

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.047

抗蛇行减振器失效对地铁运行平稳性影响的试验研究

王丹蕾, 张建豪, 吴越

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为研究抗蛇行减振器失效对车辆运行平稳性的影响,选择尚未投入运营的地铁车辆,通过拆除抗蛇行减振器的方式模拟其故障工况,对拆除抗蛇行减振器前后车辆的运行平稳性和振动特性进行线路试验研究。试验结果表明:拆除抗蛇行减振器对车辆运行平稳性有显著的影响,对于横向平稳性尤其明显。拆除的抗蛇行减振器越多,运行平稳性指标越大。抗蛇行减振器失效对车辆高速运行时以及通过直线或者大半径曲线时的平稳性影响较大。

关键词:地铁车辆;抗蛇行减振器;失效故障;运行平稳性指标

中图分类号:U260.11⁺2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)06-0239-05

Experimental Study on Effect of Failure of Yaw Damper on Ride Quality of Metro

WANG Danlei, ZHANG Jianhao, WU Yue

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract:This article chooses a metro yet for operation to investigate the effect of yaw damper failure on the ride quality of the metro. By removing the yaw damper to simulate its fault condition, the running stability and vibration characteristics of the vehicle before and after the removal of the yaw damper is studied. The experimental results show that the removal of the yaw damper has a significant impact on the ride quality of metro, especially on lateral stability. The more yaw dampers are removed, the more significant the increase in the stability indicators of vehicle operation. The failure of the yaw damper has a greater impact on the stability of the vehicle when it is running at high speed or passing through a straight line or a large radius curve.

Keywords:metro; yaw damper; failure fault; ride quality

0 引言

随着轨道交通线路的不断增加,运行速度的日益提升,对列车运行的平稳性、稳定性以及舒适性也提出了更高的要求。蛇行运动是一种轨道车辆特有的现象,表现为轮对前进时发生横移和摇头的耦合运动。当蛇行运动频率和车体刚性模态或者弹性模态接近时,会导致车辆发生“晃车”或者“抖动”等现象,从而对车辆运行平稳性以及乘客的乘坐舒适度产生恶劣的影响,严重时更会影响到车辆的运行安全性。

传统的地铁车辆由于运行速度较低,主要靠二系旁承的摩擦力来抑制蛇行运动。为了满足较高速度的轨道交通车辆正常运行,需要加装抗蛇行减振器来抑制蛇行运动。抗蛇行减振器的作用是控制和抑制车体和转向架的横向运动,其安装在构架与车体之间,提供二系悬挂需要的回转阻尼力。在实际服役过程中,抗蛇行减振器容易产生诸如心阀或底阀弹簧刚度衰减、橡胶老化、漏油

等故障,这些故障可能会使得减振器减振性能减弱甚至失效,进而影响车辆的动力学性能。因此,开展抗蛇行减振器失效工况对轨道车辆动力学性能影响的研究是非常有意义的。

国内外学者针对抗蛇行减振器对动力学性能产生的影响开展了相关研究。时蕾等^[1]仿真分析了抗蛇行减振器在失效故障下对高速列车动力学性能的影响。池长欣等^[2]探究了仿真情况下抗蛇行减振器失效对高速列车横向平稳性的影响。明星宇等^[3]利用仿真研究表明抗蛇行减振器失效时,车辆蛇行失稳临界速度显著降低。ALONSO 等^[4]研究了抗蛇行减振器特性对稳定性的影响,建立精确的抗蛇行减振器模型来进行车辆系统动力学仿真。

通过上文可以看出,相关研究人员主要采用动力学仿真计算的方法对抗蛇行减振器的动力学行为进行模拟,并得出很多重要结论。但是,由于受到车辆实际运营安全性的要求,目前还没有相关线路试验对其进行验证。因此,本文在地铁车

第一作者简介:王丹蕾(1995—),女,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为机车车辆测控技术及故障诊断,392990316@qq.com。

辆生产商和地铁线路运营部门的协助下,选择尚未投入运营的地铁车辆,通过拆除抗蛇行减振器的方式模拟其故障工况,对拆除抗蛇行减振器前后车辆的振动特性和运行平稳性进行线路试验研究。同时,对运行速度、线路与车辆运行平稳性的关系进行研究,探明抗蛇行减振器失效对轨道交通车辆产生的影响。

1 试验简介

对实际运营条件下车辆系统的动力学特性开展试验研究。试验方法参考 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》进行。运行平稳性主要是针对客车上旅客的舒适度、货车上装运货物的完整性而制定的评价车体随机振动的指标。主要评价参数是车体上规定位置的各方向振动加速度,将其统计处理后得到评价指标值。车辆运行平稳性主要用来评价车辆的运行性能。因此,本文主要通过车辆的运行平稳性来分析相关问题。具体的评定限值如表 1 所示。

表 1 客车运行平稳性等级

平稳性等级	评定	平稳性指标 W
1 级	优秀	$W < 2.5$
2 级	良好	$2.5 \leq W < 2.75$
3 级	合格	$2.75 \leq W < 3.0$

平稳性指标分别为垂向和横向平稳性指标。二者在计算中采用不同的频率修正系数,但采取相同的评定等级,平稳性指标值计算公式如下:

$$W = 3.57 \sqrt{\frac{A^3}{f}} F(f) \quad (1)$$

式中: W 为平稳性指标; A 为车体振动加速度; f 为振动频率; $F(f)$ 为频率修正系数。

车体振动加速度通过安装加速度传感器来获取。根据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》中车体振动加速度的测试方法,车体垂向、横向振动加速度测点对角布置在 1、2 位转向架中心偏向车体一侧 1 000 mm 的车内地板上,如图 1 所示,并在轴箱和构架等转向架关键部位安装振动加速度传感器,测试转向架架系统的振动特性以实现振动加速度信号的采集。

该试验主要研究抗蛇行减振器失效对车辆运行平稳性的影响。通过拆除抗蛇行减振器对其故障工况进行模拟,对比分析拆除抗蛇行减振器前

后车辆系统的动力学行为和特征,研究抗蛇行减振器失效对车辆运行平稳性的影响程度并分析平稳性变化的原因。图 2 为抗蛇行减振器拆除前后对比图。在同一线路的不同速度条件下,进行模拟故障与正常试验。

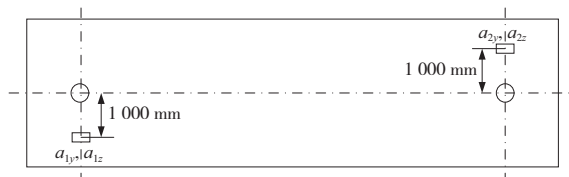
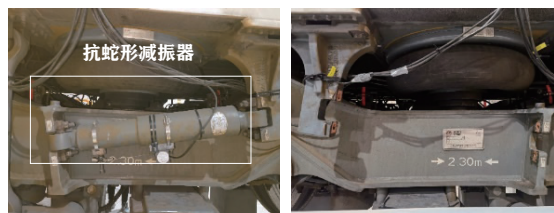


图 1 平稳性测试车体振动加速度传感器布置示意图



(a) 抗蛇行减振器拆除前 (b) 抗蛇行减振器拆除后

图 2 抗蛇行减振器拆除前后对比图

2 失效故障对运行平稳性的影响研究

由于实际线路上环境较复杂,测得数据受到不同曲线半径、速度和轨道表面等多因素影响。因此,在进行对比分析试验时,需要选择不同工况下,列车以相同速度运行通过相同轨道区段时的振动数据进行分析。用于数据对比分析的区间选取如图 3 所示,此区段速度稳定在 120 km/h。在此条件下,分析试验在 3 种工况下对车辆运行平稳性的影响。

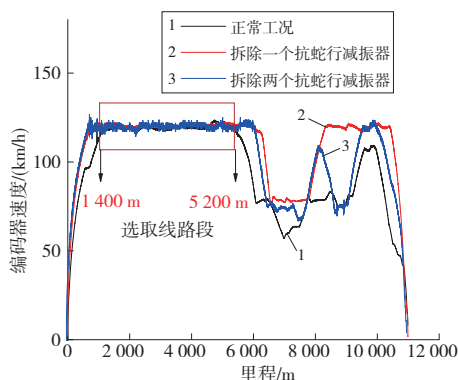


图 3 工况速度位移对应曲线

2.1 不同失效工况下平稳性对比

该地铁车辆上有两个抗蛇行减振器,分别分布在转向架两侧。进行拆除一个抗蛇行减振器、

拆除两个抗蛇行减振器和正常情况下的动力学试验。图4—图5为不同工况下车辆的运行平稳性测试结果。由图可知:拆除抗蛇行减振器对车辆运行平稳性有显著的影响,尤其表现在车辆的横向运行平稳性上。拆除抗蛇行减振器越多,其运行平稳性指标显著增大。对于垂向运行平稳性,拆除抗蛇行减振器对其影响虽不如横向平稳性明显,但是整体上也会导致垂向运行平稳性增大。

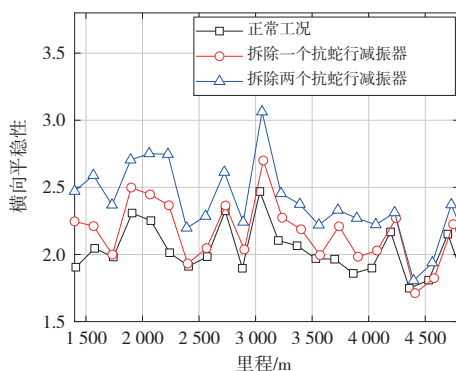


图4 抗蛇行减振器失效对横向平稳性的影响

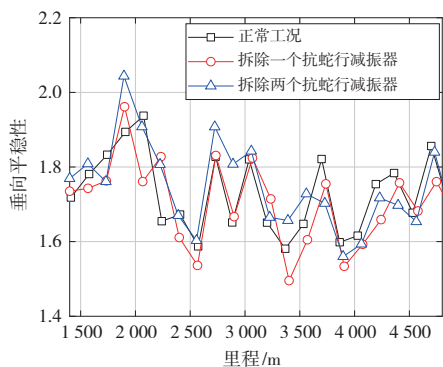


图5 抗蛇行减振器失效对垂向平稳性的影响

2.2 不同失效工况振动特性对比

为分析导致不同工况下车辆运行平稳性恶化的原因,需要结合转向架系统关键部件(轮对和构架)的振动特性展开分析。

由前文可知,平稳性指标计算与车体振动加速度有关。图6给出了车体横向振动加速度时域信号(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。由图可知:拆除抗蛇行减载器后,车体横向振动加速度明显增大,且随着拆除抗蛇行减振器个数的增加,车体振动加速度也呈增大的趋势。为了更加清晰地观察车体横向振动加速度的波形特征,对116~120s的数据进行放大,结果如图7所示。在正常工况下,车体横向振动表现出随机信号的

特征,但是拆除抗蛇行减振器后,车体横向振动出现谐波。

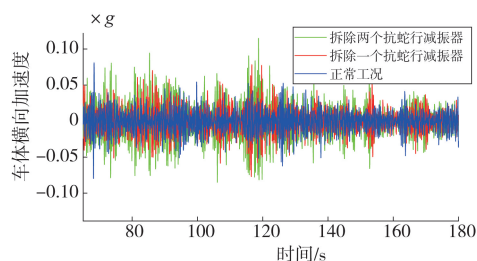


图6 车体横向加速度时域图

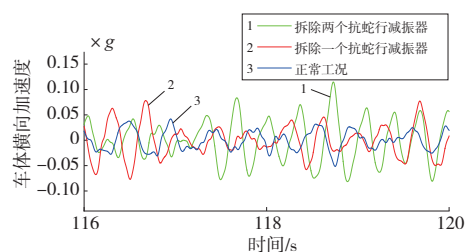


图7 车体横向加速度局部放大时域图

为进一步研究车辆振动特性,对车辆振动信号开展频谱特性分析。图8为车体横向振动的频谱图,可以看出抗蛇行减振器的失效主要影响0~10 Hz 的频率幅值,因此选取频率小于10 Hz 的能量分布进行频谱分析。

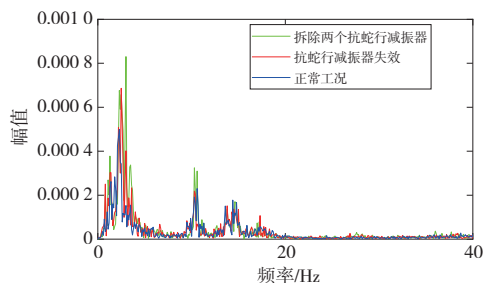


图8 车体振动频谱图

3种工况的振动传递特性的主要差异集中在1~3 Hz 低频区段。拆除的抗蛇行减振器越多,此区段的车辆振动的幅值越高,且3种工况的能量最大值均出现在此低频区段,符合车辆的蛇行运动特征^[5]。蛇行运动会引起10 Hz 以下的低频晃动。在运行过程中,车体上心滚摆和摇头振动与车体自身固有的上心滚摆和摇头振动可能会耦合在一起,从而引起共振,恶化车辆的横向平稳性。

3 影响因素

在实际线路上的运行过程中,线路的曲线半

径、速度等因素也会导致平稳性的差异。本章通过线路动力学试验,探究抗蛇行减振器失效故障对不同曲线半径、不同速度级的影响。

3.1 速度影响

选取动力学试验在相同线路条件下、不同行驶速度的工况进行分析。将 60 km/h、80 km/h、100 km/h、120 km/h 速度级作为研究对象。图 9—图 10 给出了抗蛇行减振器在失效一个、失效两个和正常 3 种不同工作状态,车辆在不同速度级条件下平稳性指标的变化情况。观察发现,随着速度的不断提升,车体的横向与垂向平稳性指标都呈现上升趋势。

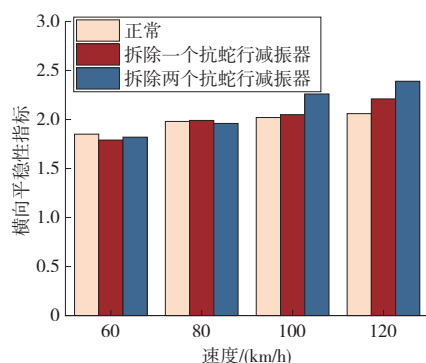


图9 横向平稳性与速度关系图

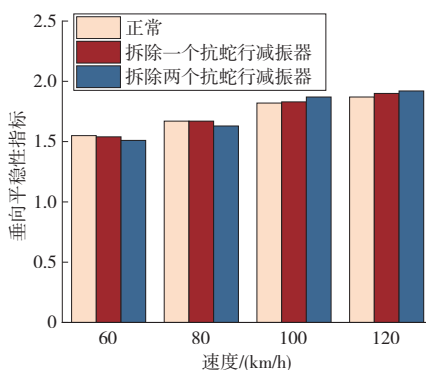


图10 垂向平稳性与速度关系图

对于垂向平稳性指标,不同工况下平稳性增长的速率基本相同,速度作为垂向平稳性指标增加的主要原因。对于横向平稳性指标,在低速段(60 km/h 和 80 km/h) 3 种工况下增长的速率仍基本相同,一旦进入高速区段(100 km/h 和 120 km/h)抗蛇行减振器随着失效数目的增多,横向平稳性指标呈现出不同的增长速率。失效数目越多,平稳性指标增长得越快。这是由于列车运行速度接近临界速度所致。

3.2 线路影响

为了研究线路条件下抗蛇行减振器失效对平稳性指标的影响,选取在试验中相同轨道区段相同速度下的数据进行研究。此段线路中包含 R450、R1400 的曲线线路与直线线路。讨论在 3 种线路条件下抗蛇行减振器失效对平稳性的影响。由于限速原因, R450 线路速度必须小于 80 km/h,则 R450 选择 80 km/h 速度级进行分析, R1400 与直线线路选择 120 km/h 速度级进行分析,结果如图 11—图 12 所示。

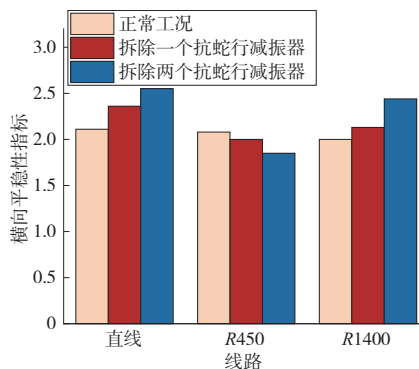


图11 不同线路条件下横向平稳性指标对比

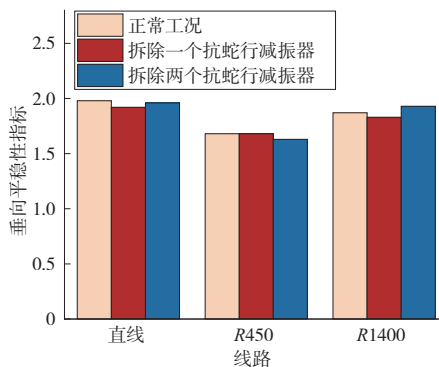


图12 不同线路条件下垂向平稳性指标

由图 11—图 12 可知,较小半径曲线 R450 的横向平稳性指标随着抗蛇行减振器失效的增多呈现下降趋势, R1400 与直线段则与之相反,横向平稳性指标逐渐上升。垂向平稳性指标轻微浮动, 3 种工况下差别不大。抗蛇行减振器的失效主要影响的是大半径曲线与直线平稳性指标。这是由于小半径曲线上,轮轨匹配锥度较大,车辆反而不易产生蛇行运动。为了不影响车辆的线路运行,要重点关注直线区段与大半径曲线平稳性指标的变化。

4 结语

1) 每辆车失效一个抗蛇行减振器、失效两个抗蛇行减振器,对车辆的垂向平稳性影响较小,横向平稳性显著变差。

2) 抗蛇行减振器失效引发车辆蛇行运动,产生横向低频振动,从而导致了横向平稳性的恶化。

3) 抗蛇行减振器失效主要影响的是横向高速段的平稳性指标。为了在高速区段不影响车辆运行,高速条件下所有抗蛇行减振器都必须保持正常工作。

4) 较小半径曲线横向平稳性指标随着抗蛇行减振器失效的增多呈现下降趋势,大曲线半径与直线段则与之相反,横向平稳性指标逐渐上升。为了不影响车辆的线路运行,要重点关注直线区段与大半径曲线平稳性指标的变化。

参考文献:

- [1] 时蕾,宋慧娟. 高速列车抗蛇行减振器故障分析[J]. 中国工程机械学报,2019,17(4):350-355.
- [2] 池长欣,梁树林,池茂儒,等. 抗蛇行减振器动态模型对高速列车横向平稳性影响[J]. 铁道机车车辆,2022,42(2):8-14.
- [3] 明星宇,傅茂海,贺文锦,等. 基于抗蛇行减振器实时特性的车辆动力学性能分析[J]. 机械工程与自动化,2016(6):8-10.
- [4] ALONSO A, GIMÉNEZ J G, GOMEZ E. Yaw damper modelling and its influence on railway dynamic stability[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(9): 1367-1387.
- [5] 罗仁,石怀龙. 高速列车系统动力学[M]. 成都:西南交通大学出版社,2019.

收稿日期:2023-04-21

(上接第 238 页)

参考文献:

- [1] 张成国,玉钰,施韧,等. 上海轨道交通 2 号线龙阳路停车场 CBTC 改造后的运营能力分析[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(6):159-161,165.
- [2] 王俊飞,汪成文,余占蛟. 无避让立体停车装置液压系统的动态特性[J]. 液压与气动,2022,46(1):143-149.
- [3] 邵长桥,邵晓菲,吕鲲,等. 大型公共停车场合理规模计算方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(4):17-22.
- [4] LI M, HAN Q, ZHAO Z, et al. Research on new scheduling optimization of three - dimensional garage based on genetic algorithm[J]. The Frontiers of Society, Science and Technology, 2020, 2(6): 58-67.
- [5] 蒋睿,祝锡晶,马宁,等. 基于改进混合粒子群算法的智能车间无人机巡检路径规划[J]. 机械设计与制造工程,2023,52(2):51-57.
- [6] 谢济铭,秦雅琴,彭博,等. 多车道交织区车辆跟驰行为风险判别与冲突预测[J]. 交通运输系统工程与信息,2021,21(3):131-139.
- [7] 陈建凯,肖亮,覃鹏,等. 基于交织的立体综合车场公交调度优化模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2020,20(3):169-173,226.
- [8] CHEN Y Z, WANG T, YAN X C, et al. An ensemble optimization strategy for dynamic parking - space allocation[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems

Magazine,2023,15(1):347-362.

- [9] YANG Y H, WANG J C, XIA Y B, et al. Three - dimensional stopping sight distance calculation method under high slope restraint[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20):7118.
- [10] 何胜学. 公交车辆调度的超级时空网络模型及改进和声搜索算法[J]. 计算机应用研究,2021,38(10):3078-3084.
- [11] 李乾,胡玉鹏,叶振宇,等. 基于蚁群优化算法的纠删码存储系统数据更新方案[J]. 计算机研究与发展,2021,58(2):305-318.
- [12] 李焱,唐倩,刘联超,等. 基于改进蚁群算法的汽车混流装配调度模型求解[J]. 中国机械工程,2021,32(9):1126-1133.
- [13] 李常敏,魏文彬,张露. 考虑匹配优先级的共享混合停车位租用与分配问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2022,22(3):190-197,223.
- [14] WANG X W, SHI H, ZHANG C. Path planning for intelligent parking system based on improved ant colony optimization[J]. IEEE Access,2020,8:65267-65273.
- [15] LIU Q, ZHANG Y, WANG Y, et al. Research on parking space allocation of stereo garage based on improved genetic algorithm[C]//Deng Z. Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Automation Conference. Singapore:Springer,2022:1-10.

收稿日期:2023-03-21