

# 基于分布式模型预测的商用车队列避障控制

李文博<sup>1</sup>, 谢华城<sup>1</sup>, 于树友<sup>1,2</sup>, 林宝君<sup>1</sup>, 陈虹<sup>1,3</sup>

(1. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022; 2. 重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065; 3. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对商用车队列避障控制问题, 提出了上层轨迹规划和下层轨迹跟踪的分层控制方法。在上层中, 设计了基于滚动时域优化的领航车轨迹规划方法, 其中利用粒子滤波算法将求解优化问题转化为概率估计问题, 提高了求解效率。在下层中, 针对商用车横纵耦合动力学非线性强的特性, 本文设计了基于纵横一体化动力学模型的分布式模型预测控制器, 提高了控制精度。TruckSim 和 Matlab/Simulink 的仿联合仿真结果表明: 设计的双层控制架构能够保证车辆编队实现避障行驶; 在多种道路场景下, 所设计的分布式模型预测控制器可以有效跟踪规划轨迹。

**关键词:** 控制理论与控制工程; 商用车队列; 避障控制; 模型预测控制; 车辆耦合特性

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0247-10

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240678

## Obstacle avoidance control for truck platoon using distributed model predictive control

LI Wen-bo<sup>1</sup>, XIE Hua-cheng<sup>1</sup>, YU Shu-you<sup>1,2</sup>, LIN Bao-jun<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>1,3</sup>

(1. College of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. The Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 3. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** For the obstacle avoidance control problem of truck platoons, this paper proposes a hierarchical control method with upper-layer trajectory planning and lower-layer trajectory tracking. In the upper layer, a leader truck trajectory planning method based on model predictive control is designed using a particle filter algorithm, which transforms the optimization problem into a probabilistic estimation problem, thereby improving the solution efficiency. In the lower layer, considering the strong nonlinearity of the coupled longitudinal and lateral dynamics of trucks, a distributed model predictive controller based on an integrated longitudinal-lateral dynamics model is developed to enhance control accuracy. Co-simulation results using

收稿日期: 2024-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62473167); 吉林省自然科学基金项目(20240402079GH); 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室开放基金项目(2019FF01).

作者简介: 李文博(1997-), 男, 博士研究生. 研究方向: 多车协同控制, 分布式预测控制.

E-mail: liwb21@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 林宝君(1974-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 数控系统, 可编程逻辑控制器, 电机调速及其在机电系统中的应用. E-mail: linbj@jlu.edu.cn

TruckSim and Matlab/Simulink demonstrate that the designed two-layer control architecture ensures obstacle-avoidance driving for truck platoons, and in various road scenarios, the proposed distributed model predictive controller effectively tracks the planned trajectory.

**Key words:** control theory and control engineering; truck platoon; obstacle avoidance control; model predictive control; vehicle coupling characteristic

## 0 引言

车辆队列可以有效减少交通拥堵和提高交通运输效率,从而降低能源消耗和减轻环境污染<sup>[1,2]</sup>。根据车辆动力学模型的复杂程度,车辆模型可以分为纵向建模、纵向和横向独立建模,以及纵向和横向耦合动力学模型。在车辆的纵向动力学建模中,常用的模型有:一阶质点模型、二阶质点模型、三阶质点模型<sup>[3,4]</sup>。三阶质点模型不仅考虑了车辆的位置、速度和加速度信息,还考虑了发动机的输入输出特性,常用于队列在纵向运动的行驶问题<sup>[5]</sup>。文献[6]提出纵向和横向车辆模型相结合的跟踪控制方法,设计了一种基于协同自适应的巡航控制器,在满足车辆间距策略要求的同时,能够补偿车辆的过弯行为。文献[7]建立了解耦的纵向和横向车辆队列模型,设计预测控制器来保证车辆队列在弯道路面上的纵向跟随性和操纵稳定性。文献[8]考虑非线性动力学模型,在弯道情况下验证了该方法的控制效果,但未考虑轮胎的非线性特性和轮胎在不同道路附着系数下的变化特性。

车辆的纵向运动和横向运动相互耦合,为建立准确的车辆动力学模型,需要充分考虑车辆的纵横耦合特性,如常用的车辆运动学模型、3自由度和5自由度动力学模型等。文献[9]基于3自由度车辆动力学模型,通过博弈论设计耦合控制器,该耦合控制器使自动驾驶车辆能在高速公路的出入口和转弯场景有效跟踪期望轨迹。

对于乘用车队列,一部分方法采用PID控制器,另一部分方法基于二阶或三阶线性模型设计纵向控制器,横向则基于二阶线性自行车模型设计转向控制器,并取得了较好的控制效果。然而,对于商用车编队,由于车辆具有质心高、质量大、横纵动力学耦合特性强等特点,其车辆系统模型表现出明显的非线性。乘用车队列开发的控制器无法保证商用车编队的安全行驶,需要基于车辆高自由度非线性模型开发控制器<sup>[10]</sup>。文献[11]建立考虑车辆前后轮胎转动角速度的5自由度动

力学模型,分别用线性和非线性轮胎对商用车队列稳定性进行分析,指出车辆的耦合特性会对高速行驶队列的操纵稳定性产生影响。在弯曲道路上,为保证车辆队列安全行驶,不仅需要纵向控制,还需要横向控制<sup>[12,13]</sup>。文献[14]提出一种分层控制策略,上层为反馈线性化控制器,基于反馈线性化方法简化三阶质点模型,下层控制为双向比例微分控制器。文献[15]采用分层控制器设计框架,上层为反馈线性化控制器,下层为 $H_\infty$ 控制器,进一步提高了鲁棒性。车辆队列横向控制方法通常分为前车路径跟随和车道跟随方法<sup>[16,17]</sup>。前车路径跟随方法中,文献[17]提出纵向和横向一体化控制方案,设计了一个受串稳定性约束的线性控制器实现纵向速度跟踪,采用线性时变模型预测控制实现与前车的路径跟踪。车道跟随方法中,需要车道线确定车辆的横向位置。文献[18]提出了一种纵向和横向的解耦控制策略,横向动力学模型中考虑了车道保持,使车辆队列行驶在车道内。文献[19]采用双层PID转向控制器跟踪道路中心线,未考虑纵向速度的变化对跟踪控制的影响。

在商用车队列路径跟随中,当道路情况发生改变,仅有控制层,无法满足控制需求,而规划层能结合道路环境信息,重新规划出参考路径。文献[20]采用5自由度车辆运动学模型,换道轨迹基于五阶多项式,设计了车队换道场景下的分布式模型预测控制器,保证纵向运动一致性及渐近稳定性的结果,但道路曲率为零的假设限制了驾驶场景。在路径规划算法中,Dijkstra算法用于寻找最短路径。基于图搜索的方法容易陷入局部最优。随机采样算法(如RRT和PRM)能够有效应用于高维状态空间,但其主要缺点在于求解效率较低,且所得到的解往往具有随机性并非最优。非线性模型预测控制(Nonlinear model predictive control, NMPC)结合预测模型和滚动优化,根据系统动态特性和约束条件进行路径规划。尽管NMPC能够在理论上实现最优性能,但在处理高

维空间或高度非线性系统及非线性约束时,其计算复杂度显著增加。为应对此类问题,文献[21]基于车辆运动学模型提出了一种粒子滤波模型预测控制算法,以实现车辆路径跟踪。然而,该算法未充分考虑车辆的动力学特性,存在一定的局限性。

综上所述,本文针对目前算法的不足,设计了考虑规划层的商用车队列纵横耦合控制,并进行了仿真验证,结果表明本文方法安全有效。

## 1 队列建模

假设商用车队列由 1 辆领航车和  $N$  辆跟随车组成,其中领航车用 0 表示,跟随车分别表示为 1, 2, ...,  $N$ 。队列中领航车由驾驶员驾驶,跟随车自动驾驶。

本节首先建立了车辆运动学模型、3 自由度动力学模型、轮胎模型和车道保持模型。其次,介绍队列通信拓扑和几何结构。最后,给出队列控制目标。

### 1.1 运动学模型

建立车辆运动学模型如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{v} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \varphi \\ v \sin \varphi \\ a \\ v \tan \delta / l \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $x$ 和 $y$ 分别为纵向和横向位置; $v$ 和 $a$ 分别为速度和加速度; $\varphi$ 为横摆角; $\delta$ 为前轮转角; $l$ 为车辆前后轴之间的距离。

定义状态量  $\eta_r = [x, y, v, \varphi]^T$ , 控制量  $u_r = [a, \delta]^T$ , 输出  $y_r = [x, y, v, \varphi]^T$ , 采用欧拉离散法将式(1)写为:

$$\begin{cases} \eta_r(k+1) = \bar{f}(\eta_r(k), u_r(k)) \\ y_r(k) = \eta_r(k) \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 动力学模型

建立第  $i$  辆车的纵横耦合动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_i^x = v_i^y \dot{\varphi}_i + \frac{1}{m_i} (2F_i^{xf} - 2F_i^{yf} + 2F_i^{xr} - F_{\text{dissp}}) \\ \dot{v}_i^y = -v_i^x \dot{\varphi}_i + \frac{1}{m_i} (2F_i^{yf} + 2F_i^{yr}) \\ \ddot{\varphi}_i = \frac{1}{I_i^z} (l_{i,i} 2F_i^{yf} - l_{r,i} 2F_i^{yr}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v_i^x$ 和 $v_i^y$ 分别为第  $i$  辆车的纵向和横向速度; $\dot{\varphi}_i$ 为横摆角速度; $m_i$ 为车的总质量; $l_{i,i}$ 和 $l_{r,i}$ 分别

为车辆质心到前轴和后轴的距离; $I_i^z$ 为转动惯量; $F_i^{xf}$ 和 $F_i^{xr}$ 分别为前轮和后轮纵向力; $F_i^{yf}$ 和 $F_i^{yr}$ 分别为前轮和后轮侧向力; $F_{\text{dissp}}$ 为车辆在纵向上受到阻力的合力。

引入车轮转动自由度,轮胎模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_i^f = \frac{T_i^d - R_e F_i^{xf}}{J_i^f} \\ \dot{\omega}_i^r = \frac{T_i^d - R_e F_i^{xr}}{J_i^r} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\omega_i^f$ 和 $\omega_i^r$ 分别为前、后轮角速度; $J_i^f$ 和 $J_i^r$ 分别为前、后轮转动惯量; $R_e$ 为车轮转动半径; $T_i^d$ 为整车力矩。

轮胎纵横向动力学采用 Pacejka 模型表示为:

$$\begin{cases} F_i^x = D^x \times \\ \sin \left( C^x \arctan \left( B^x \kappa_i - E^x \left[ B^x \kappa_i - \arctan(B^x \kappa_i) \right] \right) \right) \\ F_i^y = D^y \times \\ \sin \left( C^y \arctan \left( B^y \alpha_i - E^y \left[ B^y \alpha_i - \arctan(B^y \alpha_i) \right] \right) \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 分别为刚度、形状、峰值、曲率因子,由轮胎的垂向载荷和外倾角共同确定; $\alpha$ 为轮胎滑移率; $\kappa$ 为轮胎滑移率。

前后轮侧偏角定义为:

$$\begin{cases} \alpha_i = \delta_i - \frac{v_i^y + l_{i,i} \dot{\varphi}_i}{v_i^x} \\ \alpha_r = \frac{l_{r,i} \dot{\varphi}_i - v_i^y}{v_i^x} \end{cases} \quad (6)$$

轮胎滑移率的计算如下:

$$\begin{cases} \kappa_i^f = \frac{\omega_i^f R_e - v_i^x}{\max(|\omega_i^f R_e|, |v_i^x|)} \\ \kappa_i^r = \frac{\omega_i^r R_e - v_i^x}{\max(|\omega_i^r R_e|, |v_i^x|)} \end{cases} \quad (7)$$

同一轮胎在不同道路附着系数下 Pacejka 轮胎模型参数不同,式(8)表明不同道路附着系数对应 Pacejka 轮胎参数关系<sup>[22]</sup>。

$$\begin{cases} B_{0.35} = \frac{2 - \mu_{0.35}}{2 - \mu_{0.85}} B_{0.85}, C_{0.35} = \frac{5 - \mu_{0.35}}{5 - \mu_{0.85}} C_{0.85} \\ D_{0.35} = \frac{\mu_{0.35}}{\mu_{0.85}} D_{0.85}, E_{0.35} = E_{0.85} \end{cases} \quad (8)$$

### 1.3 车道保持模型

定义车辆与规划路径的横向位置误差和车辆偏航角误差:

$$\begin{cases} \dot{e}_i^y = v_i^x e_i^e - v_i^y - L\dot{\phi}_i \\ \dot{e}_i^e = \dot{\phi}_{i,des} - \dot{\phi}_i \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $e_i^y$  为预瞄点与车道中心线的横向偏差;  $L$  为预瞄距离;  $e_i^e$  为车辆行驶方向与预瞄点处道路切线之间航向角误差;  $\dot{\phi}_{i,des}$  为期望横摆角速度,  $\dot{\phi}_{i,des} = v_i^x/R$ , 其中  $R$  为时变的道路曲率半径。

### 1.4 通信拓扑及队列几何结构

本文采用前车跟随通信拓扑结构和恒定时距策略<sup>[11]</sup>。车辆期望车间距随着被控车辆速度的变化进行调整:

$$x_{i,des} = hv_i^x + d_0 \quad (10)$$

式中:  $d_0$  为静止时车辆间的安全距离;  $h$  为固定时距, 即车辆  $i$  在匀速行驶时, 通过与前车  $i-1$  之间距离的时间。

### 1.5 队列控制目标

采用前车跟随策略, 第  $i$  辆车与前车的纵向位置误差定义如下<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} x_r = x_{i-1} - x_i \\ x_{i,e} = x_r - x_{i,des} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $x_r$  为相邻两车之间的车间距离。

第  $i$  辆车与前车的纵向速度误差的定义如下:

$$v_{i,e}^x = v_i^x - v_{i-1}^x - hv_i^x \quad (12)$$

因此, 队列纵向控制目标表示为:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_{i,e}^x(t)\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_{i,e}(t)\| = 0 \end{cases} \quad (13)$$

横向控制目标为队列沿车道中心线行驶, 即:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_i^y(k)\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_i^e(k)\| = 0 \end{cases} \quad (14)$$

## 2 控制策略

车辆队列的纵向控制已经受到广泛关注, 其控制目标如式(13)所示, 大多数研究采用跟踪预定义的横向车道线。如图 1 所示, 针对车辆队列的避障控制问题, 本文提出了一种基于领航车轨迹规划和分布式模型预测的分层控制方法。该方法的特点在于, 上层由领航车规划避障轨迹并输出横向参考信号, 作为下层规划的可行轨迹; 下层通过分布式控制在纵向上跟踪前车, 在横向上跟踪参考信号。通过将多车防碰撞的轨迹规划分解为领航车的轨迹规划问题, 能够有效保障行驶安

全性。在规划层采用较低精度的模型而在控制层采用较高精度的模型, 能够较好地兼顾控制性能和计算速度<sup>[23]</sup>。

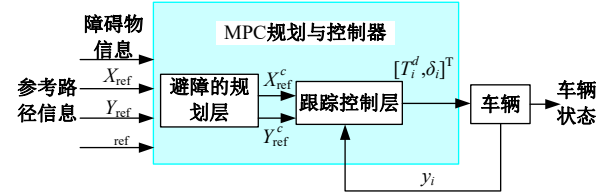


图 1 路径跟踪控制系统

Fig. 1 Path tracking control system

### 2.1 上层路径规划

设计目标函数为:

$$J(\eta_r(k), U_r(k)) =$$

$$\sum_{i=0}^{H_r} \left\| \eta_r(k+i|k) - \eta_{ref}(k+i|k) \right\|_{Q_r}^2 + \left\| u_r(k+i|k) \right\|_{R_r}^2 \quad (15)$$

式中:  $Q_r$  和  $R_r$  分别为状态量和控制量的权重矩阵;  $\eta_{ref}$  为全局参考路径;  $H_r$  为预测步长。

进而设计路径规划层的优化问题如下所示。

优化问题 1:

$$\underset{\eta_r}{\text{minimize}} J(\eta_r(k), U_r(k))$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \eta_r(k|k) = \eta_r(k) \\ \eta_r(k+1|k) = \bar{f}(\eta_r(k|k), u_r(k|k)) \\ y_r(k|k) = \eta_r(k|k) \\ d(k|k) - D_0 \geq 0 \\ \delta_{\min} \leq \delta(k|k) \leq \delta_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\delta_{\min}$  和  $\delta_{\max}$  分别为前轮转角最小值和最大值;  $D_0$  表示以几何中心  $(x_0, y_0)$  为圆心的防碰撞距离, 车辆与障碍物的距离为:

$$d(k|k) = \sqrt{(x(k|k) - x_0(k))^2 + (y(k|k) - y_0(k))^2} \quad (17)$$

式中:  $x_0$  和  $y_0$  分别为障碍物几何中心的纵向和横向位置; 粒子滤波算法是一种序列蒙特卡洛采样方法, 从贝叶斯估计的角度出发, 将优化问题 1 转化为一个概率密度函数的估计问题, 并利用一组样本(或称粒子)近似这一概率密度函数, 能有效处理非线性系统中的状态估计问题<sup>[24]</sup>。

将优化问题 1 中的约束转化为下式:

$$s(k|k) \geq 0 \triangleq \begin{cases} d(k|k) - D_o \geq 0 \\ \delta(k|k) - \delta_{\min} \geq 0 \\ \delta_{\max} - \delta(k|k) \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

本文选择 Softplus 函数作为避障功能函数:

$$\phi(s) = \frac{1}{\alpha} \ln(1 + \exp(\beta \cdot s)) \quad (19)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  为调节约束违背对粒子权值影响的参数;  $s$  为车辆与障碍物间距离。设存在高斯分布  $N(0, \sigma^2)$ , 将 Softplus 函数的输出作为该高斯分布的输入, 当  $s > 0$  时, Softplus 的值为 0, 此时高斯分布的输出达到最大值, 粒子的有效概率较大, 当  $s < 0$  时, 粒子有效的概率小。

粒子滤波算法流程如下:

Step 1 设系统(2)存在噪声扰动  $w$  和  $m$ , 且满足齐次马尔科夫假设和独立观测假设<sup>[24]</sup>。将系统(2)写成以下形式:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_r = \bar{f}_i(\eta_r, u_r, w) \\ y_r = (\eta_r, m) \end{cases} \quad (20)$$

系统状态  $\eta_{r,k}$  在  $k$  时刻的最优估计可由以下条件均值给出:

$$E(\eta_{r,k}) = \int \eta_{r,k} p(\eta_{r,k} | y_{r,1:k}) d\eta_{r,k} \quad (21)$$

Step 2 因无法直接求得式(21)中概率密度函数  $p(\eta_{r,k} | y_{r,1:k})$  的解析解, 引入蒙特卡洛采样, 通过蒙特卡洛采样代替计算后验概率密度, 即:

$$p(\eta_{r,k} | y_{r,1:k}) \approx \hat{p}(\eta_{r,k} | y_{r,1:k}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(\eta_{r,k} - \eta_{r,k}^i) \quad (22)$$

式中:  $\delta(\eta_{r,k} - \eta_{r,k}^i)$  为狄拉克函数;  $\eta_{r,k}^i$  为系统  $k$  时刻第  $i$  个采样粒子的状态值,  $i = 1, 2, \dots, \tilde{N}$ , 总计  $\tilde{N}$  个采样粒子。

Step 3 式(22)中无法直接对概率密度  $p(\eta_{r,k} | y_{r,1:k})$  进行采样, 需要引入重要性采样  $q(\eta_{r,k} | y_{r,1:k})$ , 此时系统状态估计如下:

$$E(\eta_{r,k}) = \int \eta_{r,k} \frac{\tilde{w}_k(\eta_{r,k})}{p(y_{r,1:k})} q(\eta_{r,k} | y_{r,1:k}) d\eta_{r,k} \quad (23)$$

其中, 权重为:

$$\tilde{w}_k(\eta_k) = \frac{p(y_{1:k} | \eta_k) p(\eta_{r,k})}{q(\eta_k | y_{1:k})} \propto \frac{p(\eta_{r,k} | y_{r,1:k})}{q(\eta_{r,k} | y_{r,1:k})} \quad (24)$$

式中: 符号  $\propto$  的含义为符号两侧成比例关系。

此外:

$$p(y_{1:k}) = \int p(y_{1:k} | \eta_k) p(\eta_{r,k}) d\eta_k \quad (25)$$

则式(23)改写为:

$$E(\eta_{r,k}) = \frac{\int \eta_k \tilde{w}_k(\eta_k) q(\eta_k | y_{1:k}) d\eta_k}{\int \tilde{w}_k(\eta_k) q(\eta_k | y_{1:k}) d\eta_k} \quad (26)$$

因此, 结合蒙特卡洛法, 将式(20)改写为:

$$E(\eta_{r,k}) = \frac{\frac{1}{\tilde{N}} \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \eta_{r,k}^i \tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)}{\frac{1}{\tilde{N}} \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)} = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \omega_k(\eta_{r,k}^i) \quad (27)$$

式中:  $\omega_k(\eta_{r,k}^i)$  为  $\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)$  归一化结果, 即:

$$\omega_k(\eta_{r,k}^i) = \frac{\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)}{\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)} \quad (28)$$

Step 4 由式(27)可知, 求状态估计转为求粒子的权重  $\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)$ , 为降低求解复杂度, 引入顺序重要性采样, 求得不同时刻粒子权重之间的递推关系。将粒子权重表达式进行转化<sup>[25]</sup>:

$$\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i) \propto \frac{p(\eta_{r,1:k}^i | y_{r,1:k})}{q(\eta_{r,1:k}^i | y_{r,1:k})} \quad (29)$$

式中:

$$\begin{cases} p(\eta_{r,1:k}^i | y_{r,1:k}) \propto p(y_{r,k} | \eta_{r,k}^i) p(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i) \times \\ \quad p(\eta_{r,1:k-1}^i | y_{r,1:k-1}) \\ q(\eta_{r,1:k}^i | y_{r,1:k}) = q(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i, y_{r,1:k-1}) \times \\ \quad q(\eta_{r,1:k-1}^i | y_{r,1:k-1}) \end{cases} \quad (30)$$

结合式(29)和式(30),  $k$  时刻和  $k-1$  时刻的粒子权重关系如下:

$$\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i) \propto \frac{p(y_{r,k} | \eta_{r,k}^i) p(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i)}{q(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i, y_{r,1:k-1})} \tilde{w}_{k-1}(\eta_{r,k-1}^i) \quad (31)$$

式中: 概率密度  $p(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i)$  通过式(20)的状态转移函数获得; 概率密度  $p(y_{r,k} | \eta_{r,k}^i)$  通过式(20)的测量函数获得;  $q(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i, y_{r,1:k-1})$  为重要性分布一部分, 选定为  $q(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i, y_{r,1:k-1}) = p(\eta_{r,k}^i | \eta_{r,k-1}^i)^{[20]}$ 。此时权重更新式(31)改写为如下形式:

$$\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i) \propto p(y_{r,k} | \eta_{r,k}^i) \tilde{w}_{k-1}(\eta_{r,k-1}^i) \quad (32)$$

Step 5 在 NMPC 中, 需要同时考虑对状态量和控制量的估计, 因此, 将概率密度  $p(\eta_{r,1:k} | y_{r,1:k})$  扩展为  $p(\eta_{r,1:k}, u_{r,1:k} | y_{r,1:k})$ 。

根据贝叶斯规则,将概率密度化简:

$$p(\eta_{r,1:k}, u_{r,1:k} | y_{r,1:k}) \propto \prod_{t=1}^k p(y_{r,t} | \eta_{r,t}) \times p(u_{r,t}) \quad (33)$$

当  $p(y_{r,t} | \eta_{r,t})$  服从分布  $N(\eta_{r,t}, Q_{Bayes}^{-1})$ ,  $p(u_{r,t})$  服从分布  $N(0, R_{Bayes}^{-1})$  时,对式(27)进行最大似然估计:

$$\begin{aligned} \max_{x_{1:k}, u_{1:k}} \log(p(\eta_{1:k}, u_{1:k} | y_{1:k})) &\propto \\ \min \left( \sum_{t=1}^k \|y_{r,t} - \eta_{r,t}\|_{Q_{Bayes}}^2 + \|u_{r,t}\|_{R_{Bayes}}^2 \right) &\quad (34) \end{aligned}$$

通过选择相应的权重  $Q_{Bayes}$  和  $R_{Bayes}$ ,实现概率密度与 NMPC 中的代价函数(16)关联。

说明 1:本文设计了基于粒子滤波算法的上层轨迹规划模块,将优化问题的求解转化为概率估计问题,从而降低了求解难度。这为商用车编队的避障控制提供了新的思路。本文未对现有的轨迹规划方法进行综合比较。

## 2.2 下层轨迹跟踪控制器设计

针对车辆编队协同控制,充分考虑车辆平面运动的非线性特性,建立了由 3 自由度车身动力学模型(3)、车轮旋转动力学模型(4)、轮胎侧偏和滑移非线性动力学模型(5)、车道保持模型(9)和跟车模型(12)组成的纵横向一体化模型。

$$\begin{cases} \dot{v}_i^x = v_i^y \dot{\phi}_i + \frac{1}{m_i} (2F_i^{xl} - 2F_i^{yl} + 2F_i^{xr} - F_{dissp}) \\ \dot{v}_i^y = -v_i^x \dot{\phi}_i + \frac{1}{m_i} (2F_i^{yl} + 2F_i^{yr}) \\ \ddot{\phi}_i = \frac{1}{I_i^z} (l_{i,i} 2F_i^{yl} - l_{r,i} 2F_i^{yr}) \\ \dot{w}_i^l = \frac{T_i^d - R_e F_i^{xl}}{J_i^l}, \dot{w}_i^r = \frac{T_i^d - R_e F_i^{xr}}{J_i^r} \\ \dot{x}_{i,e} = v_i^x - v_{i-1}^x - h \dot{v}_i^x \\ \dot{e}_i^y = v_i^x e_i^e - v_i^y - L \dot{\phi}_i, \dot{e}_i^e = \dot{\phi}_{i,des} - \dot{\phi}_i \end{cases} \quad (35)$$

定义状态量  $x_i = [v_i^x, v_i^y, \dot{\phi}_i, w_i^l, w_i^r, x_{i,e}, e_i^y, e_i^e]^T$ , 控制量  $u_i = [T_i^d, \delta_i]^T$ , 输出量  $y_i = [v_i^x, x_{i,e}, e_i^y, e_i^e]^T$ , 通过欧拉离散法将系统(20)写为如下形式:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = \hat{f}_i(x_i(k), u_i(k)) \\ y_i(k) = C_i x_i(k) \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $C_i = \text{diag}(1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1)$ 。

说明 2:本文仅考虑了平面运动下的车辆 3 自

由度车身动力学,并进一步结合了车辆轮胎的非线性动力学。对于车辆在非平坦路面上的俯仰运动和侧倾运动不在本文的研究范围内。因此,3 自由度车身动力学已能够满足本文的控制需求。

通过规划层输出的避障路径,定义系统(36)的期望输出为:

$$y_{i,des}(k) = [v_{i,des}^x(k), x_{i,e,des}(k), e_{i,des}^y(k), e_{i,des}^e(k)]^T \quad (37)$$

式中:  $v_{i,des}^x(k)$  为期望纵向速度;  $x_{i,e,des}(k)$  为第  $i$  辆车期望纵向位置误差;  $e_{i,des}^y(k)$  为期望的车辆横向位置误差;  $e_{i,des}^e(k)$  为期望的航向角误差;  $x_{i,e,des}(k)$ ,  $e_{i,des}^y(k)$  和  $e_{i,des}^e(k)$  期望值均为 0。

在前车跟随通信拓扑结构和恒定时距策略下,期望纵向速度如下:

$$v_{i,des}^x = v_{i-1}^x - h \dot{v}_i^x \quad (38)$$

定义第  $i$  辆跟随车的实际与期望输出的误差:

$$e_i(k) = y_i(k) - y_{i,des}(k) \quad (39)$$

定义代价函数为:

$$J_i(e_i(k), U_i(k)) = \sum_{j=0}^{H_p} \|e_i(k+j|k)\|_{Q_i}^2 + \|u_i(k+j|k)\|_{R_i}^2 \quad (40)$$

式中:  $Q_i$  和  $R_i$  为正定对称加权矩阵;  $H_p$  为预测时域。

商用车队列纵横向耦合控制的优化问题如下:

优化问题 2:

$$\begin{aligned} &\underset{U_i(k)}{\text{minimize}} J_i(e_i(k), U_i(k)) \\ &\text{s.t.} \begin{cases} x_i(k+j+1|k) = \hat{f}_i(x_i(k+j|k), u_i(k+j|k)) \\ y_i(k+j|k) = C_i x_i(k+j|k) \\ T_{i,\min}^d \leq T_i^d(k+j|k) \leq T_{i,\max}^d \\ \delta_{i,\min} \leq \delta_i(k+j|k) \leq \delta_{i,\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (41)$$

式中:  $\delta_{i,\min}$  和  $\delta_{i,\max}$  分别为最小和最大前轮转角约束;  $T_{i,\min}^d$  和  $T_{i,\max}^d$  分别为最小和最大力矩约束。

说明 3:本文提出的分层控制器探索了头车避障规划在车辆队列协同控制中的可行性问题。在规划层中未考虑车辆编队纵向跟随的渐近一致性。采用纵横向一体化模型(36),文献[25]提出了一种基于 Koopman 算子的车辆编队分布式预测控制器,可以保证车辆编队的纵向跟踪一致性。由于篇幅限制,本文未对此方法进行进一步讨论。

### 3 仿真实验

搭建由 TruckSim 和 Matlab/Simulink 组成的联合仿真平台。本文采用的商用车车身参数。如下： $m_i=18\ 000\text{ kg}$ ； $I_i^c=130\ 421.8\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ； $l_i^f=3.5\text{ m}$ ； $l_i^r=1.5\text{ m}$ ； $L_i^H=2.4\text{ m}$ 。规划层和控制层参数如表 1 所示。

表 1 控制器参数

Table 1 Parameters of controller

参数	数值/单位	参数	数值/单位
$H_r$	5	$\delta_{\max}$	$35^\circ$
$T_r$	0.1 s	$\tilde{N}$	8
$Q_r$	diag(100, 100, 0, 0)	$\alpha$	5
$R_r$	diag(10, 100)	$\beta$	3
$\delta_{\min}$	$-35^\circ$	$T_{i,\min}^d$	$-5\ 000\text{ N}\cdot\text{m}$
$Q_i$	$10^5\text{diag}(10, 20, 10, 130)$	$H_p$	22
$R_i$	diag( $10^7, 10^{-2}$ )	$T_s$	0.01 s

工况 1: 弯道由道路曲率  $\pm 0.004(1/\text{m})$  的两段弧长组成, 道路附着系数为 0.85, 车辆初始速度为 20 m/s, 纵向位置 490 m, 横向位置 42 m 处存在障碍物。

工况 1 路径规划结果如图 2 所示。蓝色虚线

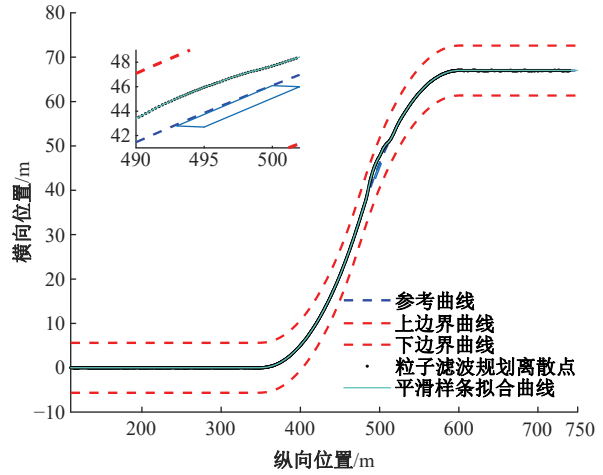
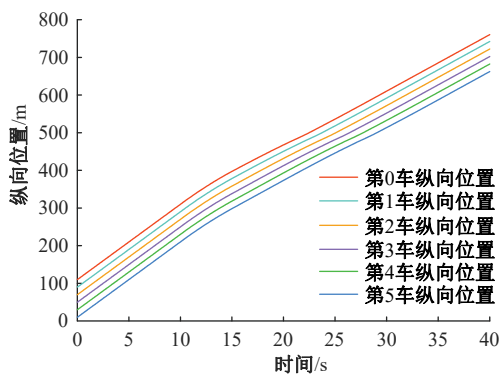


图 2 工况 1 路径规划结果

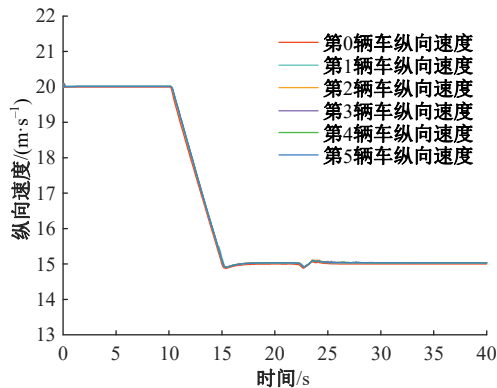
Fig. 2 Path planning results of working case 1

为中间车道的道路中心线, 即参考路径(彩图参见电子版, 以下同)。以参考路径为中心, 红色虚线为三车道的道路边界线( $\pm 5.625\text{ m}$ )。蓝色方块为停靠的事故车辆, 绿色曲线为粒子滤波规划曲线。路径规划层和车辆控制层的采样时间不一致, 且规划路径为离散点, 为将该离散点平滑处理为曲线, 采用 Matlab 中的拟合工具箱平滑样条法, 浅蓝色曲线为拟合结果。深红色箭头表示障碍物与拟合路径的最近距离 1.44 m。

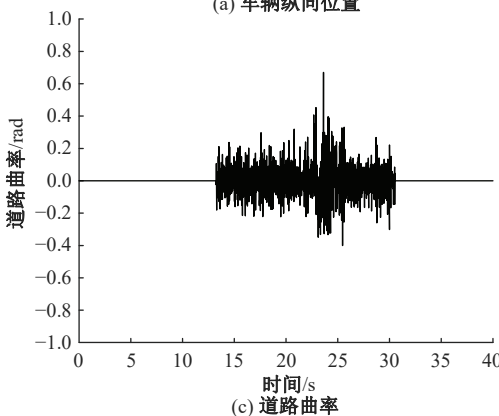
工况 1 队列跟踪规划路径的仿真结果如图 3



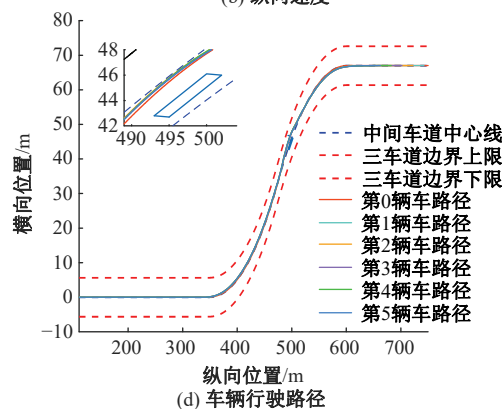
(a) 车辆纵向位置



(b) 纵向速度



(c) 道路曲率



(d) 车辆行驶路径

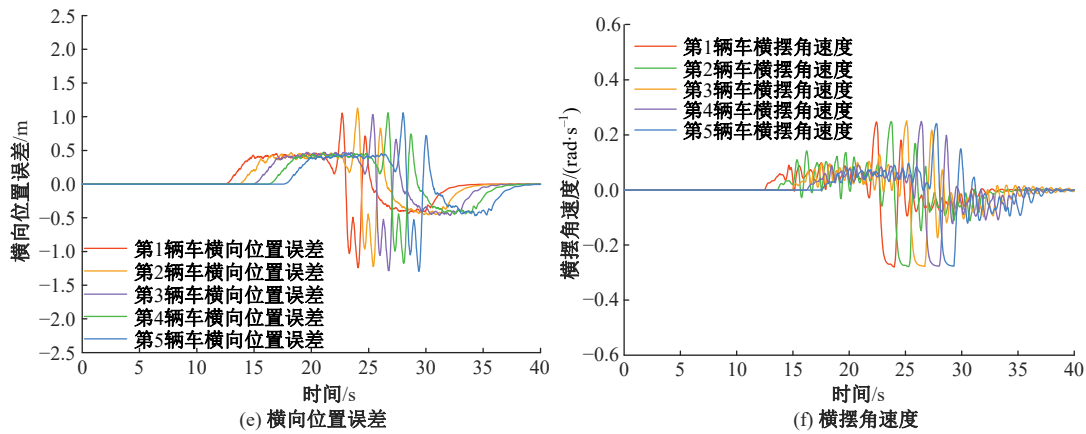


图3 工况1仿真结果

Fig. 3 Simulation results of case 1

所示。车辆纵向位置如图 3(a)所示,领航车路径颜色曲线为红色,跟随车路径为其余颜色的曲线。在图 3(b)纵向速度中,当领航车车速由 20 m/s 下降至 15 m/s 时,跟随车车速存在较小波动,但仍能跟踪领航车纵向速度。在图 3(c)道路曲率中,弯道处曲率变化由不同采样时刻计算得到,因此,道路曲率不断变化。由图 3(d)车辆行驶路径可知,所有跟随车沿规划路径行驶,同时领航车与跟随车均远离蓝色方框障碍物,考虑车辆宽度 2.4 m,跟随车辆与障碍物的最近距离相隔约 0.24 m,满足安全约束。在图 3(e)横向位置误差中,队列中 5 辆跟随车均行驶在车道线内,最大横向位置误差约 1.2 m。在图 3(f)横摆角速度中,最大横摆角速度约为 0.25 rad/s。

工况 2: 弯道由道路曲率为  $\pm 0.008(1/m)$  的两段弧长组成,车辆初始速度 20 m/s,纵向位置 450 m、横向位置 43 m 处存在障碍物。突发下雨时,雨水与路面上的尘土会形成黏度高的水液,滚动的轮胎无法及时将水液排出,路面附着系数会迅速降低<sup>[26]</sup>。考虑这一情况,设置道路附着系数

为 0.35。

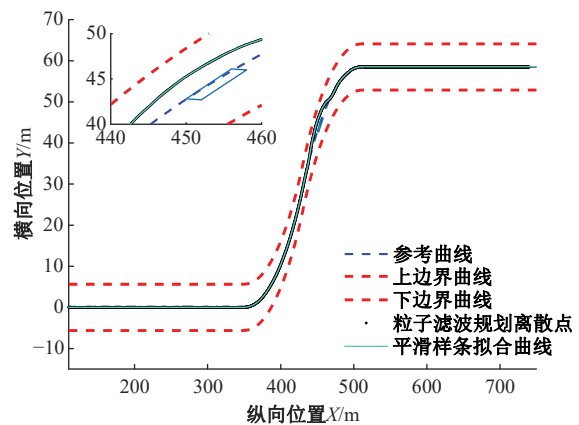
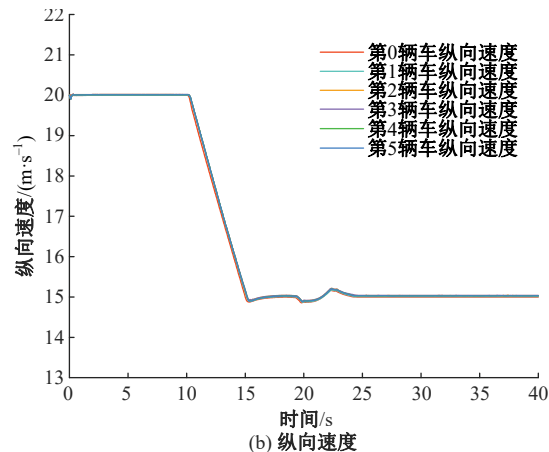
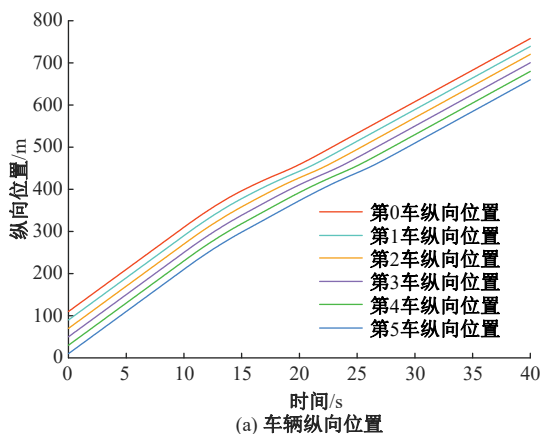


图4 工况2路径规划结果

Fig. 4 Path planning results of working case 2

工况 2 路径规划结果如图 4 所示,由拟合结果可知,所规划路线可以防止车辆队列与障碍物碰撞。

工况 2 仿真结果如图 5 所示。队列纵向位置如图 5(a)所示。在图 5(b)纵向速度中,队列行驶在低附着道路系数的弯道公路,跟随车仍保持良好的纵向跟踪效果。在图 5(c)道路曲率



(a) 车辆纵向位置

(b) 纵向速度

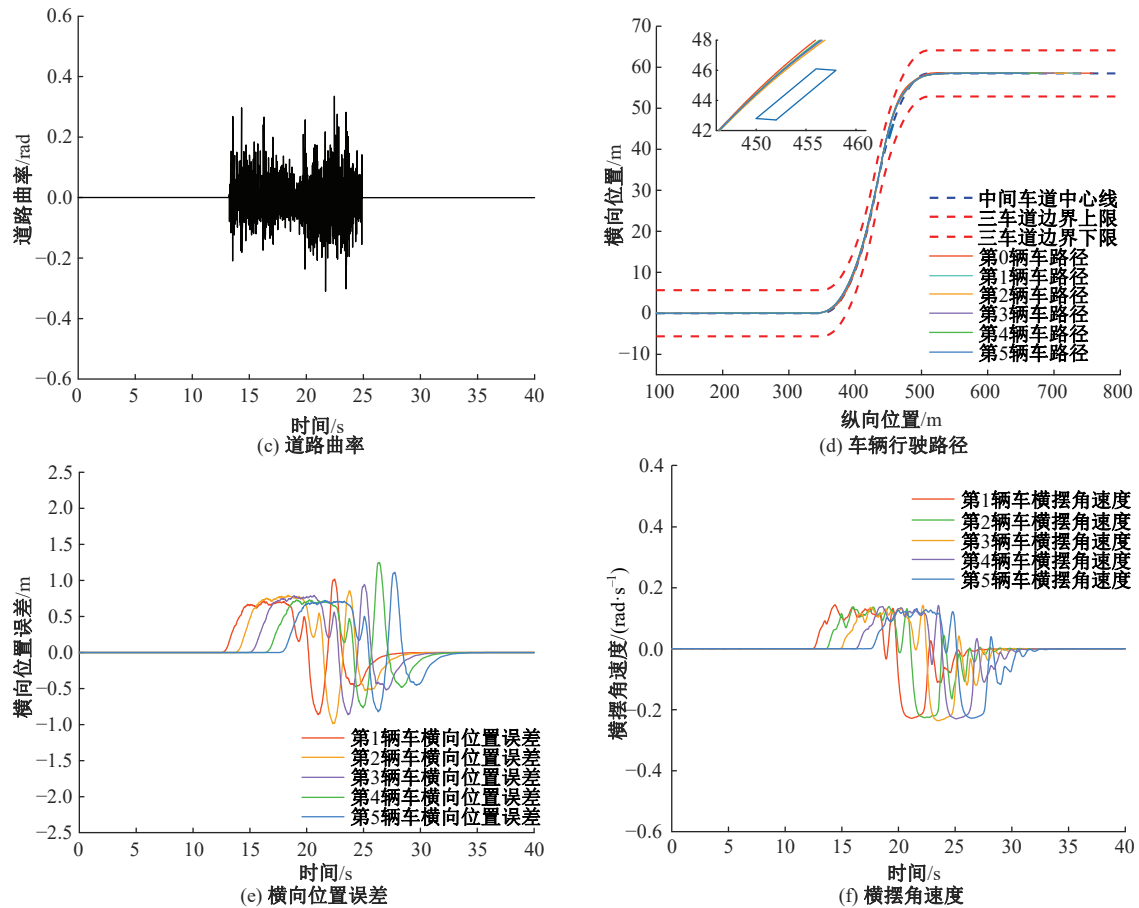


图 5 工况 2 仿真结果

Fig. 5 Simulation results of case 2

中,道路曲率在 $\pm 0.4$ 之间。由图 5(d)行驶路径可知,可知队列沿规划路径行驶,且成功避开障碍物,跟随车与障碍物的最近距离为 0.13 m。在图 5(e)横向位置误差中,队列换道最大横向误差约 1 m,能保障队列行驶安全。在图 5(f)横摆角速度中,最大横摆角速度为 0.2 rad/s。

#### 4 结束语

本文采用考虑规划层的商用车队列纵横一体化的控制策略,在规划层基于车辆运动学模型,结合道路和障碍物约束,设计粒子滤波求解的模型预测控制,并使用平滑样条拟合理规划路径;在控制层基于纵横一体化动力学模型,设计分布式模型预测控制器。通过 TruckSim 和 Matlab/Simulink 的联合仿真,验证了考虑规划层的队列分布式模型预测控制的跟踪效果。分析了车辆队列在直线道路和弯曲道路上的纵横向运动,仿真实验表明:考虑纵横耦合的商用车队列控制器能够保证车辆行驶在道路边界内,提高了队列行驶安全性。

#### 参考文献:

- [1] Liang K Y, Martensson J, Karl H, et al. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(4): 1051-1061.
- [2] Li Y, Tang C, Peeta S, et al. Integral-sliding-mode braking control for a connected vehicle platoon: theory and application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(6): 4618-4628.
- [3] Sawant J, Chaskar U, Ginoya D. Robust control of cooperative adaptive cruise control in the absence of information about preceding vehicle acceleration[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(9): 5589-5598.
- [4] Zheng Y, Li S E, Wang J Q, et al. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: study on the influence of information flow topologies[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(1): 14-26.
- [5] Bian Y, Li S E, Xu B, et al. Behavioral harmonization of a cyclic vehicular platoon in a closed road net-

- work[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, 6(3): 559-570.
- [6] Bayuwindra A, Ploeg J, Lefeber E, et al. Combined longitudinal and lateral control of car-like vehicle platooning with extended look-ahead[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 28(3): 790-803.
- [7] Zhang D Z, Li K Q, Wang J Q. A curving ACC system with coordination control of longitudinal car-following and lateral stability[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(7): 1085-1102.
- [8] Wang Y L, Bian N, Zhang L, et al. Coordinated lateral and longitudinal vehicle-following control of connected and automated vehicles considering nonlinear dynamics[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2020, 4(4): 1054-1059.
- [9] Choi Y M, Park J H. Game-based lateral and longitudinal coupling control for autonomous vehicle trajectory tracking[J]. *IEEE Access*, 2021, 10: 31723-31731.
- [10] 于树友, 谢华成, 李文博, 等. 数字孪生驱动的商用车队列纵横向控制[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2025, 55(6): 1994-2002.  
Yu Shu-you, Xie Hua-cheng, Li Wen-bo, et al. Digital twin driven longitudinal and lateral control of truck platoon[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2025, 55(6): 1994-2002.
- [11] Shi S M, Li L, Mu Y, et al. Stable headway prediction of vehicle platoon based on the 5-degree-of-freedom vehicle model[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2019, 233(6): 1570-1585.
- [12] Rajamani R. *Vehicle dynamics and control*[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2011.
- [13] Besselink B, Johansson K H. String stability and a delay-based spacing policy for vehicle platoons subject to disturbances[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(9): 4376-4391.
- [14] Ghasemi A, Kazemi R, Azadi S. Stable decentralized control of a platoon of vehicles with heterogeneous information feedback[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4299-4308.
- [15] Guo G, Wei Y. Hierarchical platoon control with heterogeneous information feedback[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2011, 5(15): 1766-1781.
- [16] Fujioka T, Omae M. Vehicle following control in lateral direction for platooning[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1998, 29(Sup. 1): 422-437.
- [17] Wei S Y, Zou Y, Zhang X D, et al. An integrated longitudinal and lateral vehicle following control system with radar and vehicle-to-vehicle communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(2): 1116-1127.
- [18] Kianfar R, Ali M, Falcone P, et al. Combined longitudinal and lateral control design for string stable vehicle platooning within a designated lane[C]//The 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC), Qingdao, China, 2014: 1003-1008.
- [19] Marino R, Scalzi S, Netto M. Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles[J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(12): 1459-1467.
- [20] Tsugawa S, Kato S, Aoki K. An automated truck platoon for energy saving[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA, 2011: 4109-4114.
- [21] Askari I, Zeng S, Fang H. Nonlinear model predictive control based on constraint-aware particle filtering/smoothing[C]//American Control Conference (ACC), New Orleans, USA, 2021: 3532-3537.
- [22] Mammari S, Koenig D. Vehicle handling improvement by active steering[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2002, 38(3): 211-242.
- [23] Gao Y. *Model predictive control for autonomous and semiautonomous vehicles*[D]. Berkeley: College of Engineering, University of California, 2014.
- [24] Askari I, Badnava B, Woodruff T, et al. Sampling-based nonlinear MPC of neural network dynamics with application to autonomous vehicle motion planning[C]//American Control Conference(ACC), Atlanta, USA, 2022: 2084-2090.
- [25] Feng Y Y, Yu S Y, Sheng E C, et al. Distributed MPC of vehicle platoons considering longitudinal and lateral coupling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(3): 2293-2310.
- [26] Hichri Y, Cerezo V, Do M. Friction on road surfaces contaminated by fine particles: some new experimental evidences[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2017, 231(9): 1209-1225.