三模块分布式驱动虚拟轨道列车的驱动防滑控制

陈 勇[1,2] 左建勇[1] 曹文祥[2] 刘宏达[2] 吴 磊[3*]
1.同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海,201804
2.中车株洲电力机车有限公司,株洲,412001
3.西南交通大学机械工程学院,成都,610031

摘要:针对虚拟轨道列车因铰接结构与多车轮配置引发的打滑问题,提出了一种三模块分布式防滑控制模型,包含驾驶员控制、防滑控制与转矩协调控制模块。驾驶员控制基于模糊控制算法,以速度误差及其变化率为输入,输出踏板开度,实现车辆目标速度精准跟踪。防滑控制采用基于滑转率偏差的PID算法,调节电机驱动力矩,有效抑制车轮打滑。为解决因力矩差异引起的转向偏差问题,提出"同轴低选"原则,实现同轴车轮力矩协调,保障行驶稳定性。仿真结果表明:该模型在速度控制中的误差小于0.5%;在未施加防滑控制的情况下,车轮滑转率及驱动力矩表现出明显波动,验证了防滑控制措施的必要性;在低附着系数及对接路面工况下,系统可实现滑转率稳定控制与加速性能改善。将该方法与滑模控制方法进行对比实验,结果显示,PID控制在控制精度与系统稳定性方面表现更优。在对开路面工况下,转矩协调模块通过"同轴低选"策略统一同轴车轮力矩,有效避免了转向偏差,提高了车辆操控稳定性。

关键词:虚拟轨道列车;分布式驱动;驾驶员模型;驱动防滑控制;滑转率;转矩协调控制
中图分类号:U284.48;TP273
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.027 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Drive Anti-slip Control of Three-module Distributed Drive Virtual Track Trains

CHEN Yong[1,2] ZUO Jianyong[1] CAO Wenxiang[2] LIU Hongda[2] WU Lei[3*]
1.Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai, 201804
2.CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan, 412001
3.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031

Abstract: Aiming at the slipping problems caused by the articulated structure and multi-wheel configuration of virtual track trains, a three-module distributed anti-slip control model was proposed, including driver control, anti-slip control and torque coordination control modules. The driver control was based on fuzzy control algorithm. With the speed errors and the change rate as the inputs, the pedal opening degree was output to achieve precise tracking of the vehicle's target speed. The anti-slip control adopted the PID algorithm based on slip rate deviation to adjust motor driving torque and effectively suppress wheel slippage. To solve the problems of steering deviation caused by torque differences, the "coaxial low selection" principle was proposed to achieve the coordination of torques of coaxial wheels and ensure driving stability. The simulation results show that the errors of this model are less than 0.5% in speed control. Without the application of anti-slip control, the slip rate of the vehicle wheels and the driving torque show obvious fluctuations, verifying the necessity of anti-slip control measures. Under the conditions of low adhesion coefficient and mating road surface, the system may achieve stable control of slip rate and improvement of acceleration performance. Compared with sliding mode control, the results of experiments show that the PID control performs better in terms of control accuracy and system stability. Under the conditions of open road surfaces, the torque coordination module unifies the torque of coaxial wheels through the "coaxial low selection" strategy, effectively avoiding steering deviations and enhancing the vehicle's handling stability.

Key words: virtual rail train; distributed drive; driver model; drive anti-slip control; slip rate; torque coordination control

0 引言

轨道交通因其高效、准时与舒适的特点成为城市出行的关键方式,但存在建设周期长、投资成

收稿日期:2025-02-20
基金项目:四川省自然科学基金(2024NSFSC0019);西藏自治区科技计划(XZ202402ZD0003-06)

本高、技术依赖强等问题，在中小城市推广受限，且对专用轨道与配套设施的高度依赖也制约了系统的灵活性与扩展性。虚拟轨道列车作为融合轨道交通大运量与公交系统灵活性的创新型交通模式应运而生。该系统以建设与运维成本低、运行灵活、载运能力适中及环保性好等优势，逐渐成为城市公共交通体系的有力补充。

近年来分布式驱动技术在新能源汽车领域迅速发展，并逐步应用于虚拟轨道列车。它通过在各车轮独立布置电机实现精确的驱动力控制。相较于传统集中驱动方式，分布式驱动具备传动链短、响应快、结构灵活等优势，被视为未来电动交通的重要方向。分布式驱动技术在虚拟轨道列车中的应用显著改善了整车动力学控制的精度与灵活性，同时也对运行安全性提出更高要求，尤其在复杂路况和低附着条件下的防滑控制面临更大挑战。

随着主动安全性研究的深入，驱动防滑控制(ASR)、防抱死制动(ABS)和制动辅助(BAS)等技术得到广泛应用。ASR系统通过调节驱动轮滑转率抑制打滑，有效改善了低附着路面上的车辆稳定性，在分布式驱动控制中尤为关键。由于分布式驱动各车轮独立运行，传统ASR策略难以直接适配，需针对结构特点进行优化与控制算法重构。

在虚拟轨道列车系统方面，国内外已有部分研究与应用探索。20世纪末期，荷兰APTS公司率先设计并推出Phileas巴士[1]，成功融合了常规公交的灵活机动性与轨道系统的大运量优势。2007年，郑州宇通推出ZK6251G双铰接式客车，采用子弹头式车头以有效降低风阻，并配备独立驾驶舱以提高安全性，且最大载客量达230人，具备良好的操作稳定性[2]。2012年，德国研发出ATEG系统[3]，该系统融合传统有轨列车与公交车的优势，可降低制造与运营成本，也展现出较好的灵活性与强大的运载能力，最大载客量达256人。近几年，中国中车集团在虚拟轨道领域也有重大突破。2017年中车株洲电力机车研究所有限公司研制出智能轨道快运系统[4]，具有自动循迹、轨迹跟随和自动导向功能；2020年中车南京浦镇车辆有限公司研发了DRT系统[5]，最大载客量达302人，融合了视觉导航与卫星导航技术；中车株洲电力机车研究所有限公司进一步推出SRT系统[6]，在前述技术基础上实现全面升级，不仅具备自动循迹和车道偏离预警等功能，还采用分布式电机驱动，最大载客数增至320人。

目前，针对虚拟轨道列车的防滑控制研究仍较为稀缺，而在分布式驱动电动汽车领域，研究主要集中于车辆行驶车速的获取、路面的识别和驱动防滑控制算法等方面[7]。

在车辆速度估计方面，主流方法可分为两大类：一类是基于运动学模型的方法，常用技术包括雷达或GPS测距、轮速传感器与加速度计数据融合等；另一类是基于动力学模型的状态观测方法，例如采用卡尔曼滤波或非线性观测器实现动态估计[8-9]。

路面识别方法主要包括基于试验的方法、基于轮胎模型的方法和路面状态特征因子方法等[8,10-12]。

驱动防滑控制算法主要包括基于滑转率的控制策略与直接驱动转矩控制方法。由于车轮滑转状态可通过滑转率直接反映，因此以滑转率为核心的控制策略被广泛应用。常见控制方法涵盖PID控制[8]、模糊逻辑控制[12]、滑模控制[10,11,13-14]以及非线性模型预测控制[15-16]等。现有驱动防滑控制方法中[17]，滑模控制、模糊控制、非线性模型预测控制等策略在理论上具备较高的控制精度和自适应能力，已在众多研究中取得良好效果。然而，这些方法通常依赖于较为复杂的系统建模，控制参数较多，且实现过程中对计算资源与模型精度有较高要求，工程实现难度相对较大。相比之下，PID控制方法结构简单、实时性强，控制律清晰，且对模型依赖程度低，便于快速部署和参数整定，比较适用于嵌入式控制器资源有限的实际应用场景。尽管其控制精度可能略低于部分先进算法，但在典型工况下已能有效实现车轮滑转率的调节，具有良好的鲁棒性与工程推广价值。因此，该控制策略在满足驱动防滑目标的同时兼顾了算法复杂度与实际应用的可行性。

综上所述，虚拟轨道列车在防滑控制方面的研究仍相对薄弱，探明车轮打滑对虚拟轨道列车的影响并制定相应的防滑控制策略具有重要意义。为此，本文面向虚拟轨道列车构建了包含驾驶员控制、防滑控制与转矩协调三模块的联合控制模型，重点解决多轮独立驱动下的打滑抑制与行驶稳定性问题。

1 联合仿真模型

1.1 动力学模型

基于表1所示的车辆基本参数建立了三编组虚拟轨道列车的多体动力学仿真分析模型。该模型通过铰接结构将不同车厢连接起来，通常采用球铰约束，这种设计能够有效保证车厢之间的灵活相对运动，同时避免过度的刚性连接，保证列车

在运行过程中具有较好的适应性。为了进一步提高列车的舒适性和稳定性，车辆的悬架系统选用了双横臂悬架结构。双横臂悬架具有较好的控制精度和响应性，能够有效减缓轨道不平整或外部冲击对车辆的影响，从而减小车身的振动和侧倾，改善乘客的舒适度和车辆的稳定性。基于该多体动力学模型，通过不同工况下的动态仿真分析，评估了列车在各种运行条件下的动力学特性与整体运行性能。

表 1　车辆基本参数

Tab. 1　Basic vehicle parameters

参数	数值
首尾车质量/kg	7124.24
中间车质量/kg	7124.24
首尾车绕z轴转动惯量/(kg·m^2)	5.41×10^9
各车前后轴到质心的距离/m	2.7
各车轴距/m	5.6
各车轮距/m	2.4
质心高度/m	1.5
中间车绕z轴转动惯量/(kg·m^2)	5.41×10^9
铰接点到前后轴的距离/m	1.6
车轮质量/kg	25

图 1 为三模块虚拟轨道列车模型示意图，图中下半部分为俯视图，序号代表轮号，方便后续车轮的辨识。

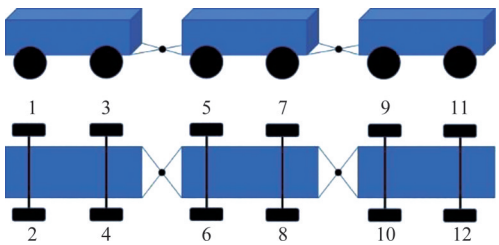


图 1　三模块虚拟轨道列车模型示意图

Fig.1　Schematic diagram of a three-module virtual rail train model

1.2　轮胎模型

轮胎模型可以反映车辆运行中受到的地面作用力和力矩。本文采用的轮胎模型是动力学软件提供的解析模型Fiala轮胎模型[18]，该模型是1954年Fiala在弹性梁模型的基础上推导了侧向力和回正力矩与侧偏角和外倾角的关系而建立的。这种模型比较简单，对于简单的操作性分析可以得到比较合理的结果。以下是Fiala导出的量纲一解析式：

$$\left.\begin{aligned}\frac{F_y}{\mu F_z}&=\Phi-\frac{1}{3}\Phi^2+\frac{1}{27}\Phi^3\\ \frac{M_z}{\mu F_z L_r}&=\frac{1}{6}\Phi-\frac{1}{6}\Phi^2+\frac{1}{18}\Phi^3-\frac{1}{162}\Phi^4\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

$$\Phi=\frac{k\tan\beta}{\mu F_z}\tag{2}$$

式中：F_y为轮胎的侧向力；F_z为垂直载荷；M_z为回正力矩；μ为附着系数；L_r为轮胎印迹长度；Φ为量纲一侧偏角；k为轮胎侧偏刚度；β为轮胎侧偏倾角。

1.3　路面模型

为便于构建不同摩擦因数的道路场景，本文采用3D路面文件建模。所建立的三维路面基本构造原理如图2所示，由若干个三角形平面单元拼接而成。每一个三角形单元由3个路面节点组成，图中以节点1～6为例，它们可构成多个三角形平面单元，分别标记为A、B、C、D。通过定义每个节点的空间坐标，可灵活构建不同形状和尺寸的路面拓扑结构，并通过设置每个路面单元的摩擦因数来模拟不同路面条件下的行驶特性，具体路面文件内容可参考文献[19]。

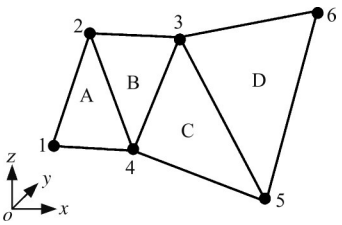


图 2　路面创建原理图[19]

Fig.2　Road surface creation schematic[19]

鉴于本文主要针对平整路面开展研究，建立的坐标系如图2所示，所有节点的z坐标均设定为零，表明路面高度在整个区域内保持恒定，不随位置发生变化，路面几何特征可通过x和y坐标描述其长度与宽度。在该基础上，可通过细化网格划分、提高节点密度等方式对路面模型进行精度优化，以增强模型的空间分辨能力与仿真计算的精确性。

1.4　电机模型

驱动电机是分布式虚拟轨道列车的唯一动力源，其内部结构较为复杂，对其进行精确建模较为困难，故采用经验法对电机进行建模。电机的外特性曲线见图3，最大力矩M的表达式如下：

$$M=\begin{cases}M_e & n\leqslant n_0\\ \dfrac{9550P_e}{n} & n>n_0\end{cases}\tag{3}$$

式中：M_e为输出力矩；P_e为输出功率；n为电机转速；n_0为电机额定转速。

1.5　驾驶员模型

驾驶员模型反映了驾驶员对车辆行驶状态的预测和判断，能够使车辆的速度和转向盘角度保持在合理范围内，确保行驶的平稳和安全。本文的驾驶员模型采用模糊控制实现目标速度跟随功

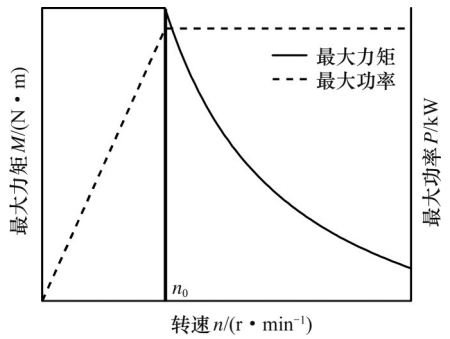


图3 驱动电机外特性曲线

Fig.3 Drive motor external characteristic curve

能[20]，实现车辆加速、匀速、减速行驶工况，具体控制如图4所示。

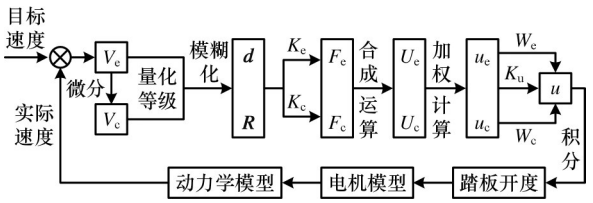


图4 驾驶员控制模型流程图

Fig.4 Flow chart of driver control model

以目标速度与实际速度的偏差 V_e 和速度偏差的变化率 V_c 为输入，将它们量化为 m 个等级，量化论域为 $\boldsymbol{d}$，是一个 m 元素的行向量。$\boldsymbol{R}$ 为输入变量和输出变量的模糊关系，是一个 m 维矩阵，计算公式如下：

$$R_{i,j}=\exp(-(d_j-d_i)^2) \tag{4}$$

式中：d_i、d_j 为 $\boldsymbol{d}$ 中的第 i 个和第 j 个元素。

输入变量的模糊化公式如下：

$$F_e(j)=\exp\left(-\left(\frac{V_e-d_jK_e}{K_e}\right)^2\right) \tag{5}$$

$$F_c(j)=\exp\left(-\left(\frac{V_c-d_jK_c}{K_c}\right)^2\right) \tag{6}$$

式中：K_e、K_c 分别为速度偏差和速度偏差变化率的量化比例因子。

输出模糊向量的计算公式如下：

$$U_e=F_e{}^{\circ}\boldsymbol{R} \tag{7}$$

$$U_c=F_c{}^{\circ}\boldsymbol{R} \tag{8}$$

式中：运算符“°”表示采用min-max合成算法实现模糊关系合成运算。

首先将输入模糊集合与模糊规则矩阵进行取小运算，得到各规则的激活强度；随后对每一列结果执行取大运算，完成多条模糊规则的输出聚合，最终得到输出模糊集合，为后续解模糊运算提供依据。

采用加权平均法进行模糊判别计算输出控制量的公式如下：

$$u_e=\left(\sum_{k=1}^{m}F_e(j)d_j\right)/\left(\sum_{k=1}^{m}F_e(j)\right) \tag{9}$$

$$u_c=\left(\sum_{k=1}^{m}F_c(j)d_j\right)/\left(\sum_{k=1}^{m}F_c(j)\right) \tag{10}$$

$$u=(w_eu_e+w_cu_c)K_u \tag{11}$$

式中：w_e、w_c 分别为输入偏差和偏差变化率的权重；K_u 为输出控制量的比例因子；u 为踏板开度的变化率，控制踏板通过电机模型控制动力学模型运行。

输出量可以通过 u 得到。

2 防滑控制模型

对车辆进行防滑控制的核心目标是使车轮滑转率接近最优值，从而最大化地利用地面的纵向附着力，改善车辆的加速性能和行驶稳定性。本文采用以滑转率为控制目标的防滑控制策略，通过滑转率计算模块实时监测车轮滑转率，并将其与对应路面的最优滑转率之间的偏差作为控制输入，实现对单个车轮的动态防滑控制。在此基础上，引入转矩协调控制模块，用于调整各车轮之间的扭矩分配，进一步优化整车的防滑效果。具体控制流程如图5所示。

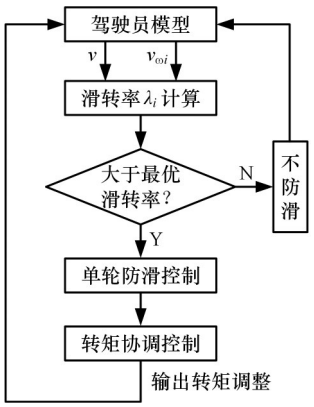


图5 防滑控制模型流程图

Fig.5 Flow chart of anti-slip control model

2.1 防滑控制策略

车轮的实时滑转率计算公式为

$$\lambda_i=\frac{v_{\omega i}-v}{v_{\omega i}} \tag{12}$$

式中：λ_i 为车轮滑转率；$v_{\omega i}$ 为车轮切向速度；v 为车速；p 为车轮编号，与图1中的车轮编号对应。

获取不同路面的最优滑转率是防滑控制的关键步骤，根据典型路面下的滑转率与附着系数的关系(图6[21])可以发现，当滑转率处于0.2～0.5之间时附着系数通常能够达到较高水平。

本研究涉及不同路面，对于摩擦因数为0.2和0.4的两种低附着路面，不同路面的最优滑转率存在差异，提供的最大附着力不同。经过大量的文献调研和数据实验测试，整理了不同路面下的最优滑转率，见表2。

为了使防滑控制系统快速响应，采用经典PID控制器来实现单轮防滑控制功能。PID控制器的输入 $e(t)$ 是实际输出值 $c(t)$ 与理想目标值

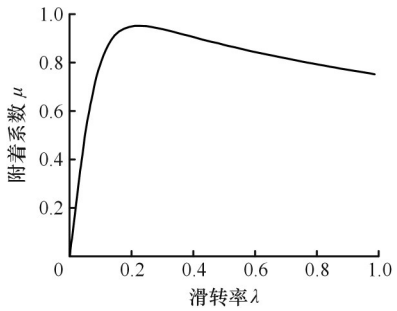


图 6　典型路面下滑转率与附着系数的关系[21]

Fig.6　Relationship between sliding rate and adhesion coefficient of typical road surface[21]

表 2　不同路面的最优滑转率

Tab.2　Optimal slip rate for different road surfaces

路面	最优滑转率
摩擦因数μ=0.2	0.35
摩擦因数μ=0.4	0.40

$r(t)$的偏差：

$$e(t)=r(t)-c(t) \tag{13}$$

PID算法的数学表达式如下：

$$u(t)=K_{\mathrm{P}}\left(e(t)+\frac{1}{K_{\mathrm{I}}}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+K_{\mathrm{D}}\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right) \tag{14}$$

式中：K_{P}为比例系数；K_{I}为积分时间常数；K_{D}为微分时间常数。

将上述公式转化为传递函数形式：

$$G(s)=\frac{U(s)}{E(s)}=K_{\mathrm{P}}\left(1+\frac{1}{K_{\mathrm{I}}s}+K_{\mathrm{D}}s\right) \tag{15}$$

式(15)可以对连续的控制系统进行控制，但通常在实际系统中有很多不连续的情况，这时需要离散化PID控制，以便计算器可以帮助实现控制算法。离散化具体操作为用采样点kT替换连续时间t，以和式替换积分项，以增量变化替换微分项，则连续系统的近似变化如下：

$$\left.\begin{aligned}&t\approx kT\\&\int_0^t e(t)\mathrm{d}t\approx T\sum_{j=0}^{k}e(jT)=T\sum_{j=0}^{k}e(j)\\&\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\approx\frac{e(kT)-e((k-1)T)}{T}=\frac{e(k)-e(k-1)}{T}\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

式中：T为采样周期；k为采样序号。

T值较小，离散化系统会更接近原来的连续系统，算法的精度也会相应提高。可以得到离散化后的PID控制如下：

$$u(k)=K_{\mathrm{P}}\left[e(k)+\frac{T}{K_{\mathrm{I}}}\sum_{j=0}^{k}e(j)+\frac{K_{\mathrm{D}}}{T}(e(k)-e(k-1))\right] \tag{17}$$

根据PID控制原理，以车轮滑转率和最优滑转率的偏差为输入，每个车轮驱动力矩的变化量为输出，具体原理如图7所示。

鉴于控制对象的复杂性及控制算法与联合仿真平台对实时计算的要求，本文采用基于系统响应特征的经验整定方法对PID参数进行确定。分析系统在典型工况下的阶跃响应，结合超调量、上升时间及稳态误差等指标，逐步调整比例、积分及微分参数，实现系统动态性能与稳态性能的优化平衡。仿真结果也变相验证了所选参数的合理性与有效性。

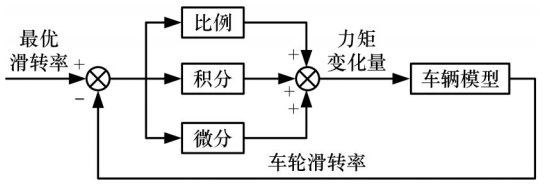


图 7　PID防滑控制原理图

Fig.7　Schematic diagram of PID anti-slip control

2.2　转矩协调控制

在实际车辆的直线行驶过程中，每个车轮所处的路面摩擦因数可能不同，导致每个车轮的最优滑转率也可能存在差异。如果某个车轮发生滑转，通常会对该车轮进行单轮防滑控制。经过防滑控制后，可能会导致不同车轮输出的力矩产生差异，进而可能出现一侧车轮的驱动力迅速减小，而另一侧车轮的驱动力变化较小或几乎不变的情况。这种不均衡的力矩分配可能会产生较大的非期望横摆力矩，进而影响车辆的转向，甚至可能导致车辆失稳。因此，需要采用转矩协调控制策略，确保同轴车轮的输出力矩相同。具体控制如图8所示，在防滑控制后，采用“同轴低选”的原则，即选择同轴两侧车轮的较小输出力矩，以确保两侧车轮的输出力矩一致，并避免超过电机的最大力矩，从而有效维持车辆的稳定性。

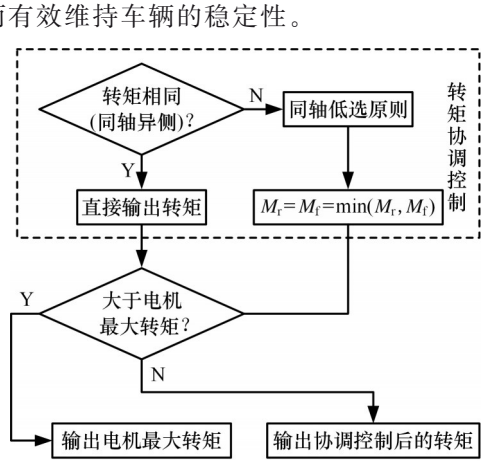


图 8　转矩协调控制流程图

Fig.8　Flow chart of torque coordination control

3　仿真验证

3.1　驾驶员模型验证

为了验证驾驶员模型控制是否能够精准契合

驾驶员意图，达成精确的速度控制，设定了20、30、50、70 km/h作为目标速度，开展仿真验证工作。

从图9中能够清晰地观察到车辆在速度控制方面的表现。在启动后的5 s内，车辆能够迅速加速至20km/h和30km/h，随后稳定维持在该速度水平，展现出良好的速度稳定性；在10 s内车辆成功加速到70km/h，充分体现了其加速性能。针对这4个目标速度（即20、30、50、70 km/h），实际速度与目标速度之间的误差分别低至0.1%、1.3%、0.16%、0.02%。如此微小的误差有力证明了驾驶员模型在速度控制上具备极高的精确性，能够按照驾驶员意图实现速度控制。

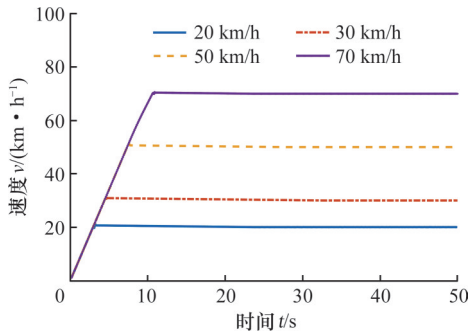


图9 速度控制变化图

Fig.9 Speed control changing diagram

3.2 低附着系数路面（路面1）仿真结果

以路面摩擦因数μ=0.4的低附着系数路面（路面1）为例，车辆启动时以电机最大驱动力矩进行加速行驶，此时车轮的动态变化成为关键观察点，观察车轮的力矩变化和滑转率变化（见图10、图11）。

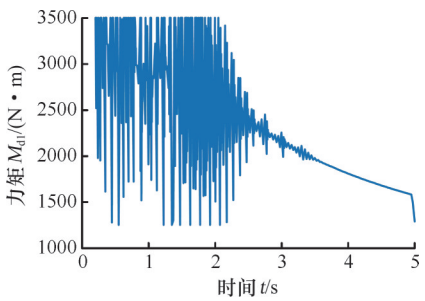


图10 车轮驱动力矩变化曲线

Fig.10 Changing curve of wheel driving torque

根据仿真结果得出：无防滑控制下，在起步阶段采用电机最大扭矩加速时，车轮所受驱动力矩波动明显，甚至出现突变现象，滑转率同样表现出剧烈变化，反映出车轮发生严重打滑。这不仅影响车辆的驱动效率，还会危及行驶稳定性，尤其在高速状态下安全风险更高。因此，驱动防滑控制策略在低附着路面工况下具有重要意义。

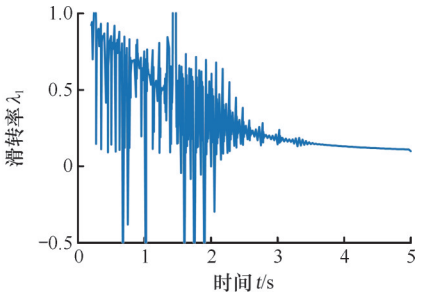


图11 车轮滑转率变化曲线

Fig.11 Changing curve of wheel slip rate

图12～图18所示为在摩擦因数为0.4的路面（路面1）上实施防滑控制后的仿真成果。其中，图例标注的数字对应图1所示的轮胎编号。后续在对接路面和对开路面仿真结果中的图例命名方式亦保持一致。由于三节车仿真结果相似，故下文以首车和中间车为例。

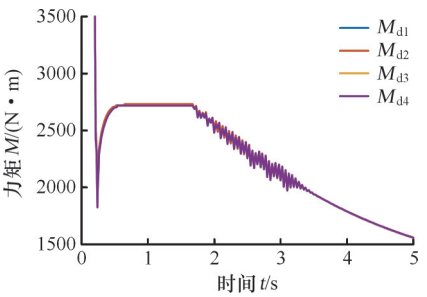


图12 首车车轮力矩变化曲线（路面1）

Fig.12 Changing curves of first car wheel torque (road surface 1)

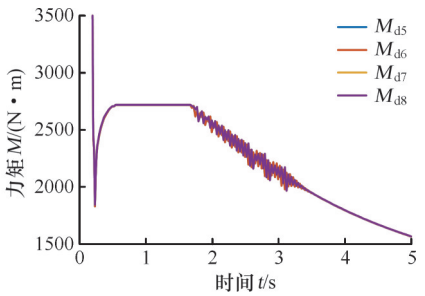


图13 中间车车轮力矩变化曲线（路面1）

Fig.13 Changing curves of middle car wheel torque (road surface 1)

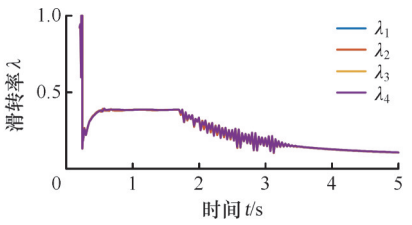


图14 首车车轮滑转率变化曲线（路面1）

Fig.14 Changing curves of first car wheel slip rate (road surface 1)

由图12和图13可知，当前所有车轮处于相同路面条件下，理论上应实现同步控制，图中的各

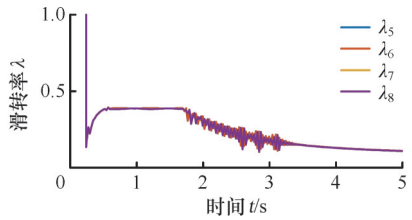


图 15　中间车车轮滑转率变化曲线(路面 1)

Fig.15　Changing curves of middle car wheel slip rate (road surface 1)

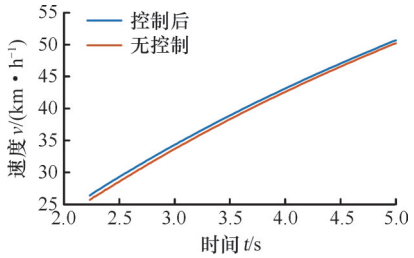


图 16　车辆纵向速度变化曲线(路面 1)

Fig.16　Changing curves of vehicle longitudinal velocity (road surface 1)

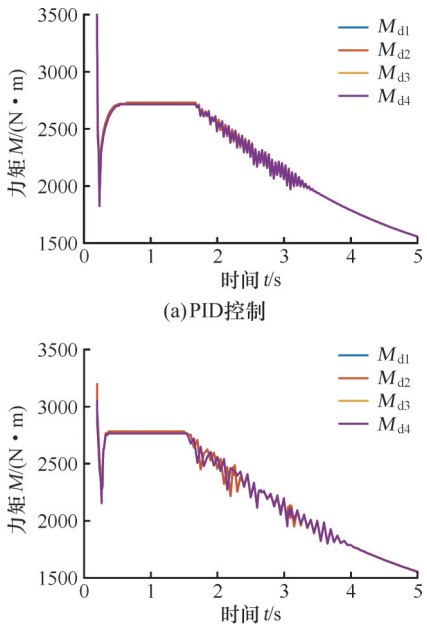


图 17　不同算法控制后力矩变化曲线(路面 1)

Fig.17　Torque changing curves after control by different algorithms(road surface 1)

条曲线几乎完全重合，验证了控制系统的一致性。在引入防滑控制策略后，车轮驱动力矩在约 0.5 s时迅速趋于稳定，实现了平稳输出；同时，车轮滑转率也成功稳定在设定的最优滑转率附近，整体控制效果与预期高度一致。在 2 s后，驱动力矩出现逐渐下降的趋势。这一现象主要是由于车轮速度持续升高，带动电机转速不断提高。根据电机的外特性曲线，随着转速的增加，电机能够输出的最大力矩相应减小，从而导致驱动力矩下降。

进一步观察滑转率变化曲线(图 14 和图 15)

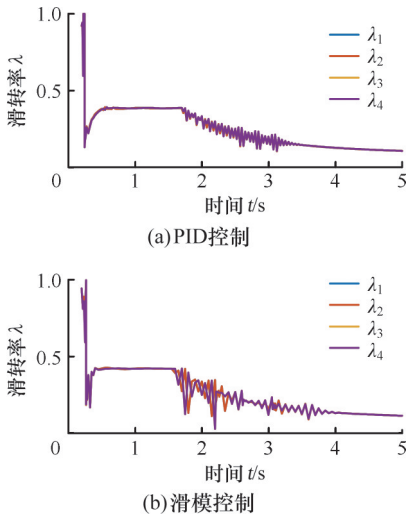


图 18　不同算法控制后车轮滑转率变化曲线(路面 1)

Fig.18　Wheel slip rate changing curves after control by different algorithms(road surface 1)

可发现，在整个过程中，车轮滑转率始终未超过最优值，有效避免了驱动打滑现象，充分满足防滑控制对驱动稳定性与牵引性能的要求。

此外，通过图 16 中的速度变化曲线可发现，经过防滑控制后的车辆运行速度显著高于控制前，有效保障了车辆的加速性能，进一步证明了防滑控制策略在低附着系数路面上的有效性和优越性。

为了证明 PID 控制算法的优越性，本文以滑模控制算法为对比对象进行仿真实验，滑模控制方法参考文献[22]。以第一节车为研究对象，对两种控制算法的控制效果进行对比分析，仿真结果如图 17 和图 18 所示。

由图 17 可以看出，相较于滑模控制，PID 控制下的驱动力矩变化更平稳。在 1.8 s前，两种控制方法的输出力矩均较为稳定；但在 1.8～3.7 s，滑模控制的力矩波动明显增大，表现出一定的不稳定性。进一步结合图 18 分析滑转率变化可见，滑模控制在该时段内后轮滑转率同样波动较大，而 PID 控制则整体比较稳定。上述结果表明，PID 控制在低附着系数路面工况下表现出更高的控制精度和整体稳定性。

3.3　对接路面(路面 2)仿真结果

本次研究采用对接路面场景，对整车防滑控制算法展开全面的仿真验证。对接路面指车辆在起始阶段处于摩擦因数 μ=0.4 的路面，行驶一段距离后，驶入摩擦因数 μ=0.2 的路面。在此过程中，车辆始终以电机最大力矩进行加速行驶，以下为详细的仿真结果分析。

由图 19、图 20 可以清晰观察到，每当车轮驶

入μ=0.2的低附着路面时，其驱动力矩均出现显著下降。这是因为系统为了使滑转率接近最优值，会自动调整驱动力矩以适应变化的路面条件。具体而言，在1.8 s时，第一轴车轮首先驶入低附着路面；随后在2.5 s、2.9 s和3.5 s，第二、第三及第四轴车轮依次进入该路段。

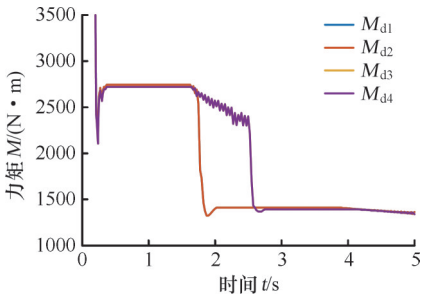


图19 首车车车轮力矩变化曲线(路面2)

Fig.19 Changing curves of first car wheel torque (road surface 2)

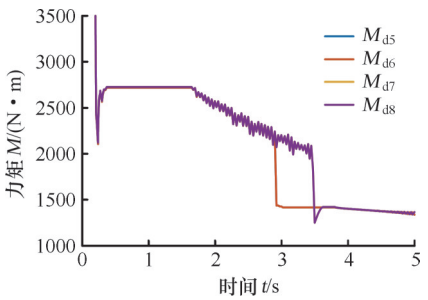


图20 中间车车轮力矩变化曲线(路面2)

Fig.20 Changing curves of middle car wheel torque (road surface 2)

结合图21、图22的滑转率变化分析可知，在μ=0.4的路面上，车轮滑转率始终保持在最优值

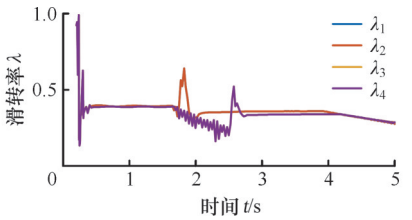


图21 首车车轮滑转率变化曲线(路面2)

Fig.21 Changing curves of first car wheel slip rate (road surface 2)

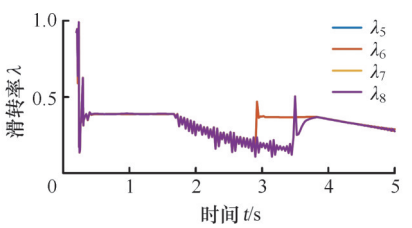


图22 中间车车轮滑转率变化曲线(路面2)

Fig.22 Changing curves of middle car wheel slip rate (road surface 2)

0.4以下；而在驶入μ=0.2的路面后，虽然滑转率短暂波动，但很快稳定至0.35以下，表明控制系统能够及时响应变化，持续维持良好的牵引性能与行驶稳定性。

进一步观察图23的速度变化曲线，即使在复杂的对接路面工况下，车辆经防滑控制后仍实现了稳定的速度提高。这充分验证了所提出的防滑控制算法在不同附着条件下的有效性与鲁棒性，为车辆在低附着路面环境中的安全、平稳、高效运行提供了坚实保障。

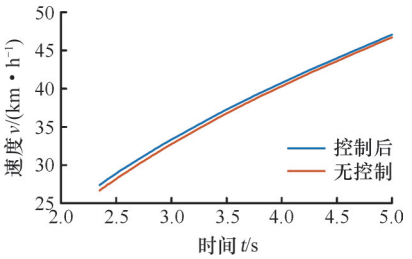


图23 车辆纵向速度变化曲线(路面2)

Fig.23 Changing curves of vehicle longitudinal velocity (road surface 2)

在对接路面工况下，为进一步验证PID控制算法在本文防滑控制系统中的适用性与优势，以第一节车为对象，开展了与滑模控制的对比仿真实验，结果如图24和图25所示。由图24可见，在车轮驶入μ=0.2的低附着路面之前(约1.8 s前)，两种控制算法下的驱动力矩变化均较稳定。但在1.8～2.5 s，滑模控制的后轴车轮力矩波动幅度要大于PID控制。为进一步说明控制效果，结合图

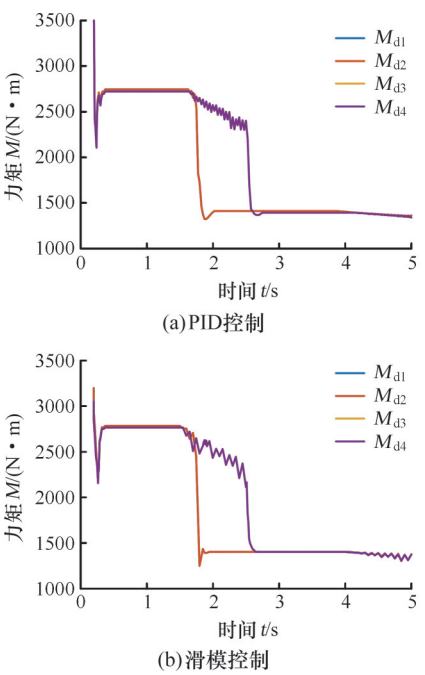
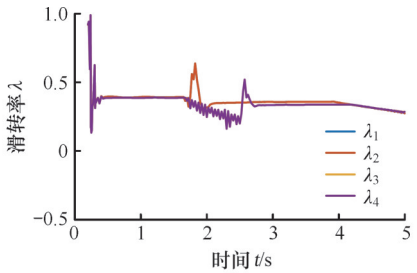
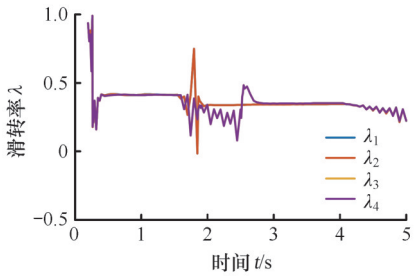


图24 不同算法控制后力矩变化曲线(路面2)

Fig.24 Torque changing curves after control by different algorithms(road surface 2)



(a)PID控制



(b)滑模控制

图 25　不同算法控制后车轮滑转率变化曲线(路面 2)

Fig.25　Wheel slip rate changing curves after control by different algorithms(road surface 2)

25 分析车轮滑转率的变化情况。虽然在初始控制阶段两种算法均出现短暂跳动，但很快趋于稳定；同样在 1.8～2.5 s 时，可以观察到滑模控制后的车轮滑转率波动显著大于 PID 控制，控制精度与稳定性均较差。这验证了 PID 控制在对接路面工况下有更好的控制精度和整体稳定性。

3.4　对开路面(路面 3)仿真结果

本次研究聚焦于对开路面工况下的整车防滑控制算法仿真验证。对开路面的特点是车辆行驶时两侧车轮所处路面状况不同，具体如图 26 所示，车辆向左行驶，右侧路面摩擦因数 μ=0.2，左侧路面摩擦因数 μ=0.4。

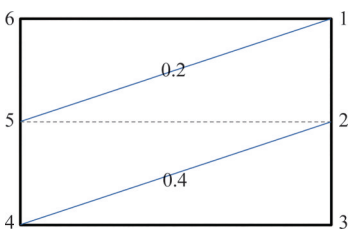


图 26　对开路面原理图

Fig.26　Schematic diagram of split road surface

鉴于本次防滑控制研究设定在直线工况下，当面对类似对开路面的情况时，单纯依靠降低车轮滑转率来调整驱动力矩存在一定问题。因为同轴两侧车轮所处路面摩擦因数不同，如果仅以滑转率为单一调整依据，很可能导致同轴两侧车轮力矩不一致，进而严重影响车辆的转向性能，最终威胁到车辆行驶的稳定性。

由图 27 可知，未施加转矩协调控制的车辆，M_{d1} 和 M_{d3} 力矩基本相同，这是因为 1 号车轮和 3 号车轮处于摩擦因数相同的路面；而 M_{d1} 和 M_{d2} 力矩却存在较大差异，这是由于 1 号车轮和 2 号车轮虽在同一轴上，但所处路面的摩擦因数不同。这种力矩差异必然会对车辆转向产生不利影响。

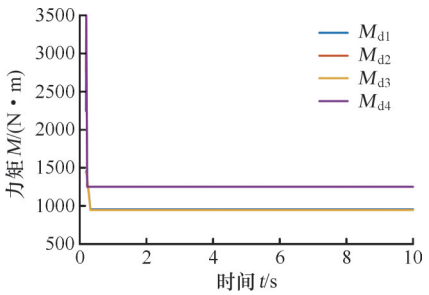


图 27　无转矩协调控制驱动力矩变化图

Fig.27　Driving torque changing diagram without torque coordinated control

经过转矩协调后的仿真结果如图 28 所示。此时，4 个车轮的力矩近乎保持一致，并且较小，这完全符合转矩协调策略中的“同轴低选”原则。通过这种方式有效保障了车辆在对开路面行驶时的稳定性，充分彰显了转矩协调控制在复杂路面条件下对维持车辆稳定运行的关键作用。

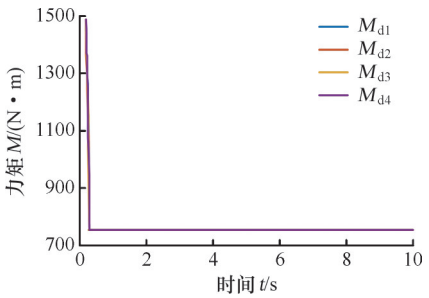


图 28　有转矩协调驱动力矩变化图

Fig.28　Driving torque changing diagram with torque coordinated control

4　结论

本文针对虚拟轨道列车因铰接结构和多车轮配置引发的打滑问题，提出一种集驾驶员控制、防滑控制与转矩协调控制于一体的三模块分布式防滑控制模型。主要结论如下：

1)驾驶员模型基于模糊控制算法在速度控制上表现卓越，针对 20，30，50，70 km/h 的目标速度，实测平均误差小于 0.5%，可精准实现驾驶员意图。

2)防滑控制模块采用基于滑转率偏差的 PID 控制，能够在低附着路面(μ=0.4)下实现驱动力矩在 0.5s 内稳定输出，滑转率稳定在最优值附近。无防滑控制时，车轮滑转率及力矩波动显著，影响加速性能和行驶稳定性，验证了防滑控制的必

要性。

3)在对接路面工况中,车辆由低附着(μ=0.4)驶入更低附着(μ=0.2)路面时,系统可自动调整驱动力矩以保持滑转率稳定于0.35以下,车辆速度仍能持续提高,体现出算法的良好自适应性和优越性。

4)与滑模控制对比发现,PID控制在低附着和对接路面工况下具有更快的响应速度、更小的滑转率波动和更好的整体稳定性,更契合本文所提出的控制策略需求。

5)转矩协调模块采用"同轴低选"策略,确保同轴车轮力矩一致,避免了单纯依赖滑转率控制可能造成的转向偏差,改善了车辆操控稳定性。

在实际工程应用中,滑转率的计算受到轮速传感器精度、惯性导航系统及里程计等车速估计设备采样频率、信号延迟和环境干扰的限制,导致在急加减速等非稳态工况下,滑转率信号易出现瞬时波动和系统误差。为解决这一问题,工程中常采用信号处理与状态估计技术,如卡尔曼滤波等时域滤波算法以抑制短时异常,或通过轮速与加速度信息融合构建扩展卡尔曼滤波器增强车速估计的鲁棒性。未来工作可针对滑转率计算的可靠性和鲁棒性展开更深入的研究和优化。

参考文献:

[1] 飞乐(Phileas)——开辟巴士快速交通(BRT)新时代[C]// 中国巴士快速交通行动大会. 上海, 2005:106-110.
Phileas — Ushering in a New Era of BRT [C]// China BRT Action Conference. Shanghai, 2005:106-110.

[2] 孙帮成. 虚拟轨道列车及其关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
SUN Bangcheng. Research on Virtual rail Train and its Key Technologies [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[3] MICHLER O, WEBER R, FÖRSTER G. Model-based and Empirical Performance Analyses for Passenger Positioning Algorithms in a Specific Bus Cabin Environment[C]// 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). Budapest, 2015: 200-208.

[4] 冯江华, 肖磊, 胡云卿. 智能轨道快运系统[J]. 控制与信息技术, 2020(1): 1-12.
FENG Jianghua, XIAO Lei, HU Yunqing. Autonomous-rail Rapid Transit[J]. Control and Information Technology, 2020(1): 1-12.

[5] 杨勇, 李晓光, 银应时, 等. 智轨电车总体与轻量化设计[J]. 控制与信息技术, 2020(1): 32-37.
YANG Yong, LI Xiaoguang, YIN Yingshi, et al. Overall and Lightweight Design of Autonomous-rail Rapid Tram [J]. Control and Information Technology, 2020 (1): 32-37.

[6] 徐伟. 超级虚拟轨道快运系统(SRT)特点和适应性分析——以盐城市为例[J]. 工程技术研究, 2021, 6(5): 40-41.
XU Wei. Characteristics and Adaptability Analysis of Super Virtual Rail Express System (SRT): a Case Study of Yancheng City[J]. Engineering Research, 2021, 6(5): 40-41.

[7] 吕东宇. 分布式驱动电动汽车的驱动防滑研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
LYU Dongyu. Research on ASR of Distributed Drive Electric Vehicle [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.

[8] 罗浩. 分布式驱动电动汽车驱动防滑控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
LUO Hao. Research on Anti-skid Control Strategy of Distributed Drive Electric Vehicle[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[9] 张伦. 轮边电机驱动电动汽车驱动防滑控制的研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHANG Lun. Research on Anti-skid Control of Electric Vehicle Driven by Wheel Edge Motor[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[10] 常九健, 吴佳豪, 方建平. 基于路面识别算法的分布式驱动汽车驱动防滑控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024(2): 65-76.
CHANG Jiujian, WU Jiahao, FANG Jianping. Research on Acceleration Slip Regulation Strategy Based on Road Surface Recognition Algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024(2): 65-76.

[11] 金永辉. 分布式电驱动半挂汽车列车驱动防滑与转矩协调控制研究[D]. 十堰:湖北汽车工业学院, 2023.
JIN Yonghui. Research on Drive Anti-slip and Torque Coordination Control of Distributed Electric Drive Semi-truck Train[D]. Shiyan: Hubei University of Automotive Industry, 2023.

[12] 蒋振江, 陈旭, 李大伟. 基于路面识别的四轮驱动电动汽车驱动防滑控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2012, 26(7): 17-21.
JIANG Zhenjiang, CHEN Xu, LI Dawei. Anti-skid control of Four-wheel drive Electric Vehicle Drive based on Road Surface Recognition [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2012, 26(7): 17-21.

[13] SAVITSKI D, SCHLEININ D, IVANOV V, et al. Improvement of Traction Performance and Off-road Mobility for a Vehicle with Four Individual Electric Motors: Driving over Icy Road[J]. Journal of Terramechanics, 2017, 69: 33-43.

[14] 张细政, 郑亮. 基于转矩协调分配的分布式驱动电动汽车稳定性控制[J]. 中国机械工程, 2018, 29(15): 1780-1787.
ZHANG Xizheng, ZHENG Liang. Vehicle Stability Control of Distributed-driven Electric Vehicles Based on Optimal Torque Allocation[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(15): 1780-1787.

[15] 秦健. 基于最优滑转率识别的轮边电驱动客车驱动防滑研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
QIN Jian. Research on Driving Anti-skid of Electric Wheel Driven Bus Based on Optimal Slip Rate Recognition [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[16] 阚小博, 赵又群, 李丹阳, 等. 基于非线性模型预测控制的分布式驱动电动汽车多目标扭矩协调控制[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5): 1123-1131.
KAN Xiaobo, ZHAO Youqun, LI Danyang, et al. Multi-objective Torque Coordination Control for Distributed Drive Electric Vehicles Based on Nonlinear MPC [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5): 1123-1131.

[17] 王震坡, 丁晓林, 张雷. 四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动

防滑控制关键技术综述[J]. 机械工程学报，2019，55(12)：99-120.
WANG Zhenpo，DING Xiaolin，ZHANG Lei. Overview on Key Technologies of Acceleration Slip Regulation for Four-wheel-independently-actuated Electric Vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering，2019，55(12)：99-120.

[18] 雷雨成. 汽车系统动力学及仿真[M]. 北京：国防工业出版社，1997.
LEI Yucheng. Vehicle System Dynamics and Simulation[M]. Beijing：National Defense Industry Press，1997.

[19] 刘文婷. 基于ADAMS的汽车ABS整车控制技术研究[D]. 成都：西华大学，2007.
LIU Wenting. Research on ABS Vehicle control Technology Based on ADAMS[D]. Chengdu：Xihua University，2007.

[20] 谢季坚，刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2006.
XIE Jijian，LIU Chengping. Fuzzy Mathematical Method and Its Application[M]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology Press，2006.

[21] 朱绍鹏，吕超. 轮毂电机分布式驱动控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2022.
ZHU Shaopeng，LYU Chao. Distributed Drive Control Technology of Hub Motor[M]. Beijing：China Machine Press，2022.

[22] 康盛. 分布式驱动电动汽车驱动防滑及转矩协调控制研究[D]. 南昌：华东交通大学，2020.
KANG Sheng. Acceleration Slip Regulation and Torque Distribution Coordination Control for Distributed Drive Electric Vehicle[D]. Nanchang：East China Jiaotong University，2020.

（编辑　王旻玥）

作者简介：陈　勇，男，1981年生，正高级工程师、博士研究生。研究方向为轨道交通控制技术。**吴　磊***（通信作者），男，1981年生，副教授、博士。研究方向为车辆导向主动控制。E-mail：Virtualtrack2024@163.com。

本文引用格式：

陈勇，左建勇，曹文祥，等. 三模块分布式驱动虚拟轨道列车的驱动防滑控制[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2343-2353.

CHEN Yong，ZUO Jianyong，CAO Wenxiang，et al. Drive Anti-slip Control of Three-module Distributed Drive Virtual Track Trains[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2343-2353.

（上接第2342页）

[13] 单忠德，范聪泽，孙启利，等. 纤维增强树脂基复合材料增材制造技术与装备研究[J]. 中国机械工程，2020，31(2)：221-226.
SHAN Zhongde，FAN Congze，SUN Qili，et al. Research on Additive Manufacturing Technology and Equipment for Fiber Reinforced Resin Composites[J]. China Mechanical Engineering，2020，31(2)：221-226.

[14] TAO Wang，SU Xuan，CHEN Yanbin，et al. Joint Formation and Fracture Characteristics of Laser Welded CFRP/TC4 Joints[J]. Journal of Manufacturing Processes，2019，45：1-8.

[15] 龚浩，程东海，刘钊泽，等. CFRP/TC4激光连接工艺及接头组织和性能[J]. 材料导报，2024，38(7)：166-170.
GONG Hao，CHENG Donghai，LIU Zhaoze，et al. Study on Laser Bonding Technology and Microstructure and Properties of CFRP/TC4 Joint[J]. Materials Reports，2024，38(7)：166-170.

[16] ZHANG Yu，WANG Fuji，WANG Qi. Effect of Interfacial Temperature on the Bonding Morphology and Fracture Mechanism of TC4-CFRTP Laser Bonding Joints with Polymer Interlayer[J]. Optics & Laser Technology，2025，184：112463.

[17] ZHANG Bowen，MA Yunwu，YU Feilong，et al. Strengthening Flat-die Friction Self-pierce Riveting Joints via Manipulating Stir Zone Geometry by Tailored Rivet Structures[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2024，203：104223.

[18] LIU Yunpeng，MA Yunwu，LOU Ming，et al. Effects of Rotation Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Non-prehole Riveting Process for High-strength Aluminium Alloys[J]. Materials & Design，2025，249：113539.

（编辑　王旻玥）

作者简介：朱　峰，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为复钛叠层材料的铆焊连接工艺。E-mail：f1109_zhu@sjtu.edu.cn。**马运五***（通信作者），男，1990年生，副教授、博士研究生导师。研究方向为轻量化材料焊接与连接技术。E-mail：myw3337@sjtu.edu.cn。

本文引用格式：

朱峰，余飞龙，周恩涛，等. 铆钉结构对CFRP/钛合金摩擦铆焊工艺及接头力学行为的影响[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2334-2342.

ZHU Feng，YU Feilong，ZHOU Entao，et al. Effect of Rivet Structure on Friction Riveting Process and Mechanical Behavior of CFRP/Titanium Alloy Joints[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2334-2342.