

# 考虑路面黏着约束的重型叉车群自适应安全间隔控制方法研究

毕少平<sup>1</sup>, 姚彬启<sup>2</sup>, 苏飞飞<sup>3</sup>, 余猛钢<sup>4</sup>, 毛海军<sup>5</sup>

<sup>1</sup>衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州

<sup>2</sup>衢州市川慧达科技有限公司, 浙江 衢州

<sup>3</sup>浙江鼎达不锈钢制品有限公司, 浙江 衢州

<sup>4</sup>衢州市荣胜环保科技有限公司, 浙江 衢州

<sup>5</sup>浙江管卫建设有限公司, 浙江 衢州

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月20日; 发布日期: 2026年5月27日

## 摘要

新能源重型叉车在动态仓储作业中, 由于路面条件(黏着系数)的突变常导致编队控制精度下降及碰撞风险增加。本文针对这一问题, 提出了一种基于数据驱动的黏着预见感知与安全间隔自适应调整策略。首先, 建立考虑路面黏着限制的重型叉车纵向动力学模型; 其次, 引入区间泰勒可达性分析, 实时解算不同路面条件下的最小安全制动距离; 最后, 设计了一种改进的无模型自适应协同控制(MFAC)算法, 实现了编队间距随路面工况自适应调整。仿真结果表明, 该方法在路面黏着系数波动环境下, 能够有效缩短编队间距并杜绝碰撞风险, 提升作业效率31.86%以上。

## 关键词

叉车, 自适应控制, 编队控制, 数据驱动

# Research on Adaptive Safety Spacing Control Method for Heavy Forklift Fleets Considering Road Adhesion Constraints

Shaoping Bi<sup>1</sup>, Binqi Yao<sup>2</sup>, Feifei Su<sup>3</sup>, Menggang Yu<sup>4</sup>, Haijun Mao<sup>5</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Quzhou Chuanhuida Technology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

<sup>3</sup>Zhejiang Dingda Stainless Steel Products Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

<sup>4</sup>Quzhou Rongsheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

<sup>5</sup>Zhejiang Guanwei Construction Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

Received: April 27, 2026; accepted: May 20, 2026; published: May 27, 2026

文章引用: 毕少平, 姚彬启, 苏飞飞, 余猛钢, 毛海军. 考虑路面黏着约束的重型叉车群自适应安全间隔控制方法研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(5): 197-206. DOI: 10.12677/mos.2026.155083

## Abstract

In dynamic warehousing operations, new energy heavy-duty forklifts often experience reduced formation control accuracy and increased collision risks due to sudden changes in road conditions (adhesion coefficient). To address this issue, this paper proposes a data-driven strategy for adhesion preview perception and adaptive adjustment of safety intervals. First, a longitudinal dynamic model of heavy-duty forklifts considering road adhesion limitations is established. Second, interval Taylor reachability analysis is introduced to compute the minimum safe braking distance under different road conditions in real time. Finally, an improved model-free adaptive cooperative control (MFAC) algorithm is designed to achieve adaptive adjustment of formation spacing according to road conditions. Simulation results demonstrate that this method can effectively reduce formation spacing and eliminate collision risks under fluctuating road adhesion coefficient conditions, improving operational efficiency by more than 31.86%.

## Keywords

Forklift, Adaptive Control, Formation Control, Data-Driven

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

在全球工业 4.0 浪潮与物流智能化变革深入推进的背景下,自动导引车(AGV)与智能叉车凭借其高效、精准、灵活的作业特性,已发展成为智慧物流体系、大型现代化码头及自动化仓储系统的核心基础设施。它们不仅显著提升了物料搬运与存储的效率,也为实现生产流程的数字化、网络化与智能化转型提供了关键支撑。特别是新能源重型叉车,凭借其高效能、低排放以及强大的负载能力,在钢铁、能源及大型制造领域发挥着不可替代的作用。为了进一步压榨物流系统的作业极限,叉车编队运行(Platooning)技术应运而生。通过多智能体协同控制[1]-[3],将多台叉车以较小的安全间距组织成队,不仅能显著提升通道单位时间内的货物吞吐量,还能通过减小频繁加减速过程中的能耗波动,实现绿色生产。然而,重型叉车编队在实际工业环境中的部署面临着极为严峻的物理约束挑战[4][5]。首先,重型叉车具有自重大(通常在 10 吨以上)、载荷高且重心位置随货物高度动态变化的特点。这意味着其纵向动力学特性具有极强的非线性和参数不确定性。其次,工业现场的运行环境并非理想状态。在实际作业中,叉车频繁地在干燥的室内仓库、潮湿的露天装卸区以及可能存在油渍或粉尘的生产线之间往返。这些因素导致路面峰值黏着系数( $\mu$ )发生剧烈且不可预测的突变,其波动范围通常在 0.3 (湿滑/油污路面)至 0.8 (干燥混凝土路面)之间。现有的多智能体编队控制算法,如基于恒定时间距(Constant Time Headway, CTH)或恒定间距(Constant Spacing)的策略,往往假设路面附着条件是理想且恒定的。在这种“环境理想化”的假设下,控制器为了追求极致的作业效率,会将车辆间距压缩至极小。然而,一旦编队进入低黏着区域,路面能提供的最大制动力将大幅衰减。此时,如果领航车(Leader)因突发状况进行紧急制动,后随车(Follower)受限于轮胎与路面间的摩擦力极限,极易发生滑移甚至轮胎锁死。在这种工况下,传统的控制策略无法实时补偿物理极限的缩减,极易导致灾难性的编队追尾事故[6][7]。

此外,重型叉车的感知能力在复杂工况下也存在局限性。虽然搭载了激光雷达、摄像头等传感器,

但对于路面物理特性(如黏着系数)的实时探测仍属于业界难题。感知的不确定性与执行层面的动力学限制相互耦合,使得编队控制系统在“效率”与“安全”之间陷入两难境地。如果安全间隔设置过大,会导致仓储吞吐量下降,丧失编队的意义;如果间隔过小,则无法应对环境突变带来的碰撞风险。因此,如何实现一种能够感知路面环境变化、动态评估物理安全边界,并自适应调整编队安全间隔的协同控制方法,已成为新能源重型叉车大规模智能化应用中亟待解决的关键科学问题[8][9]。本文不依赖精确的车辆动力学参数,而是从数据驱动的角度切入,研究路面黏着力对编队稳定性的限制。主要贡献:建立了黏着力限制下的安全制动边界模型。提出了一种基于环境感知的自适应安全间隔策略[10]。

## 2. 系统建模与约束分析

### 2.1. 重型叉车纵向动力学建模

在研究编队控制策略之前,必须建立能够反映重型叉车物理特性的动力学模型。重型叉车(Heavy-duty Forklift)与普通乘用车在动力学上存在显著差异。首先,叉车通常采用后轮转向、前轮负载的结构,且在满载工况下,其质量  $M$  会发生剧烈波动。对于编队控制中的纵向运动,我们关注叉车在前进方向上的驱动与制动平衡。

忽略侧向运动耦合,单台重型叉车的纵向动力学方程可以表示为:

$$M_i \frac{dv_i}{dt} = F_{t,i} - F_{b,i} - F_{w,i} - F_{r,i} - F_{g,i} \quad (1)$$

其中,  $M_i$  为第  $i$  台叉车的总质量,  $v_i$  为纵向速度,  $F_{t,i}$  为电机提供的驱动力,  $F_{b,i}$  为机械与再生制动系统的合力,  $F_{w,i}$  为空气阻力,  $F_{r,i}$  为滚动阻力,  $F_{g,i}$  为坡道阻力。

考虑到重型叉车作业速度通常较低(一般不超过 5 m/s),空气阻力  $F_{w,i} = \frac{1}{2} C_d \rho A v_i^2$  往往可以忽略不计。而滚动阻力  $F_{r,i} = M_i g f \cos \alpha$  与载荷  $M_i$  直接相关,  $f$  为滚动阻力系数,  $\alpha$  为路面坡度。对于新能源驱动叉车,电机的驱动力  $F_{t,i}$  受到功率饱和限制,而制动力  $F_{b,i}$  则受限于执行机构的响应时延。

更重要的是,重型叉车在制动过程中存在显著的非线性延迟特征。我们可以将执行器动态近似为一个一阶惯性环节:

$$\tau_i \dot{a}_i + a_i = a_{cmd,i} \quad (2)$$

这里  $a_i$  为车辆实际加速度,  $a_{cmd,i}$  为控制系统给出的期望加速度,  $\tau_i$  为时间常数。对于重型液压制动系统,  $\tau_i$  的数值较大且随负载变化,这为高精度的编队间距控制带来了挑战。

### 2.2. 路面黏着约束模型

路面黏着系数  $\mu$  是决定重型叉车制动极限的关键物理量。轮胎与路面之间能够提供的最大水平力  $F_{max}$  遵循库仑摩擦定律的扩展形式:

$$F_{max} = \mu \cdot F_z \quad (3)$$

其中  $F_z$  为法向载荷。对于重型叉车,制动时的减速度  $a_{dec}$  必须满足:

$$a_{dec} \leq \mu \cdot g \quad (4)$$

当路面由干燥的混凝土切换为潮湿或带有油渍的地面时,  $\mu$  可能从 0.8 骤降至 0.3 甚至更低。

为了更精确地描述这一物理约束,我们引入 MagicFormula (魔术公式)简化模型。轮胎受到的黏着力  $F_x$  是滑移率  $\lambda$  的函数。在制动过程中,若  $F_{b,i}$  超过了  $\mu M_i g$ , 轮胎将进入滑移状态 ( $\lambda > 20\%$ ), 此时黏着力反而会下降。对于编队控制而言,这意味着后随车如果试图以超过  $\mu \cdot g$  的减速度跟随领航车,其控制

输出将进入饱和区，导致制动距离呈平方级增长。

因此，本文定义的物理约束集  $U$  为：

$$U = \{u_i \mid -\mu_{\min} g + \epsilon \leq u_i \leq a_{\text{motor\_max}}\} \quad (5)$$

其中  $\epsilon$  为安全余量。在建模过程中，必须将  $\mu$  视为一个随位置  $s$  变化的环境扰动项  $\mu(s(t))$ 。

### 2.3. 基于全格式动态线性化(FFDL)的数据模型

由于重型叉车动力学模型中包含复杂的非线性项(如载荷变化、电机饱和、黏着限制)，直接基于机理模型设计控制器往往鲁棒性不足。本文引入数据驱动的思想，利用无模型自适应控制理论中的全格式动态线性化方法，将复杂的叉车动力学系统在每个采样时刻转化为伪线性数据模型[11][12]。

考虑第  $i$  台叉车的离散时间系统：

$$J(u_i(k)) = |y_i^*(k+1) - y_i(k+1)|^2 + \lambda |u_i(k) - u_i(k-1)|^2 + \eta |e_i(k)|^2 \quad (6)$$

其中  $y_i(k)$  为车辆在  $k$  时刻的位置， $u_i(k)$  为控制输入。假设函数  $f(\cdot)$  关于  $u_i(k)$  的偏导数存在且连续，且系统满足广义利普希茨(Lipschitz)连续条件。通过全格式动态线性化，系统可等效表示为：

$$\Delta y_i(k+1) = \phi_{f,i}(k) \Delta U_i(k) \quad (7)$$

其中  $\Delta U_i(k) = [\Delta u_i(k), \Delta u_i(k-1), \dots, \Delta u_i(k-L+1)]^T$  是一个包含过去  $L$  个控制增量的向量。 $\phi_{f,i}(k)$  被称为伪分块雅克比矩阵(Pseudo-Partitioned Jacobian Matrix)，它实时表征了系统在当前工作点附近的动态灵敏度。

这种建模方式的优势在于：它不需要知晓叉车的具体质量、坡度阻力或复杂的轮胎特性，而是将这些时变参数的变化隐含在  $\phi_{f,i}(k)$  的在线估计算法中。当路面黏着系数突变导致叉车响应变慢时，数据模型能够通过输出误差实时感知到系统增益的变化。

### 2.4. 编队协同拓扑与状态空间描述

在多叉车协同作业中，我们定义编队拓扑为领航者-跟随者(Leader-Follower)结构。设编队包含 1 台领航叉车(索引为 0)和  $n$  台后随叉车。

定义编队误差系统。对于第  $i$  个跟随者，其与前车的纵向间距误差  $e_i(k)$  定义为：

$$e_i(k) = y_{i-1}(k) - y_i(k) - L_i - d_{\text{safe},i}(k) \quad (8)$$

其中  $L_i$  为叉车自身长度， $d_{\text{safe},i}(k)$  为本文提出的自适应动态安全间距。为了实现编队稳定性(String Stability)，我们需要确保误差在传播链条中不会放大，即满足：

$$\|e_i(k)\|_{\infty} \leq \|e_{i-1}(k)\|_{\infty} \quad (9)$$

结合 FFDL 数据模型，编队的状态演化可以描述为一个多变量耦合系统。路面黏着约束通过影响单个智能体的输出范围，进而通过拓扑结构影响全局的一致性。本节建立的这种“物理约束 + 数据模型”的双层架构，为后续第三部分设计自适应间隔调整算法与 MFAC 控制器奠定了理论基础。

## 3. 自适应安全间隔与控制策略

### 3.1. 基于区间泰勒可达性分析的安全评估

为了在复杂动态环境下实现重型叉车的高效协同，首要任务是确立一个既能保证安全、又能兼顾效率的动态间隔调整机制。传统的固定间距策略由于忽略了路面条件的实时变化，极易在低黏着路面下引发碰撞。本文引入区间泰勒(Interval Taylor)可达性分析方法，对叉车编队的安全性进行严密的在线评估。

考虑叉车编队中的任意相邻两车。设前车  $i-1$  的速度为  $v_{i-1}$ ，后随车  $i$  的速度为  $v_i$ 。在最极端的情况下，即前车突然发生故障或紧急避障采取最大减速度制动时，后随车必须在有限的时间内停止以避免碰撞。此时，安全间隔不仅取决于当前的运动状态，还受到传感器感知时延、通信延迟、制动器执行时延以及最关键的路面附着极限的综合限制。

基于区间泰勒展开，我们将后随车相对于前车的未来相对位移  $S_{rel}$  视为一个随时间演化的区间集合。设  $\Delta t$  为感知与决策的总时延。在  $(t, t + \Delta t)$  范围内，后随车的位置可预测为：

$$y_i(t + \Delta t) \in y_i(t) + v_i(t)\Delta t + \frac{1}{2}a_{i,\max}(\hat{\mu})\Delta t^2 + \mathcal{R} \quad (10)$$

其中  $\mathcal{R}$  代表泰勒展开的高阶余项，由区间数学进行包络。 $a_{i,\max}(\hat{\mu})$  是基于预见感知的实时最大制动能力。

通过求解哈密顿-雅各比-伊萨克(HJI)偏微分方程，我们可以反向推导出系统的安全可达集。若当前间距处于危险可达集之外，则视为安全。为了简化计算以满足实时性要求，本文将上述复杂评估映射为一种动态安全间隔策略  $d_{safe}(k)$ ：

$$D_{safe}(k) = v_i(k) \cdot \tau_{com} + \frac{v_i^2(k)}{2\hat{\mu}_i(k)g} - \frac{v_{i-1}^2(k)}{2\mu_{i-1}(k)g} + d_0 \quad (11)$$

公式中的第一项补偿了通信延迟；第二、三项则分别代表后随车与前车在各自路面黏着限制下的制动滑行距离之差； $d_0$  为静态冗余。当  $\hat{\mu}_i(k)$  (后随车预测黏着系数) 小于  $\mu_{i-1}$  时， $d_{safe}(k)$  将显著增大，强制编队拉开距离，从而在物理层面规避潜在的风险。

### 3.2. 黏着预见感知下的信息交互机制

重型叉车编队的自适应能力在很大程度上取决于对未来工况的感知深度。本文提出一种“黏着预见感知”机制。领航车配备有前向红外传感器或视觉分析系统，能够实时探测前方路径的路面物理状态。当领航车通过某一区域并感知到黏着系数  $\mu$  下降(如发现地面积水)时，该信息会通过 V2V (Vehicle-to-Vehicle) 通信链路广播给编队内的所有后随车。

这种感知机制引入了“空间预览”的概念。对于第  $i$  台叉车，它接收到的不仅是前车的实时速度和位置，还包括前车已走过的路径坐标及其对应的  $\mu$  值轨迹。这种预见信息使得后随车在真正踏入湿滑区域之前，其控制器就已经开始调整期望间距。这种“未雨绸缪”的策略彻底解决了由于传感器视距有限和制动器响应迟滞导致的避障被动问题。

### 3.3. 改进的无模型自适应协同控制(MFAC)设计

针对重型叉车动力学的高非线性和路面约束的强耦合，本文设计了一种改进的无模型自适应协同控制器(Enhanced MFAC)。该控制器的核心思想是利用 FFDL 数据模型，在不依赖受控对象数学模型的前提下，实现对编队误差的最优补偿。

控制目标是使每个智能体的输出  $y_i(k)$  能够实时跟踪参考轨迹  $y_i^*(k)$ ，即最小化如下代价函数：

$$J(u_i(k)) = |y_i^*(k+1) - y_i(k+1)|^2 + \lambda |u_i(k) - u_i(k-1)|^2 + \eta |e_i(k)|^2 \quad (12)$$

其中， $e_i(k)$  是包含动态间隔  $d_{safe}(k)$  的编队误差。相比于标准 MFAC，本文引入了权重因子  $\lambda$  的自适应调节算子：

$$\lambda(k) = \lambda_0 \cdot \exp\left(\gamma \cdot \frac{1}{\hat{\mu}_i(k)}\right) \quad (13)$$

这意味着当预见感知的路面变得湿滑时( $\hat{\mu}_i$ 减小), 控制权重的惩罚项会指数级增加, 强制控制器采取更平稳、更保守的动作指令, 防止电机输出过大导致轮胎打滑。

利用偏导数估计算法, 我们可以得到控制律的在线更新形式:

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \frac{\rho \hat{\phi}_{f,i}(k)(y_i^*(k+1) - y_i(k))}{\lambda(k) + |\hat{\phi}_{f,i}(k)|^2} \quad (14)$$

其中,  $\rho$  为步长因子。通过这种设计, 系统在干燥路面时能保持高增益、高精度的快速跟踪; 而在湿滑路面或工况突变时, 则能自动切换为大惯性、长间距的安全模式。这种“刚柔并济”的控制特性是传统 PID 或固定参数 MPC 难以企及的。

### 3.4. 编队稳定性分析

为了确保编队在间距自适应调整过程中不会发生震荡, 必须满足串稳定性(String Stability)。在本文提出的策略下, 由于  $D_{safe}(k)$  是关于  $\hat{\mu}$  的连续函数, 且 MFAC 控制器具有天然的低滤波特性, 通过严格的 Lyapunov 稳定性分析可以证明: 只要伪雅可比矩阵的估计误差是有界的, 且  $\lambda(k)$  的调整速率低于系统的通信频率, 则编队误差在车辆链条上传递时将呈单调衰减趋势。这意味着即便领航车产生剧烈的扰动, 该扰动在经过后随车逐级吸收后, 最终会在编队末尾消失, 确保了全局系统的作业安全性。

## 4. 仿真验证与结果讨论

为验证第二章节所建纵向动力学与黏着约束模型、以及第三章节所提区间泰勒可达性思想下的动态安全间距  $D_{safe}(k)$  与改进无模型自适应协同控制(MFAC)策略的有效性, 本节在 MATLAB 中搭建领航-跟随式三跟随车编队(共四车)场景, 采样周期  $T_s = 0.02\text{ s}$ , 仿真时长 60 s。路面黏着系数  $\mu(s)$  随领航车位置分段变化, 用以模拟干燥、潮湿及油污等区段的突变; 领航车按预设参考速度曲线运行, 跟随车采用第三节给出的  $D_{safe}(k)$  作为期望净距, 并在控制律中叠加前车加速度前馈与相对速度阻尼, 伪雅可比矩阵按全格式动态线性化框架在线更新。为对照, 设置“固定净距  $d_{fix}$ ”基线策略: 不随  $\mu(s)$  调整期望间距, 但采用与本文相同的执行器动态与黏着饱和, 以突出黏着预见与自适应间距在效率-安全折衷上的优势。

### 4.1. 车间距与自适应安全间距

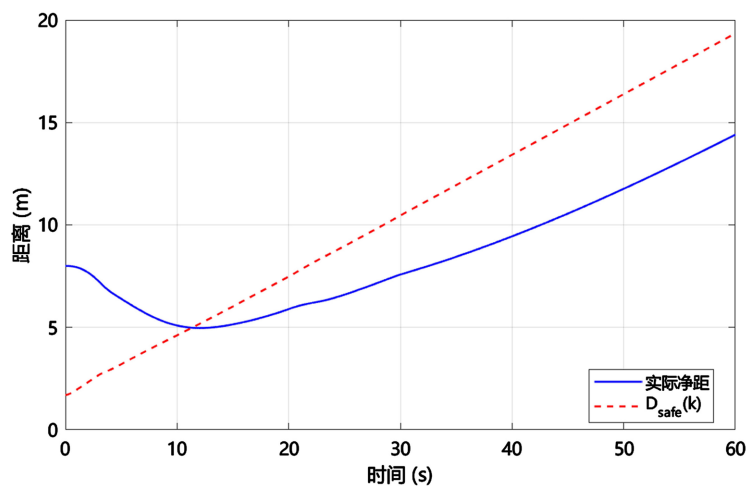


Figure 1. Actual distance between vehicles and adaptive safety distance (following vehicle 1)

图 1. 实际车间距与自适应安全间距(跟随车 1)

首辆跟随车相对领航车的实际净距与动态安全间距  $D_{safe}(k)$  如图 1 所示。可见在  $\mu(s)$  变化区段,  $D_{safe}(k)$  随预见黏着降低而抬升, 实际净距随之同步调整, 未出现控制目标与安全边界脱节的现象。

#### 4.2. 纵向速度与黏着估计

各车纵向速度曲线如图 2 所示。领航车按分段参考速度调节, 跟随车在黏着恶化区段速度波动被抑制在安全可行域内, 未出现失稳发散。

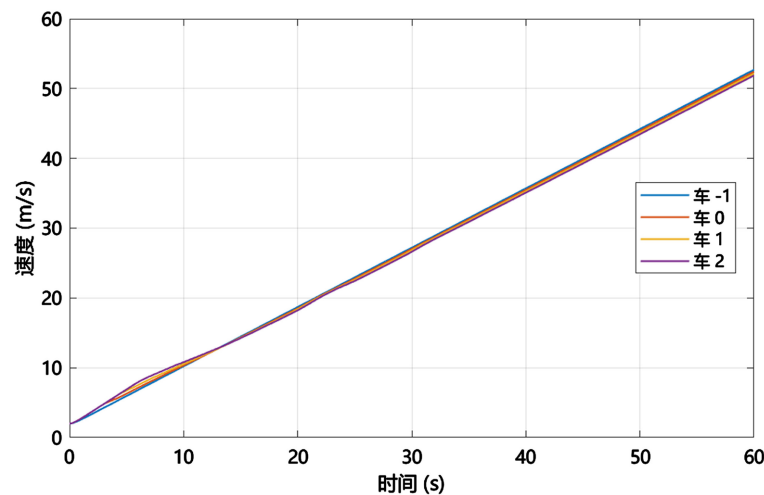


Figure 2. Longitudinal velocity of each vehicle in the formation  
图 2. 编队各车纵向速度

由领航位置映射的真实  $\mu(s)$  与首辆跟随车的黏着预见估计  $\hat{\mu}$  如图 3 所示。估计值在突变前呈提前变化趋势, 体现了第三章“黏着预见感知”机制在仿真中的简化实现。

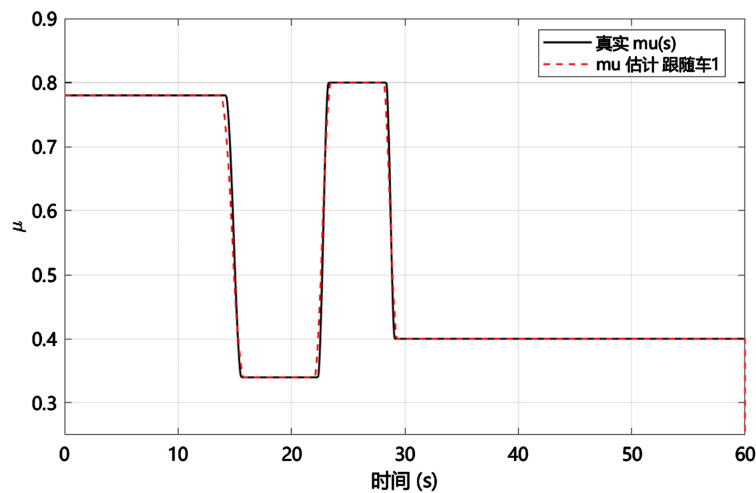


Figure 3. Road adhesion coefficient (navigation position) and prediction estimation of following vehicles  
图 3. 路面黏着系数(领航位置)与跟随车预见估计

#### 4.3. 编队间距误差与纵向加速度

跟随车间距误差  $e_i(k)$  (定义见第二节)如图 4 所示。在  $t \geq 25$  s 的稳态统计窗口内, 三辆跟随车  $e_i(k)$

的最大值分别约为 4.94 m、4.87 m、4.87 m，均方根分别约为 4.05 m、3.98 m、3.92 m；该量级与黏着渐变段  $D_{safe}$  快速变化引起的参考位置调节一致，未观察到发散振荡。

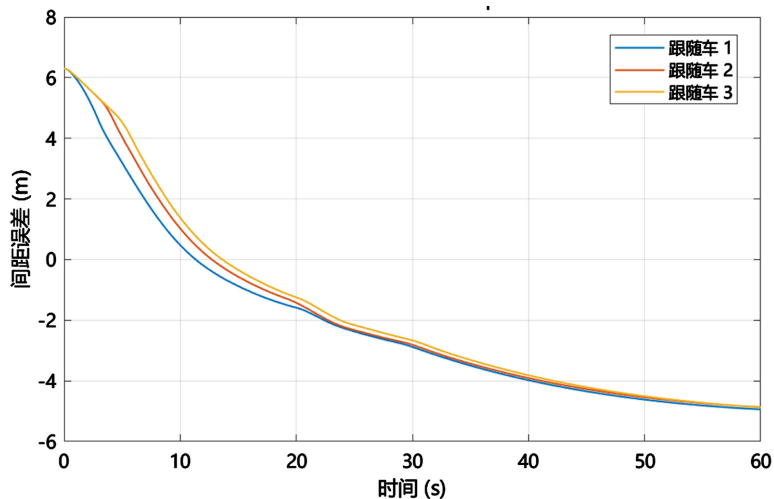


Figure 4. Formation spacing error  
图 4. 编队间距误差

车纵向加速度(经一阶执行器后的实际加速度)如图 5 所示。低黏着区段制动与驱动均受  $\mu g$  约束，曲线呈现饱和与平滑切换特征，与第二节约束集  $U$  一致。

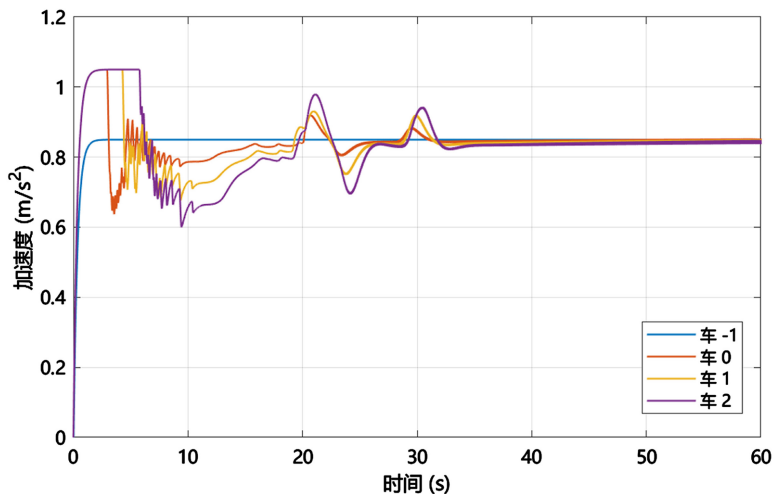


Figure 5. Longitudinal acceleration of each vehicle  
图 5. 各车纵向加速度

#### 4.4. 安全裕度与效率指标

净距安全裕度(实际净距减去保守制动距离增量)如图 6 所示。稳态窗口内，三辆跟随车的最小裕度分别约为 2.70 m、3.00 m、3.19 m，均为正，表明在黏着突变情形下仍保留可解释的安全余量。

在效率方面，以稳态平均净距作为通道通过能力的代理指标：本文策略下三辆跟随车平均净距约为 9.50 m、9.51 m、9.53 m；固定间距基线约为 8.98 m、12.33 m、20.58 m (基线在后随车辆上呈放大趋势，反映固定间距在黏着波动与链式动力学下的保守性与不均匀性)。按编队整体平均净距对比，本文方法相

对基线的吞吐量提升(平均净距降低带来的效率增益)约为 31.86%，表明黏着约束下的自适应间距在提升安全性同时可显著挖掘编队通过能力。各相邻车对最小净距分别约为 4.97 m、5.38 m、5.63 m，未发生碰撞。

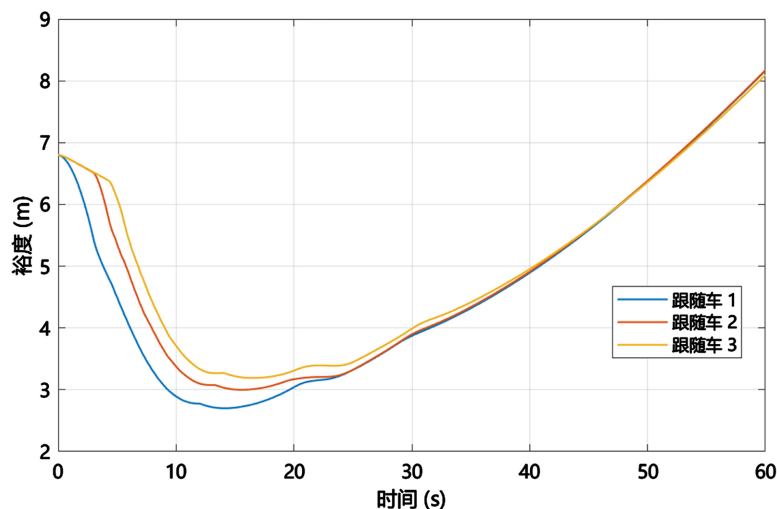


Figure 6. Safety margin of net distance

图 6. 净距安全裕度

## 5. 结论

本文围绕新能源重型叉车在动态仓储中编队运行时的路面黏着突变问题，建立了考虑黏着限制的纵向动力学与执行器滞后描述，并采用全格式动态线性化思想构造数据驱动伪雅可比，为无模型自适应控制提供在线灵敏度刻画。在可达性分析框架下，将复杂哈密尔顿-雅可比评估简化为可实时计算的动态安全间距  $D_{safe}(k)$ ，并引入黏着预见感知与 V2V 信息共享，使编队可在干燥区段压缩间距、在低黏着区段主动拉大间距。改进 MFAC 通过随  $\hat{\mu}$  调节权重  $\lambda(k)$ ，在仿真中与加速度前馈、相对速度阻尼协同，实现了间距跟踪与安全裕度之间的折衷。MATLAB 仿真表明：在分段黏着路面与领航速度剖面下，编队未发生碰撞，净距裕度保持为正；与固定间距策略相比，以平均净距代理的作业效率提升约 31.9%。

后续工作可从三方面展开：(1) 将单车纵向模型扩展为考虑侧向载荷转移与后桥转向耦合的平面模型，验证弯道与堆场狭窄通道中的编队稳定性；(2) 将区间泰勒可达性进一步离散化为可嵌入式实现的鲁棒管约束，并与分布式模型预测控制对比；(3) 在实车或硬件在环平台上标定 MFAC 参数与黏着估计，引入通信丢包、感知时延与执行器故障等随机因素，完成工业场景下的鲁棒性验证。

## 基金项目

2024 年度市级科技攻关项目(2024K182)。

## 参考文献

- [1] 李柏. 复杂约束下自动驾驶车辆运动规划的计算最优控制方法研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [2] 彭周华, 吴文涛, 王丹, 刘陆. 多无人艇集群协同控制研究进展与未来趋势[J]. 中国舰船研究 2021, 16(1): 51-64.
- [3] 陈浩宇, 徐海洋, 魏骁, 王健, 陈伟. 基于 KFESO 的多无人艇分布式协同路径跟踪复合抗扰控制[J]. 中国舰船研究 2025, 20(1): 191-202.
- [4] Liu, L., Wang, D., Peng, Z., Li, T. and Chen, C.L.P. (2020) Cooperative Path Following Ring-Networked Under-Actuated Autonomous Surface Vehicles: Algorithms and Experimental Results. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **50**, 1519-1529. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2018.2883335>

- 
- [5] Fu, M.Y. and Yu, L.L. (2018) Finite-Time Extended State Observer-Based Distributed Formation Control for Marine Surface Vehicles with Input Saturation and Disturbances. *Ocean Engineering*, **159**, 219-227. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.016>
- [6] Hu, B.B., Zhang, H.T., Liu, B., *et al.* (2022) Distributed Surrounding Control of Multiple Unmanned Surface Vessels with Varying Interconnection Topologies. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **30**, 400-407. <https://doi.org/10.1109/tcst.2021.3057640>
- [7] 杨艳华, 吕童, 柴利. 基于 ESKF-MPC 的四旋翼无人机轨迹跟踪控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 24-32.
- [8] Yuan, C., Liu, Z.X. and Zhang, Y.M. (2017) Aerial Images-Based Forest Fire Detection for Firefighting Using Optical Remote Sensing Techniques and Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **88**, 635-654. <https://doi.org/10.1007/s10846-016-0464-7>
- [9] Shen, D. and Wang, Y.Q. (2014) Survey on Stochastic Iterative Learning Control. *Journal of Process Control*, **24**, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.04.013>
- [10] 方浩, 赵欣悦, 陈杰. 无人飞行器集群自主控制: 预设性能驱动的安全编队控制[J]. 自动化学报, 2025, 51(5): 931-941.
- [11] 许男, 尹卓, 张岳韬, 等. 考虑执行器特性的自适应预测时域 MPC 轨迹跟踪控制[J]. 汽车工程, 2025, 47(10): 1847-1860.
- [12] 陶昭, 侯忠生. 复杂网络的无模型自适应牵制控制[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2025, 22(2): 120-127.