

城市轨道交通列车制动性能 实时优化关键问题

于柯¹, 张选南², 张慧³

(1. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100044; 2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;
3. 北京地铁科技发展有限公司, 北京 100044)

摘要: 针对既有线路自动控制系统实时性和准确性不足等问题, 提出一种列控系统智能化升级方案。首先, 针对列车运行中电制动和空气制动阶段的独特性, 考虑电制动和空气制动间的切换, 分别建立针对电制动和空气制动的精确制动模型。然后, 对列车自动运行系统(automatic train operation, ATO)控制器进行优化, 应用滑模自适应鲁棒控制策略进行实时调整, 增强控制器鲁棒性, 以适应不同车辆参数和外部环境干扰。最后, 以北京地铁5号线为例, 对列车精确制动模型和滑模自适应鲁棒控制器进行仿真验证, 计算列车停车精度与速度误差。研究表明: 与比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制和滑模控制算法相比, 利用本文提出的控制算法计算得到的停车精度和速度误差更小, 停车精度均值达8 cm以下。

关键词: 城市轨道交通; 制动性能优化; 滑模自适应鲁棒控制; 电空制动; 控制器优化

中图分类号: U268.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)04-0052-08

Key Issues in Real-time Optimization of Braking Performance for Urban Rail Transit Trains

YU Ke¹, ZHANG Xuannan², ZHANG Hui³

(1. Beijing Subway Limited, Beijing 1000044; 2. School of Electronic and Information Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 3. Beijing Technology Development Limited, Beijing 100044)

Abstract: To address the shortage of real-time data and the accuracy limitations of existing automatic line control systems, we propose an intelligent upgrade scheme for train control systems. First, considering the distinct characteristics of electric and air braking in train operations, we developed accurate braking models for both systems, incorporating the switch between electric and air braking. Next, we optimized the ATO controller and applied a sliding mode adaptive robust control strategy. This strategy adjusts the controller in real time, enhancing its robustness and adaptability to varying vehicle parameters and external environmental interferences. Using Beijing Metro Line 5 as a case study, we simulated the precise train braking model and the sliding mode adaptive robust controller to calculate the stopping accuracy and speed error of the train. The results demonstrate that, compared to proportional-integral-derivative (PID) control and sliding mode control, the proposed control algorithm significantly reduces parking accuracy and speed errors. Specifically, the average parking accuracy achieved is less than 8 cm.

收稿日期: 2024-01-22 修回日期: 2024-04-03

第一作者: 于柯, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为轨道交通信号控制、智能交通控制与优化, yuke01212177@163.com

通信作者: 张选南, 男, 硕士研究生, 研究方向为城轨交通智能控制与优化, xuannan619@163.com

基金项目: 北京市自然科学基金(L221016)

引用格式: 于柯, 张选南, 张慧. 城市轨道交通列车制动性能实时优化关键问题[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(4): 52-59.

YU Ke, ZHANG Xuannan, ZHANG Hui. Key issues in real-time optimization of braking performance for urban rail transit trains[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 52-59.

Keywords: urban rail transit; braking performance optimization; SMARC control; electro-pneumatic braking; controller optimization

城市轨道交通作为中国城市公共交通的核心, 正面临技术发展和自动化应用带来的挑战。这些挑战不仅关乎系统运行的效率和安全性, 还涉及对不断增长的乘客流量和复杂交通需求的适应能力。目前, 城市轨道交通系统的自动控制技术存在弊端, 包括实时性和准确性不足、高峰时段运行效率低下以及应急反应和处理能力有限。这些问题的存在, 迫切要求对现有的自动控制系统进行智能化升级。

智能化控制系统通过整合先进技术和算法, 不仅能提高列车运行的精准度和实时性, 还能有效优化运行流程, 减轻拥堵, 并在突发情况下实现更快速、更精准的响应。在这一过程中, 列车制动性能的优化是确保高效、安全运行的关键。传统的城市轨道交通列车控制系统多基于固定参数算法, 面对列车运行的复杂变化和不确定性尤其是在应对环境变化、乘客流量波动和设备状态多变性时控车效果不佳。这些因素可能导致列车制动不准确、停车位置偏差, 增加碰撞风险, 从而直接威胁列车运行安全和乘客舒适度。

针对这一问题, 自适应控制算法的引入变得尤为重要。这种算法能够实时动态调整控制策略, 根据环境变化和系统调整状态, 保证列车运行的精准性和稳定性, 尤其是在处理老旧车辆和新车混跑时存在的性能差异、制动建立延时和制动力不稳定等问题时, 自适应算法表现出更大的优势。因此, 城轨列车制动性能的智能优化对于提升城市轨道交通的运营质量和推动行业发展具有深远的影响和重要的现实意义。这不仅是对现有系统的一种改进, 更是城市轨道交通未来发展的一种必然趋势。

国内外对城轨列车制动性能的研究主要基于车辆系统和信号系统两方面。在车辆系统中, 制动控制系统起着核心的作用。这是一个复杂的系统, 涵盖了众多功能和角色。它需要接收来源不同的制动指令, 包括司机、列车自动防护系统(automatic train protection, ATP)和列车自动运行系统(automatic train operation, ATO)。国内外研究中对车辆系统的研究主要为制动闸瓦材料^[1]、电制动退出斜率^[2]、响应延迟时间^[3]、脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)编码器输出与电压输入的差异^[4]、轨道黏着系数等^[5]。

与此同时, 信号系统的研究也对制动性能的优化具有重要意义。在现有文献对信号系统的研究中, ATO

控制算法优化是一个主要的研究方向。ATO 控制算法的精度直接影响列车的运行。如果算法不够精确, 可能导致列车的目标速度或期望加速度输出不准确, 进而降低列车的控制效果, 影响制动性能, 并导致停车精度的下降。大多数 ATO 控制算法采用比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制算法, 通过对 PID 控制器的参数进行整定研究, 可以提高列车的制动性能和停车精度。PID 参数整定方法主要包括经典整定方法和智能整定方法^[6]。经典的整定方法包括试凑法和 Ziegler-Nichols 法^[7]等。但经典控制算法具有自适应力差的局限性, 随着控制理论和智能算法的发展, 越来越多的智能算法被应用到 ATO 控制算法中, 模糊控制^[8]、遗传算法^[9]、差分进化算法^[10]、二阶滑模控制^[11]、自适应模糊 PID 控制器^[12]、分数阶 PID 控制器^[13]、模型预测控制^[14]、滑模自适应鲁棒^[15]、粒子群万有引力算法^[16]、遗传算法与粒子群算法结合^[17]、基于深度学的 PID 控制器^[18]、改进的萤火虫算法^[19]等。虽然这些控制策略在改善列车制动性能方面有一定的效果, 但是针对列车在制动过程中电空转换平滑过渡、空气制动延时过大、制动力非线性、抗干扰等方面问题则很少涉及, 并且这些研究大部分是离线优化方式, 这种方式缺乏即时响应能力, 无法适应实时运行环境的变化以及在实时运行中发现并应对潜在的安全问题, 无法应用于实际列控系统中。

鉴于此, 本文提出了一种滑模自适应鲁棒控制策略, 通过该策略设计列车控制器, 并通过自适应方法调整列车所需制动力, 改善制动性能。针对现有线路中固定参数算法和列车模型的局限性, 探讨车辆系统与信号系统间的交互和协调。在车辆系统方面, 根据列车制动的不同阶段建立更精细的列车动力学模型。而在信号系统方面, 设计滑模自适应鲁棒控制算法对 ATO 系统进行了实时在线优化。结果显示, 滑模自适应鲁棒控制算法在提升控车效果和制动性能方面更为明显, 能更有效地适应列车模型, 从而显著提高运输效率。此研究不仅弥补了现有文献的不足, 还为城市轨道交通系统的优化和高效运营提供了有力支持。

1 信号系统及车辆系统现状分析

1.1 列车自动运行系统分析

在列车自动驾驶技术中, ATO 扮演着核心角色,

其不仅能实现自动驾驶功能,而且提供一系列优化措施以提高行车安全性和效率。这些措施包括改善停车精度、降低运行能耗、提高准时性和加强乘客舒适度。ATO 的实际操作基于一个双层控制模型,上层控制系统根据线路信息、限速要求、精确停车需求、准时性、乘客舒适度和能耗等因素生成目标速度曲线,而下层控制系统通过反馈控制实现对这些目标速度曲线的精确跟踪。

在现实操作中,变化的天气、网压、列车载重和响应延时等因素都可能对列车运行产生影响。为适应这些变化,下层控制模块需具备强鲁棒性和实时精确控制能力。强鲁棒性确保控制系统在参数变化下仍能维持稳定运行,而实时精确控制则保证列车能够精准跟踪目标速度曲线,实现最佳运行效果。因此,ATO 系统的优化对于提升自动驾驶列车的整体性能至关重要,这不仅影响运行效率,也关乎乘客安全和舒适度。

1.2 车辆制动系统分析

在列车实际运行中,制动阶段的精确控制对确保安全和效率至关重要。现有的列车制动系统研究多基于简化的控制模型,忽略了电制动与空气制动阶段之间的根本性差异。电制动依赖于电动机产生的反转电流,而空气制动则是一种传统的机械制动方式,通过气压系统施加制动力。这两种制动方式在工作原理和参数控制上有显著不同,同时需要考虑二者间的协调配合及切换过程。此外,不同车型或制造商的列车在设计、制动装置、负载特性等方面存在差异,使得单一的制动模型难以涵盖所有情况。因此,研究需要建立更加精确、更具有针对性的列车制动模型,以适应不同制动阶段和列车类型的需求。

2 精确动力学模型与智能控制器设计

2.1 车辆精确制动模型

在列车运行优化领域,精确的车辆动力学模型对于控车效果至关重要。现有研究中,车辆模型通常因实际车辆的非线性和复杂性而被简化,导致控制策略的实际参考性降低,影响整体运行效率。因此,针对不同线路和不同列车的具体条件,建立精确的列车动力学模型显得尤为重要。由于长期使用和磨损,老旧列车的牵引和制动系统设计水平及操作性能相较于新型列车有所落后,这些差异必须在模型中得到充分体现。

考虑到环境干扰、空气制动固有延时、电机效率等因素的不确定性,列车模型需要更细致地刻画这些

参数的影响。特别是在制动过程中,区分电制动和空气制动两个阶段,根据各自的物理原理建立相应的精确制动模型是必要的。电制动和空气制动阶段各自有着不同的工作机理和控制参数,如延时参数、电机性能参数、制动闸瓦参数等,这些内容都需要在模型中精确描述。

在制动停车过程中,信号系统至车辆系统的传输并非瞬时完成,而是存在一定的延迟。延迟参数指从信号系统发出制动指令到车辆达到目标制动率所用的时间,其包括传输延时和响应延时。通过细化这些参数,列车的动力学模型能更真实地反映实际运行情况。

2.1.1 电制动模型

电制动即只有电制动参与的过程,考虑列车指令传输过程和电机工作过程,建立电制动控制模型,如图 1 所示。本文用制动系数 P_{bra} 表示电机效率、制动率、网压等因素对电制动阶段制动力的影响。

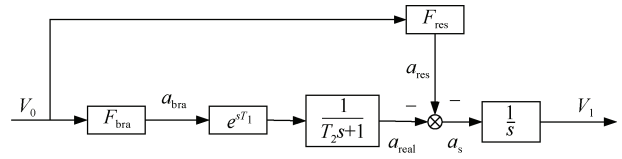


图 1 电制动阶段车辆模型

Figure 1 Electric brake stage vehicle model

图 1 中, e^{-sT_1} 是滞后环节, T_1 表示指令传输延时, s ; $1/T_2 s + 1$ 是一阶惯性环节, T_2 代表车辆惯性延迟, s ; $1/s$ 是积分环节; V_0 为输入的列车当前时刻速度, cm/s ; V_1 为输出的列车下一周期的速度, cm/s ; F_{res} 为当前列车所受的运行阻力, N ; F_{bra} 为当前列车所受的电制动力, N ; 电制动阶段的动力学模型可表示为

$$a_{\text{bra}} = f_{\text{bra}}(V_0) \quad (1)$$

$$a_{\text{real}} = \begin{cases} a_{\text{p},s}, t \leq T_1 \\ a_{\text{bra}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t-T_1}{T_2}\right) \right], t > T_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{\text{res}} = (a + bV_0 + cV_0^2 + \theta) \cdot mg / 1000 \quad (3)$$

$$a_{\text{res}} = F_{\text{res}} / m \quad (4)$$

$$a_s = a_{\text{real}} \cdot P_1 - a_{\text{res}} \quad (5)$$

$$V_1 = V_0 + a_s T_d \quad (6)$$

式中, t 为当前时间; a_{real} 为列车在电制动阶段的实际加速度, cm/s^2 ; $a_{\text{p},s}$ 为列车上一周期的加速度, cm/s^2 ; a_{bra} 为列车的理想电制动加速度, cm/s^2 ; a_{res} 为的列车所受阻力加速度, cm/s^2 ; a 、 b 、 c 为戴维斯公式系数;

a_s 为列车合力加速度, cm/s^2 ; f_{bra} 为电制动力特性函数; m 为列车重量, kg ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; P_1 为电制动阶段电机效率, %; 电机效率会影响电制动力大小, T_d 为实际 ATO 日志数据采集间隔, 0.2 s 。

2.1.2 空气制动模型

空气制动阶段又称停车制动阶段, 停车制动阶段包括从电空混合制动至只存在空气制动使列车停车为止的整个过程。空气制动阶段的车辆模型如图 2 所示。

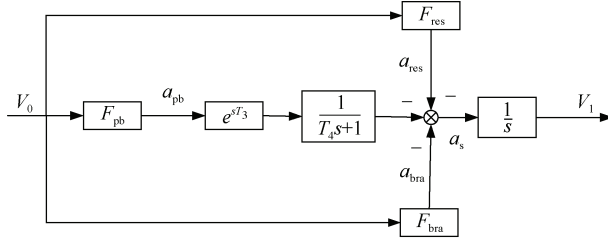


图 2 空气制动阶段车辆模型

Figure 2 Air brake stage vehicle model

图 2 中, T_3 为传输延时的大小, s ; T_4 为响应延时的大小, s ; F_{pb} 为当前列车所受的空气制动力, N ; 空气制动阶段的动力学模型可表示为

$$a_{\text{pb}} = \frac{K_1(V_0 + 150)}{K_2(2V_0 + 150) \cdot m} \quad (7)$$

$$a_{\text{bra}} = a_{\text{ps}} + k_{\text{bra}} \cdot T_d \quad (8)$$

$$a_{\text{real}} = \begin{cases} a_{\text{p},s}, t \leq T_3 \\ a_{\text{bra}} + a_{\text{pb}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t - T_3}{T_4}\right) \right], t > T_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$a_s = a_{\text{real}} - a_{\text{res}} \quad (10)$$

式中, a_{pb} 为列车空气制动加速度, cm/s^2 ; a_{res} 为列车所受阻力加速度, cm/s^2 ; a_s 为列车经过延时后合力加速度, cm/s^2 ; K_1 和 K_2 为空气制动力的分子系数和分母系数; k_{bra} 为电制动的退出斜率。

本文采用改进的果蝇算法^[20]对列车制动模型进行拟合, 选取不确定参数作为寻优对象, 以模型输出速度与实际速度的偏差作为目标函数, 来拟合精确制动模型。

定义 T 为列车参数集合, 则有

$$T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, K_1, K_2\} \quad (11)$$

建立精确模型目标函数为

$$\min \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(\hat{V}_i - V_i)^2}{N}} \quad (12)$$

式中, \hat{V}_i 为第 i 个周期列车动力学模型输出速度, cm/s ; V_i 为第 i 个周期列车实际速度, cm/s ; N 为周期总数。在建立精确制动模型的过程中, 用改进的果蝇优化算法对两个阶段的列车参数进行拟合。

2.2 滑模自适应鲁棒控制器

目前既有线路中很多列车仍采用 PID 控制, 也称 PID 调节, 是对比例控制、积分控制、微分控制的统称。PID 控制器基于当前偏差通过 3 种控制环节对现在、过去和将来的调节量进行估计。由于在实际制动过程中, 附加阻力的不确定性和车辆系统参数的不确定性, 采用传统的 PID 控制器很难实现对目标速度的精确追踪。为了提高控车效果和制动性能, 设计参数自适应滑模鲁棒控制器对控制器参数进行实时修正, 其结构框图如图 3 所示。

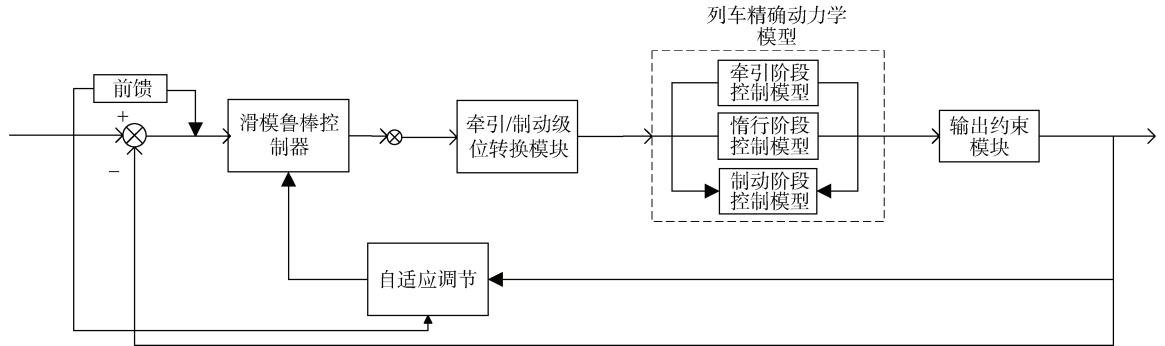


图 3 滑模自适应鲁棒控制框图

Figure 3 Block diagram of SMARC

单质点模型的列车运动方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ m\dot{x}_2(t) = u(t) + \Delta \end{cases} \quad (13)$$

式中, x_1 , x_2 分别表示列车的位置与速度; m 为列车质量; $u(t)$ 为控制器输出; Δ 为干扰与模型不确定部分的总和, 包括列车制动阻力和附加阻力等。

取 $\theta=m$ ，则式(13)可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \theta \dot{x}_2(t) = u(t) + \Delta \end{cases} \quad (14)$$

一般情况下，干扰与模型不确定部分总和相对控制器输出较小，为简化计算，本文作以下假设。

假设 1：不确定参数 θ 有界，表示为

$$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \quad (15)$$

式中， θ_{\min} 为不确定参数下界； θ_{\max} 为不确定参数上界。

假设 2：不确定项 Δ 有界，表示为

$$|\Delta| \leq D \quad (16)$$

式中， D 为常数。

定义列车状态跟踪误差为

$$\begin{cases} e(t) = x_1(t) - x_d(t) \\ \dot{e}(t) = x_2(t) - \dot{x}_d(t) \end{cases} \quad (17)$$

式中， x_d ， \dot{x}_d 为目标位置与目标速度； $e(t)$ ， $\dot{e}(t)$ 为位置误差与速度误差。

定义滑模面 $z(t)$ 为

$$z(t) = ce(t) + \dot{e}(t) = ce(t) + x_2(t) - \dot{x}_d(t) \quad (18)$$

式中， c 为滑模面系数。

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}\theta z(t)^2 + \frac{1}{2\lambda}\tilde{\theta}z(t)^2 \quad (19)$$

式中， $\lambda > 0$ ， $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值。则

$$\dot{V} = \theta z\dot{z} + \frac{1}{\lambda}\tilde{\theta}\dot{\theta} = z(\theta\dot{x}_2 - \theta\dot{x}_d + \theta c\dot{e}) + \frac{1}{\lambda}\tilde{\theta}\dot{\theta} \quad (20)$$

根据式(14)： $u(t) = \theta\dot{x}_2 - \Delta$ ，则式(20)可以写为

$$\dot{V} = z(u + \Delta - \theta(\ddot{x}_d - c\dot{e})) + \frac{1}{\lambda}\tilde{\theta}\dot{\theta} \quad (21)$$

控制律设计为

$$u(t) = \hat{\theta}(\ddot{x}_d(t) - c\dot{e}(t)) - k_s z(t) - \eta \operatorname{sgn}(z) \quad (22)$$

式中， η 为鲁棒项系数， $\eta > D$ ； k_s 为趋近律系数， $k_s > 0$ ，则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= z(\hat{\theta}(\ddot{x}_d - c\dot{e}) - k_s z - \eta \operatorname{sgn}(z) + \Delta - \theta(\ddot{x}_d - c\dot{e})) + \frac{1}{\lambda}\tilde{\theta}\dot{\theta} \\ &= z((\hat{\theta} - \theta)(\ddot{x}_d - c\dot{e}) - k_s z - \eta \operatorname{sgn}(z) + \Delta) \\ &= -k_s z^2 - \eta |z| + \Delta \cdot z + \tilde{\theta} \left(z(\ddot{x}_d - c\dot{e}) + \frac{1}{\lambda}\dot{\theta} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

取自适应律为

$$\dot{\hat{\theta}} = -\lambda z(\ddot{x}_d - c\dot{e}) \quad (24)$$

则

$$\dot{V} = -k_s z^2 - \eta |z| + \Delta \cdot z \leq -k_s z^2 \leq 0 \quad (25)$$

当且仅当 $z=0$ 时， $\dot{V}=0$ 。即当 $\dot{V} \equiv 0$ 时， $z \equiv 0$ 。根据 LaSalle 不变性原理^[21]，闭环系统为渐进稳定，即当 $t \rightarrow \infty$ 时， $z \rightarrow 0$ ，系统的收敛速度取决于 k_s 。但此时无法保证 $\hat{\theta}$ 收敛于 θ 。

为了仿真 $\hat{\theta}$ 过大而导致 $u(t)$ 过大或 $\hat{\theta} \leq 0$ 的情况，可以通过设计自适应律，将 $\hat{\theta}$ 控制在规定区间内，采用一种自适应映射 Proj 对式(24)进行修正，则

$$\dot{\hat{\theta}} = \operatorname{Proj}_{\hat{\theta}}(-\lambda z(\ddot{x}_d - c\dot{e})) \quad (26)$$

$$\operatorname{Proj}_{\hat{\theta}}(x) = \begin{cases} 0 & \hat{\theta} > \theta_{\max} \text{ 且 } x > 0 \\ 0 & \hat{\theta} < \theta_{\min} \text{ 且 } x < 0 \\ x & \text{other} \end{cases} \quad (27)$$

3 仿真测试与结果分析

3.1 车辆模型对比

以车辆多个参数作为寻优变量，车辆模型仿真输出速度与列车实际速度差值为目标函数，通过改进的果蝇算法迭代寻优确定最优参数，建立车辆精细制动模型。仿真拟合数据为北京地铁 5 号线 2023 年 6 月 3 日—6 月 4 日上下行 8 圈的 ATO 日志数据，主要拟合制动阶段列车动力学模型参数。

在目前既有研究中，常常根据问题的复杂度和需求对列车模型进行近似处理，即现有的列车模型中大多没有考虑列车实际物理运作的过程，采用估计的方法，通过给定的 ATO 模拟输出量，近似给出模型输出速度，现有动力学模型的建模方法如图 4 所示。

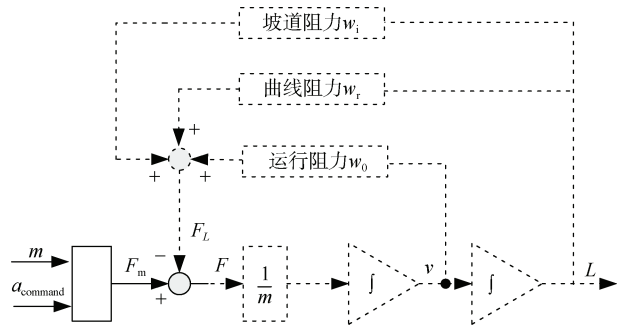


图 4 现有车辆动力学模型

Figure 4 Existing vehicle dynamics models

图 4 中， F_m 为车辆输出牵引力大小，N； F_L 为车辆所受阻力，N； a_{command} 为 ATO 期望输出加速度大小， cm/s^2 ； F 为车辆输出合力大小，N； v 为列车速度，

cm/s; L 为列车位移, cm。

现有模型的动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} F \\ F = F_m - (W_0 + W_i + W_r)m \\ W_0 = a + bv + cv^2 \end{cases} \quad (28)$$

现有动力学模型参数为: 最大制动减速度取值 -10 cm/s^2 ; 制动初速度取值 1400 cm/s ; 制动系统时间常数取值 0.65 s ; 制动系统输入延时取值 0.3 s 。

现有动力学模型运行速度对比如图 5 所示。

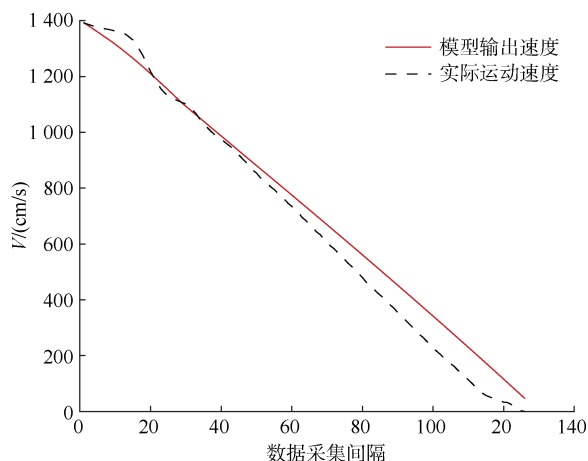


图 5 现有模型制动阶段对比

Figure 5 Comparison diagram of existing models in braking phase

对比现有的制动模型, 精确制动模型不仅考虑了列车实际物理运作的过程, 还通过智能算法拟合的方式, 使得模型输出速度与列车实际速度相同。精确制动车辆模型参数如表 1 所示。

表 1 精确车辆模型参数

Table 1 Precise vehicle model parameters

制动阶段	传输延时/s	响应延时/s	电制动系数/%	闸瓦制动分子系数	闸瓦制动分母系数
电制动	0.9	0.83	85	—	—
空气制动	0.8	1.741	—	1.014 2	0.011 91

通过改进的果蝇算法进行列车参数拟合后的精确制动模型下速度曲线对比, 如图 6 所示。

分别取北京地铁 5 号线 2023 年 6 月 3 日—6 月 4 日上下行 8 圈 ATO 日志数据, 计算在两种模型下得到的模型输出速度与实际运行速度的误差均值, 结果如表 2 所示。

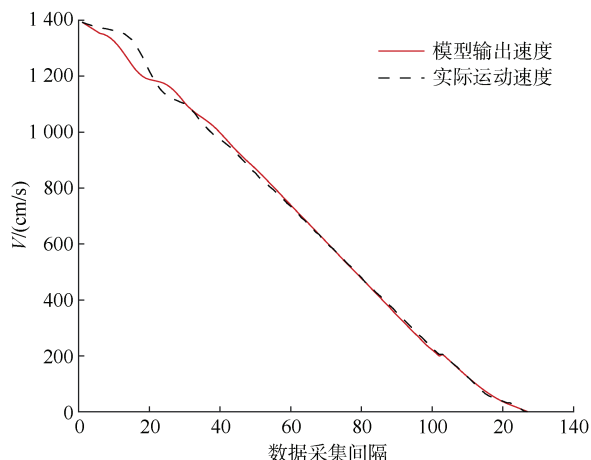


图 6 精确模型制动阶段对比

Figure 6 Comparison of the braking stages of a precise model

表 2 不同模型目标函数值对比

Table 2 Comparison of objective function values of different models

动力学模型	速度误差/(cm/s)	计算时间/s
精确动力学模型	25.827	49.5
现有动力学模型	117.26	50.3

由图 5 和图 6 可知, 对比原来的制动模型, 精确制动模型仿真输出速度曲线与实际运行速度曲线贴合程度更好, 特别在低速的空气制动阶段, 现有模型输出速度与列车实际速度偏差较大。由表 2 可知, 精确制动模型输出的速度误差较现有模型有较大的改善, 并且计算效率相近, 验证了所建立精确制动模型的准确性与实时性。

完成列车精确制动建模后, 不仅可以依据 ATO 的输出模拟量模拟列车实际的运行效果; 还可以将精确列车模型作为控制对象, 应用于后续的控制优化中, 保障控制器效果的准确性。

3.2 控制器改善制动性能验证

为了验证滑模自适应鲁棒控制的实时控车效果, 将精确制动车辆模型作为控制对象, 分别采用 PID 控制、滑模控制与滑模自适应鲁棒控制进行列车运行仿真。以北京地铁 5 号线的实际线路数据为例, 得到的制动阶段列车速度位移如图 7 所示。

由图 7 可知, 滑模自适应鲁棒控制可以更快、更准确、更平滑地跟踪目标速度曲线, 且最终达到高精度的停车效果。滑模控制虽然也能跟踪目标速度, 但响应速度较慢。而 PID 控制存在收敛速度慢、精度差的问题。由图 8 可知, 滑模控制和 PID 控制都存在低

速区段跟踪效果较差、速度误差较大，难以收敛于目标速度的问题。对比 3 个控制器在多个站间的停车精度数据，结果如表 3 所示。由表 3 可知，滑模自适应鲁棒控制下的制动性能较为稳定，停车精度误差最小。

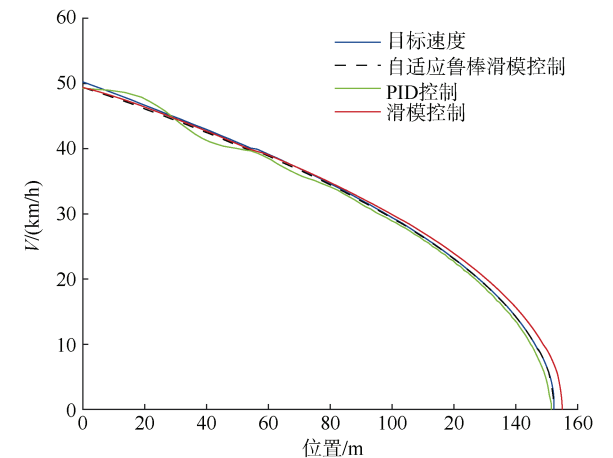


图 7 速度曲线跟踪性能对比

Figure 7 Comparison of speed curve tracking performance

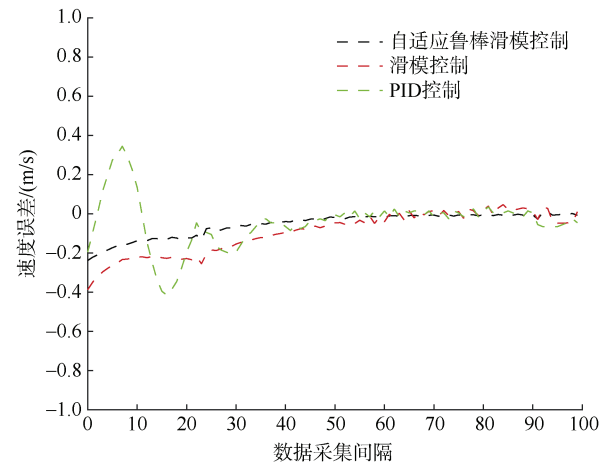


图 8 速度误差对比曲线

Figure 8 Contrast curve of velocity error

表 3 3 个控制器的停车精度对比

Table 3 Comparison of parking accuracy of three controllers

站间	滑模自适应鲁棒控制停车精度	滑模控制停车精度	PID 控制停车精度
天通苑南—立水桥	7.26	11.8	31.2
立水桥—北苑路北	4.50	12.3	26.1
北苑路北—大屯路东	3.88	15.2	35.1
大屯路东—惠新西街北口	4.63	10.2	20.6
惠新西街北口—惠新西街南口	3.57	12.9	30.2
惠新西街南口—和平西桥	4.19	18.3	25.8
和平西桥—和平里北街	2.14	15.6	35.1

同时将滑模自适应鲁棒控制在 5 号线多个站间进行反复多次仿真测试，并计算每个站间对应停车精度的均值与方差，部分站间结果如表 4 所示。

表 4 站间停车精度均值及方差

Table 4 Mean and variance of interstation parking accuracy

站间	站间均值	站间方差
天通苑南—立水桥	-2.00	9.25
立水桥—北苑路北	-6.75	11.26
北苑路北—大屯路东	-3.75	6.38
大屯路东—惠新西街北口	4.25	5.36
惠新西街北口—惠新西街南口	-2.00	8.51
惠新西街南口—和平西桥	1.75	0.43
和平西桥—和平里北街	4.00	1.41

由表 3 和表 4 可知，对比滑模控制和 PID 控制算法，滑模自适应鲁棒控制算法在许多站间的停车精度更优，停车精度达到 8 cm 以下，同时均值和方差都比较小，验证其制动性能更加稳定，控车效果更佳，说明滑模自适应鲁棒控制算法的稳定性和鲁棒性。

4 结论

鉴于既有列车存在的制动延时大和制动力不稳定等问题，针对自动驾驶列车，提出了一种智能升级方案，得到以下结论：

1) 设计了新型的城轨列车精确动力学制动模型，对比现有的动力学模型，本文提出的模型速度误差达到 25.8 cm/s，更能体现列车实际的物理运作过程。

2) 针对外部干扰问题，设计滑模自适应鲁棒控制算法对列车控制器参数进行实时在线调整，增强其鲁棒性。

3) 以北京地铁 5 号线为例，将自适应滑模鲁棒控制策略和精确制动模型进行了应用，结果表明，停车精度均值达 8 cm 以下高精度，验证了智能升级方案的可行性。

本文提出的列车精确制动模型和滑模自适应鲁棒控制策略不仅减少了列车运行的延误，还显著提高了运输效率和准时性，提升了整体交通系统的运行效能。然而，本文仍存在以下不足之处：首先，未考虑闸瓦经过反复摩擦对空气制动力产生的影响。其次，研究采用的自适应滑模鲁棒控制，忽略滑模控制的抖振问题。因此，未来的研究可以进一步通过改变趋近律的方式抑制抖振，并考虑加入干扰观测器提升系统稳定性。

参考文献

- [1] 禹宏鹏. 城轨列车停车位置不精确的原因及对策[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(9): 28-30.
YU Hongpeng. Analysis on the stop inaccuracy of urban rail train[J]. Urban mass transit, 2008, 11(9): 28-30.
- [2] 王鹏飞, 樊贵新, 王新海, 等. 城轨车辆在ATO模式下停车精度问题的分析与探讨[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(6): 77-79.
WANG Pengfei, FAN Guixin, WANG Xinhai, et al. Analysis and discussion of mass transit vehicles parking accuracy in ATO mode[J]. Railway locomotive & car, 2011, 31(6): 77-79.
- [3] 路象群. 广州地铁A5型车电空混合制动关键参数对列车停车精度的影响分析[J]. 机电信息, 2016(18): 145-147.
LU Xiangqun. Analysis on the influence of key parameters of electro-pneumatic hybrid braking on the parking accuracy of Guangzhou metro A5 vehicle[J]. Mechanical and electrical information, 2016(18): 145-147.
- [4] 庞涛. 制动响应差异对北京地铁5号线ATO停车的影响[J]. 电气化铁道, 2016, 27(1): 45-46.
PANG Tao. Influence to ATO stopping of line 5 of Beijing metro caused by difference of braking responses[J]. Electric railway, 2016, 27(1): 45-46.
- [5] 安震, 李龙, 李鹏飞, 等. 制动性能对标准地铁自动停车精度影响研究[J]. 机车电传动, 2022(2): 113-120.
AN Zhen, LI Long, LI Pengfei, et al. Study on influence of braking performance on automatic stopping accuracy of standard metro train[J]. Electric drive for locomotives, 2022(2): 113-120.
- [6] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, et al. A review of PID control, tuning methods and applications[J]. International journal of dynamics and control, 2021, 9(2): 818-827.
- [7] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers[J]. Journal of fluids engineering, 1942, 64(8): 759-765.
- [8] YASUNOBU S, MIYAMOTO S, IHARA H. Fuzzy control for automatic train operation system[J]. IFAC proceedings volumes, 1983, 16(4): 33-39.
- [9] CHANG C S, SIM S S. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms[J]. IEE proceedings-electric power applications, 1997, 144(1): 65.
- [10] CHANG C S, XU D Y. Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system[J]. IEE proceedings-electric power applications, 2000, 147(3): 206.
- [11] GANESAN M, EZHILARASI D, BENNI J. Second-order sliding mode controller with model reference adaptation for automatic train operation[J]. Vehicle system dynamics, 2017, 55(11): 1764-1786.
- [12] 孟建军, 裴明高, 武福, 等. 城轨列车多目标优化控制算法研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(3): 581-588.
MENG Jianjun, PEI Minggao, WU Fu, et al. Research and simulation on control algorithm for multi-objective optimization of urban rail train[J]. Journal of system simulation, 2017, 29(3): 581-588, 594.
- [13] CAO Y, MA L C, ZHANG Y Z. Application of fuzzy predictive control technology in automatic train operation[J]. Cluster computing, 2019, 22(6): 14135-14144.
- [14] 赵德生, 李德仓. 基于滑模自适应鲁棒控制的城市轨道交通列车电空制动控制策略研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 30-35.
ZHAO Desheng, LI Decang. Research on EP braking control strategy for urban rail transit train based on SMARC[J]. Urban mass transit, 2020, 23(7): 30-35.
- [15] 朱翼梁. 高速列车ATO控制策略优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
ZHU Yiliang. Research on optimization of ATO control strategy for high speed train[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [16] 张京, 朱爱红. 基于遗传算法和粒子群优化的列车自动驾驶速度曲线优化方法[J]. 计算机应用, 2022, 42(2): 599-605.
ZHANG Jing, ZHU Aihong. Optimization method of automatic train operation speed curve based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Journal of computer applications, 2022, 42(2): 599-605.
- [17] ZAMANI M, KARIMI-GHARTEMANI M, SADATI N, et al. Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization[J]. Control engineering practice, 2009, 17(12): 1380-1387.
- [18] LEE D, KOO S, JANG I, et al. Comparison of deep reinforcement learning and PID controllers for automatic cold shutdown operation[J]. Energies, 2022, 15(8): 2834.
- [19] 戴斐. 基于改进萤火虫算法的四旋翼姿态控制PID整定[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
DAI Fei. PID tuning of quadrotor attitude control based on mended firefly algorithm[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.
- [20] PAN W T. A new Fruit Fly Optimization Algorithm: taking the financial distress model as an example[J]. Knowledge-based systems, 2012, 26: 69-74.
- [21] LASALLE J, LEFSCHETZ S, ALVERSON R C. Stability by Liapunov's direct method with applications[J]. Physics today, 1962, 15(10): 59.

(编辑: 王艳菊)