DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.016　　文章编号：1000-128X(2023)03-0124-07

有轨电车独立旋转车轮导向与黏着控制策略研究

李正武，方晓春，林　帅，王　帅，林　飞
（北京交通大学 电气工程学院，北京 100044）

摘　要：由于独立旋转车轮的直线对中和曲线导向能力差，文章以牵引电机导向型独立旋转车轮为研究对象，开展导向控制策略的研究。针对横向位移控制在系统参数变化后，PID 参数需要重新整定的问题，提出基于模糊逻辑控制的参数自适应调整策略。此外，考虑到导向转矩的实现依赖于轮轨间黏着力，在优化黏着控制的基础上提出考虑黏着限制的转矩分配策略。通过仿真软件 MATLAB 与 Simpack 搭建机电耦合仿真模型，对提出的控制策略进行验证。结果表明，在系统参数变化和轨面状态变差的情况下，独立旋转车轮仍具有较好的导向能力。

关键词：独立旋转车轮；导向控制；横向位移控制；黏着控制；转矩分配
中图分类号：U482.1　　**文献标识码：**A

Research on guidance and adhesion control strategies for independently rotating wheels of trams

LI Zhengwu, FANG Xiaochun, LIN Shuai, WANG Shuai, LIN Fei

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Independently rotating wheels (IRWs) suffer from inadequate performance in lateral restoration and curve guidance. This paper focuses on studying the guidance control strategies, taking the IRWs driven by traction motors as the research object. To resolve the problem that the PID parameters need to be reset following any change in the system parameters for lateral displacement control, a parameter self-adaptive adjustment strategy based on fuzzy logic control was proposed. In addition, recognizing that the realization of guidance torque depends on wheel-rail adhesion, this paper proposed a torque distribution strategy that takes into account adhesion restrictions and was based on optimized adhesion control. Finally, the proposed control strategies were verified using an electromechanical coupling simulation model built with MATLAB and Simpack. The results show that IRWs still behave with good guidance ability to adapt to the changes in the system parameters and deteriorating track conditions.

Keywords: independently rotating wheel (IRW); guidance control; lateral displacement control; adhesion control; torque distribution

0　引言

100%低地板有轨电车具有低噪声、乘坐舒适、绿色环保、无需高站台等优点，目前已在国内外多个城市运营。有轨电车为实现低地板，通常采用独立旋转车轮。由于纵向蠕滑力矩的缺失，独立旋转车轮不具有自动导向的能力，直线对中和曲线导向能力差[1-2]。因此，需要采用导向技术提高独立旋转车轮的导向能力。

基金项目：中国中车科技研究开发计划重点项目（2021CYB151）
通信作者：方晓春（1987—），男，博士，副教授，硕士生导师，主要从事城轨交通电力牵引传动方面的研究；E-mail: me330221789@163.com
引用格式：李正武, 方晓春, 林帅, 等. 有轨电车独立旋转车轮导向与黏着控制策略研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 124-130.
Citation: LI Zhengwu, FANG Xiaochun, LIN Shuai, et al. Research on guidance and adhesion control strategies for independently rotating wheels of trams[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 124-130.

牵引电机导向型独立旋转车轮（Driven Independently Rotating Wheels，DIRW）可以将牵引系统和导向系统集成在一起，利用现有的牵引装置实现导向[3]。本文基于DIRW的导向技术展开导向控制策略的研究。按照控制目标不同，DIRW的导向控制策略可以分为转矩差控制[4-5]、转速差控制[6-7]和横向位移控制[8-9]。其中，横向位移控制性能最优，在轮对发生偏移后可以使轮对快速回到轨道中心。目前，横向位移控制采用经典的PID控制，在有轨电车运行工况变化后控制性能变差，PID参数需要重新整定[10]，实际运用较为困难。

对于采用DIRW的轨道交通车辆，导向转矩是通过左右车轮轮轨间黏着力产生的。车辆的导向能力不仅与导向控制相关，而且还受轮轨间黏着状态的约束。目前，轨道交通车辆黏着控制[11-13]主要是针对刚性轮对设计的，只能保证牵引/制动力的发挥，并没有考虑在轮对解耦后如何保证黏着限制下牵引/制动转矩与导向转矩协调控制的问题。

1　基于模糊PID的横向位移控制

将模糊控制良好的动态跟踪能力与PID控制良好的稳定性相结合，在系统参数变化时动态调整PID参数，使独立旋转车轮具有更好的导向性能，控制框图如图1所示。在图1中，y_{ref}为横向位移指令值；y_w为横向位移实际值；k_c,k_{ec},k_u分别为偏差量化因子、偏差变化率量化因子和输出比例因子；T_{mL},T_{mR}分别为左侧电机转矩和右侧电机转矩；ΔT_g是导向转矩。

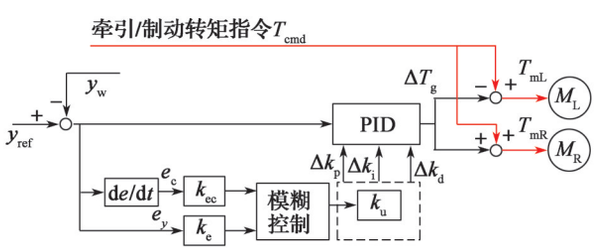


图1　模糊控制结构框图

Fig. 1　Block diagram of fuzzy control structure

模糊控制的输入为横向位移偏差e_y和偏差变化率e_c，输出为PID参数的调整量。PID控制器最终的参数为：

$$\left.\begin{aligned}k_p&=k_{p0}+\Delta k_p\\k_i&=k_{i0}+\Delta k_i\\k_d&=k_{d0}+\Delta k_d\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中：k_{p0},k_{i0},k_{d0}分别为比例、积分和微分参数初始值；$\Delta k_p,\Delta k_i,\Delta k_d$分别为比例、积分、微分参数的调整量。

由于有轨电车运行工况复杂、工况变化较大，主观经验设计难以实现对每个工况的权衡，模糊控制器参数难以达到最优值。遗传算法具有收敛速度快、能够实现并行计算、适应度函数不受限制等优点。因此，可以选取典型运行工况，通过遗传算法对模糊控制器参数进行求解，优化算法流程如图2所示。优化参数包含模糊控制量化因子、隶属度函数、模糊规则、比例因子等。

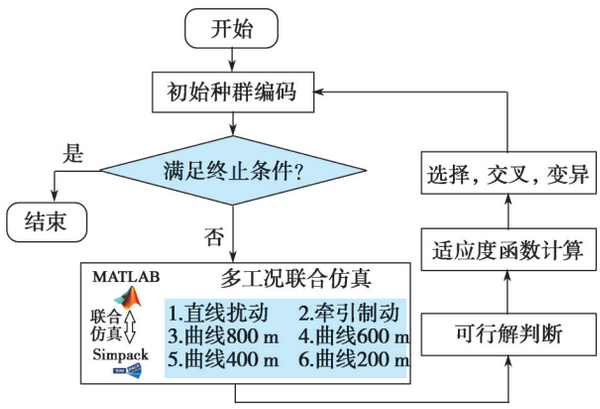


图2　遗传算法优化流程图

Fig. 2　Flow chart of genetic algorithm optimization

导向控制的控制目标是轨道中心线，需要考虑横向位移稳态误差对系统的影响。此外导向转矩受到电机最大转矩和最大功率的限制，因此目标函数主要考虑横向位移误差与导向功率之间的权重关系，表达式为

$$f=Q_1\sum|y_w|+Q_2\sum|P|\tag{2}$$

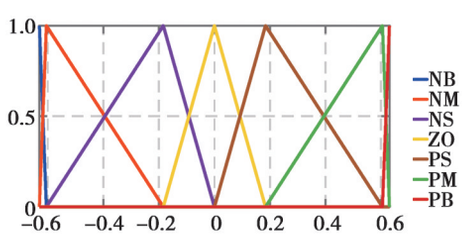
式中：Q_1,Q_2为权重系数；P为轮对上电机的输出功率。

约束条件需要保证导向转矩在牵引电机转矩范围内，并在进行导向控制时有轨电车不会发生脱轨，可表示为：

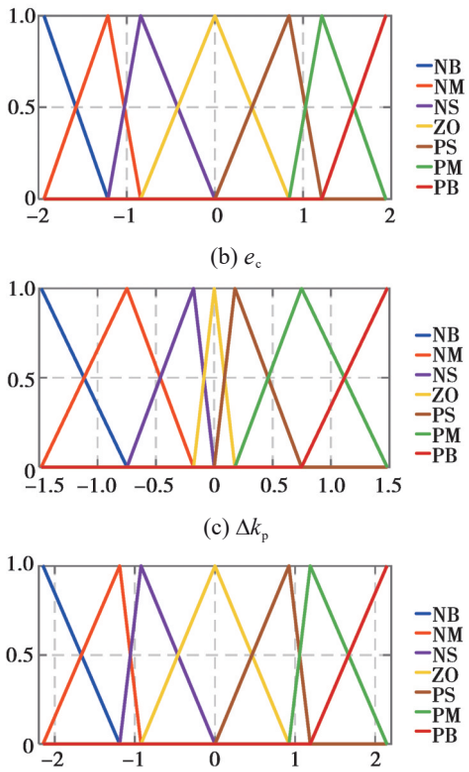
$$\left.\begin{aligned}|\Delta T_g|&\leqslant T_{max}\\|\omega\Delta T_g|&\leqslant P_{max}\\|y_w|&\leqslant y_{max}\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

式中：ω为车轮转速；T_{max}为牵引电机最大转矩；P_{max}为牵引电机最大功率；y_{max}为轮轨最大游隙。

通过遗传算法寻优后得到模糊控制器的输入、输出隶属度函数，如图3所示，以及模糊规则表，如表1和表2所示。其中，逻辑语言“NB”“NM”“NS”“ZO”“PS”“PM”“PB”分别代表“负大”“负中”“负小”“零”“正小”“正中”“正大”。



(a) e_y



(b) e_c

(c) Δk_p

(d) Δk_i

图3 输入与输出隶属度函数

Fig. 3 Input and output membership functions

表1 比例参数Δk_p模糊规则

Table 1 Fuzzy rules for the scale parameter Δk_p

e_y	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM	NS	NB	PS	NM	NB	PM
NM	NS	PS	NS	PM	NB	PB	PM
NS	PM	PM	NS	PS	PS	ZO	NM
ZO	NM	ZO	ZO	ZO	PM	PB	NB
PS	ZO	PS	PM	PB	ZO	PB	NB
PM	PS	PM	ZO	PB	PB	PS	NB
PB	NM	NM	NB	NB	PS	PB	NS

表2 积分参数Δk_i模糊规则

Table 2 Fuzzy rules for integral parameter Δk_i

e_y	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NS	PB	PB	PS	PB	PM	NS
NM	PS	NM	NS	PS	ZO	NS	PS
NS	PM	PS	ZO	PS	ZO	NB	PM
ZO	PB	NS	PB	ZO	NS	PB	ZO
PS	NS	NM	NB	NS	PM	PM	PS
PM	NB	PM	PB	PM	NB	NS	PS
PB	PM	NM	NM	PS	ZO	PS	NM

2 黏着限制下导向转矩分配策略

2.1 黏着控制策略分析

当独立旋转车轮导向时，不仅需要保障左右车轮产生期望的转矩差，而且需要保障车轮的转矩在黏着转矩范围内，因此约束条件可表示为：

$$\left.\begin{aligned} &T_{mR}-T_{mL}=\Delta T_c \\ &2\Delta T_g=\Delta T_c \\ &\max\left(-T_{optL},-T_{max}\right)\leqslant T_{mL}\leqslant\min\left(T_{optL},T_{max}\right) \\ &\max\left(-T_{optR},-T_{max}\right)\leqslant T_{mR}\leqslant\min\left(T_{optR},T_{max}\right) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中：T_{optL},T_{optR}分别为当前轨面的左右最大黏着转矩。

从约束条件可以看出，为保障独立旋转车轮在黏着控制时能完成导向，需要保证转矩指令在黏着最大转矩范围内。因此需要对轮轨间最大黏着转矩进行求解。本文采用文献[14]提出的基于蠕滑速度搜索的优化黏着控制策略。该控制策略是针对刚性轮对设计的，而独立旋转车轮左右轮解耦，采取轴控的方式，因此需要将优化黏着控制策略的运用对象转换到单个车轮上。

2.2 基于规则的转矩分配策略

由于轨道左右轨面状态难以保持一致，当车轮发生空转滑行时，左右轮的最大黏着转矩是不相同的。独立旋转车轮的导向是通过转矩差产生的，因此可以利用轮轨间黏着差异实现导向。将导向控制和黏着控制的控制策略结合，控制框图如图4所示。分别将导向控制和优化黏着控制产生的转矩输入到转矩分配系统中，然后根据轨面的黏着状态进行导向转矩的分配。图4中的$\Delta T_{aL},\Delta T_{aR}$分别为左右轮黏着转矩调整量；$T_{optL},T_{optR}$分别为左右轮最大黏着力。

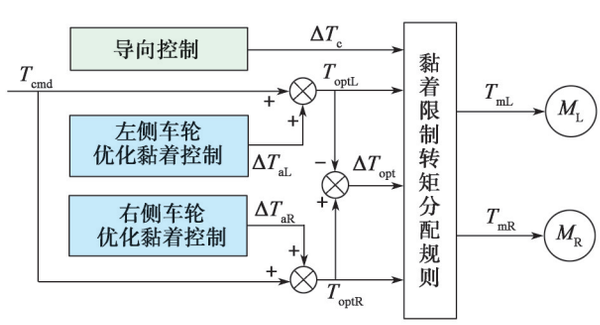


图4 导向与黏着控制框图

Fig. 4 Block diagram of guidance and adhesion control

下面对导向转矩与黏着转矩的分配规则进行分析，如图5所示。图5中的高黏着轨面表示发生空转/滑行后降低的牵引转矩较小，低黏着轨面表示发生空转/滑行后降低的牵引转矩较大。不同路面状态下的最大黏着力可通过前文介绍的优化黏着控制进行求解。ΔT_{ci}代表第i次发生空转/滑行所需要产生的导向转矩。

当第一次发生空转/滑行时，导向转矩差与黏着转矩差方向相同，可以通过高黏着轨面对导向转矩进行向下分配，分配后的转矩在低黏着轨面黏着范围内，可以产生期望的导向转矩。当第二次发生空转/滑行时，

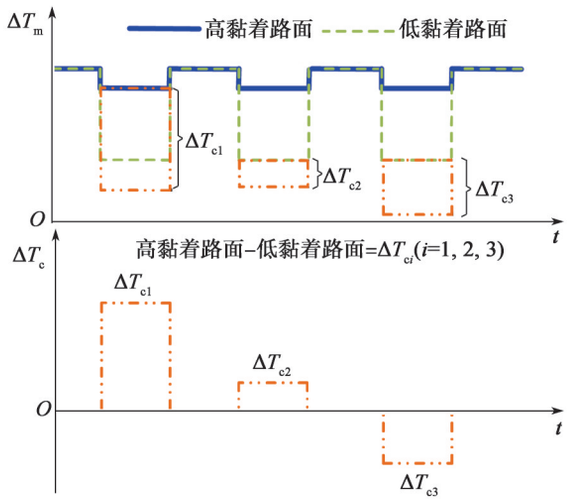
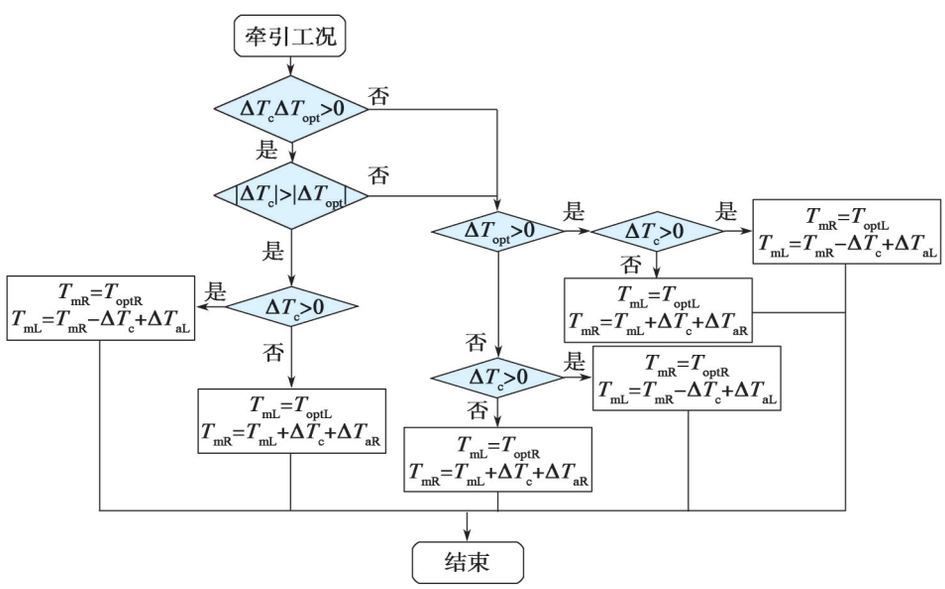


图5　导向转矩分配规则分析

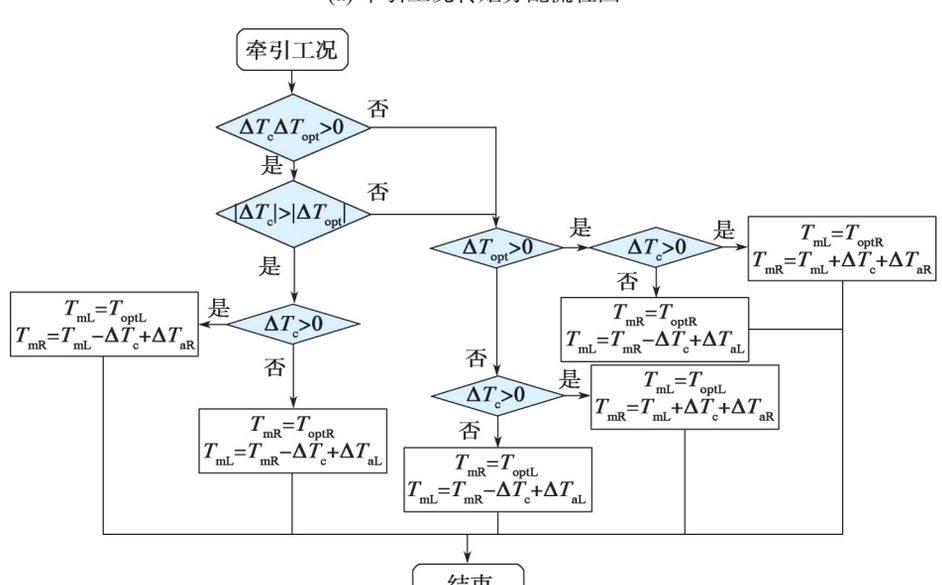
Fig. 5　Analysis of guidance torque distribution rules

导向转矩差与黏着转矩差方向相同，但是导向转矩差小于黏着转矩差。如果采取高黏着路面对导向转矩进行向下分配，那么分配后的导向转矩并不在低黏着轨面范围内。此时路面不会产生期望的导向转矩，并且车轮会发生空转/滑行。因此只能以低黏着轨面对导向转矩进行向下分配。当第三次发生空转/滑行时，导向转矩与黏着转矩差方向相反，此时只能以低黏着轨面对导向转矩进行分配。

综上所述，可以得出转矩分配的2种规则（如图6所示）：①黏着转矩差值ΔT_{opt}在导向转矩ΔT_c范围内，并且黏着转矩差和导向转矩差的方向相同，以左右轮最大黏着转矩作为转矩上限值对导向转矩进行分配；②黏着转矩差值不在导向转矩范围内或黏着转矩差和导向转矩差的方向相反，以左右轮最小黏着转矩作为



(a) 牵引工况转矩分配流程图



(b) 制动工况转矩分配流程图

图6　转矩分配流程

Fig. 6　Torque distribution process

转矩上限值进行导向转矩分配。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

本文通过仿真软件MATLAB和Simpack完成机电联合仿真，对控制策略进行验证，其中通过MATLAB搭建了电气和控制算法模型，通过Simpack搭建了有轨电车动力学模型，如图7所示。牵引电机采用永磁同步电机，恒转矩区采用最大转矩电流比控制，弱磁区采用负直轴电流补偿法控制。有轨电车速度由0 km/h加速到70 km/h，然后制动到0 km/h。为了验证黏着控制方法的有效性，设计了3种不同路况下的“黏着–蠕滑”特性曲线，如图8所示。

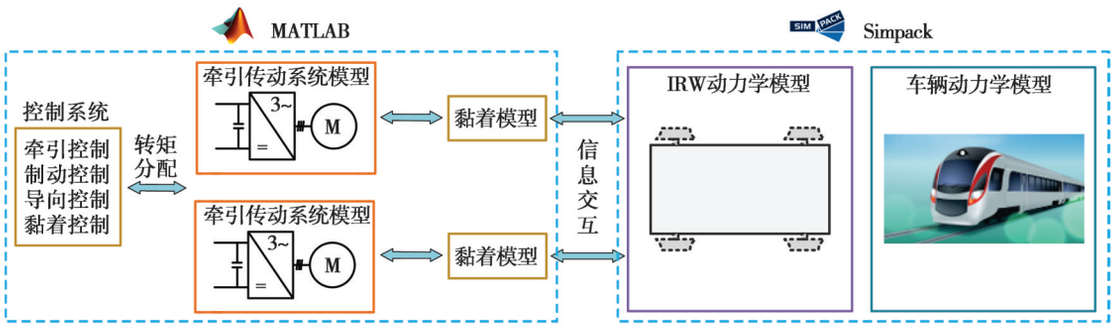


图7 系统仿真模型

Fig. 7 System simulation model

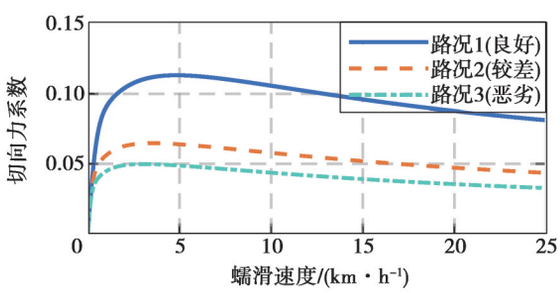


图8 黏着特性曲线

Fig. 8 Adhesion characteristic curve

3.2 主动导向控制仿真结果

1）直线对中性能

通过直线工况验证独立旋转车轮的直线对中性能，分别在10 s、25 s、45 s、55 s时加入横向扰动。在独立旋转车轮受到轨道扰动后，经典PID控制和模糊控制通过左侧、右侧电机产生导向转矩差，使轮对快速回到轨道中心，仿真结果如图9~图11所示。由图9~图11可知，与经典PID控制相比，模糊控制的横向位移超调量和调节时间更小，直线对中性能更优。

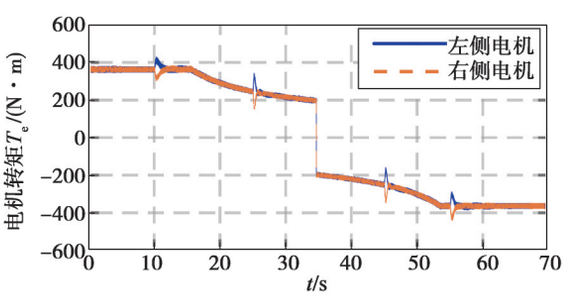


图9 直线工况PID控制电机转矩

Fig. 9 PID control motor torque under straight line condition

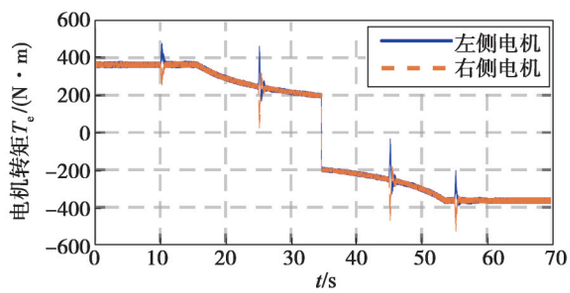


图10 直线工况模糊控制电机转矩

Fig. 10 Fuzzy control motor torque unders straight line condition

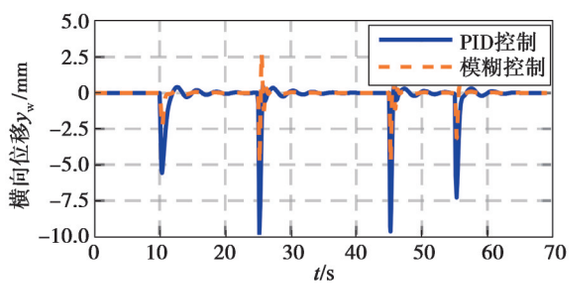


图11 直线工况横向位移对比

Fig. 11 Comparison of lateral displacement under straight line condition

2）曲线导向性能

通过曲线半径200 m的线路验证独立旋转车轮的曲线导向能力，仿真结果如图12~图14所示。由图12~图14可知，当车速较低时，经典PID控制和模糊控制使右侧车轮转矩大于左侧车轮，从而使横向位移控制在轨道中心线附近；但当车速增加时，经典PID控制动态性能变差，导致横向位移和电机的电磁转矩出现较大的波动，这会使车辆的稳定性和舒适度降低。在模糊控制的方式下横向位移不存在振荡，并且

轮对能够运行在轨道中心线附近，具有更好的曲线导向性能。

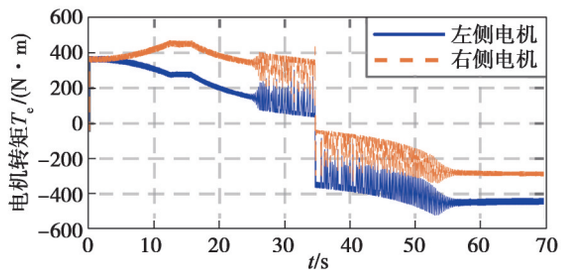


图 12　曲线工况 PID 控制电机转矩

Fig. 12　PID control motor torque under curve condition

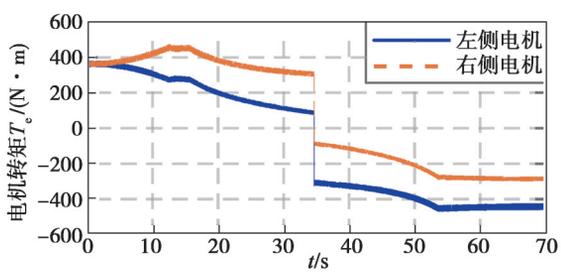


图 13　曲线工况模糊控制电机转矩

Fig. 13　Fuzzy control motor torque under curve condition

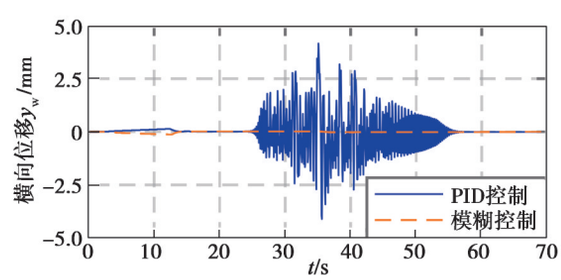


图 14　曲线工况横向位移

Fig. 14　Lateral displacement under curve condition

3.3　黏着限制下转矩分配结果

转矩分配策略通过曲线半径 200 m 的工况进行验证，导向控制采用模糊控制，仿真结果如图 15 所示。由图 15 可知，由于导向转矩 ΔT_c 为正值，在牵引工况下第一次进行黏着控制时，左轮轨面状态较右轮轨面状态较好，ΔT_{opt} 为负值，此时以左右轮最小黏着转矩对导向转矩进行分配；在牵引工况下第二次进入黏着控制时，左轮轨面状态较右轮轨面状态较差，ΔT_{opt} 为正值，此时以左右轮最大黏着转矩对导向转矩进行分配。制动工况与牵引工况类似，也能实现较好的转矩分配。当车辆牵引/制动时，车轮均未发生空转或滑行，如图 16 所示。

独立旋转车轮能够实现较好的导向控制，仿真结果如图 17 和图 18 所示。由图 17 和图 18 可知，横向位移可控制在 2.5 mm 以内，脱轨系数最大值为 0.13。这表明有轨电车不会发生脱轨[15]，转矩分配策略能够保证车辆安全运行。

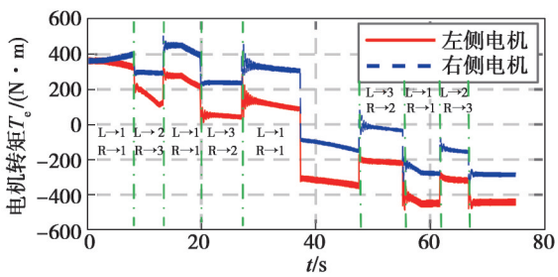


图 15　转矩分配电机转矩

Fig. 15　Torque distribution motor torque

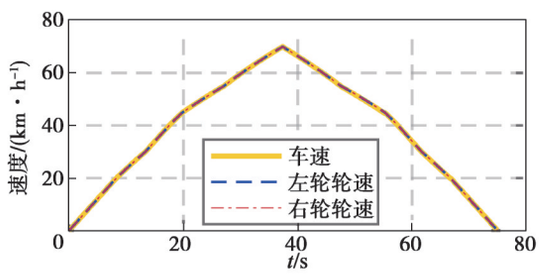


图 16　转矩分配速度曲线

Fig. 16　Torque distribution velocity curve

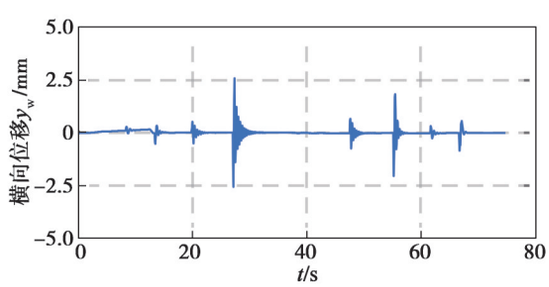


图 17　转矩分配横向位移

Fig. 17　Torque distribution lateral displacement

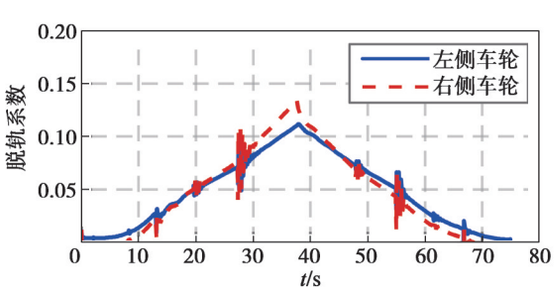


图 18　转矩分配脱轨系数

Fig. 18　Torque distribution coefficient of derailment

4　结语

为了进一步提高独立旋转车轮的导向能力，本文提出了基于模糊控制的主动导向控制策略，并通过遗传算法对控制器最优参数进行求解。针对牵引转矩、制动转矩和导向转矩受轮轨间黏着限制的问题，本文提出了导向控制和黏着控制相结合的控制逻辑与转矩分配方式。仿真结果表明，在系统参数变化的情况下，相较于经典的 PID 导向控制器，模糊控制器可以实现更好的导向性能，并且在轨面状态变差的时候，独立

旋转车轮仍然具有较好的导向能力。

参考文献：

[1] 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.

[2] 任毅, 李芾, 黄运华. 独立旋转车轮导向机理研究[J]. 机车电传动, 2009(1): 25-28.
REN Yi, LI Fu, HUANG Yunhua. Research on guiding principle of independent rotating wheels[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(1): 25-28.

[3] 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.

[4] 李哲峰. 100%低地板车牵引传动系统分析与控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
LI Zhefeng. 100% low-floor vehicle traction drive system analysis and control strategy research[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.

[5] 杨晓红. 100%低地板车牵引/导向控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
YANG Xiaohong. Research on control technology of 100% low floor vechicle reaction and steering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[6] 文永翔, 周文祥, 陈阳, 等. 独立轮对轻轨车的曲线通过能力研究[J]. 机车电传动, 2019(5): 111-115.
WEN Yongxiang, ZHOU Wenxiang, CHEN Yang, et al. Study on curve passing capacity of independent wheelset on light rail vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019 (5): 111-115.

[7] 陈国胜, 肖梯, 陈喜红, 等. 永磁电机轮毂直驱独立旋转车轮转向架的几个关键技术问题[J]. 机车电传动, 2016(5): 4-7.
CHEN Guosheng, XIAO Ti, CHEN Xihong, et al. Some key technology problems for independent-wheel and hub direct driving bogie with permanent magnet motor[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(5): 4-7.

[8] OH Y J, LEE J K, LIU Huaicong, et al. Hardware-in-the-loop simulation for active control of tramcars with independently rotating wheels[J]. IEEE Access, 2019, 7: 71252-71261.

[9] WON J H, OH Y J, LEE J. A study on the individual control method comparing the lateral displacement control of front wheel and rear wheel of IRWs system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-5.

[10] KURZECK B, HECKMANN A, WESSELER C. Mechatronic track guidance on disturbed track: the trade-off between actuator performance and wheel wear[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(Suppl 1): 109-124.

[11] 何静, 刘建华, 张昌凡. 重载机车轮轨黏着利用技术研究综述[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 30-39.
HE Jing, LIU Jianhua, ZHANG Changfan. An overview on wheel-rail adhesion utilization of heavy-haul locomotive[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 30-39.

[12] 张佳波, 马法运, 刘天宇, 等. 基于组合校正的城市轨道交通列车轮轨黏着控制方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 140-143.
ZHANG Jiabo, MA Fayun, LIU Tianyu, et al. Wheel/rail adhesion control of urban rail transit vehicle based on combined correction method[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23 (3): 140-143.

[13] FANG Xiaochun, LIN Shuai, YANG Zhongping. Adhesion control strategy based on the wheel-rail adhesion state observation for high-speed trains[J]. Electronics, 2018, 7(5): 70.

[14] 胡亮. 高速列车牵引传动再黏着优化控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
HU Liang. Study on re-adhesion optimization control strategy for high-speed train traction system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[15] 徐力, 倪纯双, 陈萌, 等. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范的制定[J]. 机车电传动, 2020(5): 19-21.
XU Li, NI Chunshuang, CHEN Meng, et al. Development of specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 19-21.

收稿日期：2022-12-18