

基于 LTV-MPC 的商用车编队横纵向控制

孙绍瑜¹, 刘涌翔¹, 张昊毅¹, 潘 旺¹, 鞠 峥¹, 于树友^{1,2†}

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130025)

摘 要: 针对传统车辆编队控制研究中普遍忽略车辆横纵向耦合效应的问题, 本文提出了一种适用于商用车编队控制的五自由度动力学-魔术公式-车道保持一体化模型. 通过对该模型进行线性化处理, 构建线性时变模型, 并基于此设计了模型预测控制器. 为验证所提方法的有效性, 开展 Matlab/Simulink 与 TruckSim 的联合仿真实验. 结果表明, 所提出的方法在保证控制性能的同时, 其实时响应性能表现更优, 可为商用车编队的工程化应用提供技术支撑.

关键词: 车辆编队; 魔术公式; 模型预测控制; 车辆五自由度模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2026.0226

引用格式: 孙绍瑜, 刘涌翔, 张昊毅, 等. 基于 LTV-MPC 的商用车编队横纵向控制 [J]. 控制与决策.

LTV-MPC-based longitudinal and lateral control for truck platoon

Sun Shao-yu¹, Liu Yong-xiang¹, Zhang Hao-yi¹, Pan Wang¹, Ju Zheng¹, Yu Shu-you^{1,2†}

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: To address the common neglect of longitudinal-lateral coupling effects in conventional vehicle platoon control studies, this paper proposes a five-degree-of-freedom dynamics-Magic Formula-lane-keeping integrated model suitable for commercial vehicle platoon control. The model is linearized to construct a linear time-varying system, based on which a model predictive controller is designed. To validate the effectiveness of the proposed approach, co-simulation experiments are conducted in Matlab/Simulink and TruckSim. The results show that, the proposed method achieves superior real-time performance while maintaining control accuracy, providing a practical technical solution for the engineering application of commercial truck platoons.

Keywords: Vehicle platoon; Magic formula; Model predictive control; Five-degree-of-freedom of vehicle

0 引言

车辆编队控制依托智能交通系统的理念^[1], 融合车联网与自动驾驶技术^[2], 通过将多辆车辆组建为紧凑且协调的行驶队列, 可在不额外增加道路基础设施投入的前提下, 显著提升道路通行能力^[3], 同时降低车辆燃油消耗并减轻驾驶员工作负荷^[4]. 对于商用车而言, 缩小车间距使后车处于前车尾流区域, 能够大幅降低空气阻力^[5], 进而提升燃油经济性^[6]. 此外, 通过编队控制统一调度车辆的加减速与转向动作, 可有效减少因驾驶员疲劳或操作失误引发的交通事故, 同时缓解长途运输领域司机短缺的问题.

早在上世纪 60 年代, 美国麻省理工学院的林肯实验室就已开展车辆编队控制器相关研究, 采用最

优控制方法设计线性反馈控制律, 实现车辆队列的编队行驶^[7]. 现有研究普遍采用纵向与横向解耦的控制结构: 纵向控制器负责车速与车距跟踪, 横向控制器负责车道保持或轨迹跟踪^[8]. 该控制策略框架清晰、易于工程实现. 尽管彭鹏等人^[9]提出的策略考虑了车辆非线性特性, 但仅涵盖发动机动力学及车辆纵向动力学中的空气阻力等非线性因素, 未考虑车辆系统本身纵向、横向与偏航运动的耦合非线性及轮胎非线性. 在高速行驶或弯道通过等工况下, 车辆纵向加速度、轮胎力分布与横向姿态存在相互作用, 横-纵耦合效应凸显^[10]. 若忽略这一耦合效应, 跟踪误差会在队列中逐级放大, 极端情况下将导致车辆偏离车道甚至失稳^[11].

收稿日期: 2026-03-20; 录用日期: 2026-07-06.

基金项目: 吉林省自然科学基金项目 (20240402079GH); 国家自然科学基金项目 (62473167).

责任编委: 郭戈.

[†]通信作者. E-mail: shuyou@jlu.edu.cn.

因此,对于在弯道行驶的车队而言,商用车的横纵动力学特性的协同至关重要. Rajamani R 等^[12]采用车道保持模型描述车辆横向动力学特性;基于典型线性二自由度车辆模型的转向稳定性研究近年来已取得显著进展^[13-14].但随着研究的不断深入,二自由度模型在转向动力学分析中的局限性逐渐显现,其忽略了纵向速度变化对整车稳定性的影响^[15-16].同时,现有研究中常见的横、纵动力学解耦处理方式,虽简化了理论推导过程,但车辆系统固有的耦合特性决定了单一维度的控制难以实现最优控制效果,且无法覆盖极端或复杂行驶工况^[17].张丽霞等^[18]基于模型预测算法构建横纵耦合模型,验证了所设计控制器的稳定性与有效性,但该研究仅对耦合项进行线性化处理,未能完整保留车辆实际横纵向耦合行为.

针对上述研究不足,本文开展如下研究工作:依托 MATLAB/Simulink 与 TruckSim 联合仿真平台,构建由 1 辆人工驾驶领航车与多辆自动驾驶跟随车组成的商用车编队系统;建立包含车轮转动自由度的五自由度动力学模型,并融合魔术公式轮胎模型与车道保持模型,构建可精准反映横-纵耦合特性的动力学框架;在控制器设计层面,采用线性时变模型预测控制策略,在每个采样时刻对非线性模型进行局部线性化,通过二次规划快速求解最优控制量,兼顾实时性与控制精度.

本文主要结构如下:第一节介绍了表征商用车横纵向动态特性的五自由度模型、魔术公式轮胎模型、车道保持模型和控制目标.第二节对控制问题进行描述,并设计了模型预测控制器.第三节基于 Trucksim-Simulink 平台进行仿真对比试验以验证所提方法的有效性.最后,第四节总结全文.

1 商用车横纵向耦合动力学建模

1.1 五自由度车辆动力学模型

商用车的运动行为极其复杂,具有强耦合性和非线性时变特性,要建立一个能全面描述其动态性能的模型十分困难.本文以经典的三自由度模型为基础,进一步引入前后轮旋转自由度,构建了如图 1 所示的五自由度 (Five-degree-of-freedom, 5-DOF) 车辆动力学模型,公式 (1) 为 5-DOF 车辆动力学数学模型,其轮胎受力分析见图 2.商用车模型参数表如表 1 所示.为简化建模过程,本研究遵循以下假设:忽略车身弹性变形,并假设左右轮对称,忽略车身俯仰和滚转运动.

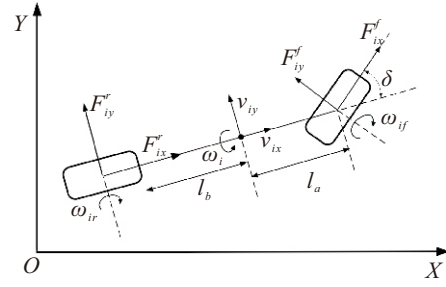


图 1 五自由度车辆动力学模型

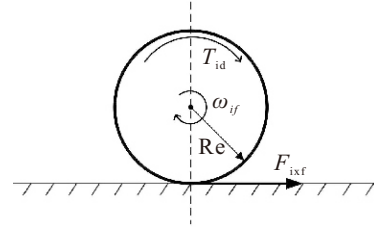


图 2 轮胎转动受力分析图

表 1 车辆模型参数

车辆参数	描述
F_{ix}^f	前轮纵向力
F_{iy}^f	前轮侧向力
F_{ix}^r	后轮纵向力
F_{iy}^r	后轮侧向力
$\dot{\varphi}_i$	横摆角速度
l_a	前轴与质心之间距离
l_b	后轴与质心之间距离
T_{id}	驱动力矩
J_{if}	前轮转动惯量
J_{ir}	后轮转动惯量
δ_i	前轮转角
m_i	整车质量
ω_{if}	前轮角速度
ω_{ir}	后轮角速度
I_{iz}	车辆绕 z 轴转动惯量
v_{ix}	车辆纵向速度
v_{iy}	车辆横向速度
R_e	车轮转动半径

$$\begin{cases} \dot{v}_{ix} = v_{iy}\dot{\varphi}_i + \frac{F_{ix}^f \cos \delta_i - F_{iy}^f \sin \delta_i + F_{ix}^r}{m_i}, \\ \dot{v}_{iy} = -v_{ix}\dot{\varphi}_i + \frac{F_{ix}^f \sin \delta_i + F_{iy}^f \cos \delta_i + F_{iy}^r}{m_i}, \\ \ddot{\varphi}_i = \frac{(F_{ix}^f \sin \delta_i + F_{iy}^f \cos \delta_i)l_a - F_{iy}^r l_b}{I_{iz}}, \\ \dot{\omega}_{if} = \frac{T_{id} - R_e F_{ix}^f}{J_{if}}, \\ \dot{\omega}_{ir} = \frac{T_{id} - R_e F_{ix}^r}{J_{ir}}. \end{cases} \quad (1)$$

1.2 魔术公式轮胎模型

轮胎作为车辆与路面相互作用的核心部件,是

除重力与气动载荷外几乎所有影响车辆操纵与运动特性的力的来源, 因而轮胎模型的建立对整车动力学仿真具有基础性作用. 魔术公式轮胎模型通过参数辨识方法从轮胎实测数据中提取参数, 将侧向力与纵向力表述为侧偏角、滑移率和路面附着系数的显式函数, 能够有效表征在库仑摩擦约束下轮胎力之间的强耦合与高度非线性行为, 尤其在接近附着极限或低附着工况下具有重要建模价值, 因而在车辆操纵稳定性分析与控制策略设计中得到广泛采纳与验证. 具体计算公式如下:

$$Y(x) = D \sin(C \arctan(Bx - E(Bx - \arctan Bx))). \quad (2)$$

其中, B 为刚度因子, C 为形状因子, D 为峰值因子, E 为曲率因子, Y 为输出变量, x 为输入变量, 当 x 为侧偏角 α 时, Y 为侧向力, 当 x 为纵向滑移率 k 时, Y 为纵向力.

轮胎侧向力计算公式如下:

$$F_s = D_s \sin(C_s \arctan(\Gamma)). \quad (3)$$

其中 $\Gamma = B_s \alpha_{f/r} - E_s (B_s \alpha_{f/r} - \arctan B_s \alpha_{f/r})$. F_s 为轮胎的侧向力, α_f 和 α_r 分别为前后轮侧偏角.

前后轮侧偏角 α_f 和 α_r 由公式(4)描述:

$$\begin{cases} \alpha_f = \arctan\left(\frac{v_{yf}^t}{v_{xf}^t}\right), \\ \alpha_r = \arctan\left(\frac{v_{yr}^t}{v_{xr}^t}\right). \end{cases} \quad (4)$$

其中, v_{xf}^t 、 v_{yf}^t 、 v_{xr}^t 和 v_{yr}^t 分别表示轮胎坐标系下前、后轮处的纵向速度和横向速度.

轮胎坐标系下前、后轮纵横向速度可由公式(5)描述:

$$\begin{cases} v_{xf}^t = v_{xf}^b \cos \delta + v_{yf}^b \sin \delta, \\ v_{yf}^t = -v_{xf}^b \sin \delta + v_{yf}^b \cos \delta, \\ v_{xr}^t = v_{xr}^b, \\ v_{yr}^t = v_{yr}^b. \end{cases} \quad (5)$$

其中, v_{xf}^b 、 v_{yf}^b 、 v_{xr}^b 和 v_{yr}^b 分别表示车辆坐标系下前、后轮处的纵向速度和横向速度.

车辆坐标系下前、后轮纵横向速度可由公式(6)描述:

$$\begin{cases} v_{xf}^b = v_{ix}, \\ v_{yf}^b = v_{iy} + l_a \dot{\varphi}_i, \\ v_{xr}^b = v_{ix}, \\ v_{yr}^b = v_{iy} - l_b \dot{\varphi}_i. \end{cases} \quad (6)$$

轮胎纵向力计算公式如下:

$$F_l = D_l \sin(C_l \arctan(\Omega)). \quad (7)$$

其中 $\Omega = B_l k_{f/r} - E_l (B_l k_{f/r} - \arctan B_l k_{f/r})$. F_l

为轮胎的纵向力, k_f 和 k_r 分别为前后轮滑移率.

前后轮滑移率由公式(8)描述:

$$\begin{cases} k_{if} = \frac{\omega_{if} \cdot R_e - v_{xf}^t}{|v_{xf}^t|}, \\ k_{ir} = \frac{\omega_{ir} \cdot R_e - v_{xr}^t}{|v_{xr}^t|}. \end{cases} \quad (8)$$

其中 v_{xf}^t 和 v_{xr}^t 可由公式(5)、(6)求解得到.

1.3 车道保持模型

在考虑横纵向耦合的商用车编队控制研究中, 引入车道保持模型具有明确的必要性和显著优势, 其核心价值在于确保队列在弯道等复杂路径上行驶时的安全性、稳定性和精确的路径跟踪能力, 因此建立如图3所示的车道保持模型. 其中, 本文采取固定纵向间距策略和前车-领航车通信拓扑结构^[19].

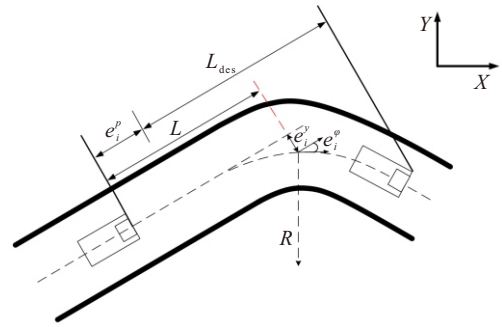


图3 车道保持模型

定义 x_i 为队列中第 i 辆车的纵向位置, e_i^p 为队列中第 i 辆车的纵向位置误差, 则:

$$e_i^p = x_i - (x_{i-1} - L_{des}). \quad (9)$$

其中 L_{des} 表示相邻两车的纵向期望间距.

定义 e_i^y 为第 i 辆车的车辆预瞄点与车道中心线的横向位置误差, e_i^φ 表示车辆的行驶方向与预瞄点处车道切线方向之间的航向角误差, 则:

$$\begin{cases} \dot{e}_i^y = v_{ix} e_i^\varphi - v_{iy} - L \dot{\varphi}_i, \\ \dot{e}_i^\varphi = \dot{\varphi}_{id} - \dot{\varphi}_i. \end{cases} \quad (10)$$

其中, L 表示车辆的预瞄距离, φ_i 表示车辆的横摆角, φ_{id} 表示车辆的期望横摆角.

结合公式(9)、(10), 将得到的车道保持模型表述如下:

$$\begin{cases} \dot{e}_i^p = v_{ix} - v_{(i-1)x}, \\ \dot{e}_i^y = v_{ix} e_i^\varphi - v_{iy} - L \dot{\varphi}_i, \\ \dot{e}_i^\varphi = \dot{\varphi}_{id} - \dot{\varphi}_i. \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\dot{\varphi}_{id} = \frac{v_{ix}}{R}$ 表示第 i 辆车的期望横摆角速度, $\dot{\varphi}_i$ 表示第 i 辆车的实际横摆角速度, R 为道路半径.

1.4 控制目标

实现车辆横纵向耦合控制, 所设计的目标函数

需同时满足以下控制要求: 纵向位置误差趋近于零, 且跟随车跟踪领航车速度; 横向位置误差与航向角误差趋近于零. 控制目标如下所示:

纵向控制目标: 纵向位置误差和纵向速度误差收敛为零:

$$\begin{cases} \text{minimize} \|e_i^p\|_2^2, \\ \text{minimize} \|v_{ix} - v_{0x}\|_2^2. \end{cases} \quad (12)$$

横向控制目标: 横向位置误差和航向角误差收敛为零:

$$\begin{cases} \text{minimize} \|e_i^y\|_2^2, \\ \text{minimize} \|e_i^\varphi\|_2^2. \end{cases} \quad (13)$$

2 控制器设计

模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 是基于系统模型的一种控制策略, 其核心逻辑为在每个控制周期内预测系统未来动态行为, 通过在线优化求解当前最优控制量, 同时可严格处理多变量约束条件. MPC 的显著特点是采用滚动时域控制策略, 即仅执行当前时刻的最优控制解, 在下一控制周期则根据最新的系统测量值重新进行预测与优化, 进而实现闭环控制. 与传统非线性模型预测控制器 (Nonlinear model predictive controller, NMPC) 相比, 本文构建的线性时变模型预测控制器 (Linear-time-varying model predictive controller, LTV-MPC) 通过对系统模型进行线性化与离散化处理, 在保障控制性能的同时, 可有效降低计算复杂度.

2.1 模型线性化

为了描述商用车相对于参考路径的偏差, 系统的状态向量定义为 $X = [v_{ix}, v_{iy}, \dot{\varphi}_i, \omega_{if}, \omega_{ir}, e_i^p, e_i^y, e_i^\varphi]^T$, 控制量 $u = [T_{id}, \delta_i]^T$, 输出量为 $y = [e_i^p, v_{ix}, e_i^y, e_i^\varphi]^T$. 将前文构建的五自由度动力学模型、魔术公式轮胎模型及车道保持模型整合, 得到状态方程 $\dot{X} = f(X, u)$. 对系统采用雅可比线性化处理, 并采用前向欧拉法离散化后可表示为:

$$\begin{cases} \tilde{X}(k+1) = A_k \tilde{X}(k) + B_k \tilde{u}(k), \\ y(k) = C_k \tilde{X}(k). \end{cases} \quad (14)$$

其中 k 为离散采样时刻, A_k 和 B_k 分别表示雅可比线性化后的状态矩阵和输入矩阵, 其表达式为:

$$A_k = \frac{\partial f(X, u)}{\partial X}, \quad B_k = \frac{\partial f(X, u)}{\partial u}. \quad (15)$$

其中系统输出矩阵为 $C_k = \text{diag}(1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1)$.

需要指出的是, 尽管车辆在单个采样周期内沿当前航向前进, 受离散采样特性的影响, 车辆在进入弯道初始阶段可能存在短暂的直行趋势, 但本文采用的车道保持模型通过引入预瞄距离机制, 有效弥

补了该不足. 具体而言, 控制器并非仅依赖车辆当前位置的道路信息, 而是基于车辆前方一定预瞄距离处的道路几何特性进行控制决策, 从而实现对即将到来的道路变化的提前感知.

2.2 MPC 控制器设计

本节基于所建立的离散化线性时变模型 (14), 设计 LTV-MPC 控制器. 通过求解相应的凸优化问题, 获得最优控制序列, 从而在保证性能的同时有效降低在线计算负担.

定义每辆车的期望输出为:

$$y_{i,des}(k) = [v_{ix,des}(k) \ e_{i,des}^p(k) \ e_{i,des}^y(k) \ e_{i,des}^\varphi(k)]^T. \quad (16)$$

其中 $v_{ix,des}$ 、 $e_{i,des}^p$ 、 $e_{i,des}^y$ 和 $e_{i,des}^\varphi$ 分别表示第 i 辆车的期望速度、期望纵向位置误差、期望横向位置误差以及期望航向角误差.

定义跟踪误差为:

$$e_i(k) = y_i(k) - y_{i,des}(k). \quad (17)$$

定义预测时域内的控制序列为:

$$\tilde{U}_i(k) = [\tilde{u}_i(k|k), \dots, \tilde{u}_i(k+N_p-1|k)]. \quad (18)$$

其中 N_p 为预测时域.

为了保证车队中每辆车保持正确的相对位置和速度, 避免发生碰撞和超出道路边界线, 优化问题描述如下:

$$\min_{\tilde{U}_i(k)} J_i(e_i(k), \tilde{U}_i(k)), \quad (19a)$$

s.t.

$$\tilde{X}(k+1) = A_k \tilde{X}(k) + B_k \tilde{u}(k), \quad (19b)$$

$$y_i(k|k) = y_i(k), \quad (19c)$$

$$T_{id,min} \leq T_{id}(k+j|k) \leq T_{id,max}, \quad (19d)$$

$$\delta_{i,min} \leq \delta_i(k+j|k) \leq \delta_{i,max}, \quad (19e)$$

$$e_i(k+N_p|k) = 0. \quad (19f)$$

其中代价函数的表达式为:

$$J_i(e_i(k), \tilde{U}_i(k)) = \sum_{j=0}^{N_p-1} \|e_i(k+j|k)\|_{Q_i}^2 + \sum_{j=0}^{N_p-1} \|\tilde{u}_i(k+j|k)\|_{R_i}^2. \quad (20)$$

式 (19e) 和式 (19f) 表示控制输入量的约束, Q_i 和 R_i 分别表示代价函数中状态量和控制量的权重矩阵. 式 (19g) 为保证系统渐近稳定性的终端等式约束. 然而终端等式约束在实际求解中难以满足, 本文将约束条件 (19g) 转化为软约束处理, 将代价函数改为以下形式:

$$J_i(e_i(k), \tilde{U}_i(k)) = \sum_{j=0}^{N_p-1} \|e_i(k+j|k)\|_{Q_i}^2 + \sum_{j=0}^{N_p-1} \|\tilde{u}_i(k+j|k)\|_{R_i}^2 + \|e_i(k+N_p|k)\|_{P_i}^2. \quad (21)$$

其中 P_i 为终端惩罚矩阵, 本文取 $P_i = 10Q_i$.

本文控制输入约束主要根据车辆执行器的物理限制以及工程可实现性进行设置. 其中, 驱动力矩约束用于限制车辆纵向加减速能力, 避免控制器输出超过驱动系统的可执行范围; 前轮转角约束用于限制车辆横向操纵幅度, 避免产生过大或者不合理的转向指令. 值得注意的是, 尽管本文采用线性时变模型进行建模, 但在单个预测时域内假设系统模型保持不变. 该假设是合理的, 因为预测时域相对较短, 系统参数在该时间尺度内的变化可以忽略. 同时, 控制器采用滚动时域策略, 在每个采样时刻对模型进行更新, 从而能够有效刻画系统的时变特性, 因此该假设不会影响控制器的有效性^[20].

3 仿真实验

本节基于由 MATLAB/Simulink 和 TruckSim 构建的联合仿真平台, 对所提出的 LTV-MPC 控制器的有效性进行验证. 控制器参数设置如表 2 所示, 车辆模型参数如表 3 所示, 表征轮胎非线性特性的魔术公式轮胎参数如表 4 所示.

表 2 控制器参数

参数	单位	值
T_s	s	0.01
N_p	-	10
Q_i	-	diag(1e8, 100, 50, 1e5)
R_i	-	diag(0.001, 0.01)

表 3 车辆模型参数

参数	单位	值
m_i	kg	18 000
I_i^z	kg · m ²	1 304 218
l_a	m	3.5
l_b	m	1.5
J_{if}	kg · m ²	24
J_{ir}	kg · m ²	48
R_c	m	0.51

3.1 仿真工况设计

采用固定期望车间距策略, 期望车间距设定为 16 m, 并在初始时刻人为引入跟随车的纵向间距初始误差. 领航车由人为驾驶, 跟随车在所设计控制器

表 4 魔术公式轮胎参数

参数	B	C	D	E
F_{ix}^f	8.434	1.813	21 370	0.6593
F_{ix}^r	8.434	1.813	42 020	0.6593
F_{iy}^f	8.434	2.42	21 430	0.9869
F_{iy}^r	8.434	2.42	42 140	0.9869

的作用下, 实现横向与纵向的协同跟随控制, 假设通信网络完全可靠, 不考虑网络引起的通信问题, 如通信延迟、信号丢失等.

该工况旨在验证所设计控制器在典型高速弯道路行驶场景下的横向与纵向控制性能. 道路几何形状设计为双弯道, 如图 4 所示, 最大曲率为 0.0025 m^{-1} . 车道宽度设置为 3.5 m, 车辆宽度设置为 2.5 m, 因此本文将横向允许误差边界设置为 $\pm 0.5 \text{ m}$. 该边界用于表征车辆在不越出车道边界条件下允许的最大横向偏差. 在该工况下, 领航车以 25 m/s 的速度匀速行驶, 跟随车初始速度为 24 m/s, 跟随车与领航车之间的初始位置误差分别设置为 1 m、2 m 和 3 m, 仿真总时长设置为 60 s.

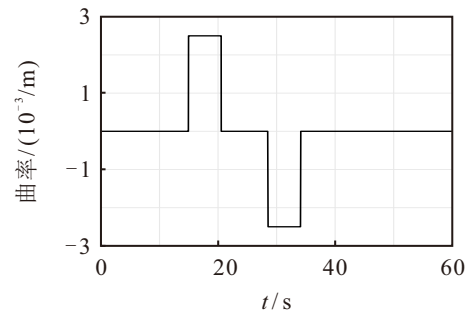


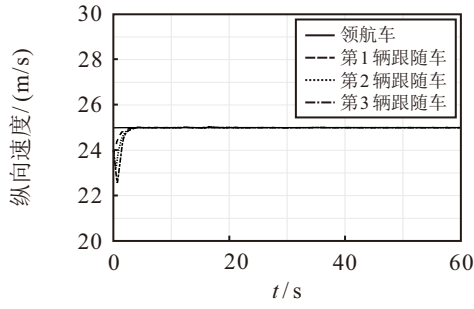
图 4 道路曲率

3.2 仿真分析

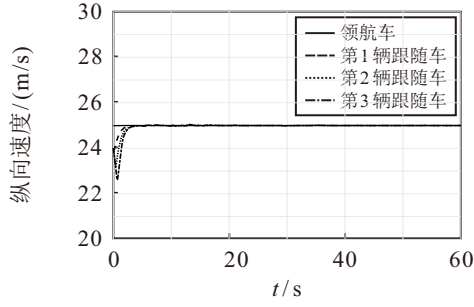
为保证对比实验的公平性与可重复性, LTV-MPC 控制器与 NMPC 方法、基于学习的预测控制 (Learning based predictive control, LPC) 方法^[21] 的对比仿真均在相同的工况条件与参数设置下进行. 本节重点从车辆速度响应、横向位置误差、纵向间距误差、航向角误差以及在线优化求解时间等指标, 对三种控制方法的仿真结果进行对比分析, 以全面评估其控制性能与实时性差异.

图 5—图 10 给出了 LTV-MPC、NMPC 和 LPC 三种方法在车队速度响应、纵向位置误差、横向位置误差、航向角误差、在线优化求解时间以及误差统计指标方面的对比结果. 由图 5 可知, 三种方法均能够使跟随车辆速度逐渐收敛至领航车辆速度, 并最终稳定在目标速度附近.

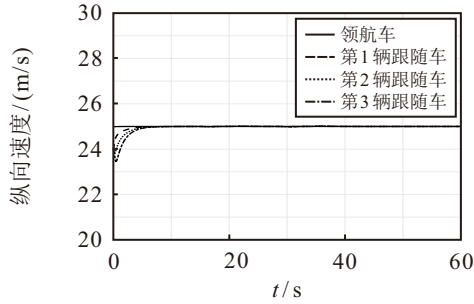
图 6 为车队纵向位置误差对比结果. 可以看出,



(a) LTV-MPC



(b) NMPC



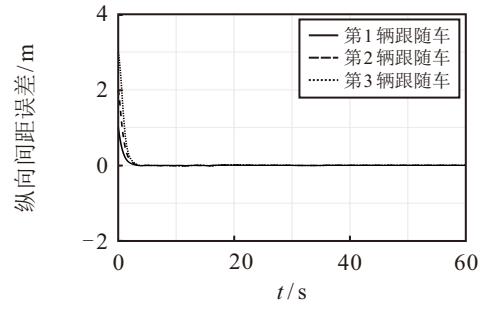
(c) LPC

图5 车队速度: (a) LTV-MPC, (b) NMPC, (c) LPC

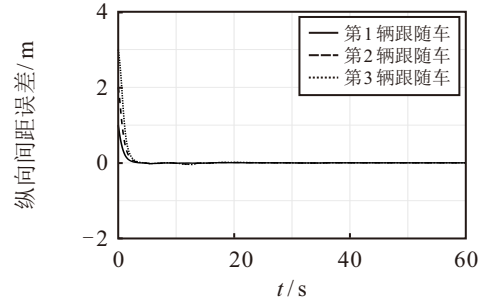
三种控制方法均能够使纵向位置误差逐渐收敛至零附近. 其中, LTV-MPC 和 NMPC 的误差收敛速度较快, 稳态误差较小; LPC 方法在初始阶段的误差衰减相对较慢, 且误差波动略大.

图7给出了车队横向位置误差对比结果. 从误差变化趋势来看, LTV-MPC 和 NMPC 在横向误差控制方面均表现出较好的跟踪性能; LPC 方法在横向位置误差变化过程中波动相对更明显, 误差峰值也相对较大. 图8为车队航向角误差对比结果. 可以看出, LTV-MPC 和 NMPC 的航向角误差整体较小, 收敛过程较平稳; LPC 方法在部分动态变化阶段的波动幅值相对较大, 说明其对车辆姿态变化的调节能力弱于 LTV-MPC 和 NMPC.

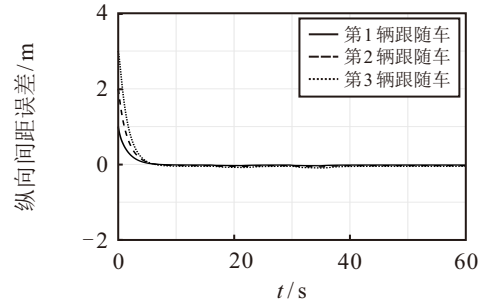
图9为三种方法的在线优化求解时间对比结果. 可以看出, LTV-MPC 的单步求解时间最短, 且求解时间波动较小, 表现出较好的实时性. NMPC 由于需要在线求解非线性优化问题, 计算量较大, 求解时间波动更明显. LPC 方法的求解时间相较 NMPC 有所降低, 但整体仍高于 LTV-MPC, 实时性不如 LTV-



(a) LTV-MPC



(b) NMPC



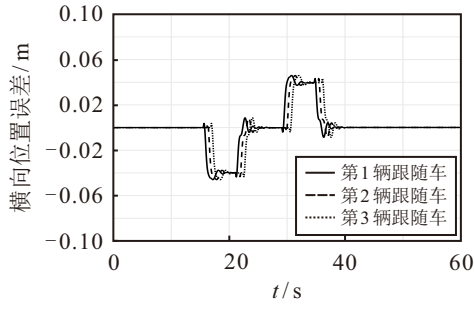
(c) LPC

图6 车队纵向位置误差: (a) LTV-MPC, (b) NMPC, (c) LPC

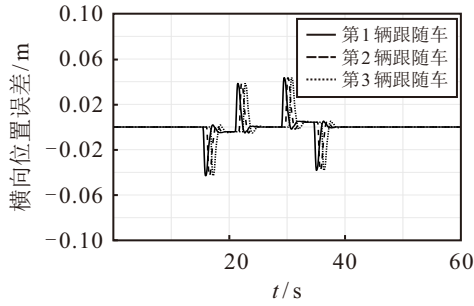
MPC.

为定量评价不同控制方法的跟踪性能, 本文选取均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和最大绝对误差 (Maximum Absolute Error, MaxAE) 作为评价指标. 上述指标数值越小, 表示跟踪误差越小, 控制精度越高. 进一步结合图10中的误差统计指标可以看出, 在 RMSE、MAE 和 MaxAE 指标下, LTV-MPC 与 NMPC 的整体控制精度较为接近, 二者均明显优于 LPC. 其中, NMPC 在部分误差指标上略小, 体现出非线性优化在精度方面的优势; 而 LTV-MPC 在保持接近 NMPC 控制精度的同时, 显著降低了在线优化求解时间.

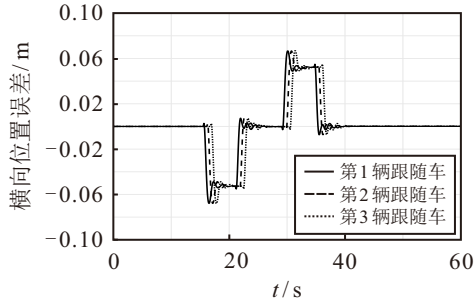
综上所述, NMPC 在部分误差指标上具有一定精度优势, 但其在线计算负担较大; LPC 方法实时性较 NMPC 有所改善, 但控制精度相对不足. 相比之下, LTV-MPC 能够在保证较高跟踪精度的同时显著降低在线计算量, 在控制性能与实时性之间取得了



(a) LTV-MPC



(b) NMPC

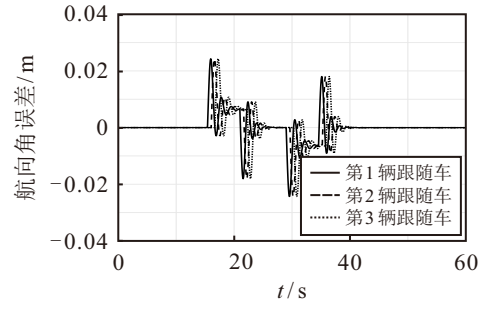


(c) LPC

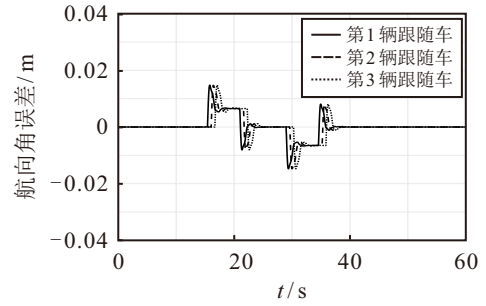
图7 车队横向位置误差: (a) LTV-MPC, (b) NMPC, (c) LPC

较好的平衡。

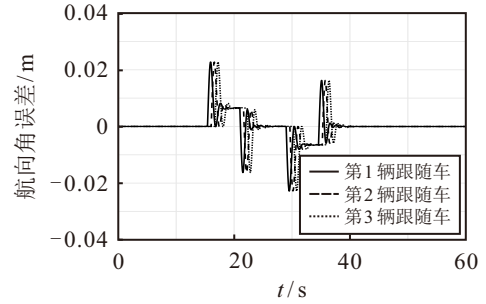
此外, 为了进一步说明 LTV-MPC 方法的适用性, 在不同的初始速度误差和纵向位置误差下进行了蒙特卡洛分析, 并且进行了能量耗散稳定性分析^[22], 统计分析结果如图 11 和图 12 所示。图 11 的结果表明, 车辆的误差分布均满足控制目标, 其中最大纵向速度误差约为 0.22 m/s, 最大横向速度误差约为 0.15 m/s, 车辆最大横摆角速度误差约为 0.02 rad/s。图 12 对车辆的运行状态进行了能量耗散稳定性分析, 图 12(a) 与图 12(b) 的能量耗散分布云图显示, 总能量耗散水平与车辆运行状态强相关: 当纵向速度增大、且横向速度与横摆角速度偏离稳态值时, 能量耗散量显著上升, 系统稳定性裕度降低; 而在车辆稳态工作点附近, 能量耗散维持在较低水平, 是系统的稳定吸引域。图 12(c) 的状态分布结果表明, 车辆状态点均集中分布于低能量耗散的稳定区域内, 未出现状态越界或发散至高耗散不稳定区域的情况, 这证明 LTV-MPC 方法的有效性。



(a) LTV-MPC



(b) NMPC



(c) LPC

图8 车队航向角误差: (a) LTV-MPC, (b) NMPC, (c) LPC

4 总 结

本文针对商用车编队纵横向协同控制中“精度与实时性难以兼顾”的问题, 开展了基于 LTV-MPC 的控制器研究。首先, 构建了融合五自由度车辆动力学、魔术公式轮胎模型与车道保持误差模型的一体化非线性系统, 并通过泰勒展开与前向欧拉法离散化, 在参考轨迹处实现局部线性化, 得到线性时变误差模型。MATLAB/Simulink 与 TruckSim 的联合仿真结果表明, 相较于 NMPC 方法和 LPC 方法, 本文设计的 LTV-MPC 方法可以在保证车辆编队控制性能的同时, 减少了实时计算负担。

需要说明的是, 对于高速大曲率和低道路附着系数的情况下, 车辆在高速行驶时可能会超出道路边界线, 后续研究将进一步考虑复杂道路曲率和不同道路附着系数条件下的控制性能验证, 并结合车辆动力学约束确定安全行驶速度范围。

参考文献 (References)

- [1] Wen S X, Guo G, Zhao Y. Practical prescribed

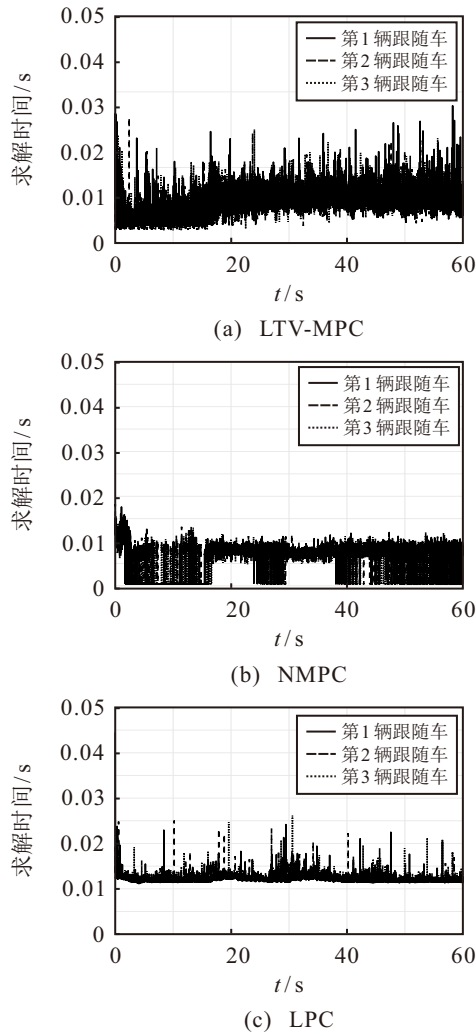


图9 求解时间: (a) LTV-MPC, (b) NMPC, (c) LPC

performance tracking control and optimization for nonlinear vehicular platoon[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, 26(7): 9625-9639.

- [2] Guo G, Zhang X X, Liu Y X, et al. Disturbance observer-based finite-time braking control of vehicular platoons[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(1): 492-500.
- [3] 吴彦宏, 左志强, 王一晶, 等. 基于数据驱动的智能网联车辆队列控制综述[J]. *控制与决策*, 2025, 40(12): 3489-3508.
(Wu Y H, Zuo Z Q, Wang Y J, et al. A survey of data-driven control for connected and autonomous vehicles[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(12): 3489-3508.)
- [4] 杨冬琪, 段洪君, 郭戈, 等. 网联车辆编队节油速度轨迹优化和分布式控制[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(12): 2249-2258.
(Yang D Q, Duan H J, Guo G, et al. Optimizing fuel-saving speed trajectory and distributed control for connected automatic vehicles platoon[J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(12): 2249-2258.)
- [5] Li B B, Zhuang W C, Chen B L, et al. Predictive ecological cooperative control of electric vehicles

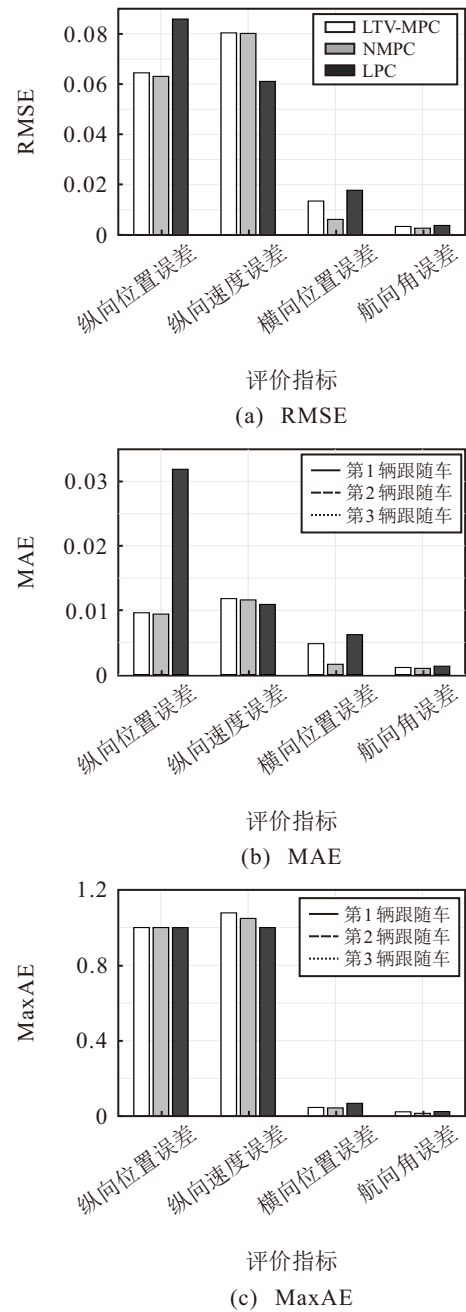
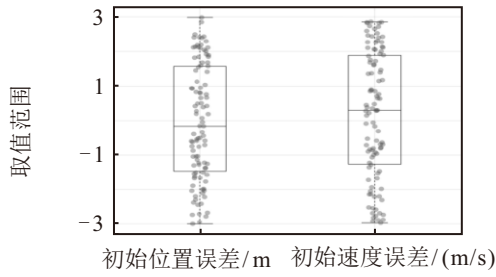


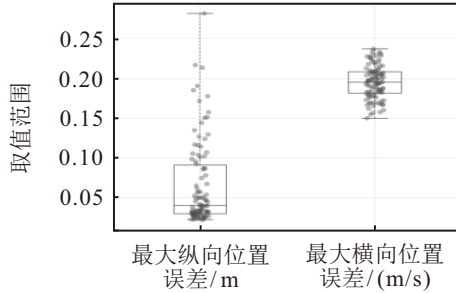
图10 不同方法的性能对比: (a) RMSE, (b) MAE, (c) MaxAE

platoon on hilly roads[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 38(1): 37.

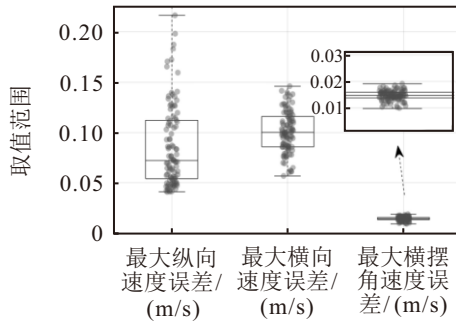
- [6] Zhang P Y, Tian D X, Zhou J S, et al. Efficient robust control of mixed platoon for improving fuel economy and ride comfort[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(9): 12542-12555.
- [7] Garg M, Bouroche M. Longitudinal car-following control of connected autonomous vehicles in realistic scenarios: A survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, 26(11): 18404-18433.
- [8] 李学鋈, 汪怡平, 苏楚奇, 等. 自动驾驶车辆轨迹跟踪非线性鲁棒控制方法[J]. *控制与决策*, 2026, 41(2): 329-338.
(Li X Y, Wang Y P, Su C Q, et al. Nonlinear robust control method for trajectory tracking of autonomous



(a) 初始值取值范围



(b) 纵向位置误差和横向位置误差分布



(c) 纵向速度误差、横向速度误差和横摆角速度误差分布

图 11 蒙特卡洛统计分析: (a) 初始误差取值范围, (b) 纵向位置误差和横向位置误差分布, (c) 纵向速度误差、横向速度误差和横摆角速度误差分布

vehicles[J]. *Control and Decision*, 2026, 41(2): 329-338.)

- [9] 彭鹏, 费致根. 正定拓扑的分布式非线性车辆编队滑模控制[J]. *机械设计与制造*, 2026(2): 180-187.
(Peng P, Fei Z G. Distributed nonlinear vehicle formation sliding mode control with positive definite topology[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2026(2): 180-187.)
- [10] Lu H Y, Lu J W, Wei H, et al. On the non-linear dynamics of vehicle shimmy coupled with handling motions: Modelling, bifurcation analysis, and validations[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023, 29(15/16): 3435-3450.
- [11] Chen Q E, Wang S M, Gao B L, et al. Robust longitudinal and lateral control for mixed-vehicular platoons with string stability guarantees[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2025, 113(20): 27853-27875.
- [12] Rajamani R, Tan H S, Law B K, et al. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000,

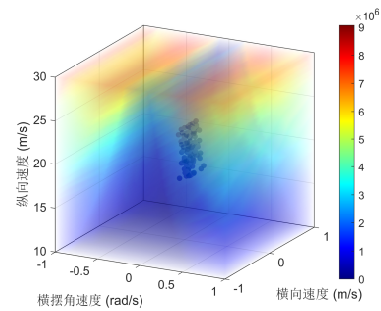
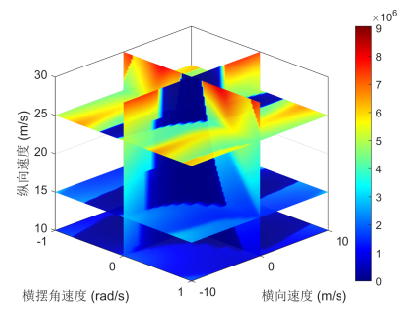
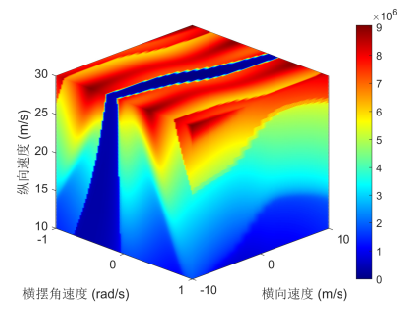


图 12 初始条件空间中总能量耗散量: (a) 耗散量, (b) 总能量耗散量的切片图, (c) 状态分布图

8(4): 695-708.

- [13] Yu X X, Muñoz S, Urda P, et al. Experimental study of the use of a transfer function to find rail corrugation from axle-box accelerations[J]. *Measurement*, 2025, 249: 117058.
- [14] Zhu J, Zhu Y J, Wu M X, et al. Exploring physics-enhanced neural operators for predicting vehicle-bridge dynamics: From 1-DOF to 13-DOF vehicle models[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2026, 629: 119686.
- [15] Gao L T, Xiong L, Xia X, et al. Improved vehicle localization using on-board sensors and vehicle lateral velocity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 6818-6831.
- [16] Chen H, Zhang J Z, Lv C. RHONN modelling-enabled nonlinear predictive control for lateral dynamics stabilization of an in-wheel motor driven vehicle[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(8): 8296-8308.
- [17] Ge L H, Zhao Y, Ma F W, et al. Towards longitudinal and lateral coupling control of autonomous vehicles using offset free MPC[J]. *Control Engineering Practice*, 2022, 121: 105074.
- [18] 张丽霞, 葛吴浥, 潘福全, 等. 车辆变速轨迹跟踪横纵耦合控制方法[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(10): 4174-4181.

- (Zhang L X, Ge W Y, Pan F Q, et al. Lateral and longitudinal coupling integrated control method for vehicle changing speed trajectory tracking[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4174-4181.)
- [19] Li S, Zheng H T, Wang J W, et al. Influence of information flow topology and maximum platoon size on mixed traffic stability[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2025, 171: 104950.
- [20] Pang H, Liu N, Hu C, et al. A practical trajectory tracking control of autonomous vehicles using linear time-varying MPC method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2022, 236(4): 709-723.
- [21] Yu S Y, Liu Z P, Li Y Y, et al. Distributed iterative reinforcement learning predictive control of truck platoons[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2026, 240(6): 3233-3250.
- [22] Meng F Y, Shi S M, Bai M H, et al. Dissipation of

energy analysis approach for vehicle plane motion stability[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2022, 60(12): 4035-4058.

作者简介

孙绍瑜 (2000-), 男, 博士生, 主要研究方向为车辆编队控制、模型预测控制, E-mail: sysun22@mails.jlu.edu.cn;

刘涌翔 (2004-), 男, 本科生, 主要研究方向为车辆稳定性控制, E-mail: liuyx1323@mails.jlu.edu.cn;

张昊毅 (2004-), 男, 本科生, 主要研究方向为模型预测控制, E-mail: hyzhang2223@mails.jlu.edu.cn;

潘旺 (2005-), 男, 本科生, 主要研究方向为强化学习、车辆稳定性控制, E-mail: panwang2024@mails.jlu.edu.cn;

鞠峥 (2005-), 男, 本科生, 主要研究方向为车辆编队控制, E-mail: juzheng9923@mails.jlu.edu.cn;

于树友 (1974-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为预测控制、鲁棒控制、预测控制与鲁棒控制在机电系统中的应用, E-mail: shuyou@jlu.edu.cn.