

# 基于减磨液介质黏着规律的防滑控制策略优化研究

金碧筠

上海申通地铁集团有限公司技术中心, 上海

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

针对城市轨道交通车辆在减磨液介质导致的低黏着轨面条件下制动时易发生滑行、黏着利用不足等问题, 本文基于绕行式轮轨黏着模拟试验台开展减磨液介质工况下的轮轨黏着特性试验, 获取了20~80 km/h速度范围内的黏滑曲线。通过最小二乘法拟合构建了反映“双峰值”特性的三维轮轨黏着模型, 揭示了减磨液介质下黏着系数随滑移率和速度的变化规律。在此基础上, 提出一种小滑移与大滑移相结合的复合防滑控制策略: 在低速阶段将滑移率控制在0.06附近以利用第一峰值黏着, 在高速阶段以速度差20 km/h为阈值切换至大滑移控制以利用第二峰值黏着, 并设定50 km/h为控制模式切换点。基于Simulink建立列车纵向动力学模型进行仿真验证。结果表明: 与纯小滑移控制相比, 所提优化策略的平均利用黏着提升14.2%, 制动距离缩短9%, 同时减少了制动缸频繁充排气动作, 提高了防滑控制的经济性与可靠性。研究成果可为减磨液等低黏着介质条件下的列车防滑控制参数整定提供理论依据。

## 关键词

减磨液, 轮轨黏着, 防滑控制, 黏滑特性, 制动策略优化

# Research on Anti-Slip Control Strategy Optimization Based on Adhesion Characteristics of Anti-Wear Fluid Medium

Biyun Jin

Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai

Received: April 21, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

To address the problems of prone sliding and insufficient adhesion utilization during braking of urban rail transit vehicles under low-adhesion rail surface conditions caused by anti-wear fluid medium, this paper conducts wheel-rail adhesion characteristic tests under anti-wear fluid medium conditions based on a circulating wheel-rail adhesion simulation test rig, and obtains adhesion-slip curves in the speed range of 20~80 km/h. A three-dimensional wheel-rail adhesion model reflecting the “double-peak” characteristic is constructed by least squares fitting, revealing the variation law of adhesion coefficient with slip ratio and speed under an anti-wear fluid medium. On this basis, a composite anti-slip control strategy combining small slip and large slip is proposed: in the low-speed stage, the slip ratio is controlled around 0.06 to utilize the first peak adhesion; in the high-speed stage, a speed difference threshold of 20 km/h is used to switch to large slip control to utilize the second peak adhesion, and 50 km/h is set as the control mode switching point. A train longitudinal dynamics model is established based on Simulink for simulation verification. The results show that compared with pure small slip control, the proposed optimization strategy increases the average utilized adhesion by 14.2%, reduces braking distance by 9%, and reduces frequent charging and exhausting actions of the brake cylinder, thereby improving the economy and reliability of anti-slip control. The research results can provide a theoretical basis for parameter tuning of train anti-slip control under low-adhesion medium conditions such as anti-wear fluid.

## Keywords

Anti-Wear Fluid, Wheel-Rail Adhesion, Anti-Slip Control, Adhesion-Slip Characteristics, Braking Strategy Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

轮轨黏着是保障列车安全、高效运行的核心物理基础。列车牵引与制动力的传递均依赖于轮轨接触斑内的黏着-蠕滑行为。然而,在实际运营中,轮轨界面常因环境介质(如水、油、冰雪、减磨液等)的侵入而导致黏着系数显著下降,引发车轮空转或滑行,严重威胁行车安全[1][2]。特别是在城市轨道交通系统中,为减小轮轨磨耗而广泛使用轮缘润滑或减磨液喷洒,其在降低磨耗的同时也带来了低黏着制动风险[3][4]。因此,深入理解特定介质下的轮轨黏着规律,并据此优化防滑控制策略,具有重要的工程与理论价值。

现有防滑控制研究主要围绕黏着系数观测、最优蠕滑率跟踪及多模式控制展开。付佳兴[1]针对重载机车提出了基于蠕滑率识别的PID实时防滑控制器,显著降低了低黏着工况下的磨耗功率。蔡亮成等[2]考虑了列车通信输入时滞问题,设计了时滞补偿防滑控制器,提高了控制鲁棒性。苗培溟等[3]引入电磁作动器辅助牵引/制动,在低黏着条件下提升了轮轨黏着利用率。乔志远[4]从城市轨道交通多系统协同角度优化了信号与车辆系统的防滑交互逻辑。刘瑞锋[5]提出了基于滑模极值搜索的最优黏着控制方法,实现了黏着系数的自适应最大化。翟耕慰等[6]修正了减速度包络线,提出了一种更稳定的防滑效率评价方法。张兴旺等[7]系统总结了城轨车辆电空混合制动的防滑控制原理。陈清华等[8]对比了定阈值与最优阈值PID防滑控制,指出后者在低黏着区域更具优势。杨洋等[9]分析了极端天气下防滑失效原因,强调了

撒沙等辅助增黏措施的必要性。周军[10]基于台架试验验证了分层递阶防滑策略在低黏着条件下的适应性。李中奇等[11]设计了动态遗忘因子递归最小二乘算法估计最优蠕滑率,结合自适应滑模控制提升了防滑效果。马天和等[12]提出了基于黏着力观测器的空气制动防滑控制,实现了制动缸压力的平滑调节。

尽管上述研究在防滑控制理论和方法上取得了显著进展,但绝大多数研究采用经验或简化的黏着模型,如指数模型或 Polach 模型,对特定第三介质(如减磨液)下的真实黏着规律关注不足。减磨液作为一种典型的轮轨界面调节介质,其引起的黏着系数随滑移率和速度的变化呈现出不同于水或油的“双峰值”特征,且峰值点位置对速度敏感。现有防滑控制策略多采用固定蠕滑率或速度差阈值,难以在减磨液介质下充分利用两个黏着峰值,导致制动距离偏长或控制动作频繁。

为此,本文首先基于绕行式轮轨黏着模拟试验台开展减磨液介质下的黏着特性试验,构建基于实测数据的黏着模型;其次,分析黏着系数随滑移率和速度的变化规律,提取第一、第二峰值点特征;最后,提出一种小滑移与大滑移相结合的复合防滑控制策略,并通过车辆纵向动力学仿真验证其有效性。研究成果可为低黏着介质条件下的防滑参数优化提供直接依据。

## 2. 减磨液介质黏着规律试验

### 2.1. 试验设备

轮轨黏着特性基于项目前期得到的轮轨黏着试验数据进行分析,数据主要来源于同济大学自主研发的绕行式轮轨黏着模拟试验台,试验台整体结构如图 1 所示。绕行式轮轨黏着模拟试验台主要由测控系统、主机机械结构、外围监控、高低温箱和水箱水泵等部分组成,其中测控系统主要由工控机、控制面板和调压阀组成,工控机负责控制试验台的起动和停止、车速轴速和滑移率的产生以及试验数据的记录,控制面板用于开关电机及其离合器并控制第三介质喷洒装置的水量,调压阀通过控制滑动轴气缸气压来调节轴重;主机机械机构采用了国内首创的轮/环式的轮轨接触方案,实现了轮轨间第三介质的量可控可测,还能模拟列车前轮滚过时轨面第三介质量的动态变化,有利于揭示长大列车整车级黏着分布规律及衰退特性,转臂和轮对转速分别由一个电机单独控制,从而模拟车速和轮速,车速电机和轮速电机相互解耦独立,因此可以实现工况,理论上最大滑移率能够做到 100%,对于轮轨工况的研究具备优势;外围监控主要由高速摄像机、监控器摄像机和无线热像仪组成,主要用于远程监控试验台的运动情况并采集轮轨接触温度数据,保障试验的安全开展;高低温箱采用拼接包裹式结构,形成密闭试验空间,可通过加热器和制冷装置对温度进行控制,进而制造冰雪等不同状态复杂介质条件;水箱水泵主要用于向轨面定量喷洒水和减磨液等第三介质,如图 2 所示,用于制造低黏着条件。

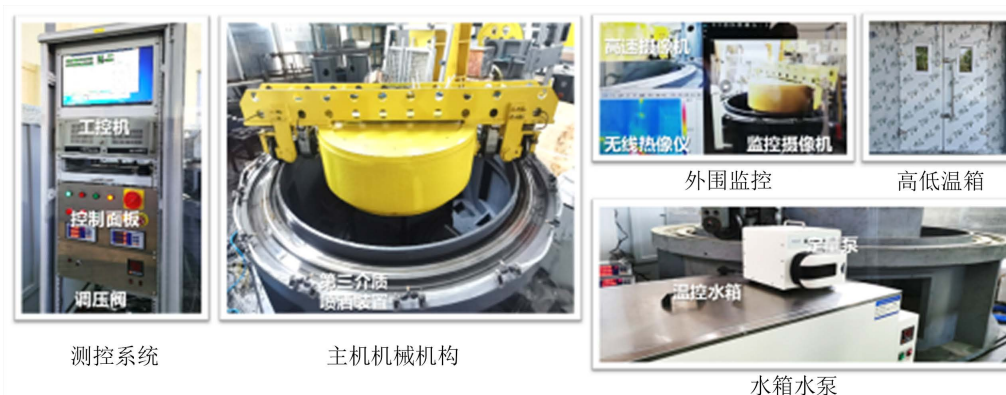


Figure 1. Overall structure of the loop-type wheel-rail adhesion simulation test rig  
图 1. 绕行式轮轨黏着模拟试验台整体结构



Figure 2. Spraying anti-wear fluid medium on the rail surface  
图 2. 轨面上喷洒减磨液介质

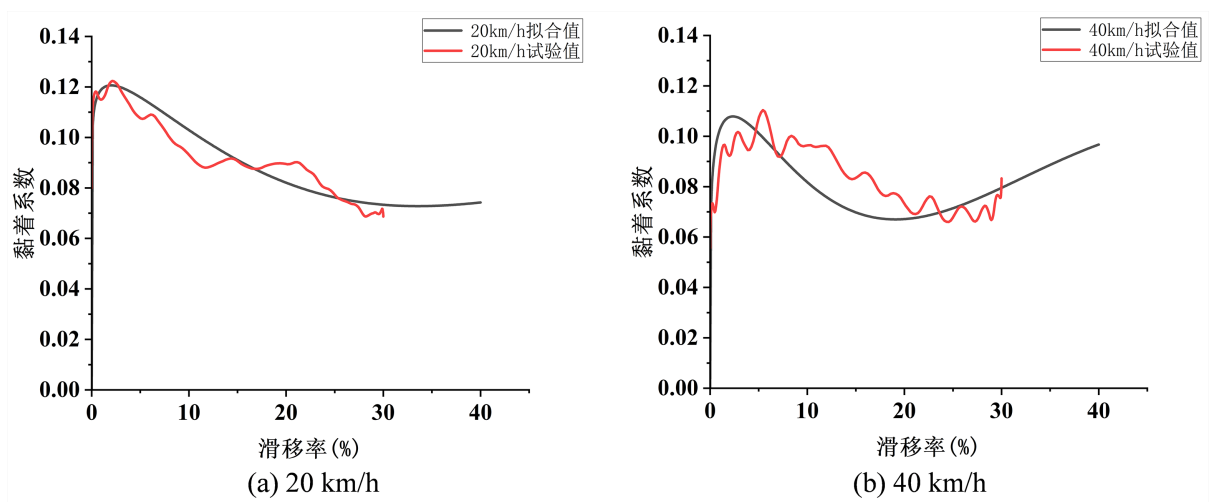
## 2.2. 试验数据处理及黏着规律分析

为探索不同速度条件下的减磨液黏着系数，其中减磨液介质为 8% 浓度的洗涤剂，轴重固定为 14 t，测试环境温度为 25℃，设计测试方案如表 1。

Table 1. Test plan  
表 1. 测试方案

速度(km/h)	流量(L/min)	滑移率上限
20	3	0.3
40	3	0.3
60	3	0.3
80	3	0.3

减磨液介质作为试验工况，对试验结果不同速度工况的黏滑曲线进行数据拟合构建轮轨黏着模型，并在此基础上对轮轨制动黏着控制策略进行研究。其中速度为 20~80 km/h 的试验结果来源于绕行式轮轨黏着模拟试验台的试验结果。因此，基于轮轨黏着试验数据，采用最小二乘法对其进行拟合，得到拟合结果和试验结果对比图如图 3 所示。



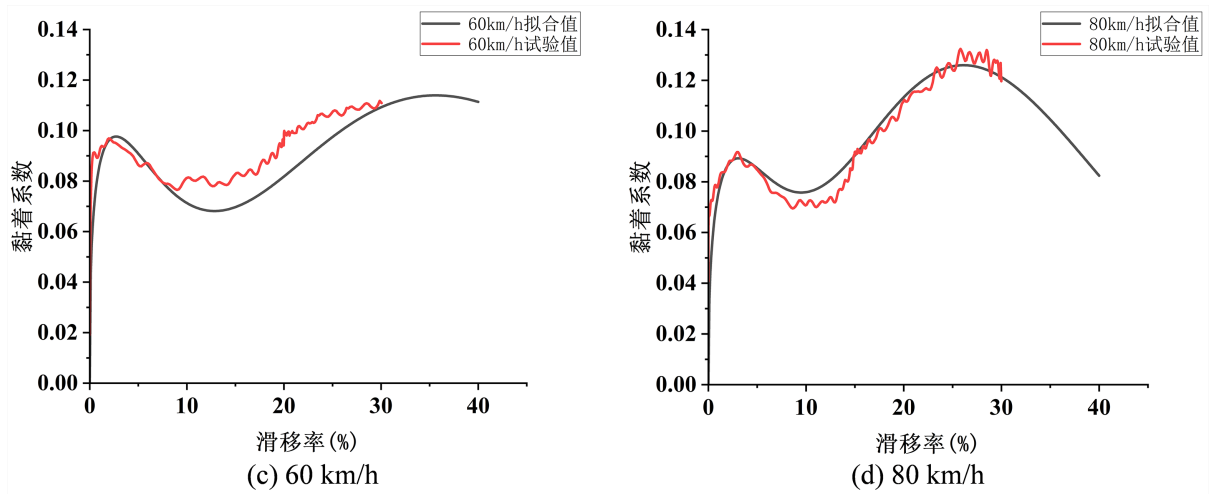


Figure 3. Comparison between wheel-rail adhesion test results and curve fitting results

图 3. 轮轨黏着试验结果与曲线拟合结果对比图

对不同速度段的轮轨黏着系数进行插值，得到轮轨黏着系数随滑移率和速度变化的三维轮轨黏着模型，如图 4 所示。可以看出，该轮轨黏着模型能够反映“双峰值”特性，也能反映黏着系数随速度的实时变化情况，且该模型来源于试验结果，更加符合真实的轮轨黏着变化规律。

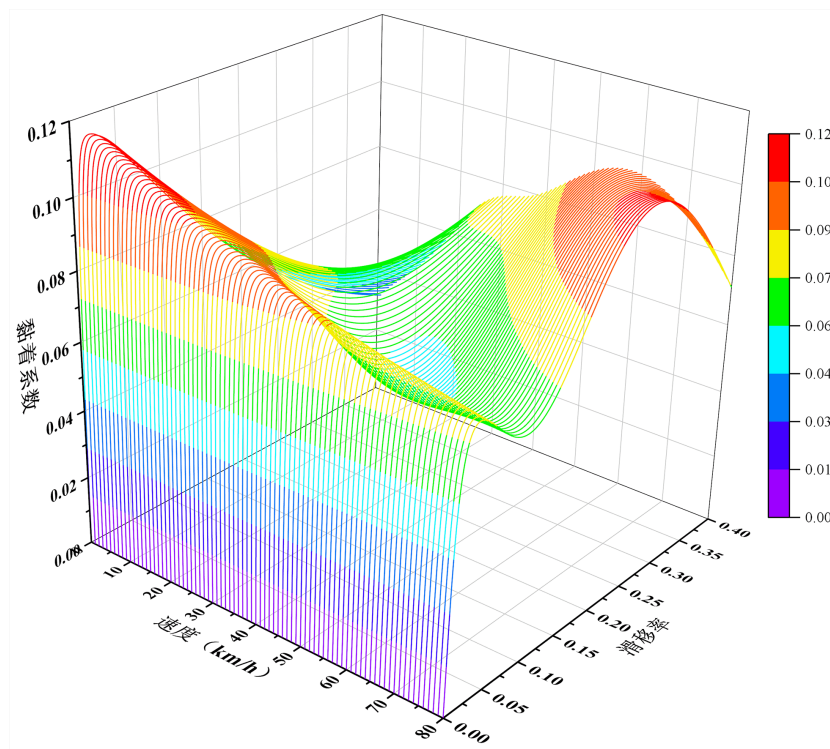


Figure 4. Three-dimensional wheel-rail adhesion model with anti-wear fluid medium

图 4. 减磨液介质三维轮轨黏着模型

基于对试验数据的分析以及对减磨液介质的黏着规律，提取 20~80 km/h 下的黏着系数随滑移率变化关系，如图 5，可见在速度低于 50 km/h 时，并未在 0~0.4 滑移率范围内出现黏着系数第二峰值点，或者

有黏着改善现象但其改善的黏着系数低于第一峰值点的黏着系数，且随滑移率超过 0.4 后，轮对会出现擦伤风险，因此不建议继续向更高的滑移率试探。

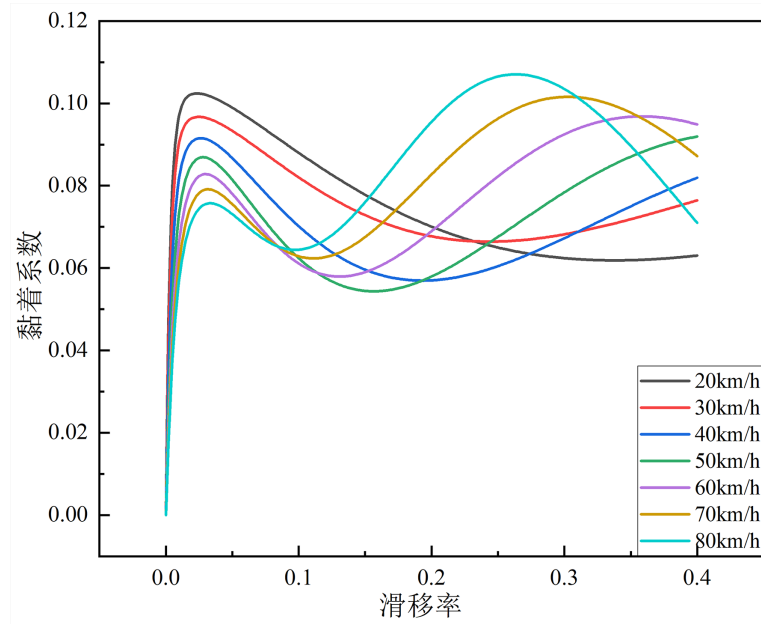


Figure 5. Stick-slip curves at different speed levels under the anti-wear fluid medium operating condition

图 5. 减磨液介质工况不同速度等级下的黏滑曲线

表 2 给出了 20~80 km/h 各黏着系数峰值点所处的位置，各速度等级下的第一峰值点相差不多，均在滑移率为 0.025 附近，对应的速度差在 2 km/h 以内，但将 2 km/h 作为 A 点(排风点)判据不切实际，会增加防滑阀动作信号的切换，制动缸充排气动作过于频繁，导致制动缸寿命降低。通过 20 km/h 的黏滑曲线变化规律可知，当滑移率处于 0.1 时，其对应的黏着系数甚至超过了 50 km/h 和 60 km/h 的黏着系数第二峰值点，因此可将滑移率控制在 0.04~0.1 范围内，为 A 点的阈值提供理论依据。黏着系数的第二峰值点在速度高于 50 km/h 后出现，且随着速度的增加，第二峰值点位置向滑移率较小的方向偏移，即速度越高，大滑移改善现象越加明显。不难看出出现第二峰值点时，虽然滑移率不同且存在较大差距，但速度差保持在 20 km/h 附近，可作为控制策略 A 点基准参数进行优化。

Table 2. Corresponding positions of peak adhesion coefficient points at different speed levels

表 2. 各速度等级下的黏着系数峰值点对应位置

速度(km/h)	S1	$\Delta v_1$ (km/h)	S2	$\Delta v_2$ (km/h)
20	0.024	0.48	/	/
30	0.024	0.72	/	/
40	0.025	1	/	/
50	0.026	1.3	0.4	20
60	0.027	1.62	0.35	21
70	0.029	2.03	0.29	20.3
80	0.03	2.4	0.265	21.2

### 3. 车辆动力学模型的建立及防滑策略的优化

#### 3.1. 车辆动力学模型的建立

城轨车辆制动动力学模型主要用于模拟列车制动过程中的受力及运动情况，输出列车制动黏着控制过程中的实时速度、减速度及制动距离等重要参数，为制动黏着控制性能的好坏提供评价指标。列车制动过程中纵向运动特性起主导作用，而横向动力学性能对列车制动影响较小，因此在进行车辆制动动力学建模时不需要建立完整模型。本报告在车辆制动动力学建模时仅考虑车体和构架的纵向、垂向和点头自由度，以及轮对的纵向和旋转自由度，忽略轨道不平顺的影响，保留列车制动最主要影响因素的同时尽可能简化模型，忽略不必要的因素，减小模型的复杂度和计算量从而加快实时仿真速度。车辆制动动力学模型通过对单节车各个零部件进行纵向动力学分析，分别建立其动力学方程，并将其组合成为一个有机的整体，从而在软件 Simulink 中实现其动力学功能。城轨车辆制动动力学模型单节车各零部件的纵向动力学分析示意图如图 6 所示。

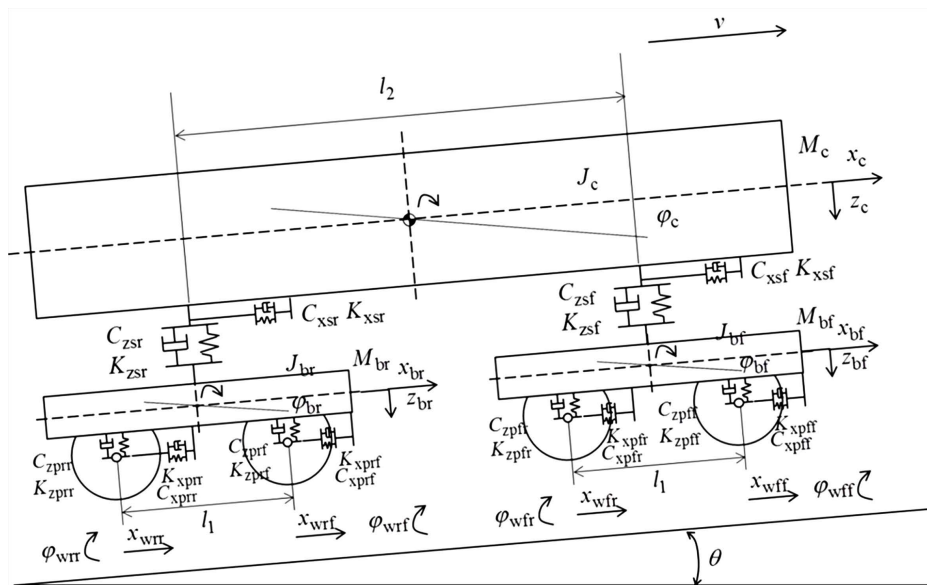


Figure 6. Schematic diagram of longitudinal dynamics analysis of various components of a single vehicle

图 6. 单节车各零部件的纵向动力学分析示意图

车辆制动动力学模型主要分为车体、转向架、轮对以及一系和二系悬挂的动力学模型，分别采用以下动力学方程构建：

车体纵向动力学方程见式：

$$M_c \ddot{x}_c + C_{xsf} (\dot{x}_c - \dot{x}_{bf}) + C_{xsr} (\dot{x}_c - \dot{x}_{br}) + K_{xsf} (x_c - x_{bf}) + K_{xsr} (x_c - x_{br}) = -M_c g \sin(\theta) \quad (1)$$

车体垂向动力学方程如下：

$$M_c \ddot{z}_c + C_{zsf} (\dot{z}_c - \dot{z}_{bf}) + C_{zsr} (\dot{z}_c - \dot{z}_{br}) + K_{zsf} (z_c - z_{bf}) + K_{zsr} (z_c - z_{br}) = M_c g \cos(\theta) \quad (2)$$

车体点头动力学方程如下：

$$J_c \ddot{\phi}_c + C_{zsf} \left( \dot{\phi}_c \frac{l_2}{2} - \dot{z}_{bf} \right) + C_{zsr} \left( \dot{\phi}_c \frac{l_2}{2} + \dot{z}_{br} \right) + K_{zsf} \left( \phi_c \frac{l_2}{2} - z_{bf} \right) + K_{zsr} \left( \phi_c \frac{l_2}{2} + z_{br} \right) = 0 \quad (3)$$

一位端转向架构架纵向动力学方程如下：

$$M_{bf}\ddot{x}_{bf} + C_{xsf}(\dot{x}_{bf} - \dot{x}_c) + C_{xpff}(\dot{x}_{bf} - \dot{x}_{wff}) + C_{xpfr}(\dot{x}_{bf} - \dot{x}_{wfr}) + K_{xff}(x_{bf} - x_c) + K_{xpff}(x_{bf} - x_{wff}) + K_{xpfr}(x_{bf} - x_{wfr}) = -M_{bf}g \sin(\theta) \quad (4)$$

一位端转向架构架垂向动力学方程如下：

$$M_{bf}\ddot{z}_{bf} + C_{zsf}(\dot{z}_{bf} - \dot{z}_c) + C_{zpf}(\dot{z}_{bf} - \dot{z}_{wff}) + C_{zpr}(\dot{z}_{bf} - \dot{z}_{wfr}) + K_{zff}(z_{bf} - z_c) + K_{zpf}(z_{bf} - z_{wff}) + K_{zpr}(z_{bf} - z_{wfr}) = M_{bf}g \cos(\theta) \quad (5)$$

一位端转向架构架点头动力学方程如下：

$$J_{bf}\ddot{\varphi}_{bf} + (C_{zpf} + C_{zpr})\dot{\varphi}_{bf} \frac{l_1}{2} + (K_{zpf} + K_{zpr})\varphi_{bf} \frac{l_1}{2} = 0 \quad (6)$$

二位端转向架构架的动力学方程与一位端转向架构架类似，将符号下表进行相应调整即可，调整方式为： $bf \rightarrow br$ ， $ff \rightarrow rf$ ， $fr \rightarrow rr$ 。

以一位端转向架一位轮对为例，建立轮对纵向、垂向和旋转运动的方程。

轮对纵向动力学方程如下：

$$M_{wff}\ddot{x}_{wff} + C_{xpff}(\dot{x}_{wff} - \dot{x}_{bf}) + K_{xpff}(x_{wff} - x_{bf}) = F_{xwff} - M_{wff}g \sin(\theta) \quad (7)$$

轮对旋转动力学方程如下：

$$J_{wff}\ddot{\varphi}_{wff} = F_{xwff}R_{wff} - T_{wff} \quad (8)$$

轮对垂向动力学方程如下：

$$F_{zwff} = C_{zpf}\dot{z}_{bf} + K_{zpf}z_{bf} + M_{wff}g \cos(\theta) \quad (9)$$

上述方程中变量名  $M$  为质量， $J$  为转动惯量， $x$  为纵向位移， $z$  为垂向位移， $\varphi$  为点头角位移， $K$  为刚度系数， $C$  为阻尼系数， $F$  为作用力， $T$  为制动力矩， $\theta$  为坡道坡度， $l_1$  为转向架固定轴距， $l_2$  为车辆定距；下标符号  $c$  代表车体， $b$  代表构架， $w$  代表轮对， $s$  代表二系悬挂， $p$  代表一系悬挂， $x$  代表纵向， $z$  代表垂向， $f$  代表前位， $r$  代表后位；例如  $K_{xpff}$  代表后构架的前轮对的一系悬挂的纵向定位刚度，其中轮对的纵向力  $F_{xw}$  即为利用黏着力。

### 3.2. 防滑策略优化

根据前述的黏着规律设计小滑移控制模式下的优化方案，将黏着系数控制在第一峰值点附近，见表 3，验证小滑移控制模式下的最优滑移率。

**Table 3.** Optimization of anti-slip control strategy under the anti-wear fluid and small-slip control mode

**表 3.** 减磨液 - 小滑移控制模式下的防滑控制策略优化

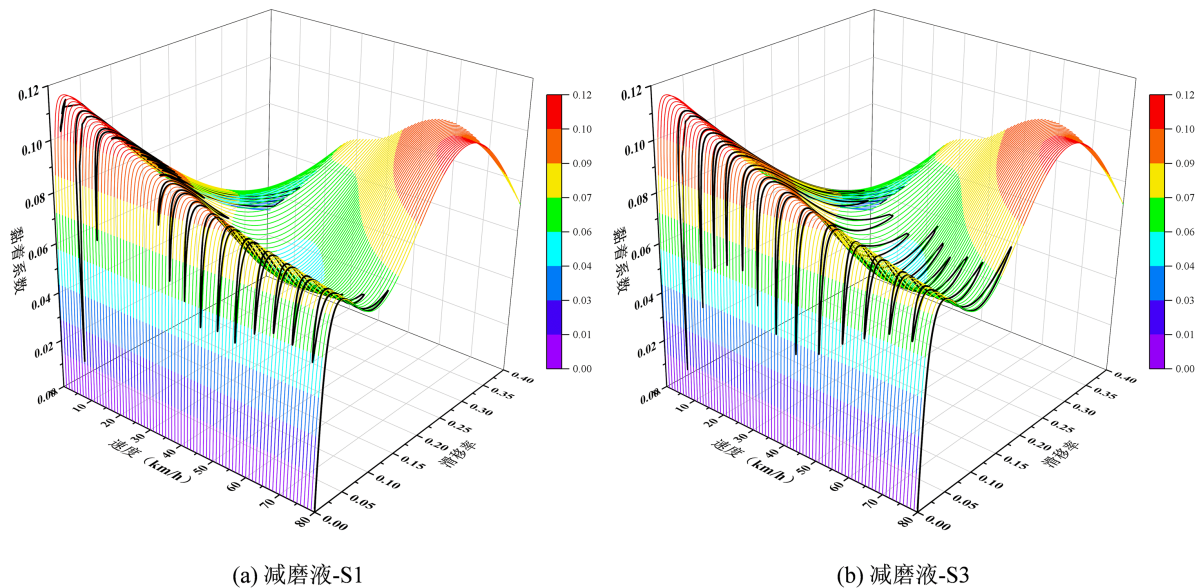
优化方案	A 点(排气)	B 点(保压)	C 点(充气)
减磨液-S0	$s > 0.04$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$
减磨液-S1	$s > 0.06$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$
减磨液-S2	$s > 0.08$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$
减磨液-S3	$s > 0.1$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$

设置滑移率为 0.04~0.1 作为 A 点判据阈值使轮轨间黏着系数控制在第一峰值点附近，当轴速不再衰

减时进入保压状态,最后当轴速恢复至 1.8 km/h 开始充气,进行仿真分析。表 4 对比减磨液 S0-S3 优化方案的制动距离,平均利用黏着,可见当滑移率超过 0.06 时,制动距离延长,平均利用黏着降低,即在该滑移率控制模式下,黏着系数超过了第一峰值点并且处于下降较快阶段。图 7 对比了减磨液 S1 和减磨液 S3 方案的黏着利用三维动态过程,可以看出当滑移率增加时,黏着利用经过了第一波谷位置,即黏着系数最低的区域,虽也利用到了黏着上升的阶段,但在每个速度阶段都会在波谷位置来回移动。

**Table 4.** Comparison of braking distance and average utilized adhesion for the anti-wear fluid small-slip optimization scheme  
**表 4.** 减磨液 - 小滑移优化方案的制动距离和平均利用黏着对比

优化方案	制动距离	平均利用黏着
减磨液-S0	231.2	0.07
减磨液-S1	236.6	0.0693
减磨液-S2	239.3	0.0657
减磨液-S3	251	0.0648

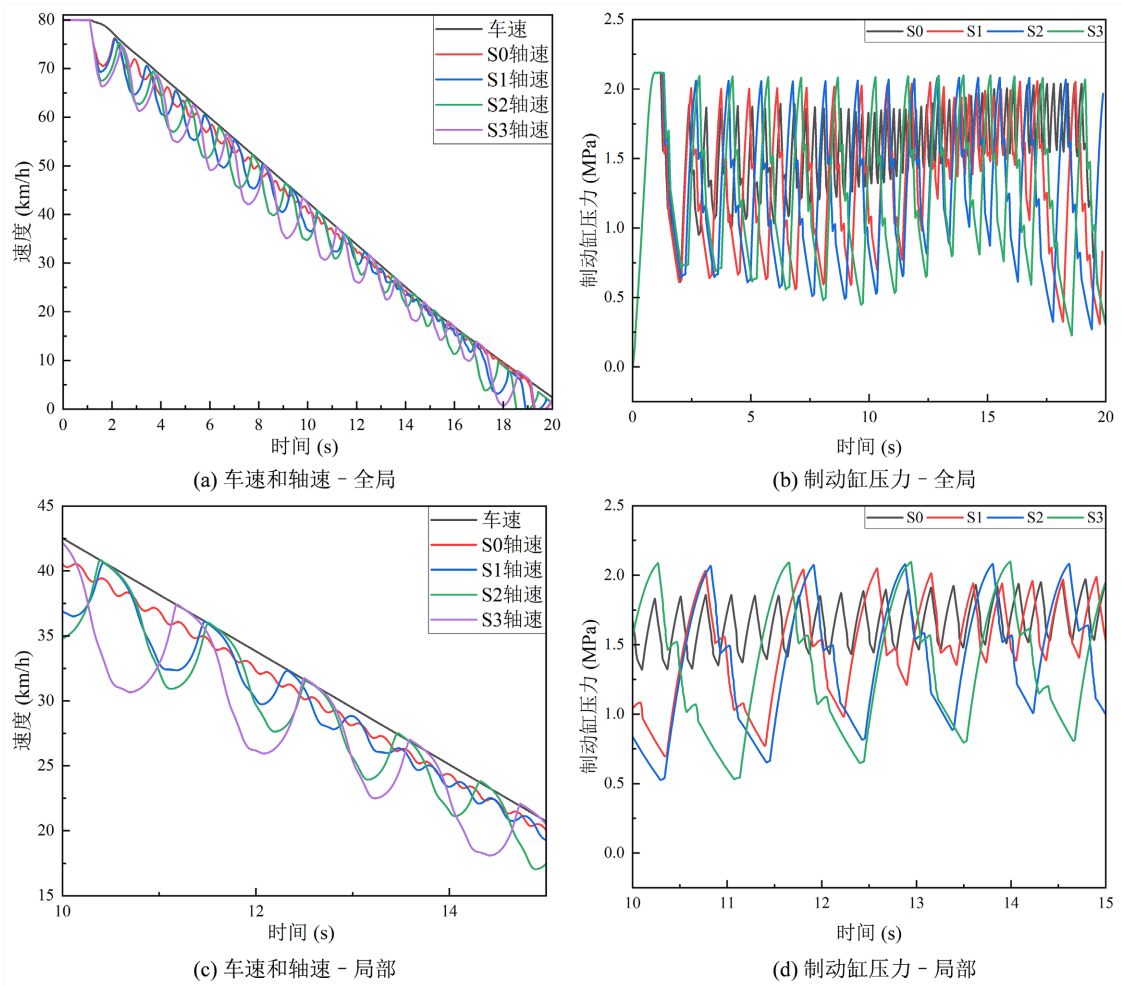


**Figure 7.** Three-dimensional dynamic process of adhesion utilization (Small-slip)

**图 7.** 黏着利用三维动态过程(小滑移)

图 8 为减磨液 S0-S3 优化方案的车速,轴速和制动缸压力随时间的变化关系,可以看出,随着滑移率阈值的增加,对应的速度差偏大,控制信号作用周期增加,制动缸充排气过程减少。因此,可以得出结论,在小滑移控制模式下,采用滑移率控制时,滑移率阈值太小会导致制动缸充排气动作过于频繁,减少制动缸使用寿命。当滑移率阈值过大时,会导致利用黏着处于黏着曲面的波谷位置,造成制动距离延长。

通过小滑移控制模式下的利用黏着和制动距离的结果分析,得知将滑移率控制在 0.06 附近能取得较优的控制效果,为此,固定小滑移控制模式的滑移率阈值为 0.06,结合减磨液黏着模型在高速阶段出现的黏着系数上升现象,优化高速阶段下的大滑移控制策略,将高速阶段的黏着系数控制在第二峰值点附近,设计方案如表 5。



**Figure 8.** Changes in vehicle speed, axle speed, and brake cylinder pressure under the small-slip optimization scheme  
**图 8.** 小滑移优化方案的车速、轴速和制动缸压力变化

**Table 5.** Optimization of anti-slip control strategy under the anti-wear fluid and large-slip control mode  
**表 5.** 减磨液 - 大滑移控制模式下的防滑控制策略优化

优化方案	A 点	B 点	C 点	切换小滑移时刻
减磨液-S4	$\Delta v > 10 \text{ km/h}$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$	$V < 50 \text{ km/h}$
减磨液-S5	$\Delta v > 15 \text{ km/h}$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$	$V < 50 \text{ km/h}$
减磨液-S6	$\Delta v > 20 \text{ km/h}$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$	$V < 50 \text{ km/h}$
减磨液-S7	$\Delta v > 22.5 \text{ km/h}$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$	$V < 56.25 \text{ km/h}$
减磨液-S8	$\Delta v > 25 \text{ km/h}$	$\beta > 0$	$\Delta v < 1.8 \text{ km/h}$	$V < 62.5 \text{ km/h}$

设置高速区速度差阈值为 10~25 km/h 作为 A 点判据阈值使轮轨间黏着系数控制在第二峰值点附近，在部分速度阶段滑移率达到 0.4 时，黏着系数仍处于上升阶段，未出现第二峰值点，因此需要根据滑移率 0.4 对切换小滑移控制模式的速度差进行调整，避免滑移率超过 0.4 的情况。当轴速不再衰减时进入保压状态，最后当轴速恢复至 1.8 km/h 开始充气，进行仿真分析。

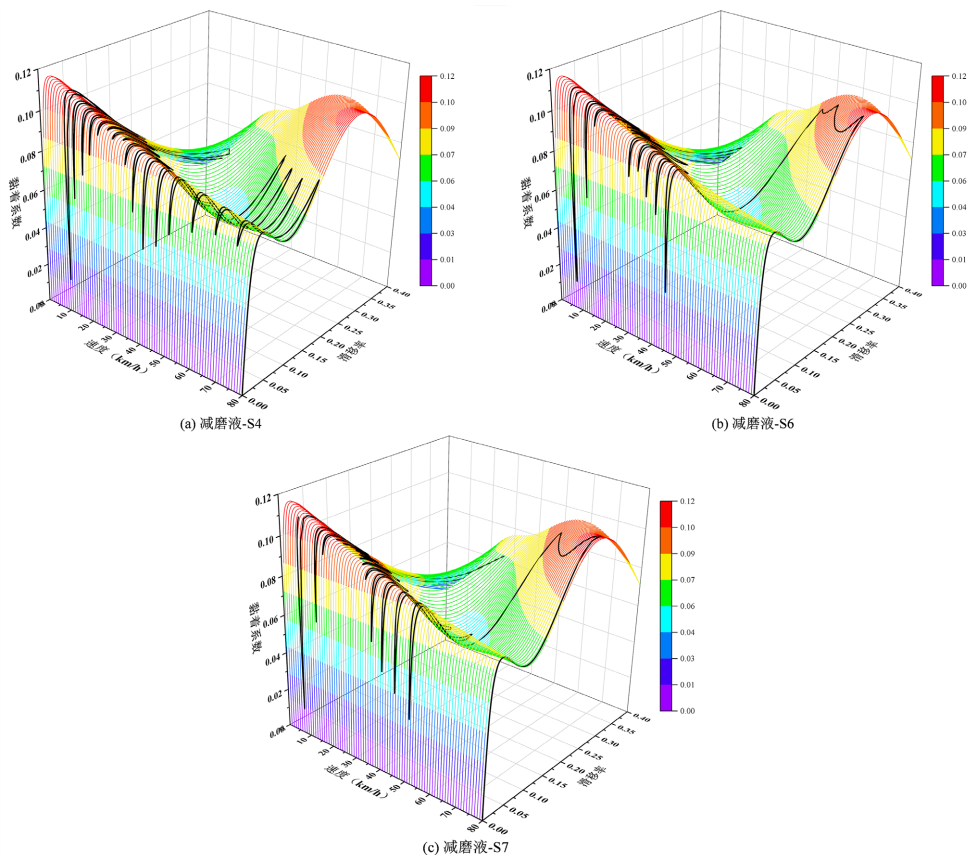
表 6 对比减磨液 S4-S8 优化方案的制动距离和平均利用黏着。对比减磨液 S4-S8 优化方案的制动距离，平均利用黏着，可见当速度差超过或者低于 20 km/h 时，制动距离延长，平均利用黏着降低。当速度

差低于 20 km/h 时候, 制动过程位于 70~80 km/h 高速度段的利用黏着并未到达第二峰值点; 当速度差高于 20 km/h 时候, 制动过程位于 70~80 km/h 高速度段的利用黏着跳过第二峰值点开始快速降低, 而高速段的速度积分对制动距离的敏感性较高且高速摩擦热导致轮轨黏着改善的程度更为明显, 黏着系数第二峰值点较低速段较高, 因此需合理控制高速区间的大滑移速度差阈值。

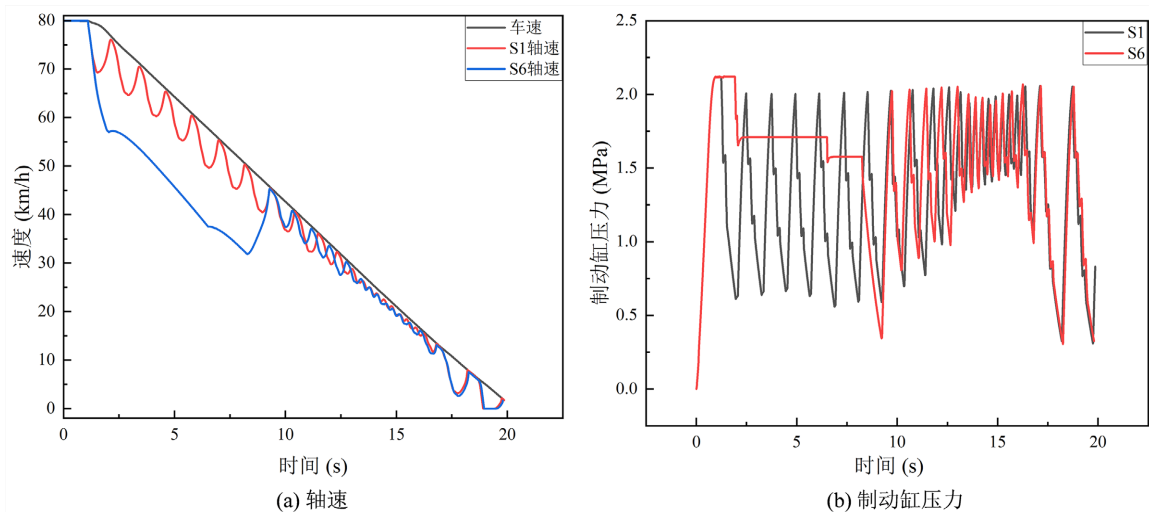
图 9 对比了减磨液 S4、减磨液 S6 方案和减磨液 S7 方案的黏着利用三维动态过程, 可以看出当速度差( $\Delta v = 10$  km/h)不足以达到第二峰值点时, 黏着利用经过了第一波谷位置, 开始在黏着上升段波动, 但所能到达的最大黏着系数基本和第一峰值点平行, 未起到大滑移改善轮轨黏着效果。当速度过大( $\Delta v = 22.5$  km/h)时, 虽然利用黏着达到了第二峰值点, 但其大滑移速度区间减小, 导致平均利用黏着降低, 因此将 50 km/h 作为小滑移控制策略的切换点是比较合理的。

**Table 6.** Comparison of braking distance and average utilized adhesion for the anti-wear fluid large-slip optimization scheme  
**表 6.** 减磨液 - 大滑移优化方案的制动距离和平均利用黏着对比

优化方案	制动距离	平均利用黏着
减磨液-S4	224	0.0701
减磨液-S5	219.5	0.0743
减磨液-S6	215	0.0792
减磨液-S7	216	0.0771
减磨液-S8	223.1	0.0745



**Figure 9.** Three-dimensional dynamic process of adhesion utilization (Large-slip switch to small-slip)  
**图 9.** 黏着利用三维动态过程(大滑移转小滑移)



**Figure 10.** Comparison of axle speed and brake cylinder pressure between large and small slip control modes  
**图 10.** 大小滑移控制模式的轴速和制动缸压力对比

为对比大滑移控制策略的防滑阀信号动作频率的影响,图 10 对比了减磨液 S1 方案和减磨液 S6 方案的轴速和制动缸压力,可以看出在大滑移模式下,轴速在较长时间保持在恒定的速度差,制动缸压力分为阶梯式两段下降后进入小滑移控制模式,避免制动缸频繁充排气。减磨液 S6 方案的平均利用黏着为 0.0792,相较于减磨液 S1 方案的平均利用黏着为 0.0693,提升 14.2%,制动距离缩短 9%。

#### 4. 总结

本文针对减磨液介质导致的低黏着轨面条件,系统开展了轮轨黏着特性试验与防滑控制策略优化研究,主要结论如下:

(1) 基于绕行式轮轨黏着模拟试验台获取了减磨液介质下 20~80 km/h 速度范围内的黏滑曲线,揭示了黏着系数随滑移率变化的“双峰值”特征:第一峰值点位于滑移率 0.025 附近,受速度影响较小;第二峰值点在速度高于 50 km/h 后出现,对应速度差约 20 km/h,且随速度增加峰值点向小滑移方向偏移。

(2) 构建了基于实测数据的三维轮轨黏着模型,采用最小二乘法拟合得到的黏着模型能够准确反映减磨液介质下黏着系数随滑移率和速度的非线性变化规律,为防滑控制策略设计提供了真实的黏着边界。

(3) 提出了小滑移与大滑移相结合的复合防滑控制策略:低速阶段以滑移率 0.06 为 A 点判据,将黏着控制在第一峰值点附近;高速阶段以速度差 20 km/h 为阈值切换至大滑移控制,利用第二峰值黏着;设定 50 km/h 为控制模式切换点。仿真结果表明,该策略相较于纯小滑移控制,平均利用黏着提升 14.2%,制动距离缩短 9%,同时减少了制动缸频繁充排气动作。

(4) 研究验证了在减磨液介质条件下,合理利用大滑移区域黏着改善现象可有效提升制动性能,但需避免滑移率超过 0.4 以防止轮轨擦伤。本文方法可为低黏着介质条件下的防滑控制参数整定提供理论依据与工程参考。

#### 致谢

感谢申通集团对本文研究的支持。

#### 基金项目

(1) 申通集团科研项目——低黏着条件下列车制动防滑效率研究(编号: JS-KY24R014);

(2) 申通集团科研项目——中国城市轨道交通协会先导工程项目“轨道交通车辆黏着实时检测技术研究和应用”。

## 参考文献

- [1] 付佳兴. 长大坡道及干湿油态轨面条件下重载机车轮轨粘滑控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2025.
- [2] 蔡亮成, 乐洋, 黄德青. 带输入时滞的高速列车防滑控制[J]. 控制理论与应用, 2026, 43(3): 541-550.
- [3] 苗培淇, 凌亮, 张恒, 等. 电磁作动器辅助的高速列车防滑控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(22): 143-154.
- [4] 乔志远. 城市轨道交通多系统协同的列车防滑控制策略优化[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(11): 62-65+70.
- [5] 刘瑞锋. 适应黏着差异的高速列车最优黏着控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.
- [6] 翟耕慰, 田春, 马天和, 等. 基于减速度包络线修正的新型防滑效率计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(2): 193-206.
- [7] 张兴旺, 刘佳玲, 闫晓庚, 等. 城市轨道交通车辆防滑保护控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 207-211.
- [8] 陈清华, 杨云帆, 凌亮, 等. 复杂轮轨摩擦条件下的重载机车防滑控制研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 179-186.
- [9] 杨洋, 张鹤飞, 亢磊, 等. 制动防滑控制系统失效分析及应对措施[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(4): 85-89.
- [10] 周军. 基于台架试验的高速动车组防滑控制特性研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(1): 26-31.
- [11] 李中奇, 孟凡晖, 杨辉. 基于最优蠕滑率的列车防滑控制研究[J]. 控制工程, 2021, 28(12): 2312-2317.
- [12] 马天和, 吴萌岭, 田春. 基于黏着力观测器的列车空气制动防滑控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 1668-1675.