

转盘式转向架车辆动力学性能分析

胡定祥¹ 徐步震¹ 贾小平^{1,2} 杨 陈¹ 金 鑫¹

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司技术中心, 210031, 南京; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 相比于传统转向架, 新型转盘式转向架具有较小的回转阻力系数及良好的曲线通过性能, 因此有必要对其车辆动力学性能进行分析。[方法] 基于 SIMPACK 动力学软件, 建立转盘式转向架和传统转向架车辆动力学模型; 对比分析了两种转向架形式下的回转阻力系数、曲线通过性能、车辆动力学性能; 研究了轴承摩擦因数对转盘式转向架车辆的动力学性能影响。[结果及结论] 两种转向架形式下, 当通过曲线半径为 110 m、设置限速为 30 km/h 时, 在新轮和磨耗轮工况下, 转盘式转向架车辆的脱轨系数、磨耗数、轮轴横向力显著优于传统转向架车辆, 转盘式转向架车辆的轮重减载率略优于传统转向架车辆。当以不同车辆运行速度通过直线线路时, 两种转向架形式的车辆平稳性随着车辆运行速度的增大而增大。在新轮工况下, 转盘式转向架车辆的横向平稳性明显优于传统转向架车辆, 转盘式转向架车辆的垂向平稳性略优于传统转向架车辆。在磨耗轮工况下, 转盘式转向架车辆的横向平稳性和垂向平稳性均明显优于传统转向架车辆。当转盘式转向架车辆的回转受到限制时, 车辆的稳定性、横向平稳性和曲线通过安全性均随着轴承摩擦因数的增加而恶化, 但各值均在标准规定范围内。

关键词 城市轨道交通; 转盘式转向架; 车辆动力学

中图分类号 U270.33; U279

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.07.037

Dynamics Performance Analysis of Turntable Bogie Vehicles

HU Dingxiang¹, XU Buzhen¹, JIA Xiaoping^{1,2}, YANG Chen¹, JIN Xin¹

(1. Technology Center of CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Compared to conventional bogies, the new type of turntable bogie exhibits smaller slewing resistance coefficients and better curve negotiation performance. Therefore, it is necessary to analyze the vehicle dynamics performance. [Method] Using SIMPACK dynamics software, vehicle dynamics models with turntable bogies and conventional bogies are established. A comparative analysis is conducted on the slewing resistance coefficients, curve negotiation performance,

and vehicle dynamics performance of the two types of bogies. The impact of bearing friction coefficient on the dynamics performance of vehicle with turntable bogies is studied.

[Result & Conclusion] For the two bogie types, under conditions where the curve radius is 110 m and the speed limit is set to 30 km/h, the derailment coefficient, wear rate, and axial lateral force of TBV (turntable bogie vehicle) are significantly better than those of CBV (conventional bogie vehicle) under both new and worn wheels working conditions. The wheel load reduction rate of TBV is slightly better than that of CBV. As the vehicle passing straight tracks at different speeds, the vehicle stability of both bogie types increases as the vehicle operating speed increases. Under new wheel working condition, the lateral stability of TBV is significantly better than that of CBV, and the vertical stability is slightly better. Under worn wheel working condition, the lateral and vertical stability of TBV are significantly better than those of CBV. When the rotation of TBV is restricted, the stability, lateral stability, and curve negotiation safety of the vehicle deteriorate with the increasing bearing friction coefficient, but all values remain within the range specified by relevant standards.

Key words urban rail transit; turntable bogie; vehicle dynamics

1 城市轨道交通列车转向架概述

转向架作为保证列车安全运行的关键部件, 承担了列车的支承、导向、牵引、制动等作用, 是衡量轨道交通科技水平的重要部分。各类城市轨道交通(以下简称“城轨”)列车主要采用的是干线铁路列车的传统转向架, 即一节列车由一前一后两台常规的两轴转向架支撑, 每节车体与相邻车体由车钩缓冲装置相连。除传统转向架外, 还有单轴转向架、独立旋转车轮转向架和铰接式转向架, 可以满足城轨运营的各种日常需求^[1]。

铰接式转向架与传统转向架最大的区别在于转向架的位置。不同转向架形式的列车车体结构示意图如图 1 所示。城轨列车通常采用铰接式转向

架,其最大优点为可以减少转向架的使用,但由于相邻车体间使用铰接装置代替车钩缓冲装置,列车编组将受到极大的限制,若一节铰接列车发生故障,需要停止整列车运行^[2]。此外,由于转向架的减少增加了轴重,相应的轮轨作用力也有所提高,对轨道的损害较大^[3]。

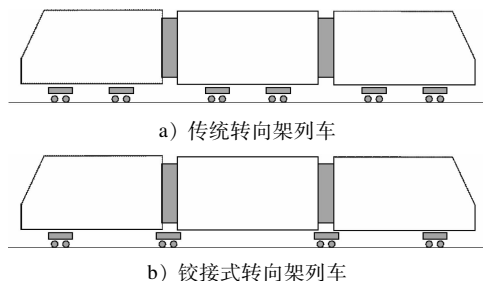


图1 不同转向架形式的列车车体结构示意图

Fig. 1 Diagram of train carbody structures with different bogie types

新型转盘式转向架结构保留了传统转向架在车下的位置,便于解编、编组操作,减少了对轨道的损害。此外,转盘式转向架结构保持了车体能与转向架相对回转的特点,具有较小的回转阻力系数,便于通过小半径曲线路段。本文基于 SIMPACK 软件,建立了新型转盘式转向架车辆和传统转向架车辆的动力学模型(见图2),对比分析两种转向架形式的车辆曲线通过性能及动力学性能。

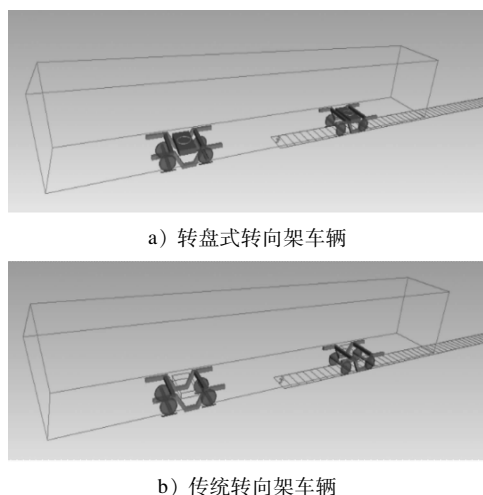


图2 不同转向架形式的车辆动力学模型

Fig. 2 Vehicle dynamics models for different bogie types

2 两种转向架形式车辆回转阻力系数对比

在标准 EN 14363:2005 *Railway applications-Testing for the acceptance of running characteristics*

of railway vehicles-Testing of running behaviour and stationary tests 中,回转阻力系数定义为关于评价车辆曲线通过性与直线运行稳定性的重要安全性能指标,设计合理的花转阻力系数可以保证车辆具有足够的稳定性,同时也具备良好的曲线通过性能^[4]。根据标准 EN 14363:2005,转向架的花转阻力系数可以表示为:

$$X = M/(2Qa) \quad (1)$$

式中:

M ——转向架花转阻力矩,单位 Nm;

Q ——被试转向架平均轴重,单位 N;

a ——转向架轴距之半,单位 m;

X ——转向架花转阻力系数,应满足 $X \leq 0.1$ 。

对比分析两种转向架形式车辆在空气弹簧正常工作、AW0(空载)工况下的花转阻力系数。当车辆正常运行时,转盘式构架与车体之间通过转盘轴承实现相对花转,若转盘轴承发生故障,则转盘式转向架车辆可等效为传统车辆。为了更全面地计算转盘式转向架车辆的花转阻力系数,需要分别考虑转盘故障工况及转盘正常工况。

2.1 传统转向架

在空气弹簧为正常工况下,转向架的花转刚度主要由空气弹簧的纵向刚度决定,传统转向架的花转阻力矩 M_1 和转向架相对车体花转的偏转角度 θ 可以表示为:

$$M_1 = 2K_1 d^2 \sin \theta \quad (2)$$

$$\theta = \arcsin(L/2R) \quad (3)$$

式中:

K_1 ——空气弹簧纵向刚度,单位 N/m;

d ——同一转向架左、右空气弹簧横向跨距一半,单位 m;

R ——曲线半径,单位 m;

L ——车辆定距,单位 m。

不同转向架形式的花转阻力系数计算参数及其取值如表1所示。根据式(2)一式(3)及表1中的数据,在空气弹簧正常工作状态下,不同曲线半径线路下的传统转向架花转阻力系数,如表2所示。

2.2 转盘式转向架

2.2.1 转盘故障工况

若转盘轴承发生故障,则转盘式转向架车辆可以等效为传统转向架车辆,根据标准 EN 14363:2005,转向架花转阻力矩与曲线半径、空气弹簧纵向刚度等参数相关。结合表1中的数据,当转盘发生

表 1 不同转向架形式的回转阻力系数计算参数及其取值

Tab. 1 Calculation parameters and their values for the slewing resistance coefficients of different bogie types

项目	转向架轴距之半/m	转向架平均轴重/N	左右空气弹簧横向跨距之半/m	车辆定距/m	空气弹簧纵向刚度/(N/m)	曲线半径/m	空气弹簧垂向载荷/N	橡胶堆水平方向摩擦因数
传统转向架	1.15	75 276	0.95	12.6	165 000	50、110、450	45 616	0.09
转盘式转向架	1.10	78 832	0.85	12.6	157 500	50、110、450	49 172	0.09

表 2 空气弹簧正常工作时不同曲线半径线路下的传统转向架回转阻力系数

Tab. 2 Slewing resistance coefficients of conventional bogies at segments of different curve radii during air spring normal operation

曲线半径/m	回转阻力系数
50	0.218
110	0.098
450	0.024

故障时,不同曲线半径线路下的转盘式转向架回转阻力系数,如表 3 所示。

表 3 转盘故障时不同曲线半径线路下的转盘式转向架回转阻力系数

Tab. 3 Slewing resistance coefficients of turntable-type bogies at segments of different curve radii during turntable failure

曲线半径/m	回转阻力系数
50	0.165
110	0.075
450	0.018

2.2.2 转盘正常工况

相比于传统车辆规定的曲线半径最小时的空气弹簧回转阻力矩,转盘式转向架车辆的转盘摩擦阻力矩要小得多。当转盘式转向架的回转阻力矩 M_2 与转盘摩擦阻力矩大小相等时, M_2 并未达到规定的空气弹簧回转阻力矩,此时转盘已自由转动,且由于转向架回转阻力矩与转盘轴承摩擦因数相关,当车辆通过不同曲线半径线路时,并不改变车体对转盘的正压力,故转盘式转向架车辆的回转阻力系数随着转盘摩擦因数的变化而变化,与曲线半径无关。 M_2 可以表示为:

$$M_2 = \frac{1}{2}\mu F_N D \quad (4)$$

式中:

μ ——转盘轴承摩擦因数;

F_N ——转盘受到的载荷,单位 N;

D ——转盘直径,取为 0.911 m。

不同转盘轴承摩擦因数下的转盘式转向架回转阻力系数,如表 4 所示。

表 4 不同转盘轴承摩擦因数下的转盘式转向架回转阻力系数

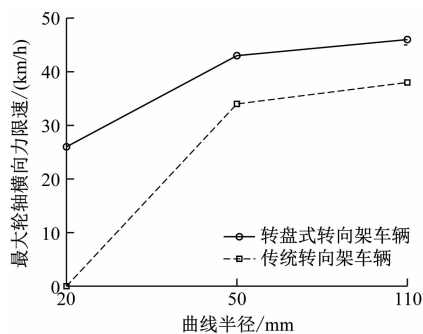
Tab. 4 Slewing resistance coefficients of turntable-type bogies under different turntable bearing friction coefficient conditions

转盘轴承摩擦因数	回转阻力系数
0.005	0.001 2
0.010	0.002 4
0.050	0.012 0
0.100	0.024 0
0.150	0.036 0
0.200	0.048 0

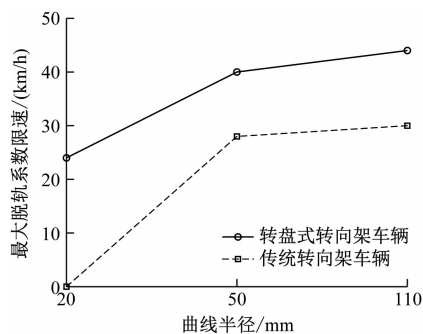
3 两种转向架形式车辆曲线通过性能对比

相比于传统转向架车辆,转盘式转向架车辆具有较小的回转阻力系数,即具有较小的转向架回转力矩。较大的转向架回转力矩会恶化车辆的曲线通过性能^[5]。因此,在小半径曲线线路上,为了对比转盘式转向架车辆与传统转向架车辆的通过性能,设车辆车轮为新轮、载重工况为 AW0,曲线半径为 110 m、50 m、20 m 条件下,两种转向架形式的车辆最大脱轨系数与最大轮轴横向力限速值对比,如图 3 所示。

由图 3 可知:当曲线半径为 50 m 和 110 m 时,转盘式转向架车辆的最大脱轨系数与最大轮轴横向力限速值均大于传统转向架车辆的限速值;当曲线半径为 20 m 时,转盘式转向架车辆的最大脱轨系数限速值可达 24 km/h,而传统转向架车辆无法通过曲线半径为 20 m 的工况。由此可知,相对于传统转向架车辆而言,转盘式转向架车辆具有更好的曲



a) 最大轮轴横向力限速值



b) 最大脱轨系数限速值

图3 不同曲线半径条件下两种转向架形式车辆的最大脱轨系数与最大轮轴横向力限速值对比

Fig. 3 Comparison of maximum derailment coefficient and maximum wheel axle lateral force speed limit for vehicles with two bogie types under different curve radii conditions

线通过性能。

4 两种转向架形式车辆动力学性能对比

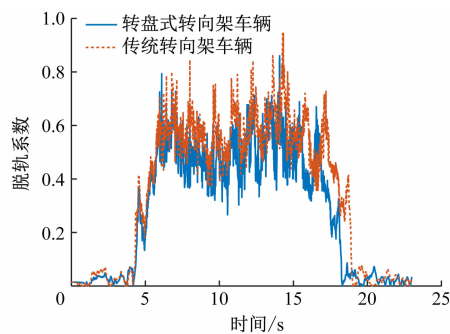
4.1 新轮工况

设置车辆运行速度为 30 km/h, 在新轮 AW0 工况下, 当曲线半径为 110 m 时, 两种转向架形式车辆的脱轨系数、轮重减载率、磨耗数及轮轴横向力对比, 如图 4 所示。在新轮 AW0、直线工况下, 不同车辆运行速度 (60 km/h、70 km/h、80 km/h、90 km/h) 下, 两种转向架形式的车辆平稳性对比如图 5 所示。

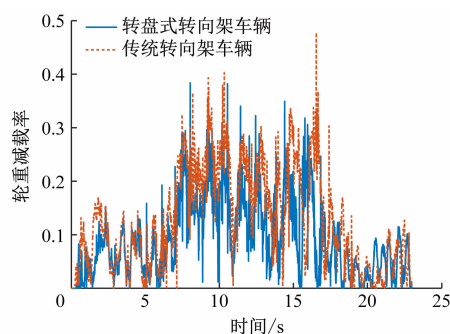
由图 4 可知: 在新轮 AW0 工况下, 转盘式转向架车辆的脱轨系数、磨耗数、轮轴横向力显著优于传统转向架车辆; 转盘式转向架车辆的轮重减载率略优于传统转向架车辆。由图 5 可知: 不同车辆运行速度条件下, 转盘式转向架车辆的横向平稳性明显优于传统转向架车辆。

4.2 磨耗轮工况

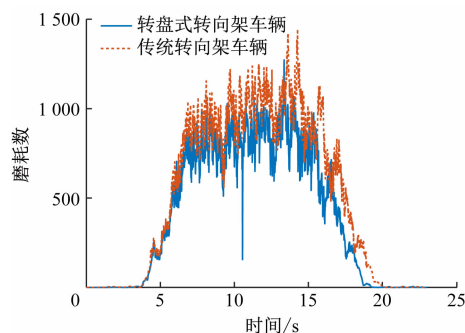
设置车辆运行速度为 30 km/h, 在磨耗轮工况



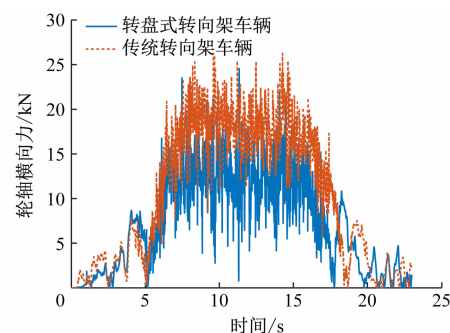
a) 脱轨系数



b) 轮重减载率



c) 磨耗数



d) 轮轴横向力

图4 新轮工况下两种转向架形式车辆的脱轨系数、轮重减载率、磨耗数及轮轴横向力对比(曲线半径为 110 m)

Fig. 4 Comparison of derailment coefficient, wheel load reduction rate, wear number, and wheel axle lateral force for vehicles with two bogie types under new wheel condition (curve radius of 110 m)

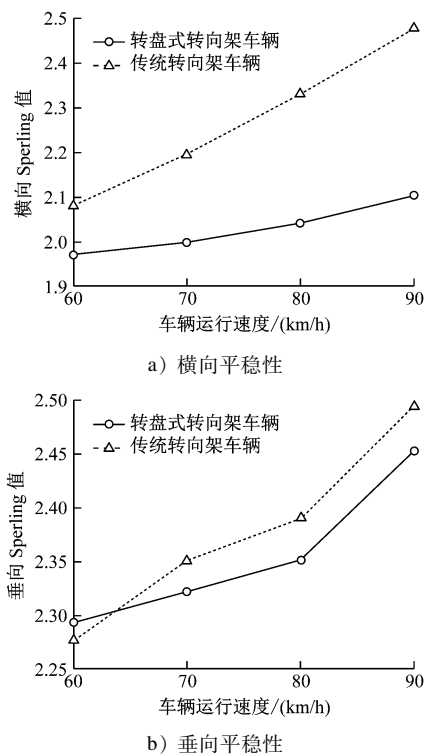


图5 新轮工况下不同车辆运行速度时两种转向架形式的车辆平稳性对比

Fig. 5 Comparison of vehicle stability for two bogie types under new wheel and different train operating speed conditions

下,当曲线半径为110 m时,两种转向架形式车辆的脱轨系数、轮重减载率、磨耗数及轮轴横向力对比,如图6所示。在磨耗轮、直线工况下,不同车辆运行速度(60 km/h、70 km/h、80 km/h、90 km/h)下,两种转向架形式的车辆平稳性对比如图7所示。

在磨耗轮工况下,两种转向架形式的动力学性能与新轮工况类似。由图6可知:转盘式转向架车辆的脱轨系数、磨耗数、轮轴横向力显著优于传统转向架车辆;转盘式转向架车辆的轮重减载率略优于传统转向架车辆。由图7可知:当车辆以不同运行速度通过直线线路时,转盘式转向架车辆的横向及垂向平稳性均明显优于传统转向架车辆。

5 轴承摩擦因数对转盘式转向架列车的动力学性能影响

在新轮 AW0 工况下,设置转盘轴承摩擦因数为0.01、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.50,分析其对车辆稳定性的影响。不同转盘轴承摩擦因数下的车辆临界速度如图8所示。当车辆运行速度为80 km/h、线路曲线半径为450 m时,转盘轴承

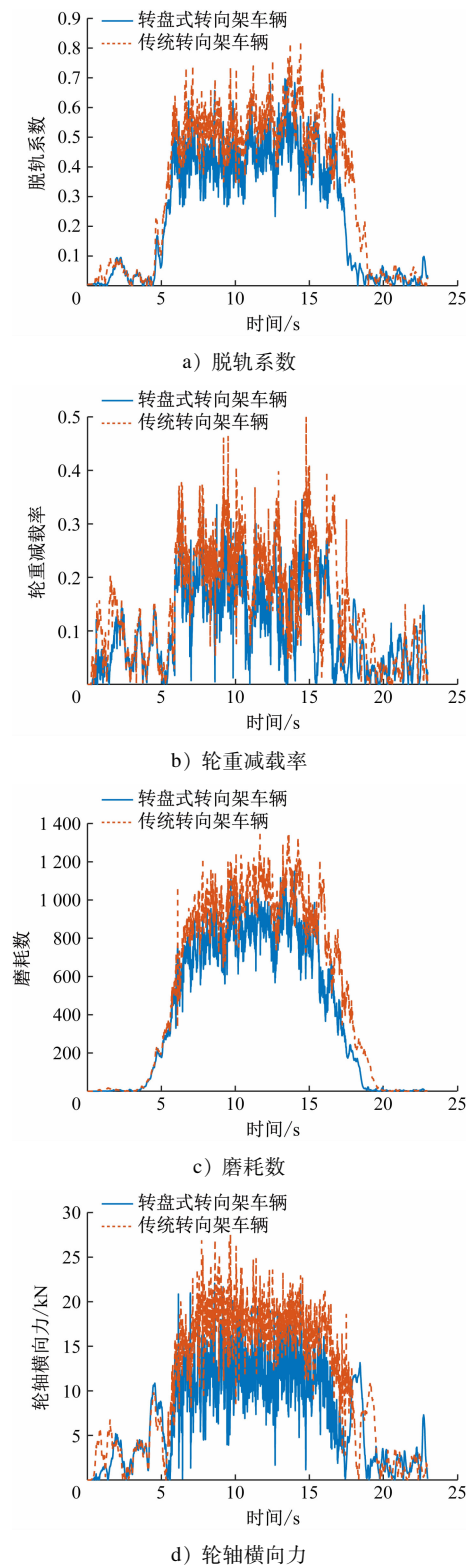
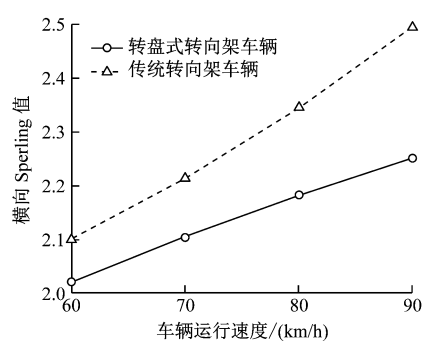
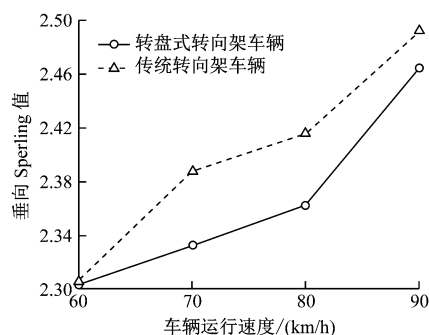


图6 磨耗轮工况下两种转向架形式车辆的脱轨系数、轮重减载率、磨耗数及轮轴横向力对比(曲线半径为110 m)

Fig. 6 Comparison of derailment coefficient, wheel load reduction rate, wear number, and wheel axle lateral force for vehicles with two bogie types under wheel wear condition (curve radius of 110 m)



a) 横向平稳性



b) 垂向平稳性

图7 磨耗轮工况下不同车辆运行速度时两种转向架形式的车辆平稳性对比

Fig. 7 Comparison of vehicle stability for two bogie types under wheel wear and different train operating speed conditions

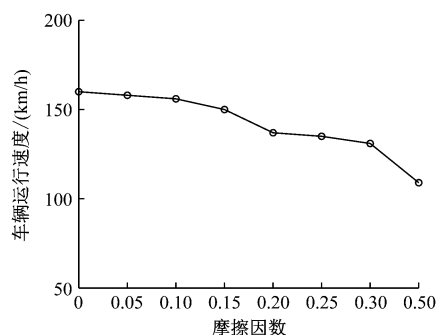
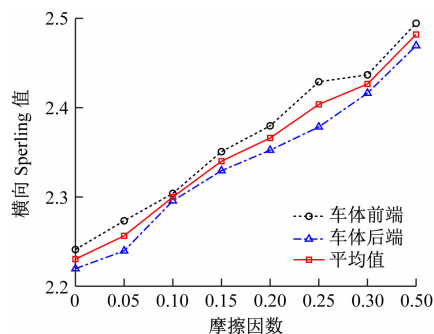


图8 不同转盘轴承摩擦因数下的车辆临界速度

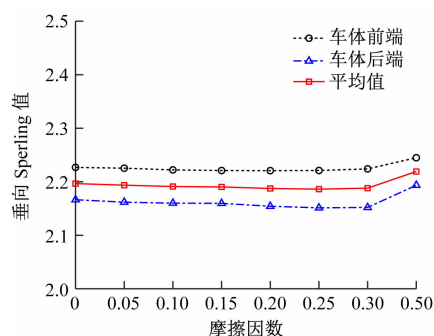
Fig. 8 Vehicle critical speed under different turntable bearing friction coefficients

摩擦因数对不同车辆部位的平稳性影响如图9所示,转盘轴承摩擦因数对车辆的脱轨系数、轮重减载率、磨耗数及轮轴横向力影响,如图10所示。

由图8可知:随着转盘轴承摩擦因数的增加,转盘式转向架车辆的临界速度有所减小,此时车辆的临界速度仍然大于最高运行速度90 km/h,且具有一定的裕量。由图9和图10可知:随着转盘轴承摩擦因数的增大,车辆的横向 Sperling 值、脱轨系数、



a) 横向平稳性



b) 垂向平稳性

图9 转盘轴承摩擦因数对不同车辆部位的平稳性影响

Fig. 9 Influence of turntable bearing friction coefficient on the stability of different vehicle parts

轮重减载率、磨耗数、轮轴横向力均有所增加;随着转盘轴承摩擦因数的增大,车辆的垂向 Sperling 值基本保持不变;车辆平稳性指标和车辆曲线通过安全性指标均在标准 GB/T 5599—2019《机动车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》限制范围内。

6 结论

1) 相较于传统转向架车辆,在转盘故障与转盘正常工况下,新型转盘式转向架车辆的回转阻力系数较小,保证了转盘式转向架车辆具有良好的曲线通过性能。不同线路曲线半径条件下,考虑曲线通过的安全性,转盘式转向架车辆的最大轮轴横向力和最大脱轨系数限速值均较高,并能安全通过小半径曲线段。

2) 在新轮和磨耗轮工况下,当车辆运行速度为30 km/h、曲线半径为110 m时,转盘式转向架车辆的脱轨系数、磨耗数、轮轴横向力显著优于传统转向架车辆,转盘式转向架车辆的轮重减载率略优于传统转向架车辆。

3) 不同车辆运行速度(60 km/h、70 km/h、80 km/h、90 km/h)下,通过直线线路时,两种转向架形

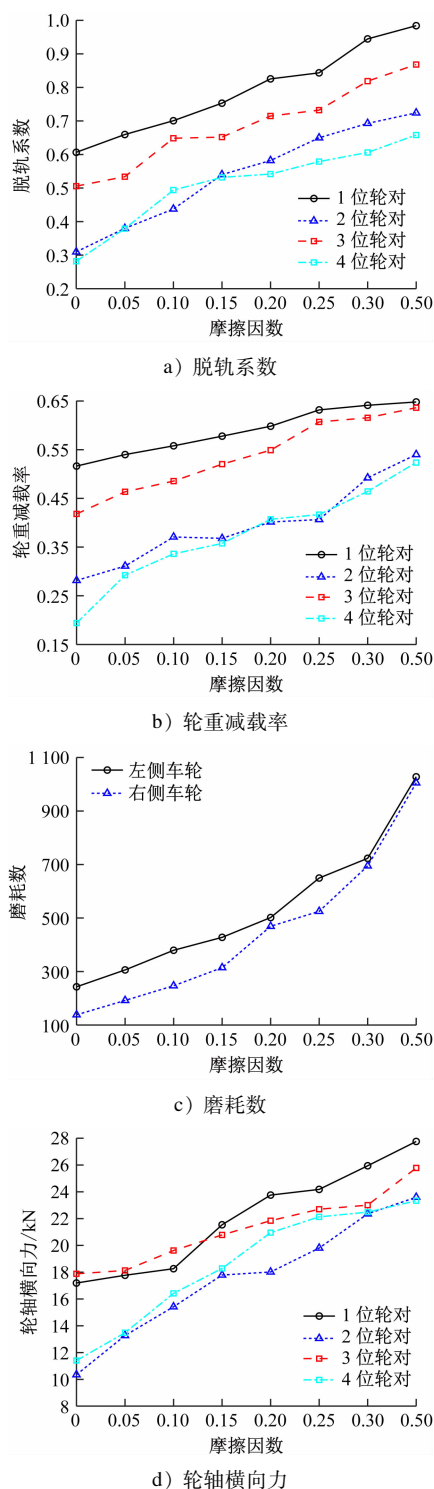


图 10 转盘轴承摩擦因数对车辆的脱轨系数、轮重减载率、磨耗数及轮轴横向力影响

Fig. 10 Influence of turntable bearing friction coefficient on vehicle derailment coefficient, wheel load reduction rate, wear number, and wheel-axle lateral force

式车辆的平稳性均随着车辆运行速度的增大而增大。在新轮工况下,转盘式转向架车辆的脱轨系

数、磨耗数、轮轴横向力显著优于传统转向架车辆,转盘式转向架车辆的轮重减载率略优于传统转向架车辆。在磨耗轮工况下,转盘式转向架车辆的横向及垂向平稳性均明显优于传统转向架车辆。

4) 当转盘式转向架车辆的回转受到影响,转盘轴承摩擦因数为 0.01、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.50 时,随着转盘轴承摩擦因数的增大,车辆的横向 Sperling 值、脱轨系数、轮重减载率、磨耗数、轮轴横向力均有所增加;随着转盘轴承摩擦因数的增大,车辆的垂向 Sperling 值基本保持不变。车辆平稳性指标和车辆曲线通过安全性指标均在标准限制范围内。

参考文献

- [1] 李带,张丽平,黄运华. 城市轻轨车辆发展及其应用前景[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(2): 111.
LI Fu, ZHANG Liping, HUANG Yunhua. The development and prospect of application of light rail vehicles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(2): 111.
- [2] 邓睿康,黄运华,冯帅,等. 铰接式转向架的特点及其发展[J]. 现代城市轨道交通, 2013(6): 21.
DENG Ruikang, HUANG Yunhua, FENG Shuai, et al. Characteristic and development of articulated bogie[J]. Modern Urban Transit, 2013(6): 21.
- [3] 胡鑫,黄运华,焦建英. 铰接式转向架及铰接装置的应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(5): 19.
HU Xin, HUANG Yunhua, JIAO Jianying. Application of articulated bogies and articulated devices[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(5): 19.
- [4] 徐杰. 地铁车辆回转阻力系数的理论计算及试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 91.
XU Jie. Theoretical calculation and experiment of the rotational resistance factor in metro vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 91.
- [5] 石怀龙,邬平波,罗仁. 客车转向架回转阻力矩特性[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 45.
SHI Huailong, WU Pingbo, LUO Ren. Bogie rotation resistance torque characteristics of passenger car[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 45.

· 收稿日期:2022-06-24 修回日期:2022-07-27 出版日期:2024-07-10
Received:2022-06-24 Revised:2022-07-27 Published:2024-07-10
· 通信作者:胡定祥,正高级工程师,xiangzi0717@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