

轨道交通车辆转向架主动径向控制器

胡波 马飞 高常君 周宇航 王中祥

(中车青岛四方车辆研究所有限公司技术中心, 266031, 青岛)

摘要 **[目的]** 轨道交通车辆传统转向架的定位刚度较大,在通过中小半径曲线时,轮轨间存在明显的横向力,导致轮轨磨耗较大,运营效率不高。为了提高轨道交通车辆的运行稳定性和曲线通过性能,提出一种转向架主动径向系统。**[方法]** 介绍了主动径向系统及其控制原理;介绍了径向控制器的软件和硬件设计流程;建立车辆动力学模型,结合系统其他部件,通过半实物仿真试验和环行线路试验对径向控制器的功能及性能进行验证。**[结果及结论]** 无论采用引导型主动检测模式还是精确型信标检测模式,径向控制器均能有效探测到曲线段,使转向架轮对趋于径向位置通过曲线段,且符合实际的线路信息。列车在进出曲线时,径向控制器能够驱动径向作动器即刻或提前完成动作,有效改善迟滞时间。仿真试验和环行线路试验结果表明,安装有主动径向系统转向架的列车在通过曲线段时,其轮轨横向力的变化趋势一致,均明显小于传统车辆被动式曲线通过状态下的参数指标,其中导向轮对的表现尤为突出。所提主动径向控制器能够提高列车的曲线段通过性能,降低轮轨磨耗。

关键词 轨道交通; 转向架; 径向控制器

中图分类号 U260.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.006

Active Radial Controller for Rail Transit Vehicle Bogies

HU Bo, MA Fei, GAO Changjun, ZHOU Yuhang, WANG Zhongxiang

(Technology Center, CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China)

Abstract **[Objective]** Conventional positioning stiffness of rail transit vehicle bogies results in significant lateral forces between wheels and rails, leading to substantial wear and reduced operational efficiency when navigating curves with small to medium radii. To enhance the operational stability and curve negotiation performance of rail transit vehicles, an active radial system for bogies is proposed. **[Method]** The active radial system and the control principles are introduced. The software and hardware design process of the radial controller is outlined. A vehicle dynamics model is established, integrating with other system components. The functionality and performance of the radial controller are verified through semi-physical simulation experiments and circular track tests. **[Result & Conclusion]**

Whether adopting a guided active detection mode or a precise beacon detection mode, the radial controller can effectively detect curve segments, aligning the bogie wheelsets toward radial positions during curve negotiation in accordance with the actual track information. When entering or exiting curves, the radial controller can drive the radial actuator to act immediately or in advance, effectively reducing the lag time. Simulation and circular track test results demonstrate that trains equipped with bogies featuring the active radial system exhibit a consistent and significantly lower variation in wheel-rail lateral force compared to conventional passive curve negotiation states. The performance of the guiding wheelsets is particularly outstanding. The proposed active radial controller improves the curve negotiation performance of trains and reduces wheel-rail wear.

Key words rail transit; bogie; radial controller

轨道交通车辆传统转向架的定位刚度较大,在通过中小半径曲线时,轮轨间存在明显的横向力,尤其是导向轮对,其轮轨磨耗较大,运营效率不高。

在传统转向架结构的基础上,主动径向转向架在构架和轮对轴箱之间设置了径向驱动装置^[1]。当车辆沿直线轨道运行时,径向驱动装置锁定在固定位置上,以保证轮对轴线平行且具备足够的定位刚度;当车辆通过曲线轨道时,径向驱动装置使轮对轴线趋于轨道曲线的径向位置,使轮对冲角趋近于0,从而减小轮轨间的横向力,降低轮轨磨耗。为了提高车辆在既有线路和高速线路的跨线运营能力^[2-3],从工程化应用的角度出发,本文参照需求和标准研制了一种径向控制器,在其探测到曲线的同时能够驱动径向作动器,使转向架轮对趋于径向位置,并在半实物仿真平台和环形线路上进行了主动径向系统的试验验证。本文研究可为主动径向系统的推广应用提供工程经验与技术指导。

1 主动径向系统及其控制原理

1.1 系统简介

主动径向系统由线路状态探测单元、径向控制器和执行机构组成,如图1所示。线路状态探测单

元实时检测车辆的运行参数信息,径向控制器通过这些信息判断当前车辆是否进入曲线,并计算所进入曲线的半径。径向控制器根据车辆所处的曲线条件计算各径向作动器的目标位移,并发送至执行机构,执行机构驱动径向作动器动作,使轮对达到径向位置。

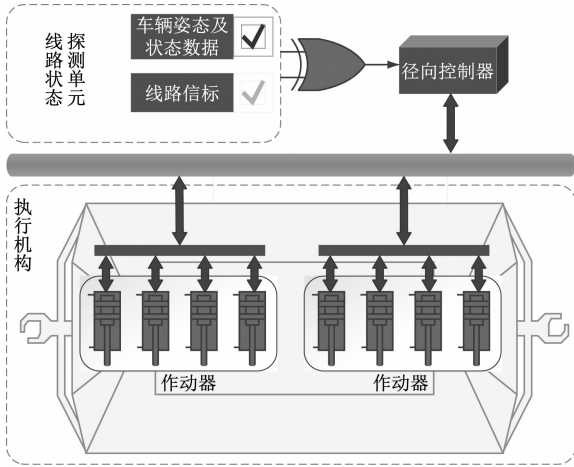


图1 主动径向系统组成示意图

Fig. 1 Diagram of active radial system composition

1.2 控制原理

主动径向系统工作原理示意图如图2所示,转向架类型为轴箱内置式。其中: θ 为转向架两条轮对轴线夹角的一半; a 为径向作动器横向安装跨距; b 为转向架轴距; R 为轨道曲线半径。

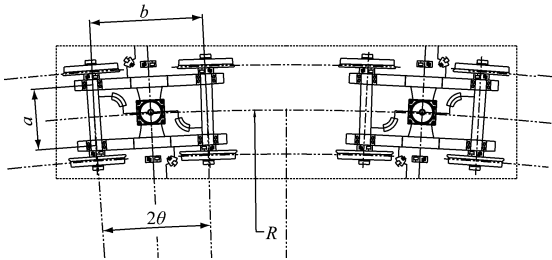


图2 主动径向系统工作原理示意图

Fig. 2 Diagram of active radial system working principle

每条轮对两侧轴箱分别安装径向作动器并独立控制,当转向架轮对处于完全径向位置时,同一转向架4个径向作动器的位移可由式(1)近似计算获得:

$$x = \pm \frac{abmP}{4R} \quad (1)$$

式中:

x ——径向作动器位移;

m ——径向倍率,默认为1.0;

P ——径向作动器位移与轴箱绕上端定位弹簧偏摆形成的轮对与转向架间的纵向位移比例系数,由转向架及径向作动器安装结构所决定,取为1.3。

线路曲率可以表示为:

$$k = \frac{\omega}{v} + \frac{\omega' d}{2v^2} \quad (2)$$

式中:

k ——线路曲率;

ω ——车体摇头角速度;

ω' ——车体摇头角加速度;

d ——车辆定距;

v ——车速。

式(2)能够补偿由车体几何尺寸引起的惯性滞后,使计算获得的曲率测量值与线路曲率实际值的同步性较高。

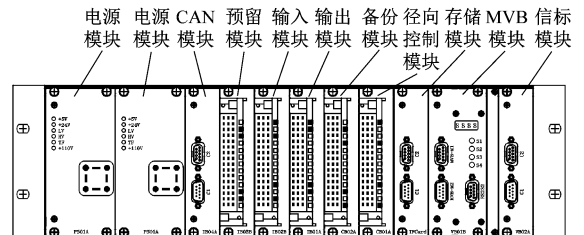
2 径向控制器研制

2.1 功能需求

径向控制器的功能主要包括:①接收传感器提供的车速、车体摇头角速度及信标信息;②计算线路曲率,判断车辆是否进入曲线,再计算曲率的倒数并取整,获取当前曲线半径;③根据当前曲线半径,计算各转向架径向作动器的目标参数;④根据主动径向控制策略,将控制指令发送给各转向架上的径向作动器;⑤具备网络通信、数据存储和故障记录功能。

2.2 硬件设计

根据设计需求,径向控制器采用标准3U机箱,电路板为插板形式,主要包括电源模块、径向控制模块、接口模块以及网络通信模块等,其径向控制器结构示意图如图3所示。



注:CAN为控制器局域网;MVB为多功能车辆总线。

图3 径向控制器结构示意图

Fig. 3 Diagram of radial controller structure

1) 电源模块。电源模块包括电磁兼容和过欠压保护电路,能够提供稳定的工作电源。

2) 径向控制模块。径向控制模块主要包括模

拟量输入及 RS485 通信电路,主芯片采用 dsPIC30F 系列。模拟量输入是通过传感器将角速度、加速度等信号转换为电压信号,再经过滤波、信号放大和运放跟随后传至主芯片,角速度测量范围为 $\pm 12(^{\circ})/\text{s}$,加速度测量范围为 $\pm 2g$ (g 为重力加速度)。RS485 通信电路与雷达进行通信,获取列车速度、运行距离等信息。

3) 接口模块。接口模块包括开关量模块、信标模块和存储模块。开关量模块包括带光电隔离的输入通道和继电器输出通道,负责采集光电开关的状态及输出系统故障信号。输入通道具有防反保护和逻辑自检电路,继电器输出通道具有短路保护和状态反馈自检电路。信标模块采用 RS485 通信电路与信标阅读器进行通信,获取信标信息。存储模块采用非易失性存储,可以存储 3 个月以上的数据。

4) 网络通信模块。网络通信模块包括 CAN 模块和 MVB 模块。CAN 模块采用 CAN 网络与径向作动器进行通信,下发控制指令,同时收集径向作动器的状态。MVB 模块负责与 TCMS(列车控制与管理系统)进行通信,上传主动径向系统的相关数据。该模块还设置有数码管和按键,可以通过按键选择信标模式或主动检测模式,数码管显示当前工作模式。

2.3 软件设计

本节重点介绍主动径向控制策略及软件实现方法,参照 EN 50128:2011《铁路应用—通信、信号和处理系统—铁路控制和监控系统的软件》定义的软件开发生命周期模型,将软件划分为 A(模拟)/D(数字)采集、径向控制、数据处理、网络通信等多个组件。

2.3.1 A/D 采集

A/D 采集角速度传感器的模拟量值,软件循环读取模拟量采样端口的角速度信息,当采样次数达到设定阈值后,对采样值进行中值滤波,再对滤波结果进行边界判断,对在边界值范围内的数据进行低通滤波,对在边界范围外的数据进行故障诊断,最终返回角速度值。由于采用了低通滤波处理,角速度值的计算会引入延时,该延时时长为 50 ms。

2.3.2 径向控制

径向控制分为精确型的信标模式和引导型的主动检测模式。信标模式根据所读取到的信标、行走的距离和存储的线路获取线路曲率;主动检测模

式根据式(2)的曲率公式计算线路曲率,参照基于轨道交通车辆二系回转角的线路曲率测量方法^[4],软件通过 PID(比例积分微分)控制^[5]调节车体摇头角的动态修正项。

径向控制器首先判断是否为信标模式,再根据精确型或引导型的不同模式获取线路曲率,检测列车运行方向的第一转向架是否进入曲线,在进入曲线开始径向动作的同时记录线路信息和位移数据,出曲线后记录曲线终点并终止数据记录,同时将径向作动器的位移清零。第一转向架径向控制程序流程图如图 4 所示,循环周期不超过 10 ms。

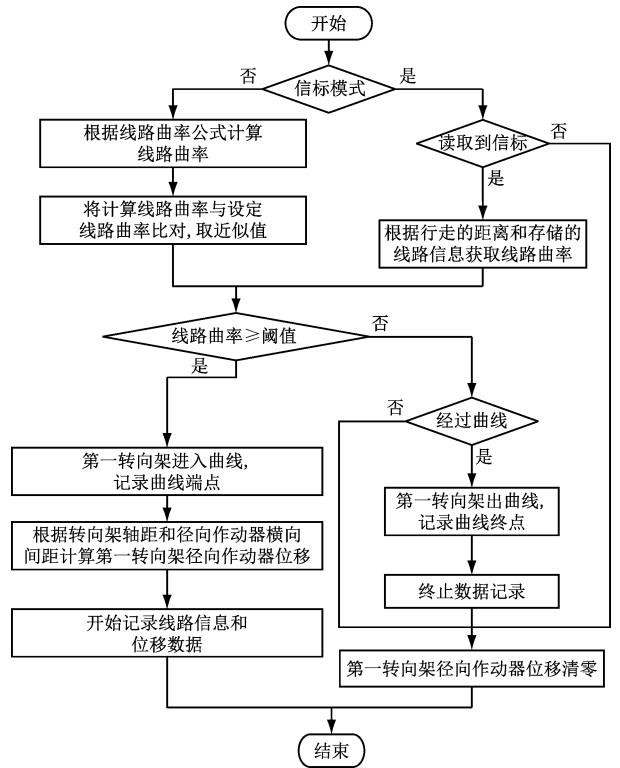
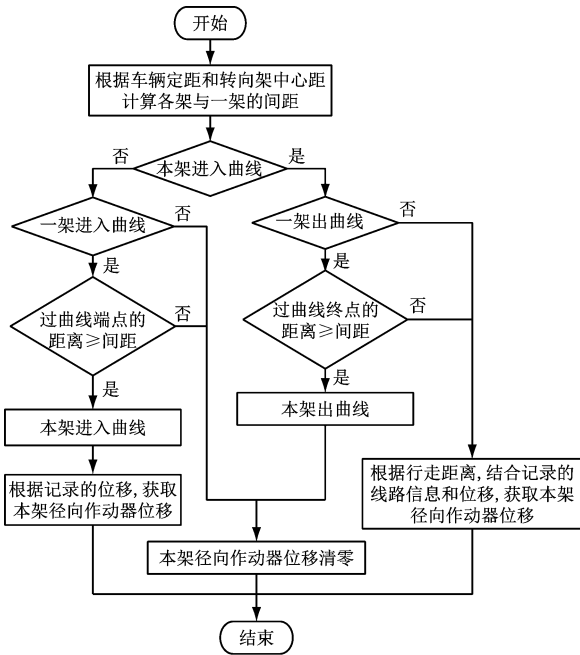


图 4 第一转向架径向控制程序流程图
Fig. 4 Flow chart of radial control program for the first bogie

其余转向架先根据车辆定距和邻车相邻转向架中心距计算其与第一转向架的间距,再根据列车行走的距离判断是否进入曲线,在曲线内与第一转向架保持相同的径向位移动作,出曲线亦然。其余转向架径向控制程序流程图如图 5 所示,循环周期不超过 10 ms。

2.3.3 数据处理

将径向作动器位移指令、角速度、半径等发送的数据进行打包,将径向作动器状态、工作模式等接收到的数据进行解析,同时进行超时判断,当通



注: 一架指列车运行方向的第一个转向架; 本架指下一个即将进入或出曲线的转向架; 各架指列车的各个转向架。

图5 其余转向架径向控制程序流程图

Fig. 5 Flow chart of radial control program for the rest bogies

信中断时采用默认的安全侧数据。

2.3.4 网络通信

网络通信包括 CAN 通信和 RS485 通信。通信组件包括初始化、错误处理及接收中断模块, 以及对帧序号及数据进行校验。

3 仿真试验验证

为确保系统装车后的运行安全, 在地面搭建了半实物仿真平台, 采用车辆实时动力学仿真模型与主动径向系统产品实物相结合的方式^[6]进行逻辑验证和性能测试。

3.1 半实物仿真平台

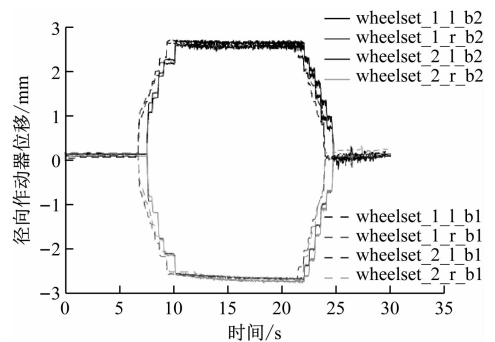
半实物仿真平台主要包括车辆动力学仿真、测控系统和机械台架三部分。车辆动力学仿真模型使用 Simpack 软件搭建, 线路模型可以根据需要进行设置, 一般为包含直线、缓和曲线、圆曲线、缓和曲线、直线的完整曲线。测控系统负责各模块之间的数据传输和模式转换, 机械台架模拟主动径向系统在车辆上的功能和布局。

试验运行时, 仿真器进行车辆动力学模型仿真运算, 获得车辆速度、车体摇头角速度等参数。测控系统通过以太网实时接收这些参数, 并将其转化为模拟量信号发送给径向控制器。径向控制器接

收到这些信号后进行判断和运算, 计算各径向作动器的位移数据, 并通过 CAN 网络发送给执行机构, 驱动径向作动器动作。径向作动器的实际位移由位移传感器测量获得, 仿真器中的车辆动力学模型接收到各径向作动器的位移数据后, 驱动模型中的径向作动器动作, 带动轮对趋于线路曲线的径向位置, 从而实现主动径向系统的硬件在环测试。

3.2 试验验证

车辆仿真模型以 70 km/h 的速度通过带有缓和曲线的右向曲线, 曲线半径为 300 m, 对系统的工作过程、响应时间等进行测试, 并将径向作动器实际位移输入车辆动力学模型进行轮轨横向力等参数的仿真。两个转向架径向作动器位移曲线如图 6 所示。径向作动器的实际位移为 2.7 mm, 与理论计算值一致。相较于前转向架, 后转向架径向作动器的响应时间理论值(车辆定距除以车速)为 915 ms, 后转向架径向作动器的响应时间实际值为 894 ms, 与理论值基本一致, 符合径向控制策略。转向架各轮对的轮轨横向力仿真曲线如图 7 所示。转向架主动径向通过曲线时的轮轨横向力明显小于被动式通过曲线时的轮轨横向力, 其中导向轮对的表现尤为突出。

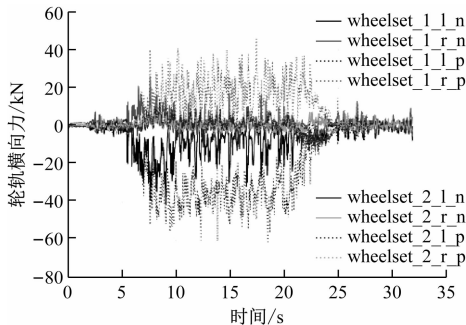


注: wheelset_1 表示转向架的导向轮对; wheelset_2 表示转向架的非导向轮对; l 表示曲线外侧车轮; r 表示曲线内侧车轮; b1 表示前转向架; b2 表示后转向架; 径向作动器位移以径向作动器向外伸出为正, 以径向作动器向内缩回为负, 转向架前后轮对轴线呈外八字, 趋于径向位置通过曲线; 余类同。

图6 两个转向架的径向作动器位移曲线

Fig. 6 Radial actuator displacement curves of two bogies

主动径向系统的响应时间总计为 150 ms, 包括车体角速度计算时低通滤波引入的 50 ms 延时, 以及径向作动器从接收到指令至开始动作的 100 ms 延时, 该响应时间是影响系统运行效率的关键因素之一。但由于连续缓和曲线的存在, 结合径向控制器的曲线半径算法, 响应时间的影响可以忽略不



注:n表示转向架主动径向通过曲线;p表示转向架被动式通过曲线;轮轨横向力以行车方向左向为正,以行车方向右向为负。

图7 转向架各轮对的轮轨横向力仿真曲线

Fig. 7 Wheel-rail lateral force simulation curve of each bogie wheelset

计。试验台接收到的线路曲率及径向作动器位移曲线如图8所示。其中,线路曲率是通过仿真器发送的车体摇头角速度和车辆速度等参数计算得到的。考虑到实际线路存在缓和曲线,在试验中设定将曲线半径为800 m作为主动径向系统工作的起始点来考核系统的响应时间。由图8可知:车辆进入曲线至曲线半径为800 m的位置时,相较于理想状态,即曲线半径为800 m处的理论位移,径向作动器已提前约40 ms达到指定位移;当车辆驶出曲线至曲线半径为800 m的位置时,径向作动器已开始动作,达到指定位移的延时约为260 ms。

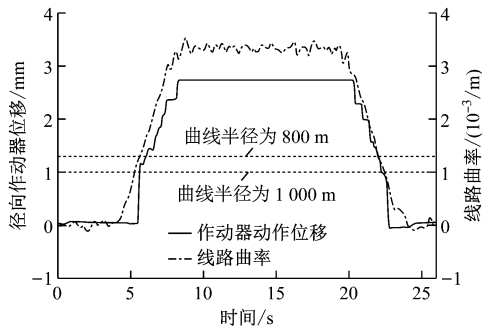


图8 试验台接收到的线路曲率及径向作动器位移曲线

Fig. 8 Line curvature received by test bench and displacement curve of radial actuator

4 环形线路试验验证

4.1 试验工况

2021年4月,主动径向系统在CR400AF-S双层动车组试验车上进行装车,并在环行线上进行了试验。环形试验线路从起点开始包含了长约730 m、半径为250 m的右向曲线段,多个小半径曲线及

直线段的组合,长约770 m、半径为280 m的右向曲线段,以及长约760 m的直线段。试验按照列车直线段的运行速度15~60 km/h、曲线段的运行速度15~30 km/h、主动检测模式和信标模式等多种工况组合进行。为进一步研究径向位移对轮轨横向力的影响,设定式(1)中径向倍率 m 为0.8~1.6,结合线路实际运行工况,对比验证各项指标参数。

4.2 试验过程

试验过程中,先设定主动径向系统的工作模式为引导型主动检测模式或精确型信标模式,再设定径向倍率,然后以不同的列车运行速度围绕环形试验线运行,如此反复进行多次试验。引导型主动检测模式实测径向作动器位移如图9 a)所示,其与环形试验线的线路信息吻合。采用精确型信标模式时,信标设置在半径为250 m的右向缓和曲线前20 m处,精确型信标模式实测径向作动器位移曲线如图9 b)所示,该图验证了主动径向系统能够准确响应信标模式。

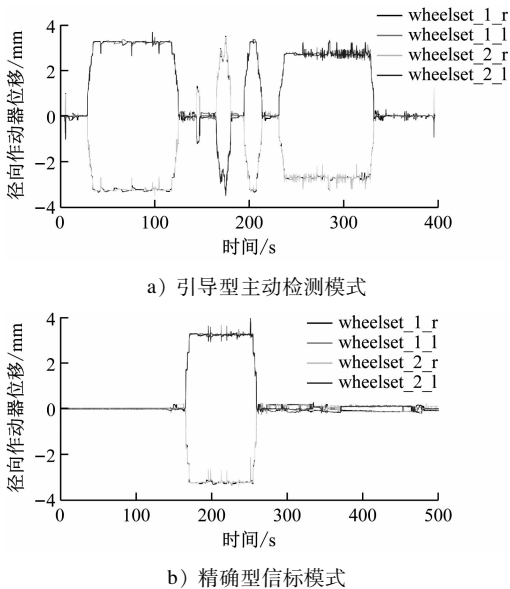


图9 引导型主动检测模式及精确型信标模式实测径向作动器位移曲线

Fig. 9 Field-measured radial actuator displacement curves under guided active detection mode and precise beacon detection mode

4.3 试验结果分析

对环线试验中主动径向系统的测试数据进行处理,取列车在直线段的运行速度60 km/h、曲线段的运行速度30 km/h的相关数据,以半径为250 m的右向曲线段为例,分析主动径向系统对列车通过

曲线时的轮轨横向力的影响。

当主动径向系统采用引导型主动检测模式通过曲线段时,导向轮对内外侧车轮的轮轨横向力曲线如图 10 所示。主动径向作动器通过曲线时的轮轨横向力明显小于被动式通过曲线时的轮轨横向力,且随着径向作动器位移量的增加,轮轨横向力的降低更明显,在 1.2 倍径向作动器位移时,轮轨横向力达到最小值。

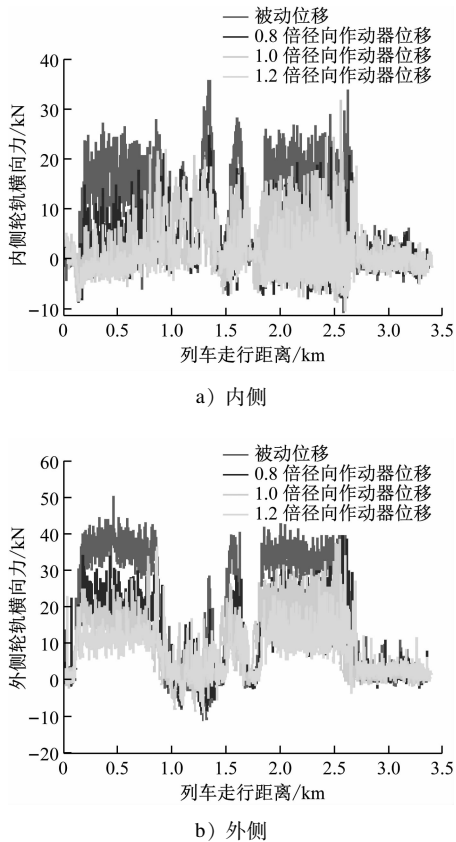


图 10 引导型主动检测模式下导向轮对内外侧车轮轮轨横向力对比

Fig. 10 Comparison of guided wheelset inner and outer wheel-rail lateral forces under guided active detection mode

当主动径向系统采用精确型信标检测模式通过曲线段时,导向轮对内外侧车轮的轮轨横向力曲线如图 11 所示。轮轨横向力的变化趋势与引导型主动检测模式类似,在 1.4 倍径向作动器位移时,轮轨横向力达到最小值,但超过 1.4 倍径向作动器位移时,轮对冲角反向增大,轮轨横向力不降反升。

精确型信标检测模式下的非导向轮对内外侧车轮轮轨横向力对比如图 12 所示。非导向轮对的变化趋势与导向轮对相同,但其变化量小于导向轮对的变化量。

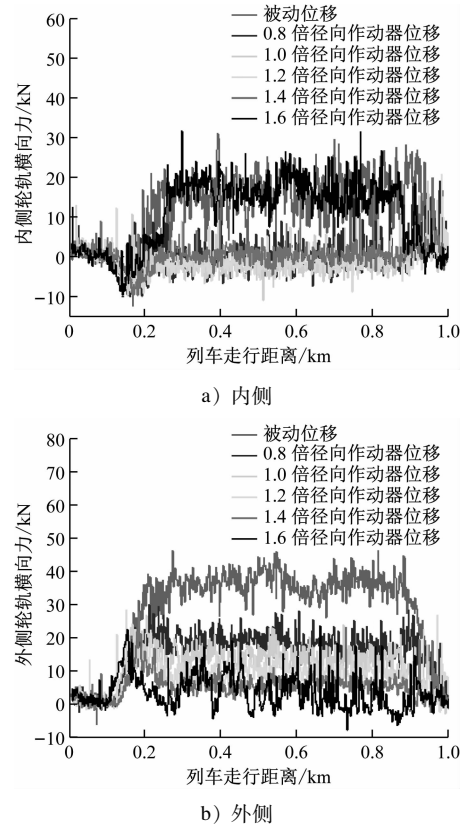


图 11 精确型信标检测模式下的导向轮对内外侧车轮轮轨横向力对比

Fig. 11 Comparison of guided wheelset inner and outer wheel-rail lateral forces under precise beacon detection mode

5 结语

通过仿真试验和环行线路试验,对径向控制器的功能及性能进行验证,主要获得以下结论:

1) 无论采用引导型主动检测模式还是精确型信标检测模式,径向控制器均能有效探测到曲线段,使转向架轮对趋于径向位置通过曲线段,且符合实际的线路信息。

2) 径向控制器驱动第一转向架和其余转向架的径向位移一致,各转向架径向作动器的动作延迟时间与理论计算值相符,符合主动径向控制策略。

3) 列车在进出曲线时,径向控制器能够驱动径向作动器即刻或提前完成动作,有效改善迟滞时间。

4) 对比仿真试验和环行线路试验,安装有主动径向系统转向架的列车在通过曲线段时,其轮轨横向力的变化趋势一致,均明显小于传统车辆被动式曲线通过状态下的参数指标,其中导向轮对的表现尤为突出。所提主动径向控制器有效提高了列车的曲线段通过性能,降低了轮轨磨耗。

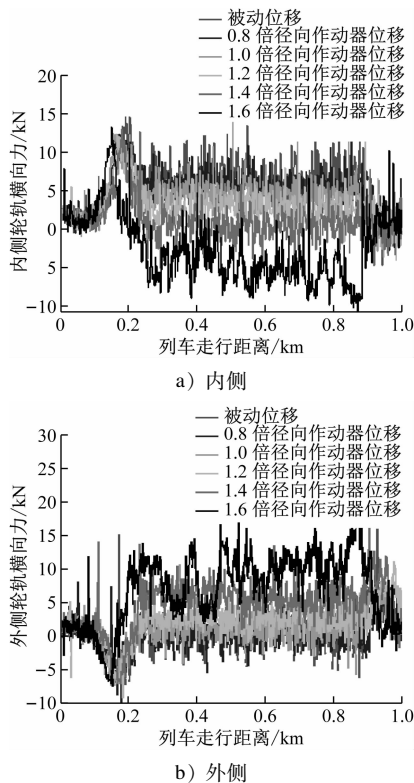


图 12 精确型信标检测模式下的非导向轮对内外侧车轮轮轨横向力对比

Fig. 12 Comparison of non-guided wheelset inner and outer wheel-rail lateral forces under precise beacon detection mode

参考文献

[1] 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.

(上接第 30 页)

[6] 冯国辉, 窦炳珺, 张高锋, 等. 隧道开挖引起水平向位移被动桩的简化计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 10.
FENG Guohui, DOU Bingjun, ZHANG Gaofeng, et al. Simplified calculation method for lateral displacement of passive pile caused by tunneling[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 10.

[7] 冯国辉, 徐兴, 侯世磊, 等. 基于 Kerr 地基模型的基坑开挖引起下卧既有隧道受力变形[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(4): 474.
FENG Guohui, XU Xing, HOU Shilei, et al. Deflections of adjacent underground tunnel induced by excavation based on Kerr foundation model[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(4): 474.

[8] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 考虑剪切变形下基坑开挖引起下卧既有隧道的纵向变形研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 132.
FENG Guohui, XU Changjie, ZHENG Mingwang, et al. Study of

LUO Xiangping. Integrated wheelset positioning device used for radial bogie; 201610304174.6[P]. 2016-09-21.

[2] 李芾, 傅茂海, 黄运华. 径向转向架机理及其动力学特性研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(5): 46.
LI Fu, FU Maohai, HUANG Yunhua. Research of principle and dynamic characteristics of radial bogies[J]. China Railway Science, 2002, 23(5): 46.

[3] 李亨利. 货车径向转向架动力学特性及轮轨磨耗研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
LI Hengli. Research on the dynamics and wear of truck radial bogie[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.

[4] 田师屹, 罗湘萍, 任利惠, 等. 基于地铁车辆二系回转角的主动径向研究[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.

[5] 王平, 傅茂海, 刘楠, 等. 基于 Simulink 的主动径向转向架控制方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2013(5): 37.
WANG Ping, FU Maohai, LIU Nan, et al. Active steering bogie control approaches study based on Simulink[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(5): 37.

[6] 兰海龙, 李萍, 郭建群. 基于 dSPACE 平台的 AMT 硬件在环测试系统搭建[J]. 机械工程与自动化, 2020(5): 19.
LAN Hailong, LI Ping, GUO Jianqun. Building of AMT hardware-in-the-loop testing system based on dSPACE platform[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(5): 19.

· 收稿日期:2022-12-03 修回日期:2023-01-17 出版日期:2024-02-10
Received:2022-12-03 Revised:2023-01-17 Published:2024-02-10
· 通信作者:胡波,高级工程师,daniels_hu@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

longitudinal deformation of existing underlying tunnel due to above excavation considering shear deformation of tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 132.

[9] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
XU Ling. Study on longitudinal settlement of shield tunnel in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.

[10] 吴为义. 盾构隧道周围地下管线的性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
WU Weiyi. Study on mechanical behaviors of buried pipelines induced by shield tunneling construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

· 收稿日期:2022-04-08 修回日期:2022-05-05 出版日期:2024-02-10
Received:2022-04-08 Revised:2022-05-05 Published:2024-02-10
· 通信作者:董瑞桥,高级工程师,517554248@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