

用于地铁列车的主动径向装置研究

刘慧斌¹ 倪文波¹ 马少明²

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 2. 青岛申晟轨道装备有限公司, 266111, 青岛)

摘要 [目的] 地铁列车通过小半径曲线区段时会产生车轮磨耗及噪声。转向架轮对的主动径向技术作为一种理论上可以解决上述问题的有效措施, 有必要对其进行深入研究。[方法] 通过分析主动径向原理, 确定了“径向导向”的控制目标。提出了一种用于转臂式轴箱定位转向架的可控橡胶节点装置及其控制系统, 使之成为车辆的主动径向装置。阐述了该主动径向装置的主动径向导向原理, 即: 地铁列车运行时以信标的方式获取线路信息, 径向控制器内存储有每条曲线的信息, 结合列车运行速度可确定列车在曲线中位置, 由此控制可控橡胶节点装置动作, 进而实现轮对以径向姿态通过曲线。以列车的头车为研究对象, 建立了 A 型地铁列车的动力学模型, 对采用主动径向装置的地铁列车以 60 km/h 的速度通过 400 m 曲线半径时的通过性能进行了分析, 并与传统转向架的通过性能进行对比。[结果及结论] 相比于传统转向架导向轮对, 主动径向转向架导向轮对的冲角和磨耗指数均大幅降低; 同一转向架的两个轮对具有相近的横移量, 在该位置下轮对可实现“纯滚动”; 列车在小半径曲线上的通过性能有明显改善。

关键词 地铁列车; 主动径向导向; 可控橡胶节点; 曲线通过能力; 联合仿真

中图分类号 U260.331⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.021

Research of Active Radial Device for Metro Train

LIU Huibin¹, NI Wenbo¹, MA Shaoming²

(1. Institute of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Qingdao Shensheng Rail Equipment Co., Ltd., 266111, Qingdao, China)

Abstract [Objective] Metro trains experience wheel wear and noise issues when negotiating small radius curve section. Active radial technology for bogie wheelsets is considered an effective solution theoretically. It is essential to conduct in-depth research on this technology. [Method] The control objective of 'radial steering' is determined by analyzing the principle of active radial technology. A controllable rubber joint device and its control system for the swing-arm axle box positioning bogie are proposed, transforming it into an active radial device for the vehicle. The active radial guidance principle of

the device is elucidated, involving the metro train obtaining track information in a beacon-like manner, storing information of each curve in the radial controller, determining the train position along curve based on train operating speed. This controls the action of the controllable rubber joint device, further enabling the wheelset to negotiate curves in a radial attitude. Taking the leading car of the train as the research object, an A-type metro train dynamic model is established. The passing performance of a metro train equipped with the active radial device is analyzed at a speed of 60 km/h through a curve radius of 400 m, and the negotiation performance is compared with the conventional bogie for reference. [Result & Conclusion] Compared to conventional bogie-guided wheelsets, the active radial bogie-guided wheelsets exhibit significantly reduced flange angle and wear index. Both wheelsets on the same bogie have similar lateral displacement, allowing the wheelsets to achieve 'pure rolling' at this position. The performance of train negotiating small radius curves is noticeably improved.

Key words metro train; active radial steering; controllable rubber joint; curve negotiation performance; co-simulation

地铁线路上存在较多的小半径曲线。列车经过小半径曲线时, 车轮磨耗严重, 同时还伴随着噪声, 影响乘客的乘坐舒适性。转向架轮对的主动径向技术作为一种理论上可以解决上述问题的有效措施, 在业内备受关注。

目前对地铁列车主动径向技术的研究主要集中在线路信息的获取、控制策略的选择及径向机构的结构设计 3 个方面。主动径向系统需要根据列车当前的运行线路状况控制径向机构, 使其做出正确的动作。考虑到地铁列车在固定线路上运行, 可以事先将线路信息存储于微处理器中, 并在每段曲线前布置信标, 通过对信标信息的识别将相应的线路信息从微处理器中读取出来^[1]。此方法可获得实时的线路信息。同时, 随着电子技术及控制理论的发展, 目前对伺服系统的控制已经能够达到较好的控制精度。因此, 设计一个满足工程化的主动径向装

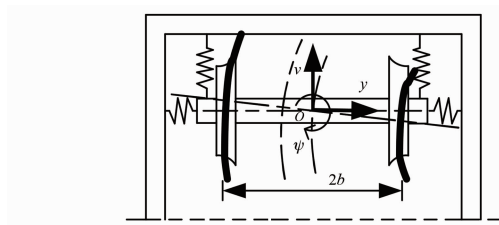
置,是地铁列车主动径向技术的关键。

韩国亚洲大学先后于2010年和2014年提出了两种基于不同控制量的机电式主动径向机构^[2-3]。2016年,文献[4-5]设计研发了用于径向转向架的一体式轮对定位装置。2018年,文献[6]提出了一种集成于橡胶节点内部的双杆活塞缸装置,由于该装置采用无源控制方式,不需要电机、电泵等设备,因而整个装置的安装空间大为减小。

根据轮对主动径向原理,本文提出了一种实现轮对“径向导向”的可控橡胶节点装置,并设计了相应的主动径向控制系统。

1 主动径向原理

轮对通过曲线时的坐标系定义如图1所示。



注: y —轮对相对于轨道中心线的横向位移; ψ —轮对轴线相对于曲线径向线的夹角; b —左、右车轮滚动圆跨距的一半; v —列车运行速度。

图1 轮对通过曲线时的坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinate system when wheelset negotiating curves

忽略重力刚度、重力角刚度和自旋蠕滑系数等因素的影响,根据线性蠕滑理论,轮对的横向动力学方程为:

$$m_w \ddot{y} + 2f_{22} \left(\frac{\dot{y}}{v} + \psi \right) = F_{cen} + F_t + F_{act} \quad (1)$$

$$I_{w,z} \ddot{\psi} + 2f_{11} \left(\frac{b^2}{v} \dot{\psi} + \frac{b\lambda}{r_0} y + \frac{b^2}{R} \right) = M_t + M_{act} \quad (2)$$

式中:

m_w ——轮对质量;

f_{22} ——轮对的横向蠕滑系数;

F_{cen} ——未平衡离心加速度引起的横向力;

F_t ——一系悬挂作用于轮对的横向力;

F_{act} ——作动器作用于轮对的作动力;

$I_{w,z}$ ——绕垂向方向的转动惯量;

f_{11} ——轮对的纵向蠕滑系数;

λ ——车轮踏面的等效锥度;

r_0 ——车轮名义滚动圆半径;

R ——曲线线路半径;

M_t ——一系悬挂作用于轮对的摇头力矩;

M_{act} ——作动器作用于轮对的作动力矩。

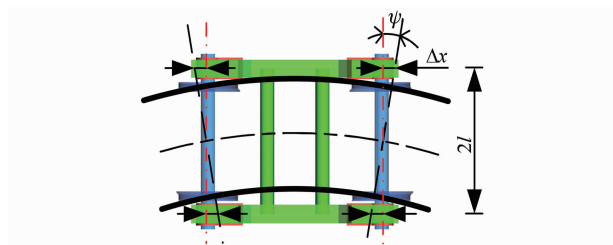
稳态情况下, $\ddot{y} = \dot{y} = 0, \ddot{\psi} = \dot{\psi} = 0$, 则有:

$$2f_{22}\psi = F_{cen} + F_t + F_{act} \quad (3)$$

$$2f_{11} \left(\frac{b\lambda}{r_0} y + \frac{b^2}{R} \right) = M_t + M_{act} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知:如果控制 y , 使轮对的纵向蠕滑力为零(即“纯滚动”), 同时轮对自动调整 ψ , 以产生适量的横向蠕滑力来抵消 F_{cen} , 则可实现对轮对的“完美导向”。但若使用横向布置的作动器来实现对 y 的控制, 则 F_{act} 也会直接作用于车体, 进而导致乘客的乘坐舒适度降低。因此在现有的几种主动径向系统中, 均采用了作动器纵向布置的方案。此外, 对轮对施加一定大小的 M_{act} , 也可以实现对轮对的“完美导向”, 但对 M_{act} 的控制需要根据轮对的受力情况实时调整, 在工程上较难实现^[7]。

综上所述, 轮对的“完美导向”不易实现, 因此可将控制目标简化为“径向导向”, 即:控制 ψ , 使其以径向姿态(即 $\psi = 0$)通过曲线。图2为轴箱相对于构架纵向位移 Δx 与轮对摇头角 ψ 间的转换关系。考虑到 ψ 较难测量, 可根据图2的几何关系, 将对 ψ 的控制转换为对 Δx 的控制。



注: l —作动器横向跨距的一半; ψ 与 Δx 的转换关系为 $\psi = \Delta x / l$ 。

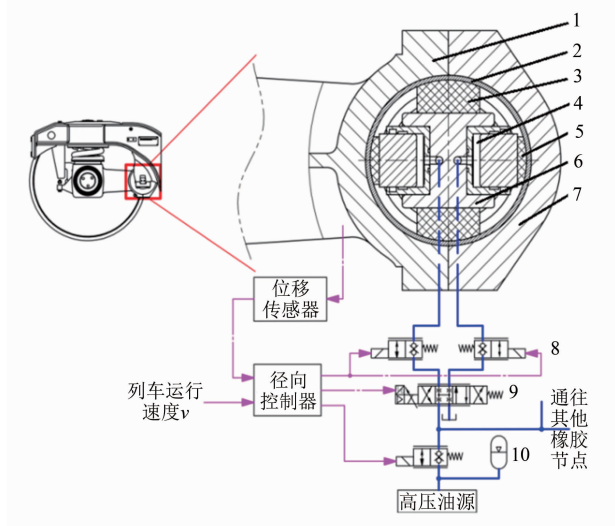
图2 轴箱相对于构架纵向位移 Δx 与轮对摇头角 ψ 间的转换关系

Fig. 2 Conversion relationship between the longitudinal displacement Δx of the axle box relative to the frame and the wheelset shaking angle ψ

2 可控橡胶节点装置及其控制系统

为实现对 Δx 的控制, 本文提出了一种用于转臂式轴箱定位转向架的可控橡胶节点装置及其控制系统, 其结构如图3所示。图3中:可控橡胶节点是在传统转臂式轴箱定位装置橡胶节点的基础上, 将2个受控的柱塞缸沿纵向对称布置于芯轴两侧。装置内的橡胶弹簧采用压缩刚度大、剪切刚度小的叠层弹簧, 这样可在保证轴箱定位刚度的同时, 允许轴

箱相对构架在一定方向上平移和转动。该装置工作时,液压油通过芯轴内部的油路进入到柱塞缸的腔室内,柱塞在液压油的作用下外伸,推动节点外壳和轴箱转臂相对于芯轴运动。由于芯轴与构架间为固定连接,因此在柱塞缸的作用下,轴箱相对于构架的纵向位置变得可控。



注:1—轴箱转臂;2—节点外壳;3—垂直橡胶弹簧;4—柱塞缸;5—纵向橡胶弹簧;6—芯轴;7—转臂端盖;8—二位二通常闭式电磁阀;9—伺服比例阀;10—囊式蓄能器。

图3 可控橡胶节点装置及其控制系统的结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of controllable rubber node device and the control system

径向控制器内存储了地铁线路中每个曲线区段的信息(包括曲线半径、曲线长度、超高和缓和曲线长度等)。当地铁列车的头车检测单元识别到线路上的信标后,径向控制器即可获得相应的曲线信息。安装于轴箱转臂与构架之间的位移传感器提供径向位置反馈信息,进而实现对 Δx 的闭环控制。设 L_0 为轴距,基于当前的 v ,可计算第 i 个可控橡胶节点的目标作动纵向位移 x_i ,其计算式为:

$$x_i = L_0 l / R \quad (5)$$

文献[8]中已对上述可控橡胶节点装置及其控制系统进行了性能分析,本文不再赘述。文献[8]的研究结果表明:该装置具有良好的性能,能够满足轮对主动径向控制的需求。

3 主动径向系统动力学仿真计算

利用 SIMULINK 软件、AMESim 软件和 SIMPACK 软件,建立配备有上述主动径向系统的 A 型地铁单节车厢的联合仿真模型,如图 4 所示。

该模型的仿真流程为:①利用 SIMULINK 软件根据预先加载好的线路条件和 v ,计算 x_i ;②将 x_i 作为 AMESim 软件的输入;③SIMPACK 软件将 AMESim 软件中计算得到的 F_{act} 作为输入,同时将轴箱与构架间的相对位移 x_0 反馈到 AMESim 软件中,进而实现对可控橡胶节点装置作动纵向位移的闭环控制。

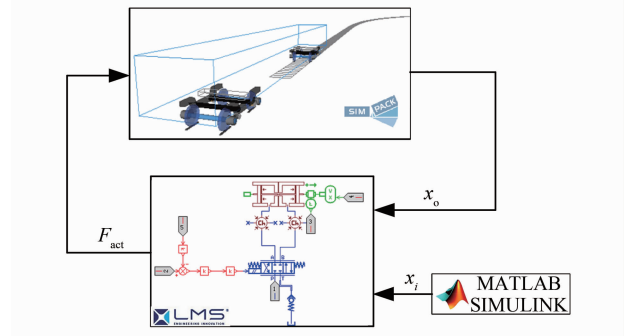


图4 A型地铁单节车厢的联合仿真模型

Fig. 4 Co-simulation model for A-type metro single compartment

该仿真模型选取的车轮踏面外形为 LM 型,钢轨型号选用 T60,其相关参数分别如表 1—表 3 所示。

表 1 车辆基本参数

Tab. 1 Basic parameters of vehicle	
参数名称	参数值
可控橡胶节点的横向跨距/m	2.02
车辆定距/m	15.70
轴距/m	2.50

表 2 主动径向转向架一系悬挂参数

Tab. 2 Primary suspension parameters of active radial bogies

参数名称	参数值
纵向橡胶弹簧压缩刚度/(MN/m)	60.0
纵向橡胶弹簧剪切刚度/(MN/m)	0.5
横向橡胶弹簧压缩刚度/(MN/m)	4.5
横向橡胶弹簧剪切刚度/(MN/m)	0.5
垂向橡胶弹簧压缩刚度/(MN/m)	6.0
垂向橡胶弹簧剪切刚度/(MN/m)	1.5
纵向减振器阻尼/(MNs/m)	5 000.0

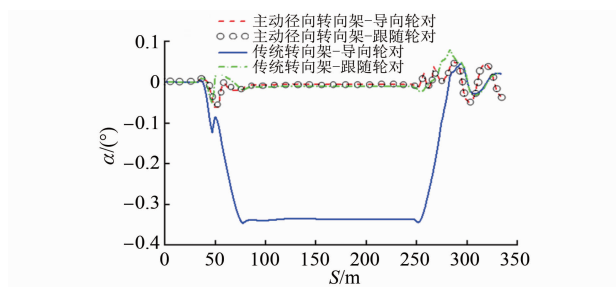
表 3 传统转向架一系悬挂参数

Tab. 3 Primary suspension parameters of conventional bogies

参数名称	参数值
转臂橡胶节点纵向刚度/(MN/m)	17.0
转臂橡胶节点横向刚度/(MN/m)	9.0
转臂橡胶节点垂向刚度/(MN/m)	17.0

设 S 为列车运行距离。令 $v=60\text{ km/h}$, 使其匀速通过 $R=400\text{ m}$ 的曲线区段, 采用以下参数作为评价指标, 以验证主动径向转向架在改善曲线通过性方面的有效性: ① y ; ② 曲线外侧车轮与钢轨间的冲角 α ; ③ 磨损指数 I_{wear} (其计算公参见文献[9]); ④ 轮对作用于曲线外侧钢轨的横向力 Q (以下简称“轮轨横向力”)。

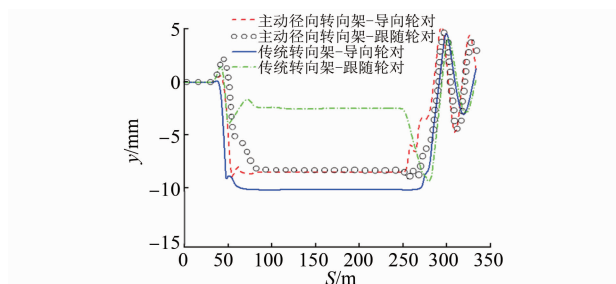
这4个参数与 S 的关系的仿真结果分别如图5—图8所示。



注: α 与图1摇头角方向一致时数值取正, 反之取负。

图5 曲线外侧车轮与钢轨间的冲角 α 与列车运行距离 S 的关系

Fig. 5 Relationship between curve outer wheel-rail angle of attack α and train running distance S



注: y 朝图1所示方向发生位移时数值取正, 反之取负。

图6 轮对相对于轨道中心线的横向位移 y 与列车运行距离 S 的关系

Fig. 6 Relationship between the lateral displacement y of the wheelset relative to track centerline and train running distance S

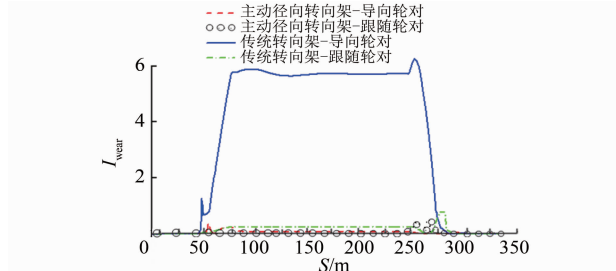
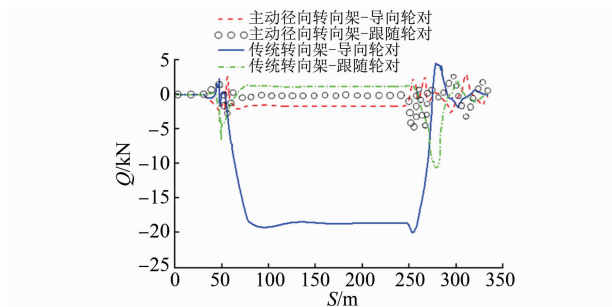


图7 磨损指数 I_{wear} 与列车运行距离 S 的关系

Fig. 7 Relationship between wear index I_{wear} and train running distance S



注: Q 与图1中 y 轴负方向一致时数值取正, 反之取负。

图8 轮轨横向力 Q 与列车运行距离 S 的关系

Fig. 8 Relationship between wheel-rail lateral force Q and train running distance S

由图5可知: 与传统转向架-导向轮对的冲角 (0.336°) 相比, 本文所建主动径向转向架-导向轮对的冲角 (0.005°) 大幅降低。由图6可知: 主动径向转向架-导向轮对、主动径向转向架-跟随轮对的 y 值相近, 在该位置下轮对可实现“纯滚动”。由图7可知: 列车在通过曲线区段时轮轨间接触条件得到改善, 与传统转向架-导向轮对的 I_{wear} (5.72) 相比, 主动径向转向架-导向轮对的 I_{wear} (0.08) 大幅降低。由图8可知: 采用主动径向转向架后, 列车在小半径曲线线路上运行时, 避免了轮缘与钢轨接触, 这直观地表现为与传统转向架-导向轮对的 Q (-19.62 kN) 相比, 主动径向转向架-导向轮对的 Q (-1.86 kN) 减少了91%。

4 结语

本文分析了地铁列车转向架轮对的主动径向原理, 确定了“径向导向”的控制目标。为实现轮对的“径向导向”, 提出了一种结构紧凑的可控橡胶节点装置, 并设计了相应的主动径向系统。

本文提出的主动径向系统可使列车在曲线半径 400 m 线路下的通过性能得到明显改善: 相比于传统的转向架, 主动径向转向架导向轮对的冲角、轮轨间的磨损指数均大幅降低; 所有轮对具有相近的横移量, 在该位置下轮对可实现“纯滚动”; 此外, 本文方法还避免了列车在小半径曲线线路上运行时轮缘与钢轨相接触, 作用于导向轮对的轮轨横向力可减少91%。

参考文献

- [1] 罗湘萍, 田师峤, 王旭, 等. 基于特征点触发的获取轨道曲线线路信息的系统及方法: 201610890261. 4[P]. 2017-03-29.

(下转第118页)

- China Railway Corporation. Technical standards for signal maintenance rules of ordinary speed railways[M]. Beijing: China Railway Press, 2019: 1.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[EB/OL]. (2020-03-12) [2023-06-01]. https://m.163.com/dy/article_cambrian/F89Q5FRN0511T04N.html. China Association of Metros. Outline for the development of smart urban rail transit in China[EB/OL]. (2020-03-12) [2023-06-01]. https://m.163.com/dy/article_cambrian/F89Q5FRN0511T04N.html.
- [3] 陈镭. 运用监测动作曲线实现 ZD6-D 道岔状态修[J]. 铁道运营技术, 2012, 18(2): 19.
- CHEN Mei. Using monitoring action curve to realize condition maintenance of ZD6-D turnout[J]. Railway Operation Technology, 2012, 18(2): 19.
- [4] 马帅, 王腾蛟, 唐世渭, 等. 一种基于参考点和密度的快速聚类算法[J]. 软件学报, 2003, 14(6): 1089.
- MA Shuai, WANG Tengjiao, TANG Shiwei, et al. A fast clustering algorithm based on reference and density[J]. Journal of Software, 2003, 14(6): 1089.
- [5] 王莉. 数据挖掘中聚类方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- WANG Li. Study on clustering algorithm in data mining[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [6] 匡桂娟. 广度优先搜索算法在互连网络通信中的应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2005.
- KUANG Guijuan. Application of breadth-first search algorithm in interconnection network communication[D]. Qingdao: Qingdao University, 2005.
- [7] WEISS M A. 数据结构与算法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 225.
- WEISS M A. Data structure and algorithms[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2020: 225.
- [8] 于斌. 电动转辙机摩擦电流标调问题分析及处理方法[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(12): 45.
- YU Bin. Reason analysis and disposal of adjusting electric switch machines' triboelectric currents[J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(12): 45.
- 收稿日期:2023-04-21 修回日期:2023-06-06 出版日期:2024-04-10
Received:2023-04-21 Revised:2023-06-06 Published:2024-04-10
· 第一作者:邱晓莉,讲师, qiuxiaoli_nora@yeah.net
通信作者:韩思远,工程师, 931018167@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 113 页)

- LUO Xiangping, TIAN Shiqiao, WANG Xu, et al. A system and method for obtaining track curve and route information based on feature point triggering: 201610890261.4[P]. 2017-03-29.
- [2] PARK J H, KOH H I, HUR H M, et al. Design and analysis of an active steering bogie for urban trains[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(6): 1353.
- [3] SIM K S, HUR H M, SONG H S, et al. Study of the active radial steering of a railway vehicle using the curvature measuring method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(11): 4583.
- [4] 罗湘萍. 一种用于径向转向架的一体式轮对定位装置: 201610304174.6[P]. 2016-09-21.
- LUO Xiangping. An integrated wheelset positioning device for radial bogies: 201610304174.6[P]. 2016-09-21.
- [5] 田师娇, 罗湘萍, 任利惠, 等. 基于地铁车辆二系回转角的主导向研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 147.
- TIAN Shiqiao, LUO Xiangping, REN Lihui, et al. Research on active radial of rail transit based on the yaw angle of second suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 147.
- [6] SCHNEIDER R. Actuator for controlling a wheelset of a rail vehicle: US20180273057[P]. 2018-09-27.
- [7] 毕鑫, 马卫华, 罗世辉. 机车转向架通过曲线的动态过程分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 150.
- BI Xin, MA Weihua, LUO Shihui. Dynamic process analysis of locomotive bogie curve negotiation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 150.
- [8] 刘慧斌, 倪文波, 马少明. 用于转臂式轴箱定位转向架的轮对主动导向装置研究[J]. 机车电传动, 2022(4): 83.
- LIU Huibin, NI Wenbo, MA Shaoming. Research of wheelset active steering device for bogie with rocker type journal box positioning[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(4): 83.
- [9] GONZÁLEZ F, PÉREZ J, VINOLAS J, et al. Use of active steering in railway bogies to reduce rail corrugation on curves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(4): 509.
- 收稿日期:2021-10-28 修回日期:2022-01-17 出版日期:2024-04-10
Received:2021-10-28 Revised:2022-01-17 Published:2024-04-10
· 第一作者:刘慧斌,硕士研究生, 1845394709@qq.com
通信作者:倪文波,教授, nwb@home.swjtu.edu.cn
· ©《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