, WANG Jian, et al. Manufacture and application of prefabricated steel spring floating slab[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 39.
- [6] 任娟娟, 许雪山, 章恺尧, 等. 基于振动响应的浮置板轨道钢弹簧失效影响及检测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2407. REN Juanjuan, XU Xueshan, ZHANG Kaiyao, et al. Influence and detection method of steel spring failure of floating slab track based on vibration response[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2407.
- [7] 王明生, 董奇奇. 断簧对浮置板轨道结构振动特性的影响分

- 析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35(4): 75.
- WANG Mingsheng, DONG Qiqi. Analysis of the influence of broken spring on the vibration characteristics of floating slab track structure[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2022, 35(4): 75.
- [8] 郑翔, 罗信伟, 李平, 等. 市域快线预制钢弹簧浮置板轨道振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(5): 951.
- ZHENG Xiang, LUO Xinwei, LI Ping, et al. Vibration performance of a prefabricated steel-spring floating-slab track for urban express rail transit[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(5): 951.
- [9] 蒋吉清, 张佳斌, 董北北, 等. 剪力铰对地铁列车-劣化浮置板轨道振动的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2978.
- JIANG Jiqing, ZHANG Jiabin, DONG Beibei, et al. Effects of dowel joints on vibrations of metro train-deteriorated floating slab track system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2978.
- [10] 王永安. 地铁钢弹簧浮置板轨道振动及隧道不均匀沉降影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- WANG Yongan. Analysis of track vibration and uneven settlement of subway steel spring floating slab[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for floating slab track: CJJ/T 191—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- 收稿日期:2024-06-05 修回日期:2024-08-11 出版日期:2025-05-10
Received:2024-06-05 Revised:2024-08-11 Published:2025-05-10
· 第一作者:朱梅,工程师,739246514@qq.com
通信作者:韩翔宇,工程师,739246514@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- (上接第 180 页)
- [4] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 194.
- GAO Lihong. Analysis of settlement deformation and construction node control of a double-line shield tunnelling passing under existing tunnel in close distance[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 194.
- [5] 邢慧堂, 徐前卫, 刘浩, 等. 盾构近距离上跨既有隧道施工影响及控制研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(9): 61.
- XING Huitang, XU Qianwei, LIU Hao, et al. Research on the construction impact and control of shield crossing over existing tunnel at close distance[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(9): 61.
- [6] 曾铁梅, 王金峰, 吴贤国, 等. 盾构下穿既有隧道位移控制施工参数多目标优化[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(2): 98.
- ZENG Tiemei, WANG Jinfeng, WU Xianguo, et al. Multi-objective optimization of displacement of shield tunneling underpass existing tunnel based on GA-LSSVM combining NSGA-II [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(2): 98.
- [7] 崔玉龙. 砂土地层盾构隧道超近距离下穿既有隧道变形控制技术[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(3): 123.
- CUI Yulong. Study on deformation control technology of shield tunnel passing under an existing tunnel at ultra-close distance in sand layer[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(3): 123.
- [8] 钱文喜, 耿大新, 梁国卿. 围岩蠕变对运营隧道衬砌安全性的影响[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 90.
- QIAN Wenxi, GENG Daxin, LIANG Guoqing. Influence of Surrounding Rock Creep on Safety of Lining of Operating Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(9): 90.
- [9] 黄明. 含水泥质粉砂岩蠕变特性及其在软岩隧道稳定性分析中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- HUANG Ming. Creep characteristics of cement-bearing siltstone and its application in stability analysis of soft rock tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [10] 杨春山, 莫海鸿, 陈俊生, 等. 近距离下穿盾构隧道对上覆运营地铁隧道的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5): 145.
- YANG Chunshan, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. Influence of the approaching construction of underlying shield tunnels on overlying metro tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(5): 145.
- 收稿日期:2023-03-24 修回日期:2023-04-24 出版日期:2025-05-10
Received:2023-03-24 Revised:2023-04-24 Published:2025-05-10
· 第一作者:王有旗,高级工程师,1961098081@qq.com
通信作者:仇文革,教授,qiuwen_qw@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license