DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.106

基于 dSPACE 的独立轮对主动导向控制策略研究

曾贵萍，唐　阳，蒋明朝
（西南交通大学 机械工程学院，四川 成都 610031）

摘　要：独立轮对作为低地板列车的关键组成部分，其结构导致其导向性能缺失、磨损和噪声等问题，这些问题成为制约低地板列车发展的主要因素。文章通过已有的独立轮对单轴转向架滚动试验台，结合 dSPACE 系统搭建了快速控制原型（Rapid Control Prototype，RCP）测试平台，并提出了 2 种主动导向控制策略，分别开展了独立轮对导向性能验证、Simulink 和 SIMPACK 联合仿真验证，以及主动导向控制策略的半实物仿真台架试验。试验结果表明，独立轮对本身不具备曲线对中能力，当添加主动导向控制后独立轮对能完全无横向偏移。文章所提出的 2 种主动导向控制策略均能够使采用独立轮对的车辆获得良好的曲线通过性能，在补偿车辆速度和曲线半径的情况下，独立轮对横移量能高效地回复至中心线位置。

关键词：独立轮对；主动导向控制；RCP 测试平台；半实物仿真；dSPACE；城市轨道交通

中图分类号：U270.33　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)04-0118-07

0　引言

在城市轨道交通中，采用低地板车辆的交通工具主要有轻轨和有轨电车[1]。独立轮对是低地板车辆的关键组成部分，然而，由于其自身结构的特点导致轮对无法自主导向，造成了车辆运行不安全、磨损、噪声等问题，使其尚未被广泛使用[2]。目前，国内外解决独立旋转车轮导向问题的方法主要包括踏面外形设计[3-5]、加设导向机构[6-8]、主动悬挂技术[9]等。文献[10]针对独立轮对的主动导向问题及其系统稳定性做了全面的研究，提出了直接导向轮辐方法，理论上可以使车轮始终处于线路的径向位置，具有很好的曲线通过性能和很高的临界速度，难点在于车轮相对轨道的实时横向位移数据获取难度很大。文献[11-12]提出了 2 种控制策略，通过仿真测试验证了 2 种控制方法均能够使独立轮对很好地达到中心线位置，但在工程上无法有效地实现对独立轮对横移量的检测。文献[13]提出了独立轮对的电磁差速主动导向控制，利用独立轮对左右两车轮间加装的电磁耦合器的矢量控制系统，控制左右车轮以一定的转速差转动，以弥补内外轨的路程差，从而实现轮对导向，但最终未能从试验角度予以验证和研究。

半实物仿真是数学模型和实物模型相结合的一种技术，相比于软件仿真和实物仿真它具有提升计算结果的可信度、缩短研发周期和节约研发经费等优点[14]。为解决独立轮对导向能力缺失的问题，本文基于独立轮对单轴转向架滚动试验台和 dSPACE 系统搭建了 RCP 测试平台，开展半实物仿真研究。本文首先开展独立轮对导向性能试验验证，在此基础上进行 Simulink 和 SIMPACK 的联合仿真，验证主动导向控制方案的可行性，最后基于 RCP 测试平台开展半实物仿真台架试验，对比 2 种主动导向控制策略的性能。台架试验虽然不能完全代替车辆的现场测试，但能较为准确地还原和预测车辆动态性能特点，对独立轮对主动导向控制技术研究具有理论指导意义。

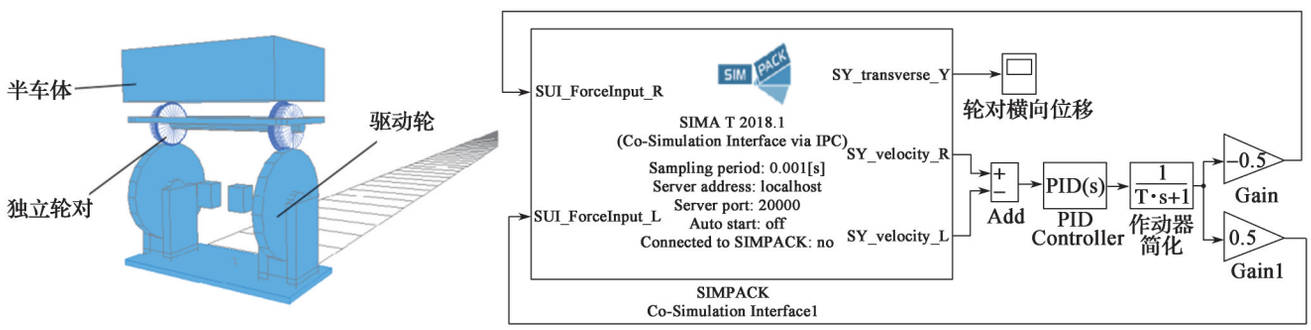
基金项目：四川省科技厅资助项目（2019YFH0045）
通信作者：唐　阳，男，硕士，副教授，硕士生导师，主要从事城市轨道交通理论与技术方面的研究；E-mail: ty501@swjtu.edu.cn
引用格式：曾贵萍, 唐阳, 蒋明朝 . 基于 dSPACE 的独立轮对主动导向控制策略研究[J]. 机车电传动, 2024(4): 118-124.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.106.
Citation：ZENG Guiping, TANG Yang, JIANG Mingchao. Research on active steering control strategy for independent wheelsets based on dSPACE [J]. Electric drive for locomotives,2024(4): 118-124.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.106.

1　独立轮对单轴转向架滚动试验及仿真模型简介

1.1　Simulink和SIMPACK联合仿真模型

开展半实物仿真时若直接将实物放进控制回路中进行测试研究，可能会由于控制系统不完善、接口程序考虑不周全等问题导致试验失败，甚至造成实物损坏。因此，在半实物仿真开始前有必要开展Simulink和SIMPACK联合仿真，以验证主动导向控制的可行性。将作动器安装在构架与车体之间，由于车体的质量远大于单轴转向架的质量，故车体可以看成固定的状态，同时力矩可以通过一系悬挂传递到轮组上，如此也可以看成间接弥补了独立轮组缺失的纵向蠕滑力矩。在仿真中，在半车体两侧与构架之间增加93号力元即可。

图1(a)为通过SIMPACK建立的全尺寸半车滚动试验台的动力学模型，其底板相对于大地只有侧滚自由度，轨道轮相对于曲率装置只有点头自由度，曲率装置相对于底板只有摇头自由度。因此，控制底板相对于大地转动的角度，便可模拟超高和离心力特征；控制曲率装置相对于底板的转动角度便可模拟冲角特征；分别控制左右2个轨道轮的转速即可模拟曲线内外轨长度差。当车辆通过曲线轨道时，轨道超高角、曲率关于弧坐标是变化的，而滚动试验台并不是在轨道上运行，故需要将相关参数处理成关于时间的函数。图1中轨道轮之间通过14号齿轮约束实现内外轨道长度的模拟，而模拟超高特征、离心力特征的综合效应和冲角特征则使用40号铰接。仿真环境线路总长为520 m，其中直线段长度为105 m，缓和曲线长度为105 m，圆曲线段长度为105 m，半径为300 m，在圆曲线上超高为0.11 m，直线段与圆曲线之间的缓和曲线采用BLO三次曲线变化，车速为15 m/s。图1(b)为在Simulink中建立的控制模型框图，独立轮对单轴转向架滚动试验台模型通过SIMAT接口实时输出独立轮对横移量和左右轮角速度，作动器的输出作为SIMAT接口的输入，控制器为比例控制器。



(a) 动力学模型　　(b) 控制模型框图

图1　独立轮对单轴转向架滚动试验台SIMPACK动力学模型

Fig. 1　SIMPACK dynamic model of rolling test bench for single-axle bogies with independent wheelsets

基于联合仿真模型，分别对曲线通过条件下的不加主动导向控制和加主动导向控制2种状态进行仿真计算。仿真结果如图2所示，其中0~7 s为直线运行时间，7~14 s为缓和曲线运行时间，14~21 s为圆曲线运行时间，21~50 s为直线运行时间。从图2可知，滚动试验台模拟直线段进入缓和曲线后，在不添加主动导向控制时独立轮对向外轨方向产生约6 mm的横向偏移，在t=25 s后有少许的恢复，之后维持稳定，并且其恢复效果较差，这是由于微量的横向蠕滑力和底板恢复侧滚倾角所致；当添加主动导向控制时，在t=25 s后轮对开始逐渐向中心方向偏移，到t=45 s时左、右轮已经完全无横向偏移，整个控制过程时间较短，并且无大的超调。上述结果表明，添加主动导向控制能够大幅提升独立轮对的曲线对中特性。

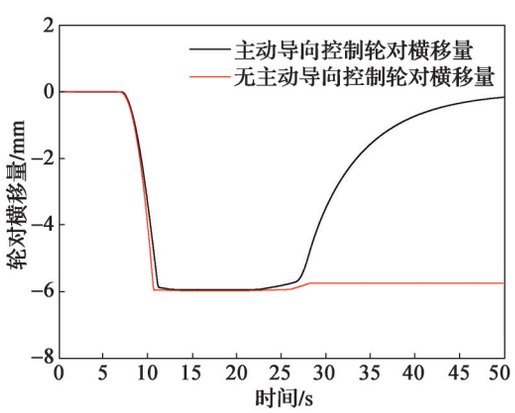


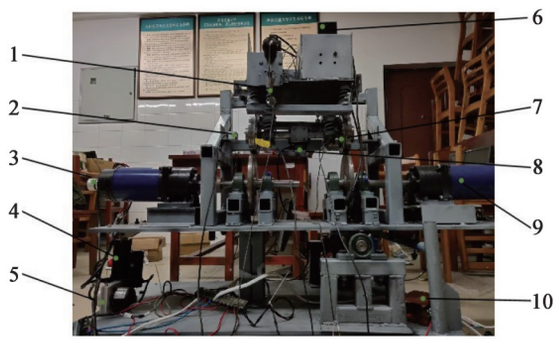
图2　联合仿真主动导向控制横移量变化规律

Fig. 2　Variation law of lateral displacement under joint simulation of active steering control

1.2　独立轮对单轴转向架滚动试验台

缩比试验可以提高试验的安全性，降低研发周期和成本。因此，基于相似理论，根据几何相似、物理相似和动态行为相似，设计了图3所示的1:5独立轮对单轴转向架滚动试验台[15]，其关键参数如表1所示。总体结构主要包含有基座、超高平台、轨道轮平台、独立轮对、构架、车体和作动器平台，在各种传感器和

执行机构配合下完成相应试验。直流电机带动驱动轮模拟无限长的轨道，电机尾部安装有编码器，使得驱动轮按照预设的转速运转，并实现曲线段模拟。纵向定位装置限制独立轮对的横向和摇头自由度，激光位移传感器和姿态传感器分别检测横移量和摇头角。基于独立轮对单轴转向架滚动试验台开展曲线导向能力验证的模拟试验，试验线路为“直线–缓和曲线–圆曲线–缓和曲线–直线”[16]。



1—拉压负荷传感器；2—激光位移传感器；3—增量式编码器；4—超高电动缸；5—拉绳位移传感器；6—伺服电动缸；7—霍尔传感器；8—姿态传感器；9—驱动轮直流电机；10—驱动器及变压设备。

图 3　独立轮对单轴转向架滚动试验台

Fig. 3　Rolling test bench for single-axle bogies with independent wheelsets

表 1　试验台参数及相似比

Table 1　Test bench parameters and similarity ratios

参数名称	参数值		相似比
	1:1 模型	1:5 模型	
轮对质量/kg	700	5.6	5^3
滚动圆半径/m	0.30	0.06	5
构架质量/kg	360	2.88	5^3
轨距/mm	1 435	287	5
纵向蠕滑系数	1.0×10^7	47 000	$5^{8/3}$
横向蠕滑系数	1.0×10^7	47 000	$5^{8/3}$
轮对摇头惯量/(kg·m^2)	330	0.10	5^5
构架摇头惯量/(kg·m^2)	160	0.05	5^5
一系悬挂横向间距/m	1.80	0.36	5
一系横向刚度/(N·m^{-1})	10^7	80 000	5^3
一系纵向刚度/(N·m^{-1})	10^7	80 000	5^3
一系垂向刚度/(N·m^{-1})	10^7	80 000	5^3
二系悬挂横向间距/m	0.90	0.18	5
二系悬挂纵向间距/m	0.30	0.06	5
二系横向刚度/(N·m^{-1})	3.0×10^6	24 000	5^3
二系纵向刚度/(N·m^{-1})	3.0×10^6	24 000	5^3
半车体质量/kg	5 500	44	5^3

在开展主动导向控制策略的半实物仿真试验前，使用独立轮对单轴转向架滚动试验台对独立轮对的导向性能进行验证，包括直线复位性能和曲线导向性能。试验速度为 2 m/s，直线和曲线长度均为 50 m，曲线半径为 20 m，试验结果如图 4 所示。图 4 中红色曲线为直线段轮对横移量试验结果，黑色曲线为曲线段轮对横移量试验结果。由图 4 可知：①对于直线段，独立轮对在初始条件为 3 mm 右移的情况下，轮对的右移量在前 10 s 基本稳定不变，其横移量整体上呈缓慢减小趋势。由于试验台负载不均衡和电机转速的影响导致横移量短暂的波动，在 t=20 s 后，轮对基本稳定在右移 1.8 mm 左右。②对于曲线段，在前 4 s 内，轮对未发生明显横移，轮对以及试验台车辆向右倾斜，期间轮对受振动影响，有不稳定的摇头产生，反超高电机工作用以模拟未平衡离心力；到 t=8 s 前后，反超高电机停至最高点，此刻横移量达到最大值，约为 4 mm，检测右侧轮对与驱动轮接触处，可听到连续的驱动轮与车轮踏面摩擦声音；此后反超高电机下降，而轮对横移量出现微小的向左方向的回复，这表明存在少许的横向蠕滑力作用。由此可见，独立轮对并非完全没有复位能力，只是持续的时间太长，对于真实线路是不允许的。

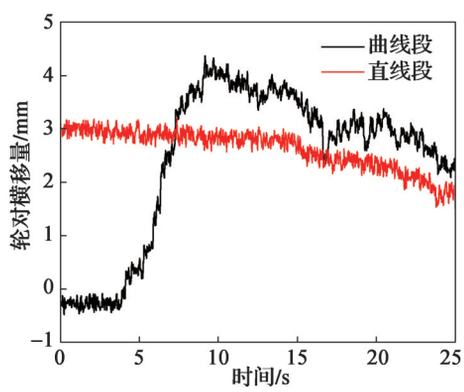


图 4　独立轮对横移量随时间变化规律图

Fig. 4　Variation law of lateral displacement of independent wheelsets over time

1.3　RCP 测试平台与主动导向控制策略

基于独立轮对通过曲线时主动导向控制的可行性这一前提，设计了滚动试验台 RCP 测试平台，图 5 为 RCP 测试平台结构示意图。RCP 测试平台分为上位机和下位机系统[17]。其中，上位机系统主要由计算机、监控界面、开发环境、仿真软件等组成，下位机系统主要由伺服电机、直流电机等执行机构和监测位移、速度等信号的各种传感器组成。dSPACE 在上位机与下位机之间形成联系，一方面接收计算机的程序向执行机构发出命令，另一方面接收反馈装置信号并进行处理。上位机完成控制策略的建模，并根据模型自动生成可执行代码，dSPACE 将可执行代码传输到执行机构以进行控制，同时将被控对象的实时状态返回上位机进行监控，并根据状态反馈改变控制参数，实现控制策略的半实物仿真校验和控制参数的实时校正。

独立轮对主动导向控制原理主要是借助于独立轮对原有的横向蠕滑力。由于独立轮对不具有纵向蠕滑力矩，因此通过对轮对施加横向力的方式不能使轮对获得导向能力，只能通过对轮对施加摇头力矩而达到

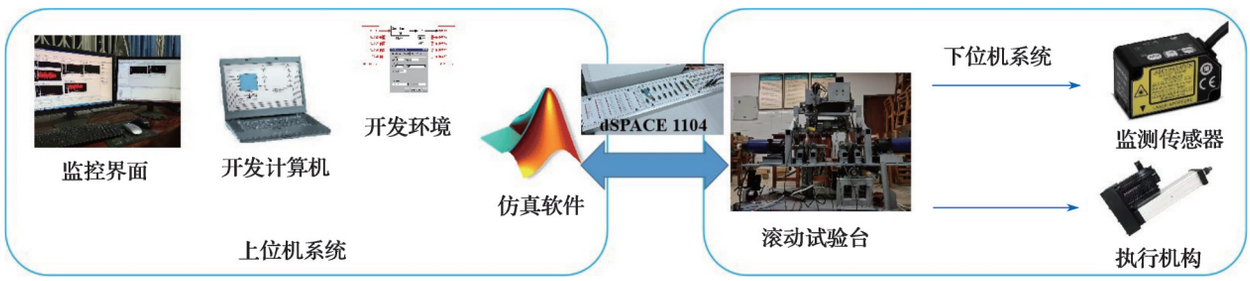


图5　RCP测试平台结构示意图

Fig. 5　Schematic diagram of RCP test platform structure

导向的目的。在车辆运行过程中，通过检测轮对的状态信息，如轮对横移量、轮对冲角和左右轮转速差等，对轮对进行姿态控制或转速控制，从而使轮对产生合适的摇头角，进而利用横向蠕滑力使轮对对中。

本文采用左右车轮的转速差作为反馈量，控制目标为左右轮转速差等于0，使用最简单的比例控制模型进行导向控制，其输入控制力矩T_β为

$$T_\beta = k_p \cdot \dot{\beta}_\omega \tag{1}$$

式中：k_p为比例系数；$\dot{\beta}_\omega$为左右轮转速差。

由于独立轮对的两轮互相解耦，导致以$\dot{\beta}_\omega = 0$作为最终的控制目标时独立轮对到达不了中心位置。当车辆以速度v通过曲线半径为R的曲线，并且轮对没有产生横移量时，使用最简单的比例控制模型，则可得到输入的控制力矩为

$$T_\beta = k_p \cdot \left(\dot{\beta}_\omega - \dot{\beta}_{obj}\right) \tag{2}$$

式中：$\dot{\beta}_{obj}$为内外侧的角速度差目标值。

$$\dot{\beta}_{obj} = \frac{2L_g v}{r_0 \cdot R} \tag{3}$$

式中：r_0为车辆滚动圆半径；L_g为轮对滚动圆横向间距的一半。

在真实线路中，r_0和L_g都是固定不变的，所以需要在此基础上补偿车辆运行速度和曲线通过半径，从而达到左右车轮转速差的控制目标，进而使作动器产生相应大小的主动导向力矩，使轮对趋向于径向位置。

基于RCP测试平台，本文提出了2种独立轮对主动导向控制策略：一种为仅用左右轮转速差作为反馈量；另一种为采用左右轮转速差作为反馈量，并补偿车辆速度和曲线通过半径的信息，预先设定后将其输入到控制程序中。另外，考虑到RCP测试平台所涉及的非线性因素过多，通过理论方式对控制器进行调定试验较为复杂，为避免对试验台造成不必要的损伤以及降低试验成本，选择最简单的比例控制器进行整体的控制。

2　半实物仿真试验结果分析

2.1　调定比例系数

在完成独立轮对直线复位能力、曲线导向能力和添加主动导向控制可行性验证的基础上，基于RCP测试平台开展了主动导向策略半实物仿真试验。经过反复地调定，缩小比例系数的范围在100~1 200，分别在此范围内选择3个比例系数，并对试验台进行曲线通过的姿态控制，独立轮对横移量随仿真时间的变化规律如图6所示。由图6可知，3种比例系数的控制器都对独立轮对曲线对中起到了控制效果。综合超调量和上升时间考虑，选择比例系数$k_p = 640$，其超调量和上升时间都在较小范围内。

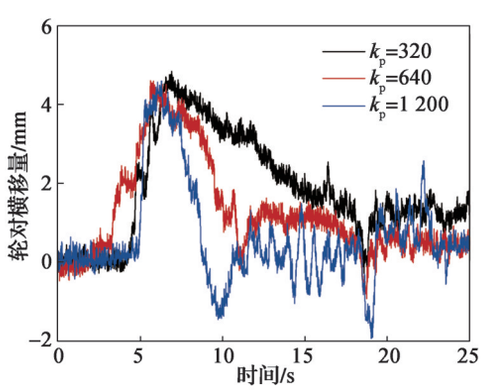


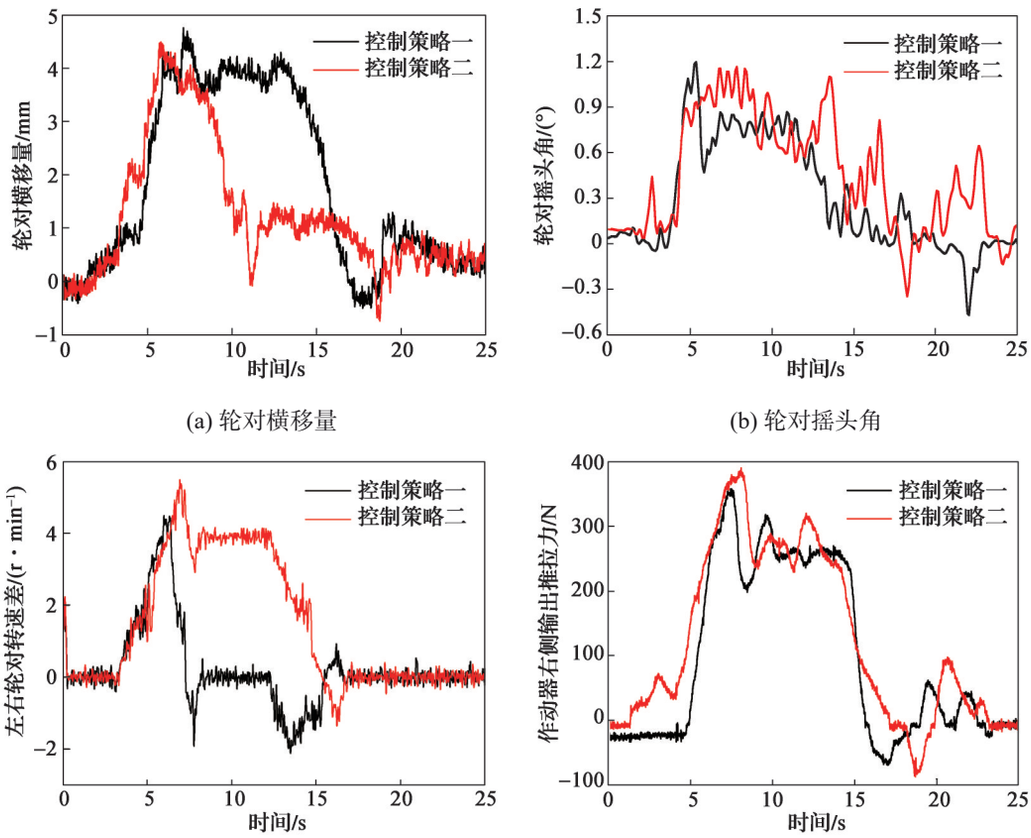
图6　不同比例系数下独立轮对横移量控制效果

Fig. 6　Control effect of lateral displacement of independent wheelsets under different proportional coefficients

2.2　主动导向控制策略半实物仿真试验

验证主动导向控制的可行性后，分别对前文提及的2种主动导向控制策略开展半实物仿真对比试验。试验速度为2 m/s，线路总长为42 m，其中直线段18 m，缓和曲线12 m，圆曲线12 m，曲线半径20 m。试验结果如图7所示，在图7中，0~9 s为直线运行时间，9~15 s为缓和曲线运行时间，15~21 s为圆曲线运行时间，21~25 s为直线运行时间。需要说明的是，由于为半实物仿真，数据从实物传输到计算机的过程中有些许延迟，故时间段节点对应的线段会有一点偏差。

由图7(a)可知，车辆在进入圆曲线后，2种控制策略下轮对横移量均存在约4 mm的峰值，此时独立轮对的轮缘内侧与驱动轮发生剧烈摩擦。在控制策略一的条件下，横移量处于峰值，并在维持一段时间后开始逐渐下降，在t=15 s左右时横移量接近为0；而控制策



(a) 轮对横移量　(b) 轮对摇头角

(c) 左右轮对转速差　(d) 作动器输出力

图 7　两种控制策略独立轮对检测量随仿真时间变化规律

Fig. 7　Variation law of detection quantity of independent wheelsets under two control strategies with simulation time

略二由于补偿车辆运行速度和曲线的通过半径，作动器产生一定大小的主动导向力矩，使得轮对更快地趋向于径向位置，因此在t=10 s左右时轮对已处于中心线位置。由图 7(b) 可知，在曲线线路中段控制策略二的摇头角普遍大于控制策略一的摇头角，这表明摇头角越大，独立轮对的对中效果越好。由图 7(c)可知，2 种控制策略均以左右轮转速差作为反馈量，在整条线路的控制目标接近于 0，波动范围均在 4 r/min 左右。由图 7(d)可知，作动器输出力与独立轮对横移量的变化趋势基本相同，但控制策略二的作动器输出推力大于控制策略一，这表明控制策略二能够在较短的时间内对相对较大的横移量进行调节。

综上所述，本文提出的主动导向控制策略在改善独立轮对车辆的曲线通过性方面行之有效，并且在 2 种控制方法中，控制策略二的改善效果更为良好。

3　总结

本文基于独立轮对单轴转向架滚动试验台，搭建了 Simulink 和 SIMPACK 联合仿真模型，结合 dSPACE 上位机系统搭建 RCP 测试平台，分别开展了独立轮对导向能力试验、主动导向控制可行性仿真验证和主动导向控制策略半实物仿真试验。研究总结如下：

①开展 Simulink 和 SIMPACK 联合仿真可发现，当添加主动导向控制后轮对获得了比较明显的曲线对中能力，为进一步进行半实物仿真试验奠定了理论基础。

②半实物仿真对比试验研究结果表明，在左右轮转速差作为反馈量的基础上，同时补偿车辆速度和曲线通过半径的信息，独立轮对车辆通过曲线时的导向能力有较大的提升。

③本试验所采用试验台为滚动试验台，未来的研究中可将其改进为滚振试验台，模拟轨道不平顺工况。另外，本文仅对比了 2 种比例控制策略，本课题组将继续开展深入研究，通过添加自适应控制器提高动态性能，实现多种控制策略优劣对比。

参考文献：

[1] 李太民 . 城市轨道交通可持续发展的分析与研究[J]. 北方交通, 2022, 355(11): 78-81.
LI Taimin. Analysis and research on the sustainable development of urban rail transit[J]. Northern communications, 2022, 355(11): 78-81.

[2] 周橙, 池茂儒, 梁海啸, 等 . 城市轻轨低地板列车独立轮对接触与磨耗分析[J]. 中国铁路, 2021(5): 33-38.
ZHOU Cheng, CHI Maoru, LIANG Haixiao, et al. Analysis on the contact and wear of independent wheelsets for low-floor trains of urban light rail transit[J]. Chinese railways,

2021(5): 33-38.

[3] WANG Wenjun. Design of the wheel profile of an independently rotating wheel with inverse tread conicity by considering the trajectory of the center of gravity[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2016, 230(3): 672-680.

[4] 孙效杰, 许聪, 陆正刚, 等. 独立车轮导向优化研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 1316-1326.
SUN Xiaojie, XU Cong, LU Zhenggang, et al. Research progress of independent rotating wheels steering optimization[J]. Journal of central south university (science and technology), 2021, 52(4): 1316-1326.

[5] LIU B, MEI T X, BRUNI S. Design and optimisation of wheel-rail profiles for adhesion improvement[J]. Vehicle system dynamics, 2016, 54(3): 429-444.

[6] 周橙, 雷昆来, 孙代涛, 等. 低地板轻轨列车独立轮对导向发展现状与永磁同步直驱电机应用趋势[J]. 机车电传动, 2021(4): 48-53.
ZHOU Cheng, LEI Kunlai, SUN Daitao, et al. Development status of IRWs steering and application trend of PMSM in LRVs[J]. Electric drive for locomotives, 2021(4): 48-53.

[7] 王晨晨, 李红, 蔡海森, 等. 一种轨道车辆轮对主动导向装置: CN201620179401.2[P]. 2016-03-09.
WANG C C, LI H, CAI H S, et al. A kind of active guiding device for wheel pairs of rail vehicles: CN201620179401.2 [P]. 2016-03-09.

[8] 刘晓宇. 采用独立旋转车轮列车的导向性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LIU Xiaoyu. A study on steering behavior of vehicles with independently rotating wheels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[9] FU Bin, GIOSSI R L, PERSSON R, et al. Active suspension in railway vehicles: a literature survey[J]. Railway engineering science, 2020, 28(1): 3-35.

[10] 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
YU Fan. Vehicle dynamics and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.

[11] 张济民, 宗振海, 周和超, 等. 独立旋转轮对轨道车辆自适应导向控制研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 232-239.
ZHANG Jimin, ZONG Zhenhai, ZHOU Hechao, et al. Research on adaptive steering control of independent rotating wheelset[J]. Journal of mechanical engineering, 2022, 58 (4): 232-239.

[12] 文永翔. 独立轮对轻轨车导向技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WEN Yongxiang. The study on steering technology of light rail vehicle with independent wheel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[13] 李涛涛. 独立轮对的电磁差速主动导向控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
LI Taotao. Research on electromagnetic differential active guidance control of independently rotating wheels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[14] 单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
SHAN Jiayuan, MENG Xiuyun, DING Yan. Hardware in the loop simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

[15] 蒋明朝. 基于dSPACE的独立旋转车轮主动导向半实物仿真试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
JIANG Mingchao. Research on hardware-in-the-loop simulation of active steering of independent rotating wheel based on dSPACE[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.

[16] 陈阳. 铁道机车车辆试验台曲线模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
CHEN Yang. The study on simulation method of curve negotiation on roller rig[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[17] 万羽瞳. 基于NI CompactRIO的无人直升机快速控制原型设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
WAN Yutong. Rapid control prototype of unmanned helicopter based on NI CompactRIO[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

Research on active steering control strategy for independent wheelsets based on dSPACE

ZENG Guiping, TANG Yang, JIANG Mingchao

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: As a key component of low-floor trains, independent wheelsets suffer from issues such as lack of steering performance, wear, and noise due to their structure, which are major factors constraining the development of low-floor trains. Therefore, this paper established a rapid control prototype (RCP) test platform by utilizing the existing rolling test bench for single-axis bogies with independent wheelsets and combining it with the dSPACE system. Two active steering control strategies were proposed and verified through steering performance validation of independent wheelset, joint simulation validation of Simulink and SIMPACK, and hardware-in-the-loop simulation bench experiments of active steering control strategies. The experimental results show that the independent wheelsets themselves do not possess the curve centering ability, but when active steering control is added, the independent wheelsets can completely eliminate lateral offset. Both proposed active steering control strategies enable the independent wheelset vehicle to achieve good curve-passing performance, and under the compensation of vehicle speed and curve radius, the lateral displacement can efficiently be corrected to return independent wheelsets to the centerline position.

Keywords: independent wheelsets; active steering control; RCP test platform; hardware-in-the-loop simulation; dSPACE; urban rail transit

收稿日期：2023-08-21；修回日期：2024-03-08