

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417618

基于车辆编队反馈控制器优化研究

赵晓鹏¹ 王国权¹ 岳先龙² 冯英杰²

(1. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192; 2. 中机科(北京)车辆检测工程研究院有限公司 北京 102100)

摘要: 针对车辆编队控制中传统的控制策略难以同时满足系统鲁棒性和高精度跟踪的要求,尤其是在面对外部扰动和模型不确定性时,这一问题更加突出。本文提出了一种基于线性反馈控制与车辆运动状态估计相结合的融合算法(LFC-MSE),以提高跟随车速度和角速度的精确性,进而减小外部扰动和通信延迟带来的不利影响。通过反馈线性化部分将车辆编队这种非线性系统转化为线性系统去求解,设计出车辆编队系统的控制器,在通信延时方面,对车辆的运动状态进行估计,提高整个系统的响应速度和控制精度。最后在CarSim-Simulink的联合仿真环境中,搭建车辆编队的动力学模型、参数模型和控制模型,对论文的LFC-MSE算法进行仿真验证。仿真结果表明,在该算法控制下跟随车辆相较于领航车辆横向误差在0.5 m内、纵向轨迹误差在1.5 m之内,而且LFC-MSE控制方案在保持编队稳定性、响应速度及减少能耗方面表现更优。

关键词: 车辆编队;领航跟随者法;反馈线性化控制;控制器设计;LFC-MSE算法

中图分类号: TP271+.9; TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on feedback linearization control for vehicle platoon

Zhao Xiaopeng¹ Wang Guoquan¹ An Xianlong² Feng Yingjie²

(1. School of Electromechanical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

2. China National Machinery Industry Corporation (Beijing) Vehicle Testing Engineering Research Institute, Beijing 102100, China)

Abstract: In vehicle platoon control, traditional control strategies struggle to simultaneously meet the requirements of system robustness and high-precision tracking, especially when facing external disturbances and model uncertainties, which exacerbates the issue. This paper proposes a fusion algorithm (LFC-MSE) that combines linear feedback control with vehicle motion state estimation to enhance the accuracy of the following vehicle's speed and angular velocity, thereby mitigating the adverse effects of external disturbances and communication delays. By utilizing feedback linearization, the nonlinear system of vehicle platooning is transformed into a linear system for solution, and a controller for the vehicle platoon system is designed. In terms of communication delay, the motion state of the vehicle is estimated to improve the response speed and control accuracy of the entire system. Finally, in the CarSim-Simulink co-simulation environment, the dynamic model, parameter model, and control model of the vehicle platoon are established to simulate and validate the proposed LFC-MSE algorithm. The simulation results show that under the control of this algorithm, the lateral error of the following vehicle relative to the leading vehicle is within 0.5 m, and the longitudinal trajectory error is within 1.5 m. Moreover, the LFC-MSE control scheme performs better in maintaining platoon stability, response speed, and reducing energy consumption.

Keywords: vehicle platooning; leader-follower method; feedback linearization control; controller design; LFC-MSE algorithm

0 引言

随着自动驾驶相关研究不断深入,车辆编队行驶技术在智能交通系统中发挥着十分重要的作用。车辆编队行驶受到越来越多的关注。车辆编队技术起源于多智能体系统(MAS)。多智能体系统应用在道路交通系统中,演变成

为车与车、车与道路、车与云平台之间的协同编队问题。通过车与车(V2V)通信技术,车辆可以共享速度、位置等信息,实现协同控制^[1]。编队控制通过控制多个车辆,使得各个车辆保持某一预先设定的形状运动,如菱形与线性等。随着车辆编队技术的不断进步,车辆编队控制方法得到了显著的发展。现有的编队控制方法主要包括以下几种:基

于行为法^[2]、虚拟结构法^[3-4]、领航-跟随法^[5-6]等。

基于行为法的车辆编队技术是一种先进的车辆协同控制策略,它采用模拟个体车辆行为模式的方式,以实现整个车辆编队的有序、协同运动。它最早由麻省理工大学的机器人专家提出,截止现在许多研究学者已经将该方法应用到智能车辆编队控制问题中。曾毓凌等^[7]通过结合深度神经网络(double deep Q-network, DDQN)强化学习算法,融入一致性理论和伴随位形理念来设计多无人车系统的编队控制器,使得即使在缺乏精确模型、仅有运动数据的情况下,该控制器也能高效完成编队控制任务,从而减少了系统对精确模型的依赖。Benterki 等^[8]提出了一种基于行为预期的智能车辆控制器,该方法将编队控制任务分解为多个基于行为的目标优化子问题,通过协同解决这些子问题,实现编队的高精度控制。基于行为法具备灵活性和扩展性,以应对不同规模的编队和多样化的交通需求。该方法还能减少对中央控制系统的依赖,提升系统鲁棒性。但这种方法也存在一些局限,在复杂环境中,行为之间的冲突和重叠可能影响全局最优的控制效果,极端情况下,个体车辆的控制可能产生冲突,可能会造成严重事故。

与基于行为法的分布式特性形成对比,车辆编队虚拟结构法旨在通过创建一个虚拟的刚性结构来模拟车辆之间的协同运动。胡锦帆等^[9]通过引入虚拟结构法构建能够直观描述编队队形的相对运动坐标系,从水平与纵向相解耦的无人机运动学模型出发,同时考虑无人机系统的性能约束条件,对一致性算法进行了改进。Liu 等^[10]则通过基于卡尔曼滤波的状态估计算法对每个跟随者的状态进行精确估计,从而提高了编队系统中跟随者的状态精度,并通过仿真实验证明了所提出编队控制方法的有效性。总体而言,虚拟结构法能够精确控制编队的形态和相对位置,适用于对编队形状要求较高的场景,尤其在静态或已知环境中表现优异。然而,虚拟结构法需要处理大量参数,算法开发和优化过程复杂,对计算资源要求较高,且对车辆动力学模型和环境模型的精度依赖性强,任何模型误差都会直接影响编队控制的精度。在实际应用中,虚拟结构法在动态或复杂环境中的适应性较差,难以快速响应环境变化,且对通信带宽和实时性要求较高,增加了系统的成本和复杂性,限制了其在大规模编队中的应用。

作为编队控制的基础范式,领航-跟随法通过层级化控制架构平衡了系统复杂度与实用性。即通过领航车和跟随车的跟随控制策略实现车辆编队控制的技术。领航车依靠搭载的传感器与通信设备,实时获取道路环境信息,并依循编队策略发出指令,跟随车则通过紧密跟随领航车来维持车队的稳定性和协同性。

但是领航-跟随法的也存在一些不足,为此一些研究学者根据领航-跟随编队中出现的不足提出了改进方法。吴金霆等^[11]利用了领航-跟随法和人工势场法的结合实现了机器人编队进行巡检工作。Ge 等^[12]研究了有限通信资源

下事件触发的通信调度和车辆自组织网络编队控制的协同设计问题。保证了稳健的队列控制性能和通信效率之间的权衡。

领航-跟随法中对领航车的依赖性较强,一旦领航车出现故障或通信中断,编队控制将受到严重影响。在实际应用中,领航-跟随法在存在通信延迟的情况下,跟随车的控制响应可能滞后,影响编队稳定性,且在复杂环境中难以快速调整编队形态,可能导致编队稳定性下降^[13]。但是相较于其他控制方法领航-跟随法具有资源消耗低、灵活性高和易于实现的优势,适合多种场景下的编队控制。因此本文在领航-跟随法的基础上提出一种基于线性反馈控制与车辆运动状态估计相结合的融合算法的方法(linear feedback control with motion state estimation, LFC-MSE),提高跟随车速度和角速度的精确性,并且进一步减小外部扰动和通信延迟带来的不利影响。

1 领航式车辆编队模型的建立

在领航-跟随车辆编队(或车队)控制中,存在不同的控制策略来适应不同的道路条件和行驶场景。最常见的控制策略是距离-角度控制策略(distance-angle control)。这种方法不仅考虑车辆之间的间距,也考虑了车辆间的角度关系^[14]。该控制策略适用于大部分场景,如市区道路、山路或任何有较多弯道的路段。在这些路段上,车辆经常需要转弯,仅仅依靠间距控制可能会导致车辆位置调整不足或过度,从而产生不稳定或不连续的行车行为。此时引入距离-角度控制有助于提高车队的安全性和稳定性。因此本节首先建立起关于距离-角度控制运动模型,进而进行车辆编队反馈线性化控制器求解^[15]。

1.1 单车运动学模型

建立以后轴为车辆中心的单车运动学模型,车辆的动力学行为通常更多地受到后轮的影响,尤其是在进行动力学建模时更加准确和简化。并且可以提高控制精度,对于许多控制算法来说,以后轴为中心的模型更容易设计和实现,因为大多数控制输入都直接影响到后轮。如图 1 所示,建立了以后轴为车辆中心的单车运动学模型。

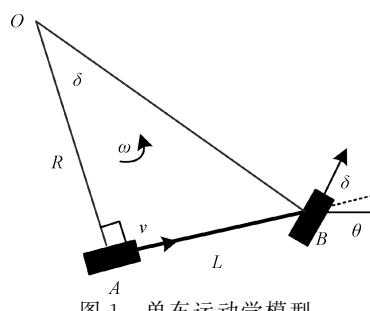


图 1 单车运动学模型

Fig. 1 Single vehicle kinematic model

根据图 1 中的以后轴为车辆中心的单车运动学模型上的几何关系,在直角三角形 OAB 中,可得:

$$\tan\delta = \frac{L}{R} \quad (1)$$

并且在低速行驶环境下,车辆行驶路径的转弯半径变换缓慢,此时可以假设车辆偏航角的变化率 $\dot{\theta}$ 可以近似等于车辆的角速度 ω 。根据车辆的角速度公式可得:

$$\dot{\theta} = \frac{V}{R} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)得:

$$\dot{\theta} = \frac{V}{L} \tan\delta \quad (3)$$

因此,以后轴为车辆中心的运动学模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos(\theta) \\ \dot{y} = V \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \frac{V}{L} \tan\delta \end{cases} \quad (4)$$

1.2 领航车与跟随车模型

该领航跟随编队模型采用了距离-角度控制方法,建立后轴为车辆中心的单车运动学模型后,首先确定出领航车的位置和方向,再设定领航车和跟随车之间要达到的理想距离和角度。如图 2 所示,建立了基于距离-角度控制方法的领航跟随编队模型。在建模过程中,车辆间的相对位置存在误差。通过该误差,得到追随车实际位置与期望位置之间的误差,从而进行反馈线性化控制器设计。

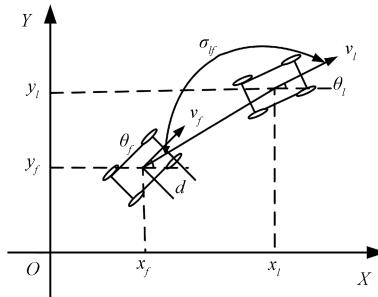


图 2 基于距离-角度控制方法的领航跟随编队模型

Fig. 2 Leader-follower formation model based on distance-angle control method

跟随者 C_f 与领航者 C_l 保持一定的相对距离 l_{lf}^* 和相对角度 σ_{lf}^* 进行编队跟随。对两车的实际距离进行分解得:

$$l_{lf}^x = (x_l - x_f - d \cos\theta_f) \cos\theta_l + (y_l - y_f - d \sin\theta_f) \sin\theta_l \quad (5)$$

$$l_{lf}^y = -(x_l - x_f - d \cos\theta_f) \sin\theta_l + (y_l - y_f - d \sin\theta_f) \cos\theta_l \quad (6)$$

其中, d 为车辆头部到车中心的距离。

对上式求导并结合车辆模型可得:

$$\dot{l}_{lf}^x = l_{lf}^y \omega_l - v_f \cos\sigma_{lf} + d \omega_f \sin\sigma_{lf} + v_l \quad (7)$$

$$\dot{l}_{lf}^y = -l_{lf}^x \omega_l - v_f \sin\sigma_{lf} - d \omega_f \cos\sigma_{lf} \quad (8)$$

其中, $\sigma_{lf} = \theta_f - \theta_l$, v_l 和 v_f 分别是领航车和领航车的线速度, ω_l 和 ω_f 分别是领航车和跟随车的角速度。

在定义的车体坐标系下车辆间理想相对距离和实际相对距离的误差为 e_{lf} 。可得误差公式为:

$$e_{lf} = \begin{pmatrix} e_{lf}^x \\ e_{lf}^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{lf}^{x*} - l_{lf}^x \\ l_{lf}^{y*} - l_{lf}^y \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中, $l_{lf}^{x*} = l_{lf}^* \cos\sigma_{lf}^*$, $l_{lf}^{y*} = l_{lf}^* \sin\sigma_{lf}^*$ 。

在车辆编队的运行过程中,跟随车与领航车间的理想相对距离 l_{lf}^* 和相对角速度 σ_{lf}^* 两者均为固定值,因此对两者进行求导均为 0,即 $\dot{l}_{lf}^* = 0$ 和 $\dot{\sigma}_{lf}^* = 0$ 。对误差公式求导并整理得:

$$\dot{e}_{lf}^x = \omega_l e_{lf}^y + v_f \cos\sigma_{lf} - d \omega_f \sin\sigma_{lf} - l_{lf}^* \omega_l \sin\sigma_{lf}^* - v_l \quad (10)$$

$$\dot{e}_{lf}^y = -\omega_l e_{lf}^x + v_f \sin\sigma_{lf} + d \omega_f \cos\sigma_{lf} + l_{lf}^* \omega_l \cos\sigma_{lf}^* \quad (11)$$

2 领航-跟随控制器设计

2.1 控制器设计的初始条件

为了简化验证控制器的设计过程,对系统模型进行了以下理想化假定:1)跟随车辆上布置高精度传感器能够实时测得跟随车与领航车的实际相对距离和相对角度;2)领航车辆与跟随车辆均为同构体并且领航车辆和跟随车辆的驱动系统能够与期望的速度控制输入量保持一致。

2.2 控制器的设计

本次领航式车辆编队控制器的设计过程中,主要是完成对距离-角度运动模型下两车的控制。进而保证领航式车辆编队中,领航车辆与跟随车辆稳定可靠运行。根据车辆编队运动模型的分析可得,距离-角度运动模型下领航车辆和跟随车辆在横向和纵向方向上的误差如式(10)和(11)所示。

为了将上述距离-角度跟随模型的误差收敛至 0,引入反馈控制率 $e_{lf} = -k_{lf} e_{lf}$ 。

$$\text{其中, } k_{lf} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix}, k_1, k_2 > 0 \text{ 为反馈比例系数。}$$

通过控制该控制率使领航车辆和跟随车辆间的距离和角度趋于理想值^[16]。根据上述公式可推得距离-角度运动模型下跟随车辆的速度 v_f 和角速度 ω_f 为:

$$v_f = [-k_1(l_{lf}^* \cos\sigma_{lf}^* - l_{lf}^x) + l_{lf}^y \omega_l + v_l] \cos\sigma_{lf} + [-k_2(l_{lf}^* \sin\sigma_{lf}^* - l_{lf}^y) + l_{lf}^x \omega_l] \sin\sigma_{lf} \quad (12)$$

$$\omega_f = \frac{1}{d} [-k_1(l_{lf}^* \cos\sigma_{lf}^* - l_{lf}^x) + l_{lf}^y \omega_l + v_l] \sin\sigma_{lf} + \frac{1}{d} [-k_2(l_{lf}^* \sin\sigma_{lf}^* - l_{lf}^y) + l_{lf}^x \omega_l] \cos\sigma_{lf} \quad (13)$$

2.3 控制器稳定性分析

对设计的控制器进行稳定性分析是控制理论中一个重要的方面,特别是在设计闭环控制系统时。稳定性分析可以确保系统响应不会不受控制地增长,而是趋向于稳定状态或在有限的振幅内波动,这种稳定性分析对于对车辆编

队进行的控制设计有着决定性作用。

使用李雅普诺夫函数(Lyapunov function)对所设计的控制器进行稳定性分析。

$$V = \frac{1}{2}((e_{lf}^x)^2 + (e_{lf}^y)^2) \quad (14)$$

当且仅当车辆编队中纵向跟随误差和横向跟随误差均为 0 时,所得的李雅普诺夫函数值为 $V=0$ 。式(14)求解对时间的导数得:

$$\dot{V} = (e_{lf}^x e_{lf}^x) + (e_{lf}^y e_{lf}^y) \quad (15)$$

将式(10)、(11)带入式(15)便可得李雅普诺夫函数对时间的导数值。为了能够保证系统稳定,将反馈线性化控制器得出的期望车速和期望角速度的控制率引入并化简得:

$$\dot{e}_{lf}^x \approx -k_1 e_{lf}^x \quad (16)$$

$$\dot{e}_{lf}^y \approx -k_2 e_{lf}^y \quad (17)$$

进而得到:

$$\dot{V} = -k_1 (e_{lf}^x)^2 - k_2 (e_{lf}^y)^2 \quad (18)$$

根据本文设计的控制率可得 k_1, k_2 均大于 0, 故当且仅当 e_{lf}^x, e_{lf}^y 均等于 0 时, $\dot{V}=0$ 。其余时刻 \dot{V} 均小于 0, 因此证明该系统在此反馈线性化控制率下系统是渐进稳定的, 领航车辆和跟随车辆的误差趋于 0, 能够满足控制要求。

3 领航跟随反馈控制器优化

3.1 总体控制架构

在多车协作编队行驶场景中, 跟随车辆的控制依据领航车辆的速度、角速度以及两车之间跟随距离进行。然而, 由于通信延迟的存在, 跟随车接收到的领航车运动数据滞后于实际环境变化, 导致控制策略的不精准^[16]。针对在通信延迟下获取的前车状态信息, 提出一种基于线性反馈控制与车辆运动状态估计相结合的融合算法(LFC-MSE), 以提高跟随车速度和角速度的精确性, 进而减小通信延迟带来的不利影响。如图 3 所示, 提出了基于 LFC-MSE 融合算法的总体控制模型。上层控制器根据 LFC-MSE 融合算法得到跟随车辆期望的速度和角速度, 重新输入到下层控制器中, 输出节气门开度和制动压力, 进而控制跟随车辆的运动状态。

3.2 领航车运动状态算法估计

如图 4 所示, 描述了存在通信延迟下的车辆状态信息传递过程。跟随车辆 i 在 $t+n$ 时刻接收到领航车辆 $i-1$ 的运动状态参数 $S_{i-1}(t+n), V_{i-1}(t+n)$, 图中被黑色实线矩形框选中的目标车辆 $i-1$ 的位置为默认不存在通信延迟下目标车辆所在的位置, 但是车辆编队在运行中存在通信延迟 γ , 车辆 i 在 $t+n$ 时刻接收到目标车辆 $i-1$ 的运动状态信息 $S_{i-1}(t+n-\gamma), V_{i-1}(t+n-\gamma)$, 图 4 中被黑色虚线矩形框选中的领航车辆 $i-1$ 为存在通信延迟下所处的位置。

通信延迟对跟随车的控制效果影响显著。延迟导致跟

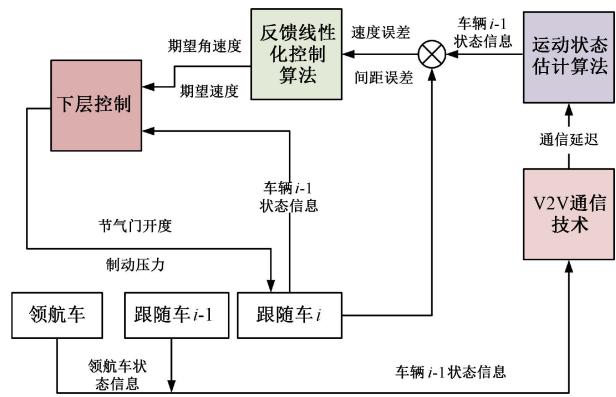


图 3 基于 LFC-MSE 融合算法的总体控制模型

Fig. 3 Overall control model based on LFC-MSE fusion algorithm

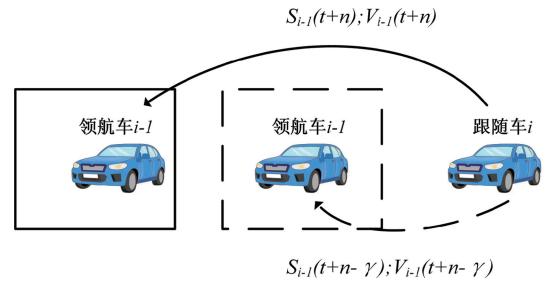


图 4 存在通信延迟下的车辆状态信息传递图

Fig. 4 Vehicle state information transmission diagram
with communication delay

随车无法及时响应前车的速度和位置变化, 具体表现为跟随车辆控制响应滞后、车间距离增加、编队松散, 从而影响编队稳定性和安全性。为解决这一问题, 可以根据预测时间步长与通信延迟的关系分两种情况进行处理。

1) 预测时间步长大于通信延迟 ($\lambda_i > \gamma$)

预测时间步长 $\lambda_i = 10$ ms 大于通信延迟 γ 时, 由于 $\lambda_i > \gamma$, 通信延迟 γ 较短, 车辆速度变化可以忽略不计。前车的运动状态(速度和位置)不会发生显著变化。因此前车在 $(t+n)$ 时刻的运动状态信息和前车在时刻 $(t+n-\gamma)$ 的速度信息与发出状态信息时的一致。在这种情况下, 前车的速度信息可以直接用式(19)表示, 并用于控制算法。

$$\tilde{v}_{i-1}(t+n) = \tilde{v}_{i-1}(t+n-\gamma) \quad (19)$$

位置是速度相对时间的积分, 因此在短时间 γ 内, 位置的变化量为:

$$\Delta S = \tilde{v}_{i-1}(t+n)\gamma \quad (20)$$

因此根据速度估计值, 前车在时刻 $t+n$ 的位置可以通过积分计算得:

$$\tilde{S}_{i-1}(t+n) = \tilde{S}_{i-1}(t+n-\gamma') + \tilde{v}_{i-1}(t+n)\gamma \quad (21)$$

2) 预测时间步长小于或等于通信延迟 ($\lambda_i \leq \gamma$)

由于通信延迟 γ 较长, 前车的运动状态需要基于前车的历史信息和加速度信息对进行预测。在该种情况下首先对通信延迟时间分段, 将通信延迟 γ 分为 T 个时间步长, 每

个步长为 λ_t 。得到调整后的通信延迟 γ' 。

$$T = \begin{bmatrix} \gamma \\ \lambda_t \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\gamma' = \gamma - T\lambda_t \quad (23)$$

在车辆运动学模型中, 车辆速度的变化由加速决定, 在时间步长 λ_t 中, 速度变化量为:

$$\Delta v = T\lambda_t v_{t-1}(t+n) - \gamma' \quad (24)$$

因此前车在时刻 $t+n$ 的位置的速度估计公式为:

$$\tilde{v}_{t-1}(t) = (\tilde{v}_{t-1}(t+1), \tilde{v}_{t-1}(t+2), \dots, \tilde{v}_{t-1}(t+n)) \quad (25)$$

在 $\lambda_t \leq \gamma$ 情况下得到的车辆 $i-1$ 存在通信延迟下预测出的速度信息, 同理根据速度估计值通过积分计算得对车辆 $i-1$ 的位置信息为:

$$\tilde{S}_{t-1}(t+n) = \tilde{S}_{t-1}(t+n-\gamma') + \tilde{v}_{t-1}(t+n)\gamma' \quad (26)$$

因此车辆 $i-1$ 在第 2 种情况下的位置和速度表示如下:

$$\tilde{S}_{t-1}(t) = (\tilde{S}_{t-1}(t+1), \tilde{S}_{t-1}(t+2), \dots, \tilde{S}_{t-1}(t+n)) \quad (27)$$

$$\tilde{v}_{t-1}(t) = (\tilde{v}_{t-1}(t+1), \tilde{v}_{t-1}(t+2), \dots, \tilde{v}_{t-1}(t+n)) \quad (28)$$

3.3 状态估计误差分析

由于通信延迟 γ 的存在, 状态估计值 $\tilde{S}_{t-1}(t), \tilde{v}_{t-1}(t)$ 与实际值直接存在误差, 状态估计误差的上界为:

$$\|\tilde{v}_{t-1}(t+n) - v_{t-1}(t+n)\| \leq C_v \gamma \quad (29)$$

$$\|\tilde{S}_{t-1}(t+n) - S_{t-1}(t+n)\| \leq C_s \gamma \quad (30)$$

其中, C_v 和 C_s 是系统参数相关的常数。

计算 Lyapunov 函数的时间导数, 并利用不等式(如 Young 不等式)推导误差的上界公式为:

$$\dot{V} \leq -\min(k_1, k_2) \|e_{tf}\|^2 + \|e_{tf}\| (C_v + C_s) \gamma \quad (31)$$

最终得到误差的上界:

$$\|e_{tf}\| \leq \frac{(C_v + C_s) \gamma}{\min(k_1, k_2)} \quad (32)$$

该误差上界的计算结果表明, 误差的上界与通信延迟 γ 成正比, 且可以通过增大反馈比例系数 k_1 和 k_2 来减小误差上界, 从而提高系统的稳定性和鲁棒性。

LFC-MSE 算法通过基于模型的状态估计和历史数据, 能够实时预测领航车辆的运动状态变化, 即使在通信延迟较长的情况下, 也能提供准确的前车状态信息。有效消除了通信延迟带来的状态估计误差, 并通过 Lyapunov 稳定性分析确保误差上界与通信延迟成正比, 从而提升了系统的鲁棒性和控制精度。LFC-MSE 融合算法与传统控制策略的对比如表 1 所示。

相比之下, 传统 PID 控制依赖实时反馈, 无法有效处理延迟和扰动; 传统 MPC 控制虽然依赖模型预测, 但计算复杂度高, 对模型精度要求严格; 传统 SMC 控制虽具有较

表 1 LFC-MSE 融合算法与传统控制策略的对比

Table 1 Comparison between LFC-MSE algorithm and traditional control strategies

特性	LFS-MSE 算法	PID 控制	MPC 控制	SMC 控制
状态估计精度	较高	低	中	低
延迟补偿能力	中	无	中	无
鲁棒性	强	中	中	强
实时性	高	高	低	高
处理外部扰动	强	中	中	强

强的鲁棒性, 但容易产生高频抖振。因此, LFC-MSE 融合算法在状态估计精度、延迟补偿能力、鲁棒性和实时性方面显著优于传统控制策略, 特别适用于通信延迟显著、外部扰动和模型不确定性较大的车辆编队系统, 为实际应用提供了更可靠的理论支持和性能保障。

4 LFC-MSE 融合算法仿真验证

为了验证 LFC-MSE 融合算法在领航式车辆编队跟随控制中的有效性, 本研究使用 CarSim 与 Simulink 联合仿真平台, 对其在不同延迟情况下的控制效果进行了实验验证。领航车的位置坐标为 $(0, 0)$, 跟随车 1 的位置坐标为 $(0, -6)$ 。通过仿真实验, 将这些结果与有延迟情况下的 LFC 算法进行对比分析。并且采样时间设定为 0.01 s。

4.1 基于 CarSim 的车辆运动学模型

CarSim 软件作为目前汽车运动学仿真的主流软件, 自带各种试验模型, 同时拥有良好的扩展性, 可以和 Simulink 等外部软件连通, 通过联合建模、选择算法、输入实车参数, 开展汽车相关测试与分析。参数的准确设置对于后期仿真运算具有重要意义。因此在 CarSim 软件中对领航车和跟随车进行运动学建模, 并且选择常用的 C-Class Hatchback 车辆模型。汽车主要参数如表 2 所示。

表 2 C-Class Hatchback 主要参数

Table 2 Main parameters of the C-Class Hatchback mm

主要参数	数值
总长度	4 343
总高度	1 458
轴距	2 600
前轮距	1 543
后轮距	1 514
前轮胎半径	215.9
后轮胎半径	215.9

4.2 CarSim/Simulink 联合仿真模型

使用 CarSim 和 Simulink 双平台联合仿真时, 处理好两个平台的接口关系, 将编译好的 CarSim 模型发送到

Simulink 平台, 实现双平台联合仿真; 当领航车 leader 和跟随车 follower 在接收到输入后通过 Simulink 计算输出所需要的领航车的车速 v_l 和跟随车车速 v_f , 并且计算出在跟

随过程中跟随车相较于领航车的横向轨迹误差 e_x 和纵向轨迹误差 e_y 。更好分析该控制模型的控制效果。搭建了 CarSim-Simulink 联合仿真模型, 如图 5 所示。

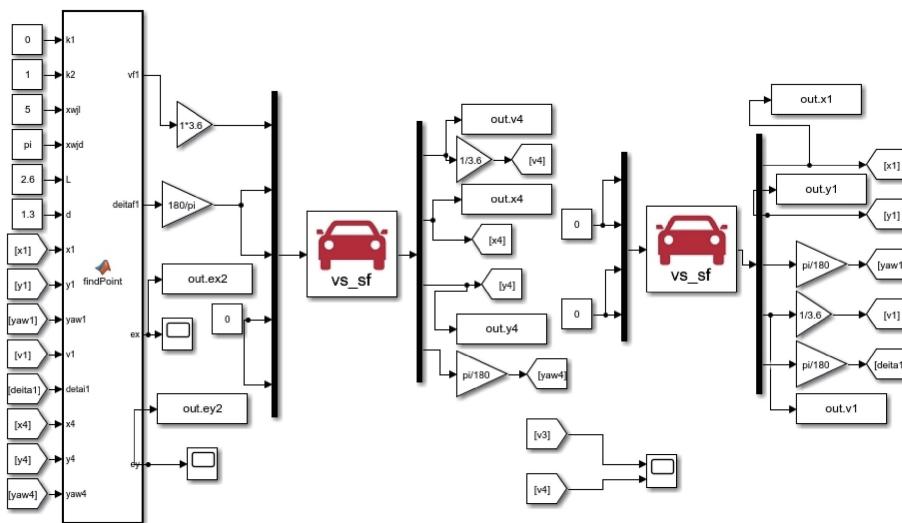


图 5 CarSim-Simulink 联合仿真模型

Fig. 5 CarSim-Simulink co-simulation model

4.3 不同延时条件下 LFC 算法仿真结果

图 6、7 和 8 为通信延时长分别为 50、100 和 200 ms 时, 不包含运动状态估计的线性反馈控制算法 (linear

feedback control, LFC), 仿真所得的跟随车辆与领航车辆的速度、横向跟随误差和纵向跟随误差。

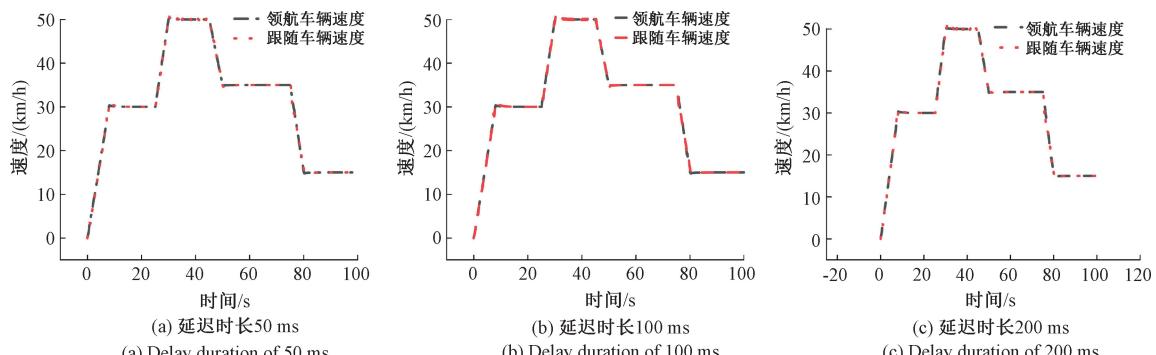


图 6 不同通信延时条件下领航车辆和跟随车辆速度对比图

Fig. 6 Speed comparison between leader and follower vehicles under different communication delay conditions

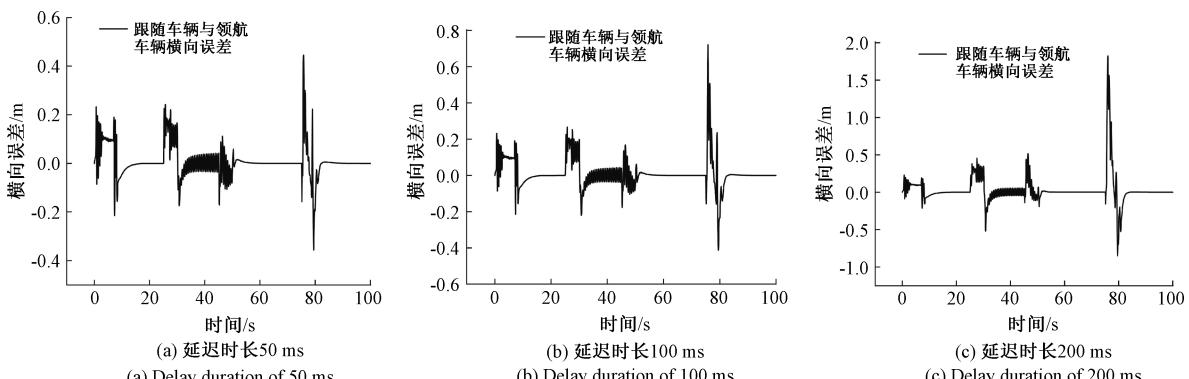


图 7 不同通信延时条件下领航车辆和跟随车辆横向跟随误差图

Fig. 7 Lateral error between leader and follower vehicles under different communication delay conditions

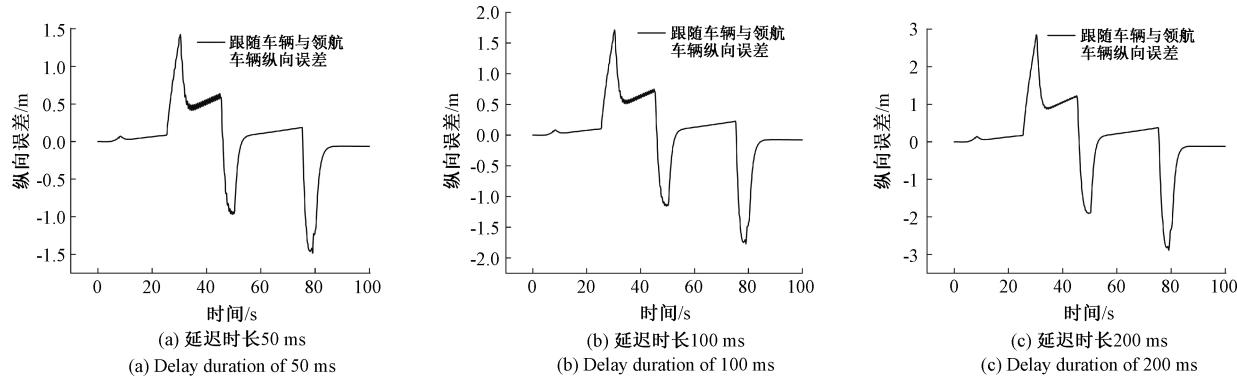


图 8 不同通信延时条件下领航车辆和跟随车辆跟纵向跟随误差图

Fig. 8 Longitudinal error between leader and follower vehicles under different communication delay conditions

为评估 LFC 算法的控制效果,对不同延时条件下 LFC 控制算法所得的纵、横向误差,与 ISO 22737《智能运输系统-用于预定路线的低速自动驾驶(LSAD)系统-性能要求、系统要求和性能测试程序》标准规定的误差进行了对比,如表 3 所示。

表 3 LFC 算法与 ISO 22737 规定的误差区间对比

Table 3 Comparison of error ranges between the LFC algorithm and ISO 22737 standards

误差类型	延迟条件/ms	LFS 算法的误差极值/m	LFS 算法的误差区间/m	标准规定误差区间/m
横向	50	0.445	±0.5	±0.5
	100	0.720	±0.8	±0.5
	200	1.824	±1.8	±0.5
纵向	50	1.424	±1.5	±0.5
	100	1.709	±2.0	±1.5
	200	2.848	±3.0	±1.5

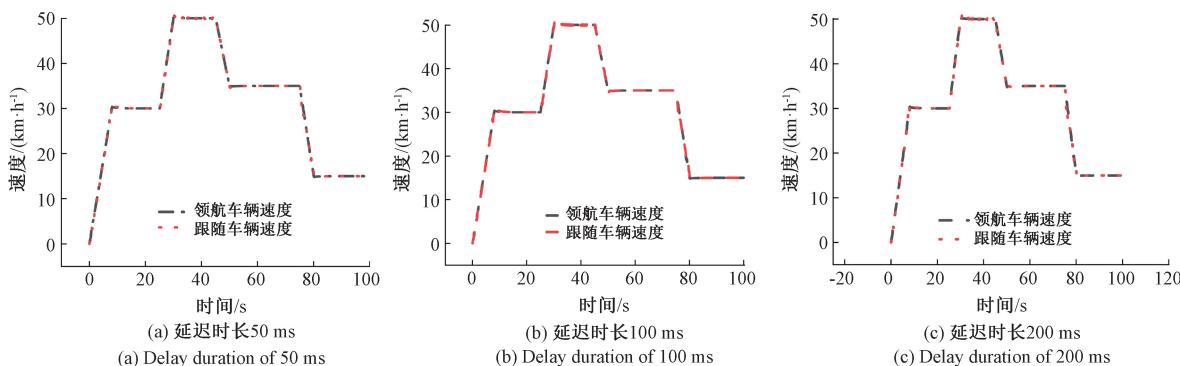


图 9 LFC-MSE 融合算法不同通信延时条件下领航车辆和跟随车辆速度对比图

Fig. 9 Speed comparison between leader and follower vehicles under different communication delay conditions using LFC-MSE fusion algorithm

表 4 是 LFC-MSE 融合算法在不同通信延时条件下领航车辆和跟随车辆的误差与 ISO 22737 标准规定的误差对比。LFC-MSE 算法在不同延迟条件下的误差表现显著优于 LFS 算法。在 50 ms 延迟下,LFC-MSE 算法的横向误

可知,LFS 算法在低延迟(50 ms)时横向误差极值为 0.445 m,未超出标准区间(±0.5 m)上限,满足实际需求;但在高延迟(100 ms 和 200 ms)时,横向误差极值分别达到 0.720 m 和 1.824 m,超出标 ISO 22737 规定值;LFS 算法在 50 ms 延迟下纵向误差极值 1.424 m,未超出标准区间(±1.5 m),而在 100 ms 和 200 ms 延迟下,误差极值进一步增大至 1.709 m 和 2.848 m,严重超出标准区间(±1.5 m)。

由此说明,不包含运动状态估计的线性反馈控制 LFC 算法只能满足在低延迟条件下的控制要求,在高延迟条件下误差显著增大,无法满足实际应用需求。

4.4 不同延时条件下 LFC-MSE 融合算法仿真结果

图 9、10 和 11 为通信延迟时长分别为 50、100 和 200 ms 条件下的 LFC-MSE 融合算法仿真中跟随车辆与领航车辆的速度控制效果和横向跟随误差、纵向跟随误差。

差极值为 0.222 m,远低于标准区间上限(±0.5 m);在 100 ms 和 200 ms 延迟下,横向误差极值分别为 0.360 m 和 0.456 m,均未超出标准区间上限(±0.5 m),表明其在高延迟条件下仍能保持较高的控制精度。纵向误差方面,

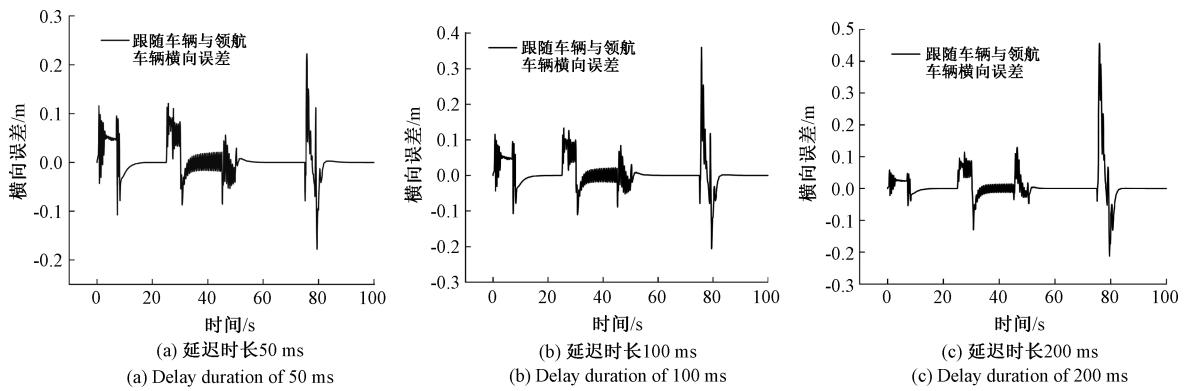


图 10 LFC-MSE 融合算法不同通信延时条件下领航车辆和跟随车辆横向跟随误差对比图

Fig. 10 Lateral error comparison between leader and follower vehicles under different communication delay conditions using LFC-MSE fusion algorithm

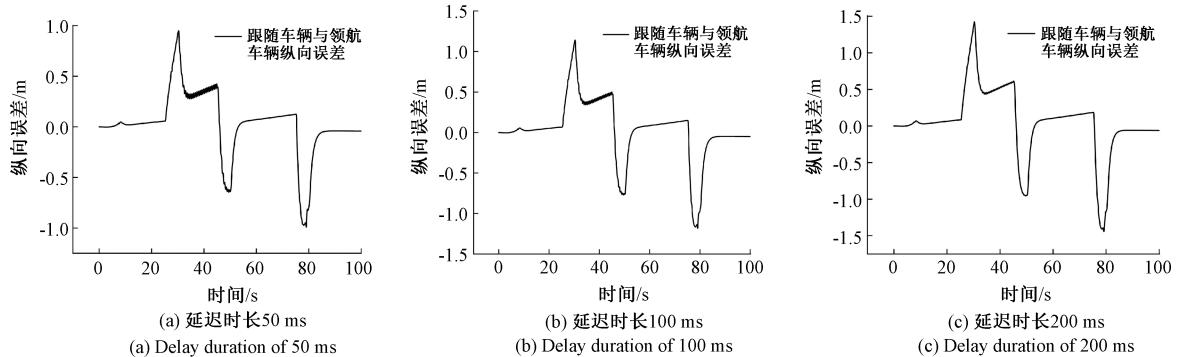


图 11 LFC-MSE 融合算法不同通信延时条件下领航车辆和跟随车辆纵向跟随误差对比图

Fig. 11 Longitudinal error comparison between leader and follower vehicles under different communication delay conditions using LFC-MSE fusion algorithm

LFC-MSE 算法在 50 ms 延迟下误差极值为 0.946 m, 低于标准区间上限 (± 1.5 m); 在 100 ms 和 200 ms 延迟下, 误差极值分别为 1.139 m 和 1.424 m, 均未超出标准区间上限 (± 1.5 m)。

表 4 LFC-MSE 融合算法与 ISO 22737 规定误差区间对比

Table 4 Comparison of error ranges between the LFC-MSE fusion algorithm and ISO 22737 standards

误差类型	延迟条件/ms	LFS-MSE 算法的误差极值/m	LFS-MSE 算法的误差区间/m	标准规定的误差区间/m
横向	50	0.222	±0.3	±0.5
	100	0.360	±0.4	±0.5
	200	0.456	±0.5	±0.5
纵向	50	0.946	±1.0	±0.5
	100	1.139	±1.2	±1.5
	200	1.424	±1.5	±1.5

相比之下, LFS 算法在高延迟条件下横向和纵向误差极值分别达到 1.824 m 和 2.848 m, 显著超出标准区间。

因此, LFC-MSE 融合算法在横向和纵向误差控制方面均表现出优势, 特别是在高延迟条件下仍能保持较小的误差, 满足实际应用需求。

5 结 论

本文通过领航车与跟随车的相对位置关系建立了车辆领航-跟随编队系统的控制模型, 提出了基于领航车运动状态参数线性反馈控制融合算法(LFC-MSE), 解决由于跟随车延迟接收领航车状态信息所导致的跟随车辆响应滞后、车间距离增加、编队松散等问题。

在两种通信延迟情况下对领航车运动状态参数估计的误差分析表明, LFC-MSE 融合算法即使在较长的通信延迟情况下, 也能够较为准确地预测领航车辆运动状态, 可以比传统算法更好地预测领航车的状态参数。同时由于该算法采用分段补偿和积分预测的方法, 较为有效地减小通信延迟所带来的车辆运动状态参数的估计误差。

为了验证 LFC-MSE 融合算法在领航车辆编队控制中的有效性, 建立了 LFC-MSE 融合算法的 CarSim/Simulink 联合仿真模型, 对通信延迟时长分别为 50、100 和 200 ms 进行了仿真分析, 发现跟随车辆与领航车辆的横向跟随误

差极值依次为 0.222、0.360 和 0.456 m, 均低于横向误差标准区间界限(±0.5 m); 纵向跟随误差极值为 0.946、1.139 和 1.424 m, 也均低于纵向误差标准区间界限(±1.5 m)。相较于传统控制策略(LFC), LFC-MSE 融合算法的横向跟随误差分别降低了为 50.1%、50.0% 和 75.0%, 纵向跟随误差分别降低了为 33.6%、33.4% 和 50.0%。

研究表明, LFC-MSE 融合算法能够将误差控制在标准区间内, 特别是在高延迟条件下表现出更好的抗干扰能力和稳定性, 可以有效改善车辆编队运行品质。

参考文献

- [1] TANG CH Y, XIA J F, ZHANG M L, et al. Research on event-triggered control of heterogeneous cooperative vehicle platoons considering time delay[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2024, 45: 540-547.
- [2] 伍锡如, 杨子儒. 基于分布式参考校正的多机器人编队控制[J]. 电子测量技术, 2024, 47(10): 93-100.
WU X R, YANG Z R. Distributed reference correction-based formation control for multi-robot systems[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 93-100.
- [3] CHEN X L, HUANG F H, ZHANG Y G, et al. A novel virtual-structure formation control design for mobile robots with obstacle avoidance[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5807-5830.
- [4] 李正平, 鲜斌. 基于虚拟结构法的分布式多无人机鲁棒编队控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2423-2431.
LI ZH P, XIAN B. Distributed robust formation control for multi-UAV systems based on virtual structure method[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(11): 2423-2431.
- [5] 王海风, 郑柏超, 卢世堃, 等. 基于观测器的无人机编队自适应容错控制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 56-64.
WANG H F, ZHENG B CH, LU SH K, et al. Observer-based adaptive fault-tolerant control for UAV formation [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17): 56-64.
- [6] 李娟, 袁锐锟, 张宏瀚. 基于领航跟随法的多 AUV 编队控制算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 237-246.
LI J, YUAN R K, ZHANG H H. Research on formation control algorithm for multi-AUV systems based on leader-follower method [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 40(6): 237-246.
- [7] 曾毓凌, 郝宇清, 于颖, 等. 基于深度强化学习的多无人车系统编队控制[J]. 力学学报, 2024(2): 56-62.
ZENG Y L, HAO Y Q, YU Y, et al. Formation control for multi-unmanned vehicle systems based on deep reinforcement learning[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024(2): 56-62.
- [8] BENTERKI A, BOUKHNIFER M, JUDALET V, et al. Artificial intelligence for vehicle behavior anticipation: hybrid approach based on maneuver classification and trajectory prediction [J]. IEEE Access, 2020, 8: 56992-57002.
- [9] 胡锦帆. 基于虚拟领航者的无人机一致性编队控制[J]. 电子测量技术, 2023, 46(22): 70-77.
HU J F. Consensus formation control for UAVs based on virtual leader [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(22): 70-77.
- [10] LIU ZH Y, LI Y ZH, WU Y Q, et al. Formation control of nonholonomic unmanned ground vehicles via unscented Kalman filter-based sensor fusion approach[J]. ISA Transactions, 2022, 125: 60-71.
- [11] 吴金霆, 王琢, 张子超, 等. 基于领航-跟随法和人工势场法的巡检机器人编队[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(1): 182-188.
WU J T, WANG ZH, ZHANG Z CH, et al. Formation control for inspection robots based on leader-follower method and artificial potential field[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(1): 182-188.
- [12] GE X, XIAO SH, HAN Q L, et al. Dynamic event-triggered scheduling and platooning control co-design for automated vehicles over vehicular ad-hoc networks[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(1): 31-46.
- [13] 邓辉, 张学艳, 胡金玲, 等. 基于车联网的车辆编队标准现状及展望[J]. 移动通信, 2022, 46(8): 86-91.
DENG H, ZHANG X Y, HU J L, et al. Current status and prospects of vehicle platooning standards based on internet of vehicles [J]. Mobile Communications, 2022, 46(8): 86-91.
- [14] 王玉珏, 崔艳, 李强. 车路协同车辆编队系统研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 324-328.
WANG Y J, CUI Y, LI Q. Research on vehicle platooning systems based on vehicle-road collaboration[J]. Highway, 2023, 68(6): 324-328.
- [15] 冯绪永, 崔立堃, 王承祥, 等. 基于反馈控制的四轮车辆编队研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2022, 38(2): 22-27.
FENG X Y, CUI L K, WANG CH X, et al. Research on four-wheel vehicle platooning based on feedback control [J]. Journal of Shaanxi University of Technology(Natural Science Edition), 2022, 38(2): 22-27.
- [16] LIU H, ZHUANG W, YIN G, et al. Strategy for heterogeneous vehicular platoons merging in automated highway system[C]. 2018 Chinese Control and Decision Conference(CCDC), 2018: 2736-2740.

作者简介

赵晓鹏, 硕士研究生, 主要研究方向为智能网联汽车。

E-mail: 15227985318@163.com

王国权(通信作者), 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为车辆动力学, 车辆虚拟试验技术与无人车技术。

E-mail: wang.guoquan@bistu.edu.cn