

吉林大学学报(工学版) Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition) ISSN 1671-5497,CN 22-1341/T

《吉林大学学报(工学版)》网络首发论文

题目:	基于分布式模型预测的商用车队列避障控制
作者 :	李文博,谢华城,于树友,林宝君,陈虹
DOI:	10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240678
收稿日期:	2024-06-18
网络首发日期:	2024-10-09
引用格式:	李文博,谢华城,于树友,林宝君,陈虹.基于分布式模型预测的商用车队
	列避障控制[J/OL]. 吉林大学学报(工学版).

https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240678



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

基于分布式模型预测的商用车队列避障控制

李文博¹,谢华城¹,于树友^{1,2},林宝君¹,陈虹^{1,3}

(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,本文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;模型预测控制;车辆耦合特性

 中图分类号:TP273
 文献标志码:A

 DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240678

Obstacle avoidance control for truck platoon using distributed model

predictive control

LI Wen-bo¹, XIE Hua-cheng¹, YU Shu-you^{1,2}, LIN Bao-jun¹, CHEN Hong^{1,3}

(1. Department 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 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; model predictive control; vehicle coupling characteristic

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: 模数控系统、PLC、电机调速及其在机电系统中的应用.E-mail:linbj@jlu.edu.cn

0 引言

车辆队列可以有效地减少交通拥堵和提高交通 运输效率,从而降低能源消耗和环境污染^[1,2]。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[3,4]。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^[5]。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巡航控制器,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、三自由度和 五自由度动力学模型等。文献[9]基于三自由度车辆 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^[10]。文献[11]建立考虑车辆前 后轮胎转动角速度的五自由度动力学模型,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,为保证车辆队列的安全 行驶,不仅需要纵向控制,还需要横向控制^[12,13]。 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*_∞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^[16,17]。前车路径跟随方法中,文献[17]提出了纵 向和横向一体化控制方案,设计一个受串稳定性约 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] 采用五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进稳定性的结果, 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, 目所得到的解往往具 有随机性并非最优。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。

本文设计考虑规划层的商用车队列纵横耦合控制,主要贡献包含以下方面:

(1)设计上层路径规划和下层跟踪控制的方案,将参考路径和障碍物信息发送至领航车的规划层,采用粒子滤波算法求解非线性模型预测控制的优化问题,为队列重新规划一条避障规划路径;

(2)基于纵横一体化动力学模型设计的队列分 布式预测控制器相比于采用线性模型和纵横向独立 设计控制器的方式,能够更全面地描述商用车的运 动特性,从而提高队列的整体性能。

1 队列建模

假设商用车队列由 1 辆领航车和 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。队列中领航车为驾驶员驾驶,跟随车自动驾驶。

在本节中,首先建立了车辆运动学模型、三自 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:

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

(1)

式中, *x* 和 *y* 表示纵向和横向位置, *v* 和 *a* 分别表示 速度和加速度, *φ* 表示横摆角, *δ* 表示前轮转角, *l* 表示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:

$$\begin{cases} \eta_r(k+1) = \overline{f}(\eta_r(k), u_r(k)) \\ y_r(k) = \eta_r(k) \end{cases}$$
(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:

$$\begin{cases} \dot{v}_{i}^{x} = v_{i}^{y} \dot{\phi}_{i} + \frac{1}{m_{i}} (2F_{i}^{xf} - 2F_{i}^{yf} + 2F_{i}^{xr} - F_{dissp}) \\ \dot{v}_{i}^{y} = -v_{i}^{x} \dot{\phi}_{i} + \frac{1}{m_{i}} (2F_{i}^{yf} + 2F_{i}^{yr}) \\ \ddot{\phi}_{i} = \frac{1}{I_{i}^{z}} (l_{f,i} 2F_{i}^{yf} - l_{r,i} 2F_{i}^{yr}) \end{cases}$$
(3)

式中, $v_i^x \approx v_i^y$ 分别表示第*i* 辆车的纵向和横向速度, ϕ_i 表示横摆角速度, m_i 表示车的总质量, $l_{f,i} \approx l_{r,i}$ 分 别表示车辆质心到前轴和后轴的距离, I_i^z 表示转动 惯量, $F_i^{sf} \approx F_i^{sr}$ 分别表示前轮和后轮纵向力, F_i^{sf} 和 F_i^{sr} 分别表示前轮和后轮侧向力, F_{dissp} 表示车辆 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:

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

(4)

式中, $\omega_i^f \ \pi \ \omega_i^r \ \beta$ 别表示前后轮角速度, $J_i^f \ \pi \ J_i^r \ \beta$ 别表示前后轮转动惯量, R_e 表示车轮转动半径 T_i^d 表示整车力矩。

轮胎纵横向动力学采用 Pacejka 模型表示为:

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

式中, *B*,*C*,*D*,*E* 分别表示刚度、形状、峰值、曲率 因子,由轮胎的垂向载荷和外倾角共同确定,α表 示轮胎滑移率,κ是轮胎滑移率。

前后轮侧偏角定义为:

$$\alpha_f = \delta_i - \frac{v_i^y + l_{f,i}\dot{\phi}_i}{v_i^x}$$
$$\alpha_r = \frac{l_{r,i}\dot{\phi}_i - v_i^y}{v_i^x} \tag{6}$$

轮胎滑移率的计算如下:

$$\begin{cases} \kappa_{i}^{f} = \frac{\omega_{i}^{f} R_{e} - v_{i}^{x}}{\max\left(\left|\omega_{i}^{f} R_{e}\right|, \left|v_{i}^{x}\right|\right)} \\ \kappa_{i}^{r} = \frac{\omega_{i}^{r} R_{e} - v_{i}^{x}}{\max\left(\left|\omega_{i}^{r} R_{e}\right|, \left|v_{i}^{x}\right|\right)} \end{cases} \end{cases}$$

同一轮胎在不同道路附着系数下 Pacejka 轮胎 模型参数不同,式(7)表明不同道路附着系数对应 Pacejka 轮胎参数关系^[22]。

$$\begin{cases} B_{0.35} = \frac{2 - \mu_{0.35}}{2 - \mu_{0.85}} B_{0.85}, C_{0.35} = \frac{5 - \mu_{0.35}}{5 - \mu_{0.85}} C_{0.85}, \\ D_{0.35} = \frac{\mu_{0.35}}{\mu_{0.85}} D_{0.85}, E_{0.35} = E_{0.85} \end{cases}$$
(7)

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:

$$\begin{cases} \dot{e}_i^y = v_i^x e_i^{\varphi} - v_i^y - L\dot{\varphi}_i \\ \dot{e}_i^{\varphi} = \dot{\varphi}_{i,des} - \dot{\varphi}_i \end{cases}$$
(8)

式中, e_i^y 表示预瞄点与车道中心线的横向偏差, *L* 表示预瞄距离, e_i^o 表示车辆行驶方向与预瞄点处道 路切线之间航向角误差, $\dot{\phi}_{i,des}$ 表示期望横摆角速 度, $\dot{\phi}_{i,des} = v_i^x / R$, *R*是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^[11]。车辆期望车间距随着被控车辆速度的变化进 行调整:

$$x_{i,des} = hv_i^x + d_0 \tag{9}$$

式中, *d*₀为静止时车辆间的安全距离, *h*为固定时距。*h*表示车辆*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^[18]:

$$\begin{cases} x_r = x_{i-1} - x_i \\ x_{i,e} = x_r - x_{i,des} \end{cases}$$
(10)

式中, x, 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:

$$v_{i,e}^{x} = v_{i}^{x} - v_{i-1}^{x} - h\dot{v}_{i}^{x}$$
(11)

$$\begin{cases} \lim_{t \to \infty} \left\| v_{i,e}^{x}(t) \right\| = 0\\ \lim_{t \to \infty} \left\| x_{i,e}(t) \right\| = 0 \end{cases}$$
(12)

横向控制目标为队列沿车道中心线行驶,即:

$$\begin{cases} \lim_{l \to \infty} \|e_i^{y}(k)\| = 0\\ \lim_{l \to \infty} \|e_i^{\varphi}(k)\| = 0 \end{cases}$$
(13)

2 控制策略



Fig.1 Path tracking control system

车辆队列的纵向控制已经受到广泛关注,其控制目标如公式(12)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^[23]。

2.1 上层路径规划

设计目标函数为

$$J(\eta_{r}(k), U_{r}(k)) = \sum_{i=0}^{H_{r}} ||\eta_{r}(k+i|k) - \eta_{ref}(k+i|k)||_{Q_{r}}^{2} + ||u_{r}(k+i|k)||_{R_{r}}^{2}$$
(14)

式中, $Q_r 和 R_r$ 分别是状态量和控制量的权重矩阵, η_{rs} 为全局参考路径, H_r 为预测步长, s为车辆与障碍物体的距离。

进而设计路径规划层的优化问题如下所示。 优化问题 1:

$$\begin{array}{l} \underset{\eta_{r}}{\text{minimize } J(\eta_{r}(k), U_{r}(k))} \\ \text{s.t.} \\ \eta_{r}\left(k|k\right) = \eta_{r}\left(k\right), \\ \eta_{r}\left(k+1|k\right) = \overline{f}\left(\eta_{r}\left(k|k\right), u_{r}\left(k|k\right)\right), \quad (15) \\ y_{r}\left(k|k\right) = \eta_{r}\left(k|k\right), \\ d\left(k|k\right) - D_{o} \ge 0, \\ \delta_{\min} \le \delta\left(k|k\right) \le \delta_{\max}, \end{array}$$

式中, δ_{\min} 和 δ_{\max} 分别是前轮转角最小值和最大值, x_o 和 y_o 分别为障碍物几何中心的纵向和横向位置, D_o 为以几何中心 (x_o, y_0) 为圆心的防碰撞距离,车 辆与障碍物的距离为

$$d(k|k) = \sqrt{(x(k|k) - x_o(k))^2 + (y(k|k) - y_o(k))^2}.$$

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,能有效地处理非 线性系统中的状态估计问题^[24]。

将优化问题1 中的约束转化为如下式:

$$s(k|k) \ge 0 \triangleq \begin{cases} d(k|k) - D_o \ge 0, \\ \delta(k|k) - \delta_{\min} \ge 0, \\ \delta_{\max} - \delta(k|k) \ge 0. \end{cases}$$

本文选择 softplus 函数作为避障功能函数,

$$\phi(s) = \frac{1}{\alpha} \ln \left(1 + \exp(\beta \cdot s) \right), \tag{16}$$

式中α和β是调节约束违背对粒子权值影响的参

数。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:

step1: 设系统(2)存在噪声扰动 w 和 m,且满足 其次马尔科夫假设和独立观测假设^[24]。将系统(2) 写成以下形式:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_r = \overline{f}_i(\eta_r, u_r, w) \\ y_r = (\eta_r, m) \end{cases}$$
(17)

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:

$$E(\eta_{r,k}) = \int \eta_{r,k} \, p(\eta_{r,k} \, \Big| \, y_{r,1:k} \,) d\eta_{r,k} \tag{18}$$

step2:因无法直接求得式(18)中概率密度函数 $p(\eta_{r,k}|y_{r,l:k})$ 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

$$p(\eta_{r,k} | y_{r,1:k}) \approx \hat{p}(\eta_{r,k} | y_{r,1:k}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \delta(\eta_{r,k} - \eta_{r,k}^{i}) \quad (19)$$

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, $i = 1, 2..., \tilde{N}$,总计 \tilde{N} 个 采样粒子。

step3:式 (19) 中无法直接对概率密度 $p(\eta_{r,k} | y_{r,l:k})$ 进行采样,需要引入重要性采样 $q(\eta_{r,k} | y_{r,l:k})$,此时系统状态估计如下:

$$E(\eta_{r,k}) = \int \eta_{r,k} \frac{\tilde{w}_k(\eta_{r,k})}{p(y_{r,1:k})} q(\eta_{r,k} | y_{r,1:k}) d\eta_{r,k}$$
(20)

式中, 权重为

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

符号∝的含义为符号两侧成比例关系。

此外,

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

则公式(20)改写为:

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

因此,结合蒙特卡洛法,将(20)改写为:

$$E(\eta_{r,k}) = \frac{\frac{1}{\tilde{N}} \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \eta_{r,k}^{i} \tilde{w}_{k}(\eta_{r,k}^{i})}{\frac{1}{\tilde{N}} \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \tilde{w}_{k}(\eta_{r,k}^{i})} = \sum_{i=1}^{N} \eta_{r,k}^{i} w_{k}(\eta_{r,k}^{i}) \quad (21)$$

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

$$w_k(\eta_{r,k}^i) = \frac{\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i)}$$
(22)

step4:由式(21)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^[25]:

$$\tilde{w}_{k}(\eta_{r,k}^{i}) \propto \frac{p(\eta_{r,1:k}^{i} | y_{r,1:k})}{q(\eta_{r,1:k}^{i} | y_{r,1:k})}$$
(23)

式中,

$$\begin{cases} p(\eta_{r,1:k}^{i} | y_{r,1:k}) \propto p(y_{r,k} | \eta_{r,k}^{i}) p(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,k-1}^{i}) \times \\ p(\eta_{r,1:k-1}^{i} | y_{r,1:k}) \\ q(\eta_{r,1:k}^{i} | y_{r,1:k}) = q(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,1:k-1}^{i}, y_{r,1:k}) \times \\ q(\eta_{r,1:k-1}^{i} | y_{r,1:k-1}) \end{cases}$$
(24)

结合式(23)和式(24), *k* 时刻和*k*-1时刻的粒子 权重关系如下:

$$\tilde{w}_{k}(\eta_{r,k}^{i}) \propto \frac{p(y_{r,k} | \eta_{r,k}^{i}) p(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,k-1}^{i})}{q(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,k-1}^{i}, y_{r,1:k})} \tilde{w}_{k-1}(\eta_{r,k-1}^{i})$$
(25)

式中, 概率密度 $p(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,k-1}^{i})$ 通过式(17)的状态转移 函数获得, 概率密度 $p(y_{r,k} | \eta_{r,k}^{i})$ 通过式(17)的测量函 数获得, $q(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,1:k-1}^{i}, y_{r,1:k})$ 为重要性分布一部分, 选定为 $q(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,1:k-1}^{i}, y_{r,1:k}) = p(\eta_{r,k}^{i} | \eta_{r,k-1}^{i})^{[20]}$,此时权 重更新公式(25)改写为如下形式:

$$\tilde{w}_k(\eta_{r,k}^i) \propto p(y_{r,k} \mid \eta_{r,k}^i) \tilde{w}_{k-1}(\eta_{r,k-1}^i)$$
(26)

step5: 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 $p(\eta_{r,l:k} | y_{r,l:k})$ 进行 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:

$$p(\eta_{r,1:k}, u_{r,1:k} | y_{r,1:k}) \propto \prod_{t=1}^{k} p(y_{r,t} | \eta_{r,t}) \times p(u_{r,t})$$
(27)

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:

$$\max_{x_{1:k}, u_{1:k}} \log(p(\eta_{1:k}, u_{r,1:k} | y_{r,1:k})) \\ \propto \min\left(\sum_{t=1}^{k} \left\| y_{r,t} - \eta_{r,t} \right\|_{Q_{Bayes}}^{2} + \left\| u_{r,t} \right\|_{R_{Bayes}}^{2}\right)$$
(28)

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(15)进行关联。

注 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,从而简化了求解难度。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,建立了由三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(8)和跟车模型(11)组成的纵横向一体化模型。

$$\begin{cases} \dot{v}_{i}^{x} = v_{i}^{y} \dot{\phi} + \frac{1}{m_{i}} (2F_{i}^{xf} - 2F_{i}^{yf} + 2F_{i}^{xr} - F_{dissp}) \\ \dot{v}_{i}^{y} = -v_{i}^{x} \dot{\phi}_{i} + \frac{1}{m_{i}} (2F_{i}^{yf} + 2F_{i}^{yr}) \\ \dot{\phi}_{i} = \frac{1}{I_{i}^{z}} (l_{f,i} 2F_{i}^{yf} - l_{r,i} 2F_{i}^{yr}) \\ \dot{w}_{i}^{f} = \frac{T_{i}^{d} - R_{e}F_{i}^{xf}}{J_{i}^{f}} \\ \dot{w}_{i}^{r} = \frac{T_{i}^{d} - R_{e}F_{i}^{xf}}{J_{i}^{r}} \\ \dot{w}_{i}^{r} = \frac{v_{i}^{x} - v_{i-1}^{x} - h\dot{v}_{i}^{x}}{J_{i}^{r}} \\ \dot{e}_{i}^{y} = v_{i}^{x} e_{i}^{\varphi} - v_{i}^{y} - L\dot{\phi}_{i} \\ \dot{e}_{i}^{\varphi} = \dot{\phi}_{i,des} - \dot{\phi}_{i} \end{cases}$$

$$(29)$$

定义状态量 $x_i = [v_i^x, v_i^y, \dot{\phi}_i, w_i^f, w_i^r, x_{i,e}, e_i^y, e_i^{\varphi}]^T$, 控制量 $u_i = [T_i^d, \delta_i]^T$, 输出量 $y_i = [v_i^x, x_{i,e}, e_i^y, e_i^{\varphi}]^T$, 将 系统(17)写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \hat{f}_i(x_i, u_i) \\ y_i = C_i x_i \end{cases}$$
(30)

式中, $C_i = diag(1,0,0,0,0,1,1,1)$ 。

注 2: 本文仅考虑了平面运动下的车辆三自由 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,三自由度车 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(30)的 期望输出为:

$$y_{i,des}(k) = [v_{i,des}^{x}(k), x_{i,e,des}(k), e_{i,des}^{y}(k), e_{i,des}^{\varphi}(k)]^{T} (31)$$

式中, $v_{i,des}^{x}(k)$ 表示期望纵向速度, $x_{i,e,des}(k)$ 表示第 *i*辆车期望纵向位置误差, $e_{i,des}^{y}(k)$ 表示期望的车辆 横向位置误差, $e_{i,des}^{\varphi}(k)$ 表示期望的航向角误差, $x_{i,e,des}(k)$ 、 $e_{i,des}^{y}(k)$ 和 $e_{i,des}^{\varphi}(k)$ 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, 期望纵向速度如下式所示:

$$v_{i,des}^{x} = v_{i-1}^{x} - h\dot{v}_{i}^{x}$$
 (32)

定义第i辆跟随车的实际与期望输出的误差:

$$e_i(k) = y_i(k) - y_{i,des}(k)$$
(33)

定义代价函数为:

$$J_{i}(e_{i}(k),U_{i}(k)) = \sum_{j=0}^{H_{p}} \left(e_{i}(k+j|k)_{Q_{i}}^{2} + u_{i}(k+j|k)_{R_{i}}^{2}\right)$$

式中, $Q_i 和 R_i$ 为正定对称加权矩阵, H_p 表示预测时域。

商用车队列纵横耦合控制的优化问题如下:

优化问题 2:

 $\underset{U_{i}(k)}{\text{minimize }} J_{i}(e_{i}(k), U_{i}(k))$

s.t.

$$\begin{aligned} x_i(k+j+1|k) &= \hat{f}'_i(x_i(k+j|k), u_i(k+j|k)) \\ y_i(k+j|k) &= C_i x_i(k+j|k) \\ T^d_{i,min} &\leq T^d_i(k+j|k) \leq T^d_{i,max} \\ \delta_{i,min} &\leq \delta_i(k+j|k) \leq \delta_{i,max} \end{aligned}$$
(34)

式中, $\delta_{i,\min}$ 和 $\delta_{i,\max}$ 分别表示最小和最大前轮转角 约束, $T_{i,\min}^{d}$ 和 $T_{i,\max}^{d}$ 分别表示最小和最大力矩约束,

注 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进一致性。采用 纵横向一体化模型(30),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 仿真验证

800 700 600

(ii) 500(iii) 第初(iii) 第初 300

200

50

-10

(向位置Y(m)

1

搭建由 TruckSim 和 Matlab/Simulink 组成的联 合仿真平台。本文采取如表1所示的商用车车身参 数。规划层和控制层参数如表2所示。

	表 1	车	辆参数	
Table 1	Vehic	le	paramete	rs

F				
	数值 单位			
m_i	18000kg			
I_i^z	$130421.8kg\cdot m^2$			
l_i^f	3.5m			
l_i^r	1.5m			
L_i^H	2.4 <i>m</i>			

表 2 控制器参数

Table 2: Parameters of the controller

参数符 号	数值 单位	参数符 号	数值 单位
H_r	5	$\delta_{ m max}$	35°
T_r	0.1s	\tilde{N}	8
Q_r	diag(100, 100, 0, 0)	α	5
R _r	diag(10,100)	β	3
δ_{\min}	-35°	$T^d_{i,\min}$	$-5000N \cdot m$

第1车纵向住

20 时间(s)

400 k向位置X(i 500

(a) 车辆纵向位置



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



Fig.2 Path planning results of working case

工况1路径规划结果如图2所示。蓝色虚线为 中间车道的道路中心线,即参考路径。以参考路径 为中心,红色虚线为三车道的道路边界线(± 5.625m)。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,为平滑处理 该离散点为曲线,因此采用 Matlab 中拟合工具箱平 滑样条法,浅蓝色曲线为的拟合结果。深红色箭头 表示障碍物与拟合路径的最近距离 1.44m。





15

Fig.3 Simulation results of case 1

20 时间(s)

(b) 纵向速度

第0辆车纵向速 第1辆车纵向速 第2辆车纵向速

35

工況1队列跟踪规划路径的仿真结果如图3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20m/s下降至15m/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。在图3(d)车辆行驶路径中,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2.4m,跟随车辆与障碍物的最近距离相隔约0.24m,满足安全约束。在图3(e)横向位置误差中,队列中五辆跟随车均行驶在车道线内,最大横向位置误差约1.2m。在图3(f)横摆角速度中,最大横摆角速度约为0.25rad/s。

工况 2: 弯道由道路曲率为±0.008(1/m)的两段 弧长组成,车辆初始速度 20m/s,纵向位置 450m, 横向位置 43m 处存在障碍物。突发下雨时,雨水与 路面上的尘土会形成粘度高的水液,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^[26]。 考虑这一情况,设置道路附着系数为 0.35。



Fig.4 Path planning results of working case 2 工况 2 路径规划结果如图 4 所示,你和结果可 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)道路曲率中,道曲率在±0.4 之间。在图 5(d)行驶路径中,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 0.13m。在图 5(e)横向位置误差中,队列换 道最大横向误差约 1m,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 0.2rad/s。



Fig.5 Simulation results of case 9

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规划路径;在控制层基

4 结束语

本文采用考虑规划层的商用车队列纵横一体化

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。

参考文献:

[1]Liang Kuo-Yun, Martensson J., and Karl H. Johansson K. H.
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 Yang, Li S. E., Wang Jian-qiang, 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 Biao, et al. Behavioral harmonization of a cyclic vehicular platoon in a closed road network[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 De-zhao, Li Ke-qiang, Wang Jian-iang. 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 Yu-lei, Bian Ning, Zhang Lin, 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 Youngmin, 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,1-9. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231367.

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),1-9. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231367. [11]Shi Shu-ming, Li Ling., Mu Yu, 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]. 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 Ge, Wei Yue. 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(S1): 422–437.

[17]Wei Shou-yang, Zou Yuan, Zhang Xu-dong, 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]//17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 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]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011: 4109–4114.

[21]Askari I., Zeng S., Fang H. Nonlinear model predictive control based on constraint-aware particle filtering/smoothing[C]//2021 American Control Conference (ACC), 2021: 3532–3537.

[22]Mammar 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: 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]//2022 American Control Conference (ACC), 2022: 2084–2090.

[25]Feng Yang-yang, Yu Shu-you, Sheng Een-cong, 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]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(9): 1209–1225.