

文章编号:1671-1637(2026)03-0060-15

## 无人机引导的狭窄弯曲路段多车协同通行控制

张茜<sup>1</sup>, 郭戈<sup>\*2,3</sup>, 王永川<sup>1</sup>

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁沈阳 110819; 3. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 河北秦皇岛 066004)

**摘要:**针对含密集车流与狭窄车道等灾害应急运输场景中地面车辆感知能力不足、路径规划困难及协同响应不及时等问题,提出了一种基于无人机引导的地面车辆预设时间协同控制方法。以无人机广域感知与路径规划能力为依托,获取了可引导地面交通的路径信息,并将其通过无线通信传输至地面领航车辆,再由车队内部双向通信实现信息互联;设计了基于指数间距策略的扩展前瞻零初始耦合误差动态,以在消除协同算法设计限制的同时,有效避免误差累积与弯道切角行为;基于该误差动态,结合反演控制技术与预设时间引理,构造了分布式车辆控制器,其可保证预设时间单载具稳定性、队列网格稳定性与交通流稳定性存在,实现对响应效率及交通平滑等的综合提升。结果表明:提出的控制方法在狭窄道路与弯曲路径等多种复杂情况下,均可于预设时间(5 s)内实现路径的精确跟踪及协同误差的快速收敛,并通过队列网格稳定性和交通流稳定性评判指标可得其能有效抑制因信息传递造成的波动扩散与交通拥堵,显著提升交通安全与流畅性。综上,该方法具有良好的工程适用性和推广价值,可为智能交通系统中灾害应急运输等场景提供理论与技术支持。**关键词:**智能交通系统;低空交通;无人机引导;协同控制;分布式控制;切角行为;队列网格稳定性;交通流稳定性

中图分类号:U491 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.152

### UAV-guided multi-vehicle cooperative passage control on narrow and curved roads

ZHANG Qian<sup>1</sup>, GUO Ge<sup>\*2,3</sup>, WANG Yong-chuan<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 3. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

**Abstract:** In response to insufficient perception capability, path planning difficulty, and delayed cooperative response of ground vehicles in disaster emergency transportation scenarios involving dense traffic flow and narrow lanes, a predefined-time cooperative control method was proposed for ground vehicles guided by an unmanned aerial vehicle (UAV). The wide-area perception and path planning capability of the UAV was utilized to obtain guiding path information for ground

出版历程:2025-07-29 收稿,2026-01-04 修回,2026-01-23 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(62173079, U1808205, 62573104);河北省自然科学基金项目(F2025501051)

作者简介:张茜(1997-),女,辽宁鞍山人,工学博士研究生, E-mail: zhangqian1901909@163.com。

\*通信作者:郭戈(1972-),男,甘肃庄浪人,教授,博士生导师,工学博士, E-mail: geguo@yeah.net。

引用格式:张茜,郭戈,王永川. 无人机引导的狭窄弯曲路段多车协同通行控制[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(3): 60-74.

Citation: ZHANG Qian, GUO Ge, WANG Yong-chuan. UAV-guided multi-vehicle cooperative passage control on narrow and curved roads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 60-74.

traffic and transmit them to the leading vehicle via wireless communication. Bidirectional inter-vehicle communication was then employed to realize information sharing within the vehicle platoon. An extended look-ahead zero-initial coupled error dynamics based on an exponential spacing policy was designed to remove constraints in cooperative control design and effectively prevent error accumulation and cutting-corner behavior on curved roads. Based on the proposed error dynamics, a distributed vehicle controller was developed using backstepping control and the predefined-time stability lemma. Therefore, the predefined-time stability of individual vehicles, platoon mesh stability, and the existence of traffic flow stability was guaranteed. As a result, cooperative response efficiency and traffic smoothness were improved. Results show that the proposed method achieves accurate path tracking and fast convergence of cooperative errors within the predefined time of 5 s under various complex conditions, including narrow roads and curved paths. Evaluation results based on platoon mesh stability and traffic flow stability indicate that the proposed approach effectively suppresses disturbance propagation caused by information transmission and traffic congestion. Traffic safety and flow efficiency are thus significantly enhanced. Therefore, the proposed method demonstrates good engineering applicability and practical potential. The theoretical and technical support can be provided for disaster emergency transportation in intelligent transportation systems.

**Keywords:** intelligent transportation system; low-altitude traffic; UAV-guided; cooperative control; distributed control; cutting-corner behavior; platoon mesh stability; traffic flow stability

**Publication history:** Received 2025-07-29; Received in revised form 2026-01-04; Accepted 2026-01-23

**Funding:** National Natural Science Foundation of China (62173079, U1808205, 62573104); Natural Science Foundation of Hebei Province (F2025501051)

\* **Corresponding author:** GUO Ge, professor, PhD, E-mail: geguo@yeah.net.

## 0 引 言

低空无人机(如四旋翼无人机)因具备机动性强、部署快捷、感知范围广等优势,广泛应用于交通监测、路径规划与动态引导等任务中。然而,其受限于较低的载重能力和有限的续航时间,难以长期稳定执行高负荷任务<sup>[1-5]</sup>。地面智能车辆则凭借稳定的执行性能、较强的载荷能力以及良好的路径跟随特性,在各类物理运输与地面任务响应中发挥着重要作用,但其感知能力依赖车载摄像头与近距离传感器,易受前车、建筑物遮挡及道路几何结构等因素限制,难以及时获取全局交通信息<sup>[6-10]</sup>。二者在功能定位与感知方式上存在天然互补,协同运行不仅能够弥补各自局限,还可显著提升交通系统的智能化水平、运行效率与环境适应性。因此,基于无人机引导的车辆协同控制正逐步成为智能交通系统的研究热点。

其当前研究主要致力于空地信息传输安全性、资源分配合理性、目标跟踪准确性及复杂环境适应性等<sup>[11-15]</sup>。其中,最新的关于复杂环境下空地协同的研究仅粗略地考虑阵风等在多数情况下可忽略的

微小扰动,没有考虑特殊场景下的路况限制。实际上,在灾害发生后,往往因坍塌、积水、交通管制或临时抢修等原因,使得道路有效通行宽度和通行能力下降。在此条件下,应急车辆通常需要在狭窄车道内以较小车间距组织成队列运行,交通状态由常规自由流转变为受约束的高密度运行状态。这对载具协同控制的稳定性和收敛速度提出了更高要求。

现有载具协同的研究常采用反演控制、滑模控制等来实现协同误差的渐近收敛。尽管这些方法在理论层面具有可行性,但在灾害应急运输等动态交通场景中,往往难以满足对快速响应的实际需求。为此,有研究于算法中引入固定时间思想,虽在一定程度上缩短了协同过程,但策略整体仍属于渐近稳定的范畴<sup>[16]</sup>。另有研究设计了可快速收敛的有限时间载具协作控制器<sup>[17]</sup>,然而,其无法显式描述误差收敛时间上界,在工程中难以设定或验证其在规定时间内完成任务的能力。

在此基础上,还需注意的是,当载具密度过高或协同策略设计不当时,前方载具状态的微小变化会在向后通信传送过程中被逐级放大,形成类似交通

波的波动效应<sup>[18-19]</sup>。这种效应不仅导致后方载具响应振荡,降低乘坐舒适度,还可能引发控制失稳致使载具碰撞<sup>[20]</sup>。因此,十分有必要考虑队列网格稳定性以抑制波动扩散<sup>[21-22]</sup>。与此同时,为进一步保证交通流畅,还应关注与交通流稳定性密切相关的间距策略,以降低不合适的间距设定所引发的交通效率低甚至完全拥堵<sup>[23-24]</sup>。

灾害应急运输亦常伴随临时绕行及复杂狭窄弯道路段,而现有载具协同常采用前瞻误差动态进行路径跟踪。其在弯道行驶时,地面车辆易因提前感知前方载具的转向趋势而产生切角行为,即在尚未进入转向区域提前转弯,致使路径偏离<sup>[25]</sup>。这一现象在山体滑坡、道路垮塌等突发灾害场景中尤为危险。此时,道路结构往往遭到破坏,主干道可能仅剩一条临时抢通的单车道,地面车辆一旦发生偏转,极易越出安全边界或误入障碍区域,从而引发交通事故,甚至危及人员生命安全。此外,载具具有力矩与状态不成正比的非线性动力关系,和纵横向运动共同受转向角和速度影响的耦合特性。已有研究尝试通过反馈线性化、解耦等手段对载具模型进行简化,从而降低控制器设计难度<sup>[26-27]</sup>。但在应急等需要车辆高速运行的交通情景中,耦合特性往往不能被轻易忽视<sup>[28]</sup>。

综上,本文针对智慧物流中的灾害应急运输场景,提出一种基于指数间距策略的扩展前瞻零初始耦合误差动态;并基于该误差动态,结合反演技术与预设时间思想,构造可保证预设时间单载具稳定、队列网格稳定及交通流稳定的分布式协同控制器。本文的主要贡献在于:①设计基于指数间距策略的扩展前瞻零初始耦合误差动态,在消除现有研究中初始状态假设和零初始策略不足的同时,有效解决转弯场景下的切角问题,保证行驶安全;②构造误差在预设时间内收敛到0的载具纵横向协同控制器,其收敛时间上界仅由单一可调参数决定,满足灾害应急运输对快速响应与可控时效性的要求;③保证载具群的队列网格稳定性和交通流稳定性的存在,有效抑制扰动放大效应,提升交通流畅性。

## 1 问题描述

在灾害应急运输场景中,由于道路结构损毁、临时交通管制或应急抢通等,车道有效通行宽度缩减;且道路资源受限加车辆集中投放会形成密集车流。在此情况下,地面运输车辆视野受损严重,无法预知弯道后的路况及全局交通拥堵点。故本文考虑如图1所示的由无人机引导  $N+1$  辆智能车(标记为

0、1、2、 $\dots$ 、 $N$ )的交通协同系统。其中,无人机凭借空域优势感知地面交通状况合理规划运行路径,并通过无线通信机制<sup>[29]</sup>将所规划路径信息实时传输至地面领航车辆,从而引导车辆群完成具体运行任务。

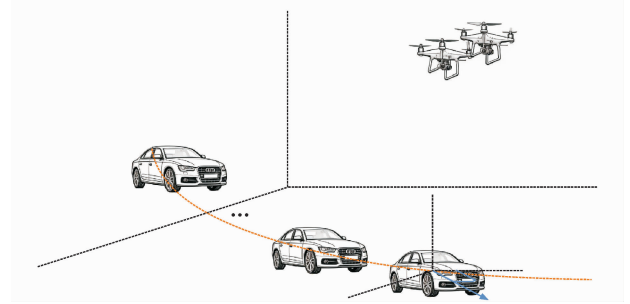


图1 基于无人机引导的车辆协同

Fig. 1 UAV-guided vehicle collaboration

### 1.1 载具建模

领航车辆接收无人机引导地面交通路径信息并据此执行相应运动的运动学为

$$\dot{x}_{c,0} = v_{c,0} \cos(\theta_0) \quad (1)$$

$$\dot{y}_{c,0} = v_{c,0} \sin(\theta_0) \quad (2)$$

式中: $x_{c,0}$ 为领航车辆的纵向位置; $y_{c,0}$ 为领航车辆的横向位置; $\theta_0$ 为领航车辆的速度方向角; $v_{c,0}$ 为领航车辆的线速度。

车辆群通过双向通信拓扑实现信息共享与协同响应。第  $i$  辆车 ( $i=1,2,\dots,N$ ) 的运动学和动力学可以被建模为

$$\dot{x}_{c,i} = v_{c,i} \cos(\theta_i) \quad (3)$$

$$\dot{y}_{c,i} = v_{c,i} \sin(\theta_i) \quad (4)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_{c,i} \quad (5)$$

$$\dot{v}_{c,i} = a_{v,i} \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_{c,i} = a_{w,i} \quad (7)$$

$$\dot{a}_{v,i} = \frac{u_{v,i}}{m_i \tau_i} - \frac{a_{v,i}}{\tau_i} + F_{U,i} \quad (8)$$

$$F_{U,i} = -\frac{1}{m_i \tau_i} \left[ \frac{h_{a,i} A_i C_{d,i} v_{c,i}^2}{2} + h_{a,i} A_i C_{d,i} \tau_i v_{c,i} a_{v,i} + r_i m_i g \cos(\alpha_{\text{slop},i}) + m_i g \sin(\alpha_{\text{slop},i}) \right] \quad (9)$$

式中: $\dot{x}_{c,i}$ 为第  $i$  辆车的纵向位置; $\dot{y}_{c,i}$ 为第  $i$  辆车的横向位置; $\dot{\theta}_i$ 为第  $i$  辆车的速度方向角; $\dot{v}_{c,i}$ 为第  $i$  辆车的线速度; $\dot{\omega}_{c,i}$ 为第  $i$  辆车的角速度; $\dot{a}_{v,i}$ 为第  $i$  辆车的线加速度; $\dot{a}_{w,i}$ 为第  $i$  辆车的角加速度; $u_{v,i}$ 为第  $i$  辆车的油门/制动力矩; $m_i$ 为第  $i$  辆车的质量; $\tau_i$ 为第  $i$  辆车的发动机时间常数; $h_{a,i}$ 为空气密度; $A_i$ 为车辆横截面积; $C_{d,i}$ 为空气阻力系数; $r_i$ 为滚动阻力系数; $g$ 为重力加速度; $\alpha_{\text{slop},i}$ 为路面坡度。

**注1:**在基于无人机引导的车辆协同控制中,采用本文所给的通信架构(即:头车接收无人机路径规划信息,车队内部双向通信实现信息互联),既可有效降低通信负载,又能增强队列安全,还具有良好的可扩展性,为大规模载具协同提供有力支撑。

**注2:**在灾害应急运输等特定场景下,无人机凭借空域优势在车辆盲区监测、全局交通流态势感知与动态路径规划等方面展现出不可替代的辅助作用。根据文献[30]中提出的空地视距概率模型,可以直观描绘无人机引导相较于地面感知的性能优势。以典型城市环境为例,当无人机飞行高度为50 m、水平距离为100 m时,其视距不受遮挡影响概率约为84%,即在该范围内,无人机能够以较高概率持续获取全局道路信息。而地面车辆在相同水平距离条件下,由于高度较低(约1.5 m),易受建筑物与密集车流遮挡,有效感知概率在数学上趋近于0。这一数量级差异充分说明无人机在信息可获得性方面相较于地面车辆的显著优势。此外,需要说明的是,本文所提出的控制策略并不依赖单一无人机的长时间连续运行,而是可通过多架次轮换或高性能电池/混合动力方案支撑完成。

## 1.2 控制目标

本文的研究动机源于智慧物流中灾害应急运输场景等对基于无人机引导的车辆协同控制的迫切需要。围绕该方向,亟需解决的关键科学问题为:无人机如何基于广域感知信息智能规划路径,以及地面多车辆如何快速、安全、可靠地协同执行该规划任务。需要指出的是,本文不聚焦于无人机路径规划问题,而是以无人机规划生成并下发给领航车辆的引导路径为基础,研究如何设计车辆控制策略,使地面多车辆在无人机引导下实现安全、高效、有序的协同运行,具体的控制目标如下。

(1)单载具稳定性:所给出的协同误差预设时间内收敛到0,即载具在预设时间内实现期望的协同关系。

协同误差表示为  $e_i = (e_{x,i}, e_{y,i})^T$ , 其中  $e_{x,i}$  为横向协同误差,  $e_{y,i}$  为纵向协同误差。

(2)队列网格稳定性:纵横向协同误差在通信传递过程中不会被逐级放大,即,不等式  $|e_{x,i+1}/e_{x,i}| < 1$  和  $|e_{y,i+1}/e_{y,i}| < 1$  被满足。

(3)交通流稳定性:存在  $\partial Q_c / \partial \rho_c$  满足不等式  $\partial Q_c / \partial \rho_c > 0$ , 其中,  $Q_c$  为交通流速率,  $\rho_c$  为交通密度。

这些目标均对应具体的载具群效能与工程诉求,可提升任务响应速度和路径跟踪精度,抑制和缓

解转向、加减速、密度变化等扰动因素所引发的交通堵塞。为面向实际部署的智能交通系统提供理论支持和工程可行性。

## 2 基于无人机引导的车辆协同控制

为实现地面车辆在空中引导路径下的高效协同,本文设计基于指数型间距策略和改进误差动态的协同控制方法。其通过保证预设时间单载具稳定性、队列网格稳定性及交通流稳定性的存在,有效提高车辆的跟踪精度、运行安全性及交通抗拥堵能力,实现对复杂环境中载具协同的稳健控制。

### 2.1 载具间距策略

为提升载具群在变速等复杂交通情况下的协同运行能力,本文采用一种与速度密切相关的指数型间距策略来动态调整载具间的期望相对位置。该策略不仅考虑了静态安全距离与载具自身长度,还引入速度、减速能力等因素对跟驰行为的影响,从而灵活调节交通密度提升交通流稳定性。具体而言,载具间的目标间距  $d_{des,i}$  被设定为

$$d_{des,i} = L_{vehicle} + \Delta + \sigma_c v_{c,i}^2 / (2A_c) + k_{s,1} (1 - e^{-v_{c,i}/k_{s,2}}) \quad (10)$$

式中:  $L_{vehicle}$  为载具的长度;  $\Delta$  为载具间的静止距离;  $\sigma_c$  为安全系数;  $A_c$  为最大可能减速度绝对值;  $k_{s,1}$  和  $k_{s,2}$  均为设计参数。

为便于后续误差动态的构建,现将其进一步分解,分解后的纵向间距  $d_{x,des,i}$  和横向间距  $d_{y,des,i}$  可以被描述为

$$d_{x,des,i} = d_{des,i} \cos(\theta_i) \quad (11)$$

$$d_{y,des,i} = d_{des,i} \sin(\theta_i) \quad (12)$$

相较于传统将纵横向期望间距设定为固定常值的方式<sup>[7]</sup>,上述策略将其设计为随载具速度方向角动态变化的矢量,具有更强的场景适应性和协同柔性,特别适用于路径非直线、载具转向频繁等高动态交通环境。

### 2.2 协同误差动态

在所建立的期望间距的基础上,为实现多载具协同,需进一步构造误差动态以刻画当前运动与理想运动之间的偏差。现有研究多采用前瞻误差动态来描述协同行为<sup>[25,31]</sup>,其基本形式为

$$e_{tra,x,i} = x_{c,i-1} - x_{c,i} - d_{x,des,i} \quad (13)$$

$$e_{tra,y,i} = y_{c,i-1} - y_{c,i} - d_{y,des,i} \quad (14)$$

式中:  $e_{tra,x,i}$  为前瞻误差动态下的纵向误差;  $e_{tra,y,i}$  为前瞻误差动态下的横向误差。

这种误差动态可于平直路段有效保证期望的队

列协同关系,但当路径包含转向段时,智能车不可避免地会出现如图2所示的切角行为<sup>[22,25]</sup>。为了减缓该现象以降低在狭窄路段发生交通事故的风险,引入一个基于前载具状态信息的扩展量  $s_{i-1}$

$$s_{i-1} = \begin{cases} 0 & \kappa_{i-1} = 0 \\ \frac{-1 + \sqrt{1 + \kappa_{i-1}^2 d_{des,i}^2}}{\kappa_{i-1}} & \kappa_{i-1} \neq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\kappa_{i-1}$ 为路径曲率, $\kappa_{i-1} = \theta_{i-1}/v_{i-1}$ 。

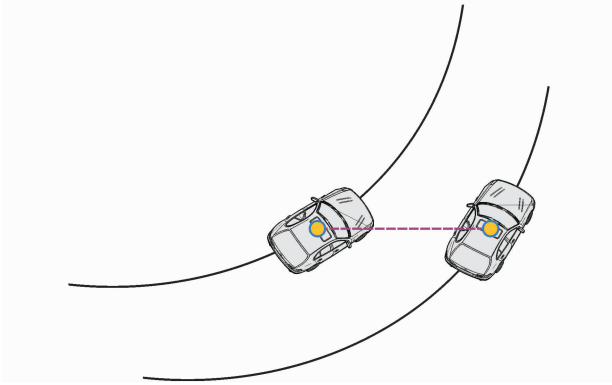


图2 切角行为

Fig. 2 Cutting-corner behavior

基于该扩展量的前瞻误差动态为

$$e_{s,x,i} = x_{c,i-1} - x_{c,i} + s_{i-1} \sin(\theta_{i-1}) - d_{des,i} \cos(\theta_i) \quad (16)$$

$$e_{s,y,i} = y_{c,i-1} - y_{c,i} - s_{i-1} \cos(\theta_{i-1}) - d_{des,i} \sin(\theta_i) \quad (17)$$

式中: $e_{s,x,i}$ 、 $e_{s,y,i}$ 分别为基于扩展量的前瞻误差动态下的纵向误差与横向误差。

在此基础上,考虑非零初始误差动态易导致队列不稳定并增加后续协同算法设计的限制,故设计零初始辅助项  $O_{x,i}$ 、 $O_{y,i}$  和  $\beta$  分别为

$$O_{x,i} = \left\{ \left[ e_{s,x,i}(0)n/T_d + \dot{e}_{s,x,i}(0) \right] t + e_{s,x,i}(0) \right\} \cdot (1-\beta) \quad (18)$$

$$O_{y,i} = \left\{ \left[ e_{s,y,i}(0)n/T_d + \dot{e}_{s,y,i}(0) \right] t + e_{s,y,i}(0) \right\} \cdot (1-\beta) \quad (19)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 - \left[ (T_d - t)/T_d \right]^n & 0 \leq t < T_d \\ 1 & t \geq T_d \end{cases} \quad (20)$$

式中: $n$ 为大于2的正常数; $T_d$ 为预设时间参数。

基于该辅助项,误差动态可重写为

$$e_{x,i} = e_{s,x,i} - O_{x,i} \quad (21)$$

$$e_{y,i} = e_{s,y,i} - O_{y,i} \quad (22)$$

此时,可以很容易地看出:当  $t=0$  时,  $e_{x,i}(0) = 0$ ,  $e_{y,i}(0) = 0$ ,  $\dot{e}_{x,i}(0) = 0$ ,  $\dot{e}_{y,i}(0) = 0$ ; 当  $0 < t < T_d$  时,  $e_{x,i} = e_{s,x,i} - O_{x,i}$ ,  $e_{y,i} = e_{s,y,i} - O_{y,i}$ ; 当  $t \geq T_d$  时,  $e_{x,i} = e_{s,x,i}$ ,  $e_{y,i} = e_{s,y,i}$ 。即辅助项在预设时间  $T_d$  收

敛到0,避免了因误差持续变化而产生的能源消耗和部件磨损。

尽管当前误差动态式(21)、(22)可在避免切角行为的同时保证协同误差零初始,但其难以抑制误差在传送方向的逐级放大,为保证队列网格稳定性,提升交通安全,本文进一步构建如下所示的耦合误差动态

$$\bar{e}_{x,i} = \begin{cases} \lambda e_{x,i} - e_{x,i+1} & i=1,2,\dots,N-1 \\ \lambda e_{x,i} & i=N \end{cases} \quad (23)$$

$$\bar{e}_{y,i} = \begin{cases} \lambda e_{y,i} - e_{y,i+1} & i=1,2,\dots,N-1 \\ \lambda e_{y,i} & i=N \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\bar{e}_{x,i}$ 、 $\bar{e}_{y,i}$ 分别为耦合误差动态下的纵向误差与横向误差; $\lambda$ 为设计参数,其满足不等式  $0 < \lambda < 1$ 。

经分析可得:所设计的耦合误差动态式(23)和(24)同误差动态式(21)和(22)具有等价性,即,当且仅当所有载具的误差式(21)和(22)同时为0时,式(23)和(24)中的耦合误差方为0。这种等价关系不仅说明了耦合误差动态式(23)、(24)的稳定性与误差动态式(21)、(22)一致,还表明了耦合误差的初始值为0。

**注3:**前瞻误差动态控制在转弯场景中易因试图加快误差收敛速度而诱发切角行为。为缓解该问题,引入扩展量  $s_{i-1}$ 对误差动态进行补偿,以确保载具于预定转向点处执行方向变换,从而提升系统在狭窄路况下的跟踪精度和运行安全性。

**注4:**扩展量  $s_{i-1}$ 如此设计的原因是为了保证跟随载具同前载具具有相同的转弯半径。此外,扩展量  $s_{i-1}$ 在  $\kappa_{i-1} = 0$  处的连续性可通过对其进行泰勒展开并取  $\kappa_{i-1} \rightarrow 0$  的极限计算得到。

**注5:**本文所设计的误差动态是在基于指数型间距策略的前瞻误差动态的基础上,由扩展量、零初始辅助项及耦合结构共同构成的,故被命名为扩展前瞻零初始耦合误差动态。其中,指数型间距策略有助于保障交通流稳定性;扩展量引入前载具曲率以抑制转弯过程中的切角行为;零初始辅助项保证误差在初始时刻的值为0,并与将误差关联起来的耦合结构共同为实现队列网格稳定性奠定了基础。

**注6:**地面载具协同多引入指数辅助项来保证协同误差在初始时刻的值为0,然而,指数函数的渐近收敛特性使得控制存在不必要的连续微调,增加了能耗并加剧了载具部件的磨损<sup>[32]</sup>。为解决该问题,本文考虑与预设时间参数相关的分段函数式(20),使辅助项式(18)、(19)在预设时间归零,从而在消除初始条件限制的同时,避免因辅助项持续

作用而引发的额外波动。

### 2.3 载具控制器设计

于此,本文在上述内容的基础上,应用反演控制技术和预设时间引理设计载具协同控制器以确保地面车辆在空中无人机引导轨迹下实现稳定、有序、高效的协同跟踪。具体的设计过程可以划分为以下

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} -\lambda_x \cos(\theta_i) (\sigma_c v_{c,i}/A_c + k_{s,1} e^{-v_{c,i}/k_{s,2}}/k_{s,2}) & \lambda_x d_{des,i} \sin(\theta_i) - k_0 s_i \cos(\theta_i) \\ -\lambda_y \sin(\theta_i) (\sigma_c v_{c,i}/A_c + k_{s,1} e^{-v_{c,i}/k_{s,2}}/k_{s,2}) & -\lambda_y d_{des,i} \cos(\theta_i) - k_0 s_i \sin(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Z_{x,1,i} = \lambda_x \left[ v_{c,i-1} \cos(\theta_{i-1}) - v_{c,i} \cos(\theta_i) + \dot{s}_{i-1} \sin(\theta_{i-1}) + s_{i-1} \dot{\theta}_{i-1} \cos(\theta_{i-1}) \right] - k_0 \left[ -v_{c,i+1} \cos(\theta_{i+1}) + v_{c,i} \cos(\theta_i) + \dot{s}_i \sin(\theta_i) + d_{des,i+1} \sin(\theta_{i+1}) \omega_{c,i+1} - \left( \frac{\sigma_c v_{c,i+1}}{A_c} + \frac{k_{s,1}}{k_{s,2}} e^{-\frac{v_{c,i+1}}{k_{s,2}}} \right) \cos(\theta_{i+1}) a_{v,i+1} \right] \quad (27)$$

$$Z_{y,1,i} = \lambda_y \left[ v_{c,i-1} \sin(\theta_{i-1}) - v_{c,i} \sin(\theta_i) - \dot{s}_{i-1} \cos(\theta_{i-1}) + s_{i-1} \dot{\theta}_{i-1} \sin(\theta_{i-1}) \right] - k_0 \left[ -v_{c,i+1} \sin(\theta_{i+1}) + v_{c,i} \sin(\theta_i) - \dot{s}_i \cos(\theta_i) - d_{des,i+1} \cos(\theta_{i+1}) \omega_{c,i+1} - \left( \frac{\sigma_c v_{c,i+1}}{A_c} + \frac{k_{s,1}}{k_{s,2}} e^{-\frac{v_{c,i+1}}{k_{s,2}}} \right) \sin(\theta_{i+1}) a_{v,i+1} \right] \quad (28)$$

进而根据式(26)设计虚拟控制律

$$\begin{bmatrix} a_{v,i}^* \\ \omega_{c,i}^* \end{bmatrix} = \mathbf{M}_i^{-1} \left[ - \begin{bmatrix} Z_{x,1,i} \\ Z_{y,1,i} \end{bmatrix} - c_1 \begin{bmatrix} |\bar{e}_{x,i}|^{1+\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{x,i}) \\ |\bar{e}_{y,i}|^{1+\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{y,i}) \end{bmatrix} - c_2 \begin{bmatrix} |\bar{e}_{x,i}|^{1-\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{x,i}) \\ |\bar{e}_{y,i}|^{1-\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{y,i}) \end{bmatrix} - k_1 \mathbf{M}_i \mathbf{M}_i^T \begin{bmatrix} \bar{e}_{x,i} \\ \bar{e}_{y,i} \end{bmatrix} \right] \quad (29)$$

$$c_1 = \sqrt{2} \pi 2^{\alpha_1/2-1} / (\alpha_1 T_1) \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} u_{v,i} \\ a_{w,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i \tau_i \left( \dot{a}_{v,i}^* + \frac{1}{\tau_i} a_{v,i} - F_{U,i} \right) \\ \dot{w}_{c,i}^* \end{bmatrix} - k_2 \begin{bmatrix} m_i \tau_i \bar{e}_{x,i} \\ \bar{e}_{y,i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_i \tau_i [c_1 |\bar{e}_{x,i}|^{1+\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{x,i}) + c_2 |\bar{e}_{x,i}|^{1-\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{x,i})] \\ c_1 |\bar{e}_{y,i}|^{1+\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{y,i}) + c_2 |\bar{e}_{y,i}|^{1-\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{y,i}) \end{bmatrix} \quad (33)$$

式中: $k_2$ 为设计参数,其满足不等式 $k_2 > 1/2$ 。

具体的关于协同控制器的定理和相关的稳定性分析在下文给出。

**注7:**在本文设计的协同控制器式(33)中,虚拟控制律的导数 $\dot{a}_{v,i}^*$ 和 $\dot{w}_{c,i}^*$ 虽可通过解析计算精确获得,但为降低计算复杂性,还可采用文献[33]中的滤波器估计得到。

**定理:**对于具有如式(1)~(9)运动学和动力学的载具群,在双向通信拓扑、指数型间距策略式(10)及扩展前瞻零初始耦合误差动态式(15)~(24)下,若选取合适的设计参数,所构造的控制器式(33)能够保证预设时间单载具稳定性,队列网格稳定性,和

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1,i} = \bar{e}_i^T & \left[ -k_1 \mathbf{M}_i \mathbf{M}_i^T \begin{bmatrix} \bar{e}_{x,i} \\ \bar{e}_{y,i} \end{bmatrix} - c_1 \begin{bmatrix} |\bar{e}_{x,i}|^{1+\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{x,i}) \\ |\bar{e}_{y,i}|^{1+\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{y,i}) \end{bmatrix} - c_2 \begin{bmatrix} |\bar{e}_{x,i}|^{1-\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{x,i}) \\ |\bar{e}_{y,i}|^{1-\alpha_1} \operatorname{sgn}(\bar{e}_{y,i}) \end{bmatrix} + \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} \tilde{e}_{x,i} \\ \tilde{e}_{y,i} \end{bmatrix} \right] \leq \\ & -c_1 (|\bar{e}_{x,i}|^{2+\alpha_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2+\alpha_1}) - c_2 (|\bar{e}_{x,i}|^{2-\alpha_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2-\alpha_1}) - k_1 [\bar{e}_{x,i} \bar{e}_{y,i}] \mathbf{M}_i \mathbf{M}_i^T \begin{bmatrix} \bar{e}_{x,i} \\ \bar{e}_{y,i} \end{bmatrix} + \end{aligned}$$

2个步骤。

**步骤1:**先对耦合误差 $\bar{e}_i = (\bar{e}_{x,i}, \bar{e}_{y,i})^T$ 求导得

$$\dot{\bar{e}}_i = \begin{bmatrix} \dot{\bar{e}}_{x,i} \\ \dot{\bar{e}}_{y,i} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} a_{v,i} \\ \omega_{c,i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{x,1,i} \\ Z_{y,1,i} \end{bmatrix} \quad (25)$$

中间变量 $\mathbf{M}_i$ 、 $Z_{x,1,i}$ 和 $Z_{y,1,i}$ 分别为

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \lambda_x d_{des,i} \sin(\theta_i) - k_0 s_i \cos(\theta_i) \\ -\lambda_y d_{des,i} \cos(\theta_i) - k_0 s_i \sin(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Z_{x,1,i} = \lambda_x \left[ v_{c,i-1} \cos(\theta_{i-1}) - v_{c,i} \cos(\theta_i) + \dot{s}_{i-1} \sin(\theta_{i-1}) + s_{i-1} \dot{\theta}_{i-1} \cos(\theta_{i-1}) \right] - k_0 \left[ -v_{c,i+1} \cos(\theta_{i+1}) + v_{c,i} \cos(\theta_i) + \dot{s}_i \sin(\theta_i) + d_{des,i+1} \sin(\theta_{i+1}) \omega_{c,i+1} - \left( \frac{\sigma_c v_{c,i+1}}{A_c} + \frac{k_{s,1}}{k_{s,2}} e^{-\frac{v_{c,i+1}}{k_{s,2}}} \right) \cos(\theta_{i+1}) a_{v,i+1} \right] \quad (27)$$

$$Z_{y,1,i} = \lambda_y \left[ v_{c,i-1} \sin(\theta_{i-1}) - v_{c,i} \sin(\theta_i) - \dot{s}_{i-1} \cos(\theta_{i-1}) + s_{i-1} \dot{\theta}_{i-1} \sin(\theta_{i-1}) \right] - k_0 \left[ -v_{c,i+1} \sin(\theta_{i+1}) + v_{c,i} \sin(\theta_i) - \dot{s}_i \cos(\theta_i) - d_{des,i+1} \cos(\theta_{i+1}) \omega_{c,i+1} - \left( \frac{\sigma_c v_{c,i+1}}{A_c} + \frac{k_{s,1}}{k_{s,2}} e^{-\frac{v_{c,i+1}}{k_{s,2}}} \right) \sin(\theta_{i+1}) a_{v,i+1} \right] \quad (28)$$

$$c_2 = \sqrt{2} \pi / (\alpha_1 T_1 2^{1-\alpha_1/2}) \quad (31)$$

式中: $T_1$ 为预设时间参数,其满足不等式 $T_1 > T_d$ ; $\alpha_1$ 和 $k_1$ 为设计参数,其分别满足不等式 $0 < \alpha_1 < 1$ 和 $k_1 > 1/2$ 。

**步骤2:**定义误差

$$\bar{e}_i = \begin{bmatrix} \bar{e}_{x,i} \\ \bar{e}_{y,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{v,i} \\ \omega_{c,i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{v,i}^* \\ \omega_{c,i}^* \end{bmatrix} \quad (32)$$

基于此,设计协同控制器

交通流稳定性的存在。

**证明:**详细的证明可以被划分为以下三部分。

(1)预设时间单载具稳定性

选择候选李雅普诺夫函数为

$$V_{1,i} = \bar{e}_i^T \bar{e}_i / 2 \quad (34)$$

根据式(25)、(32),对其关于时间求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1,i} = \bar{e}_i^T \dot{\bar{e}}_i = \bar{e}_i^T & \left[ \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} a_{v,i} \\ \omega_{c,i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{x,1,i} \\ Z_{y,1,i} \end{bmatrix} \right] = \\ \bar{e}_i^T & \left[ \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} \tilde{e}_{x,i} + a_{v,i}^* \\ \tilde{e}_{y,i} + \omega_{c,i}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{x,1,i} \\ Z_{y,1,i} \end{bmatrix} \right] \end{aligned} \quad (35)$$

将虚拟控制律式(29)代入式(35),并使用文献[34]中的引理进一步推导得到

$$\begin{aligned} [\bar{e}_{x,i} \ \bar{e}_{y,i}] \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} \bar{e}_{x,i} \\ \bar{e}_{y,i} \end{bmatrix} &\leq -c_1 (|\bar{e}_{x,i}|^{2+a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2+a_1}) - c_2 (|\bar{e}_{x,i}|^{2-a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2-a_1}) + \\ \frac{1}{2} \bar{e}_i^T \mathbf{M} \mathbf{M}^T \bar{e}_i + \frac{1}{2} \bar{e}_i^T \bar{e}_i - k_1 \bar{e}_i^T \mathbf{M}_i \mathbf{M}_i^T \bar{e}_i &\leq -c_1 (|\bar{e}_{x,i}|^{2+a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2+a_1}) - \\ c_2 (|\bar{e}_{x,i}|^{2-a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2-a_1}) + \bar{e}_i^T \bar{e}_i / 2 & \end{aligned} \quad (36)$$

选择候选李雅普诺夫函数为

$$V_{2,i} = V_{1,i} + \bar{e}_i^T \bar{e}_i / 2 \quad (37)$$

根据式(32)、(7)和(8),对其关于时间求导

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2,i} &= -c_1 (|\bar{e}_{x,i}|^{2+a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2+a_1}) - c_2 (|\bar{e}_{x,i}|^{2-a_1} + \\ &|\bar{e}_{y,i}|^{2-a_1}) + \bar{e}_i^T \bar{e}_i / 2 + \bar{e}_i^T \dot{\bar{e}}_i = -c_1 (|\bar{e}_{x,i}|^{2+a_1} + \\ &|\bar{e}_{y,i}|^{2+a_1}) - c_2 (|\bar{e}_{x,i}|^{2-a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2-a_1}) + \\ &\bar{e}_i^T \left[ \begin{bmatrix} u_{v,i} \\ m_i \tau_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{a}_{v,i}^* + \frac{a_{v,i}}{\tau_i} - F_{U,i} \\ \dot{w}_{c,i}^* \end{bmatrix} \right] + \frac{\bar{e}_i^T \bar{e}_i}{2} \end{aligned} \quad (38)$$

将控制律式(33)代入式(38),并使用文献[34]

中的引理进一步推导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2,i} &= -c_1 (|\bar{e}_{x,i}|^{2+a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2+a_1}) - c_2 (|\bar{e}_{x,i}|^{2-a_1} + \\ &|\bar{e}_{y,i}|^{2-a_1}) + \bar{e}_i^T \left[ -c_1 \begin{bmatrix} |\bar{e}_{x,i}|^{1+a_1} \text{sgn}(\bar{e}_{x,i}) \\ |\bar{e}_{y,i}|^{1+a_1} \text{sgn}(\bar{e}_{y,i}) \end{bmatrix} - \right. \\ &c_2 \left. \begin{bmatrix} |\bar{e}_{x,i}|^{1-a_1} \text{sgn}(\bar{e}_{x,i}) \\ |\bar{e}_{y,i}|^{1-a_1} \text{sgn}(\bar{e}_{y,i}) \end{bmatrix} - k_2 \bar{e}_i \right] + \bar{e}_i^T \bar{e}_i / 2 \leq \\ &-c_1 (|\bar{e}_{x,i}|^{2+a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2+a_1} + |\bar{e}_{x,i}|^{2+a_1} + \\ &|\bar{e}_{y,i}|^{2+a_1}) - c_2 (|\bar{e}_{x,i}|^{2-a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2-a_1} + \\ &|\bar{e}_{x,i}|^{2-a_1} + |\bar{e}_{y,i}|^{2-a_1}) \leq \\ &-\sqrt{2} \pi [V_{2,i}^{(2+a_1)/2} + V_{2,i}^{(2-a_1)/2}] / (\alpha_1 T_1) \end{aligned} \quad (39)$$

根据式(39)及文献[35]中的引理可得:耦合误差  $\bar{e}_{x,i}$  和  $\bar{e}_{y,i}$  在预设时间  $T_1$  内收敛到 0。结合前述的误差等价性分析可以进一步推出,误差  $e_{x,i}$  和  $e_{y,i}$  具备同样的预设时间收敛性,即预设时间单载具稳定性证明完毕。

(2) 队列网格稳定性

由单载具预设时间稳定性可得,当  $t \geq T_1$  时,耦合误差  $\bar{e}_{\iota,i} = 0$ ,下标  $\iota = x, y$ , 那么有

$$\lambda e_{\iota,i} = e_{\iota,i+1} \quad (40)$$

因  $0 < \lambda < 1$ , 那么  $0 < e_{\iota,i+1} / e_{\iota,i} < 1$ , 其与文献[22]中的队列网格稳定性条件相一致,即队列网格稳定性证明完毕。

(3) 交通流稳定性

当载具群处于稳态且沿车辆行驶切向方向/纵向运行时,载具与其前载具间的间距为

$$d_{des} = L_{car} + \Delta + \sigma_c v_c^2 / (2A_c) + k_{s,1} (1 - e^{-v_c/k_{s,2}}) \quad (41)$$

此时,交通密度  $\rho_c(v_c)$  和交通流速率  $Q_c[\rho_c(v_c)]$  为

$$\rho_c(v_c) = \frac{1}{L_{car} + \Delta + \sigma_c v_c^2 / (2A_c) + k_{s,1} (1 - e^{-v_c/k_{s,2}})} \quad (42)$$

$$Q_c[\rho_c(v_c)] = \frac{v_c}{L_{car} + \Delta + \sigma_c v_c^2 / (2A_c) + k_{s,1} (1 - e^{-v_c/k_{s,2}})} \quad (43)$$

通过分析交通流速率关于密度的变化曲线和经典交通流稳定性判据<sup>[36]</sup>,可以得到:为证明交通流稳定性的存在,只需证明存在量  $\rho_{c,r}$ 、 $\rho_{c,\min}$  和  $\rho_{c,\max}$  使得以下关系式成立

$$\rho_{c,\min} \leq \rho_{c,r} \leq \rho_{c,\max} \quad (44)$$

$$Q(\rho_{c,\min}) = Q(\rho_{c,\max}) = 0 \quad (45)$$

$$\partial Q_c / \partial \rho_c |_{\rho_c = \rho_{c,r}} = 0 \quad (46)$$

其中,根据式(42)、(43)可以发现  $\rho_{c,\max}$  和  $\rho_{c,\min}$  分别是交通密度在  $v_c = 0$  时和  $\lim_{v_c \rightarrow \infty} Q_c[\rho_c(v_c)]$  时的值,且

$Q(\rho_{c,\min}) = Q(\rho_{c,\max}) = 0$ , 故条件式(44)、(45)均得到满足。此外,可以观察到交通流速率  $Q_c[\rho_c(v_c)]$  在闭区间  $[\rho_{c,\min}, \rho_{c,\max}]$  内连续,在开区间  $(\rho_{c,\min}, \rho_{c,\max})$  内可导,根据罗尔定理可知在开区间  $(\rho_{c,\min}, \rho_{c,\max})$  内至少存在一个点使得式  $\partial Q_c / \partial \rho_c |_{\rho_c = \rho_{c,r}} = 0$  成立,那么,条件式(46)被满足,车辆队列交通流稳定性存在证明完毕。

**注 8:** 预设时间单载具稳定性保证协同误差于预设时间内收敛到 0, 增强了载具群应对突发状况的响应速度与任务完成的效率。队列网格稳定性避免协同误差的累积和链式反应,加强了载具协同运行的安全性。交通流稳定性抑制交通波动所引发的大范围拥堵,提高了交通通行的流畅度。三者共同为载具群在复杂交通场景下的高效与安全协同提供坚实的理论保障。

**注 9:** 近年来,自动驾驶研究多聚焦于端到端算法<sup>[37]</sup>。这类算法依托深度学习等可直接实现感知—决策—控制一体化。然而,在灾害应急运输等复杂场景中,其面临训练样本稀缺、模型可解释性不足及协同机制欠缺等困难与挑战。故本文提出更能保证载具协同安全性、稳定性与交通效率的控制方法以对含端到端算法的单车智能形成有益补充。

### 3 仿真实验

为验证所提控制方法的有效性,本文构建含密集车流、狭窄车道等典型灾害应急运输特征的载具运行环境。其中,地面部分车辆作为模拟常规城市

车流的背景车辆以不同速度或车道自由行驶,另部分车辆则在所提控制算法驱动下按无人机引导路径协同运行。需要说明的是,该引导路径是无人机结合运输任务和道路交通状态动态规划并下发给地面车辆的目标轨迹,其在试验中被假设为已知条件。

具体的载具动力学模型参数设置为: $m_i = 1\ 607\ \text{kg}$ ,  $\tau_i = 0.25$ ,  $h_{a,i} = 1.2\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $A_i = 10.7\ \text{m}^2$ ,  $C_{d,i} = 0.57$ ,  $r_i = 0.006$ ,  $g = 9.8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $\alpha_{\text{slop},i} = 30^\circ$ 。初始状态设定为: $x_{c,0} = 16\ \text{m}$ ,  $y_{c,0} = 0$ ,  $z_0 = 100\ \text{m}$ ,  $\theta_0 = 0$ ,  $v_{c,0} = 35\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\omega_{c,0} = 0.5\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $x_{c,1} = 1\ \text{m}$ ,  $y_{c,1} = 0$ ,  $\theta_1 = 0$ ,  $v_{c,1} = 0$ ,  $\omega_{c,1} = 0$ ,  $a_{v,1} = 0$ ,  $a_{w,1} = 0$ ,  $x_{c,2} = -13\ \text{m}$ ,  $y_{c,2} = 0$ ,  $\theta_2 = 0$ ,  $v_{c,2} = 0$ ,  $\omega_{c,2} = 0$ ,  $a_{v,2} = 0$ ,  $a_{w,2} = 0$ 。间距策略参数考虑为: $L_{\text{car}} = 4.5$ ,  $\Delta = 7$ ,  $\sigma_c = 0.2$ ,  $A_c = 7$ ,  $k_{s,1} = 0.5$ ,  $k_{s,2} = 3$ ,  $n = 5$ ,  $T_d = 1$ 。设计参数经试错法选取为: $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 20$ ,  $\alpha_1 = 0.9$ ,  $T_1 = 5$ 。

对应的仿真结果如图 3~5 所示。其中,图 3 展示了载具运行轨迹及其在 10 s 时的具体位置。从图 3 可以看出,即使车流密集且中央车道狭窄,被控

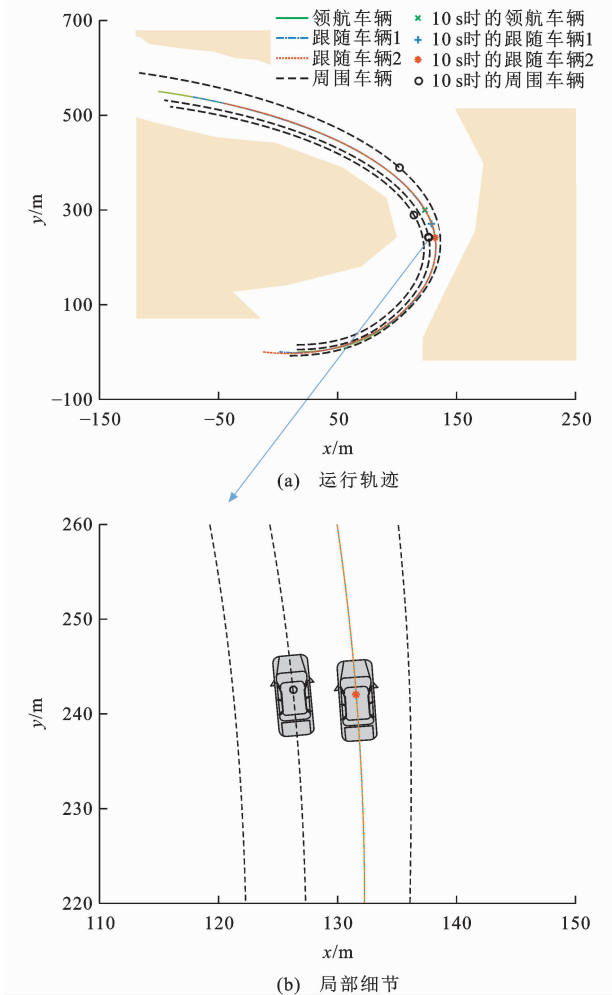


图 3 运行轨迹  
Fig. 3 Motion trajectories

车辆仍可在无人机引导下安全、协调地穿行于可通行区域内。图 4、5 分别绘制了纵向和横向误差的动态变化,结果显示所有误差均在预设时间  $T_1$  内收敛到 0,且在误差沿队列从前向后传递的过程中未出现逐级放大现象。这证实了载具群的预设时间单体稳定性和队列网格稳定性。

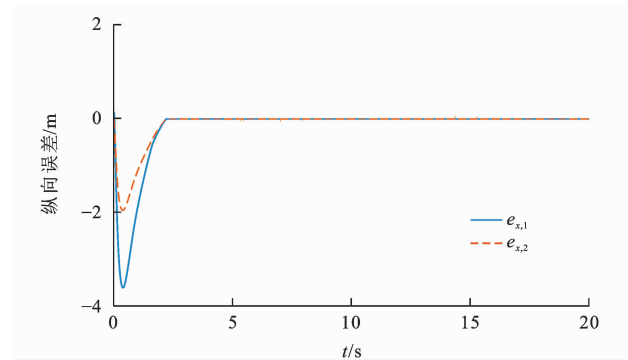


图 4 纵向误差  
Fig. 4 Longitudinal errors

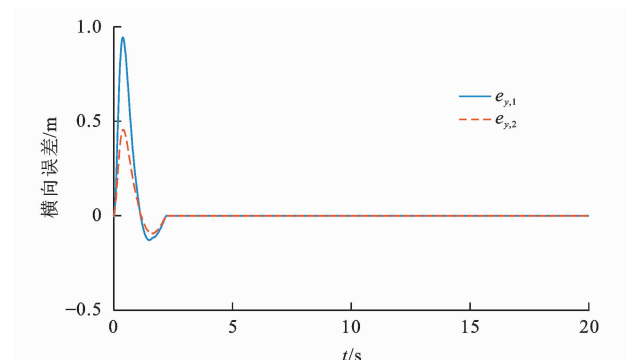


图 5 横向误差  
Fig. 5 Lateral errors

值得注意的是,尽管  $k_1$  等设计参数的选取会影响误差收敛性能,但收敛时间上界仅与预设时间参数  $T_1$  有关,与载具的初始状态和其他设计参数无关。为了更好地评估  $T_1$  的敏感性,图 6、7 给出  $T_1 = 10\ \text{s}$  时的纵横向误差动态。将其同图 4、5 对

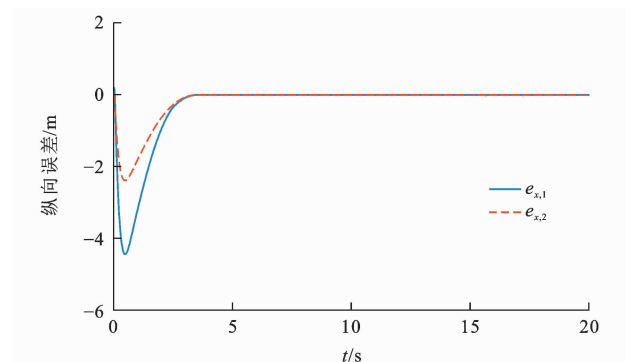


图 6  $T_1 = 10\ \text{s}$  时的纵向误差  
Fig. 6 Longitudinal errors at  $T_1 = 10\ \text{s}$

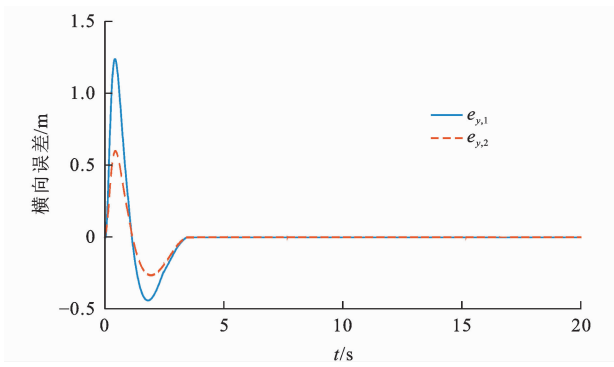


图 7  $T_1=10$  s 时的横向误差  
Fig. 7 Lateral errors at  $T_1=10$  s

比可以发现,  $T_1$  越小, 误差收敛速度越快。

为了进一步突出所提控制方法的优越性, 在图 8 中给出载具群在使用前瞻零初始耦合误差动态时的运行轨迹及在 10 s 时的载具位置分布, 从中可以很明显地看出被控车辆存在切角行为, 使得即使空中无人机提供了合理的路径引导, 车辆仍突破安

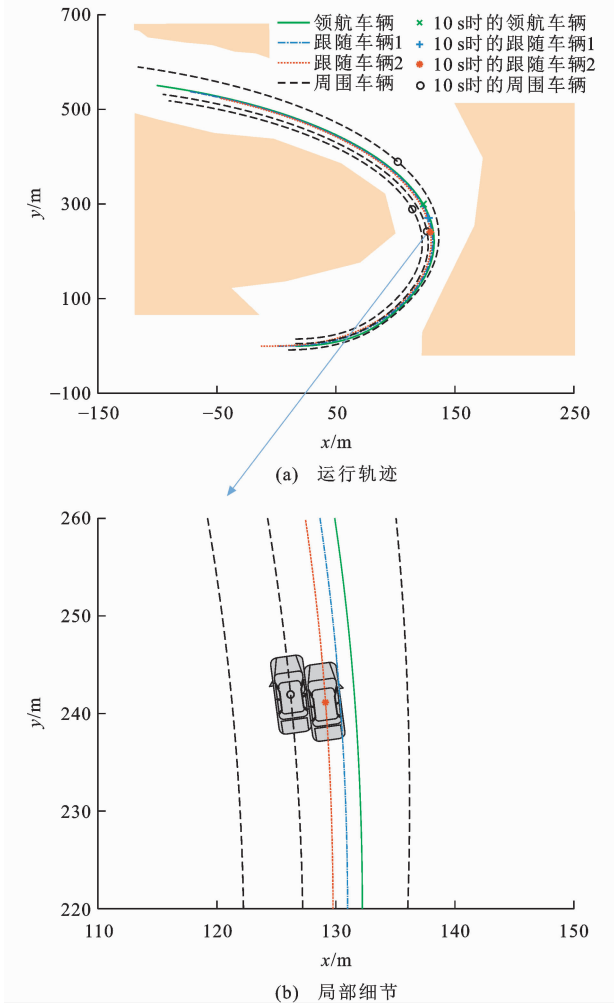


图 8 系统在前瞻零初始耦合误差动态下的运行轨迹  
Fig. 8 Motion trajectories of the system under the look-ahead zero-initial coupled error dynamics

全边界, 与周围车辆发生碰撞, 危及人员安全。图 9、10 给出在扩展前瞻零初始误差动态公式(21)、(22)下的纵横向协同误差。显然, 在一些时刻后方载具的协同误差会反超前载具。误差的传递放大意味着队列网格稳定性无法保证。与此同时, 为说明所设计控制器于收敛速度的竞争力, 图 11、12 和图 13、14 分别给出在误差动态公式(23)、(24)下采用文献[25]、[38]中控制方法时的纵横向协同误差的收敛过程, 从中可以看出, 文献[25]、[38]的方法分别需要本文方法所用时间的 5.248 倍和 2.820 倍才能达到同样的控制效果。图 15、16 和图 17、18 分别给出采用文献[25]、[38]中间距策略和控制方法时的纵横向协同误差响应曲线, 对应的实际收敛时间、控制精度及有无队列网格稳定性和交通流稳定性统计结果汇总于表 1。其中, 文献[25]、[38]不存在交通流稳定性是由文献[36]中的理论分析得到的。

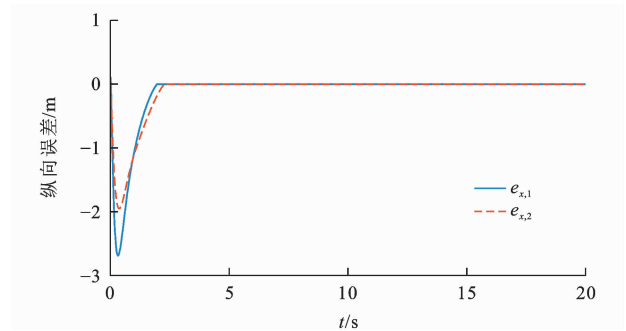


图 9 扩展前瞻零初始误差动态下的纵向误差  
Fig. 9 Longitudinal errors under the extended look-ahead zero-initial error dynamics

表 1 本文方法与典型协同控制方法的对比  
Table 1 Comparison of the proposed method and typical cooperative control methods

方法	实际收敛时间/s	控制精度	队列网格稳定性	交通流稳定性
本文方法	2.50	0.000 05	有	有
文献[25]方法	13.82	0.002 80	没有	没有
文献[38]方法	11.66	0.014 00	没有	没有

图 19~21 绘制载具群运行轨迹及纵向和横向协同误差以进一步呈现被控载具群规模扩展后的仿真结果。可以发现即使扩展载具群规模, 系统依然可以保持良好的协同性能。这再次印证了所提控制方法的有效性。图 22 描绘了用于判定交通流稳定性是否存在的  $\partial Q_c / \partial \rho_c$  的动态响应曲线, 可以观察到该梯度在稳态时始终大于 0, 即交通流稳定性存在, 从宏观层面证实了整体交通运行的流畅性。

为验证算法在期望间距不同参数标定下的有效

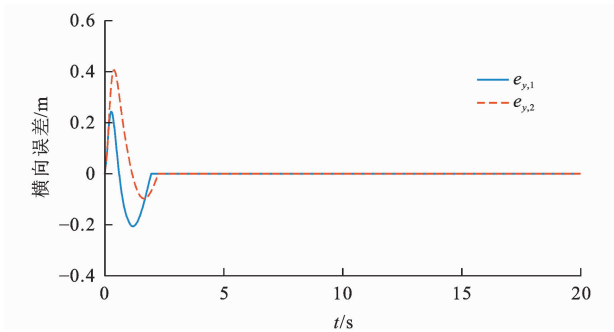


图 10 扩展前瞻零初始误差动态下的横向误差  
 Fig. 10 Lateral errors under the extended look-ahead zero-initial error dynamics

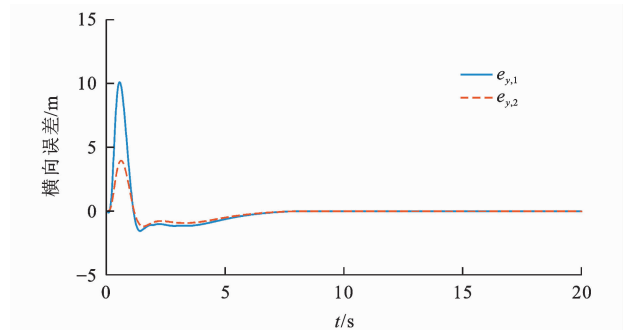


图 14 误差动态公式(23)、(24)下采用文献[38]方法的横向误差  
 Fig. 14 Lateral errors under error dynamic equations (23), (24) using the method in Ref. [38]

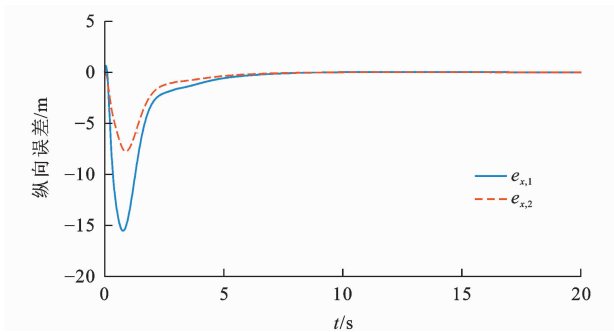


图 11 误差动态公式(23)、(24)下采用文献[25]方法的纵向误差  
 Fig. 11 Longitudinal errors under error dynamic equations (23), (24) using the method in Ref. [25]

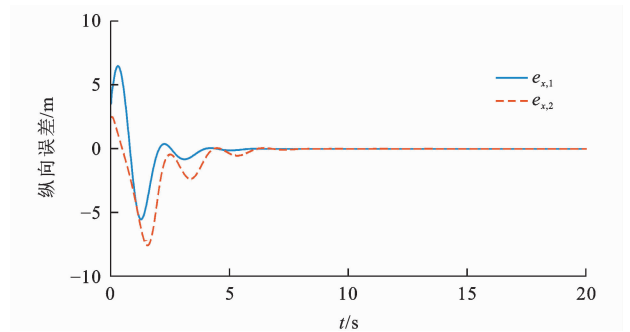


图 15 采用文献[25]间距策略和方法的纵向误差  
 Fig. 15 Longitudinal errors using the spacing policy and method in Ref. [25]

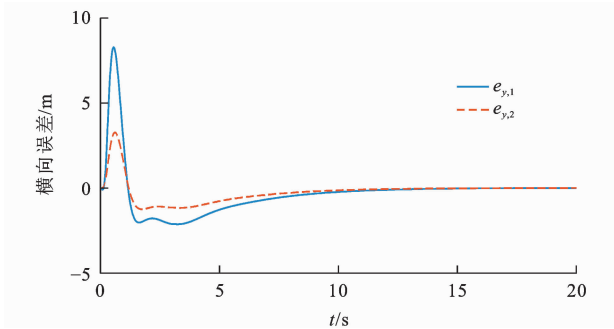


图 12 误差动态公式(23)、(24)下采用文献[25]方法的横向误差  
 Fig. 12 Lateral errors under error dynamic equations (23), (24) using the method in Ref. [25]

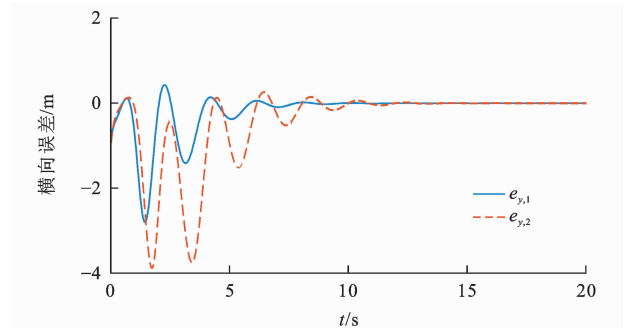


图 16 采用文献[25]间距策略和方法的横向误差  
 Fig. 16 Lateral errors using the spacing policy and method in Ref. [25]

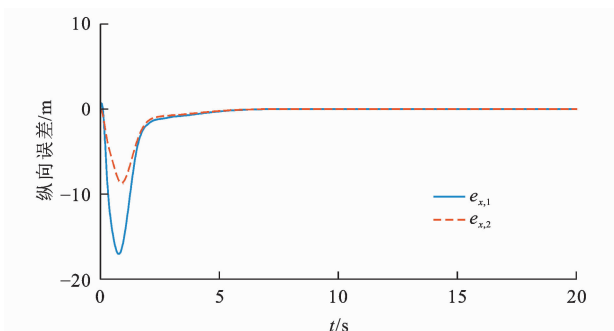


图 13 误差动态公式(23)、(24)下采用文献[38]方法的纵向误差  
 Fig. 13 Longitudinal errors under error dynamic equations (23), (24) using the method in Ref. [38]

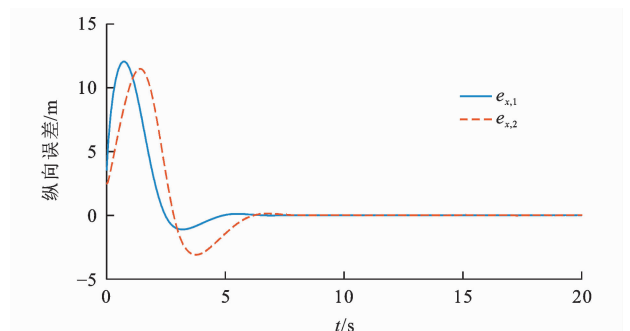


图 17 采用文献[38]间距策略和方法的纵向误差  
 Fig. 17 Longitudinal errors using the spacing policy and method in Ref. [38]

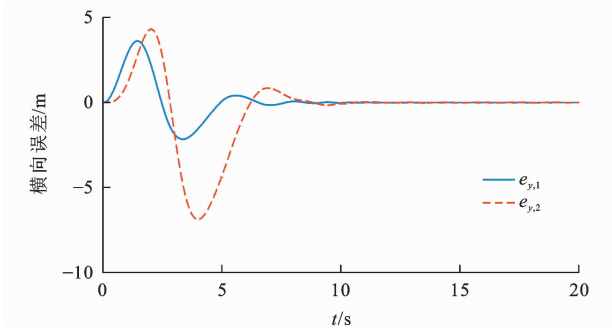


图 18 采用文献[38]间距策略和方法的横向误差  
Fig. 18 Lateral errors using the spacing policy and method in Ref. [38]

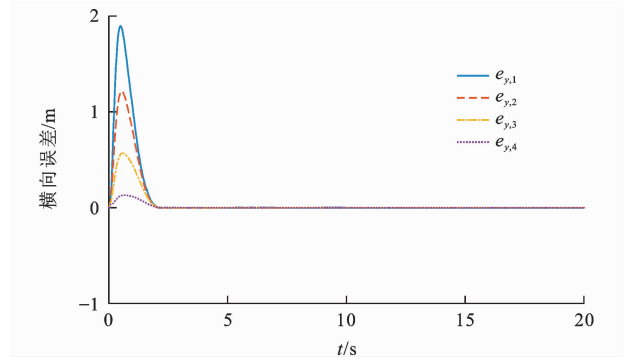


图 21 扩展规模载具群的横向误差  
Fig. 21 Lateral errors of expanded-scale vehicle group

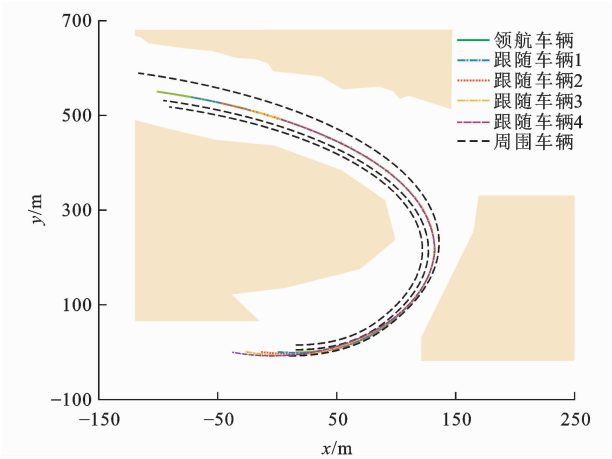


图 19 扩展规模载具群的运动轨迹

Fig. 19 Motion trajectories of expanded-scale vehicle group

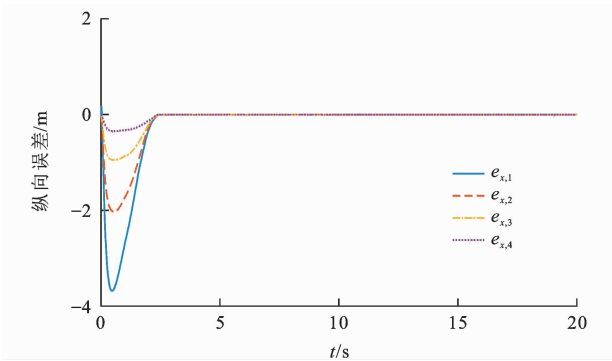


图 20 扩展规模载具群的纵向误差

Fig. 20 Longitudinal errors of expanded-scale vehicle group

性,图 23~25 给出载具间静止距离为 1 m 时的纵向误差、横向误差及交通流速率关于交通密度的梯度。图 26~28 则展示  $\Delta=5$  且初始状态设置为:  $x_{c,0}=16$  m,  $y_{c,0}=0$ ,  $x_{c,1}=-1$  m,  $y_{c,1}=0$ ,  $x_{c,2}=-16$  m,  $y_{c,2}=0$ ,  $x_{c,3}=-30$  m,  $y_{c,3}=0$ ,  $x_{c,4}=-42$  m,  $y_{c,4}=0$ ,  $v_{c,0}=40$  m  $\cdot$  s $^{-1}$ ,  $\omega_{c,0}=0.3$  rad  $\cdot$  s $^{-1}$ ,  $v_{c,1}=1$  m  $\cdot$  s $^{-1}$ ,  $\omega_{c,1}=0$ ,  $v_{c,2}=3$  m  $\cdot$  s $^{-1}$ ,  $\omega_{c,2}=0$ ,  $v_{c,3}=5$  m  $\cdot$  s $^{-1}$ ,  $\omega_{c,3}=0.01$  rad  $\cdot$  s $^{-1}$ ,  $v_{c,4}=5$  m  $\cdot$  s $^{-1}$ ,  $\omega_{c,4}=0.02$  rad  $\cdot$  s $^{-1}$  时的协同误差及交通流速率关于密度梯度

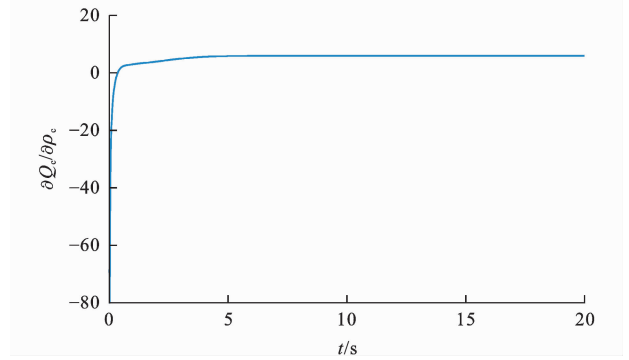


图 22 交通流速率关于交通密度的梯度

Fig. 22 Gradient of traffic flow rate with respect to traffic density

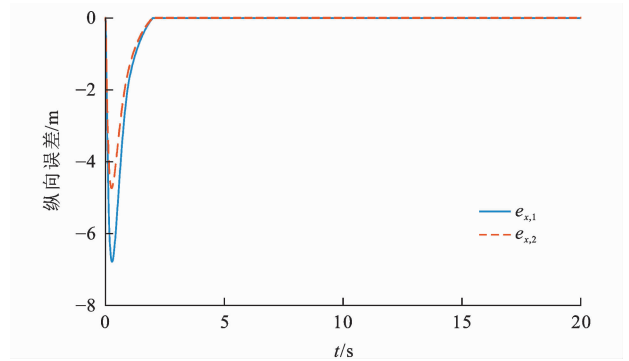


图 23  $\Delta=1$  m 时的纵向误差

Fig. 23 Longitudinal errors under  $\Delta=1$  m

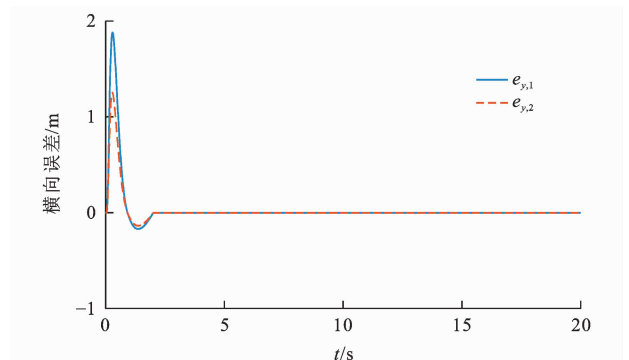


图 24  $\Delta=1$  m 时的横向误差

Fig. 24 Lateral errors under  $\Delta=1$  m

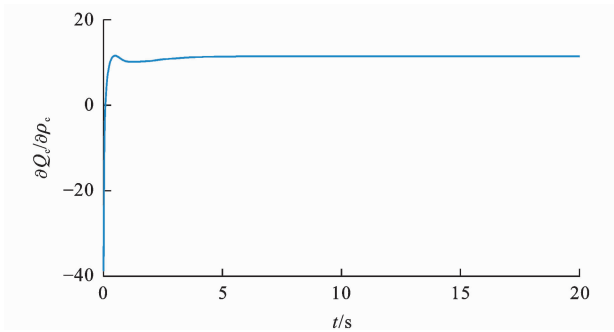


图 25  $\Delta=1$  m 时交通流速率关于交通密度的梯度  
 Fig. 25 Gradient of traffic flow rate with respect to traffic density under  $\Delta=1$  m

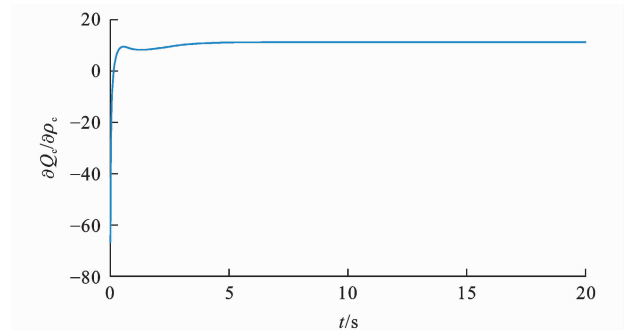


图 28 新设定初始条件下的交通流速率关于交通密度的梯度  
 Fig. 28 Gradient of traffic flow rate with respect to traffic density under newly set initial conditions

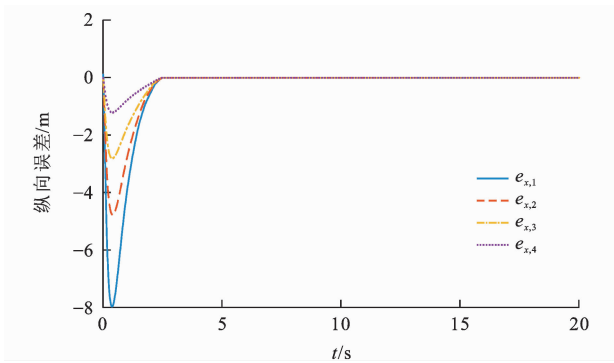


图 26 新设定初始条件下的纵向误差  
 Fig. 26 Longitudinal errors under newly set initial conditions

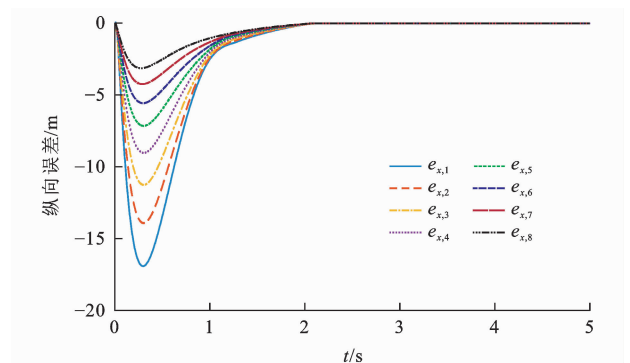


图 29 大规模载具群的纵向误差  
 Fig. 29 Longitudinal errors of large-scale vehicle group

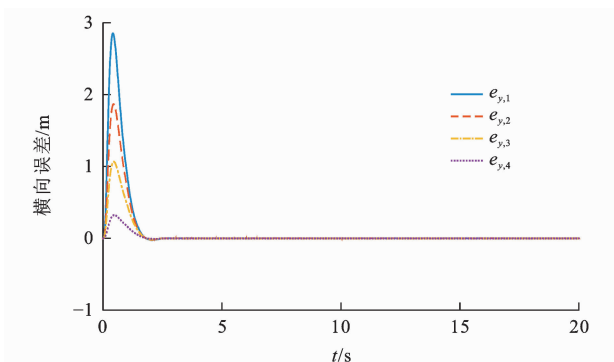


图 27 新设定初始条件下的横向误差  
 Fig. 27 Lateral errors under newly set initial conditions

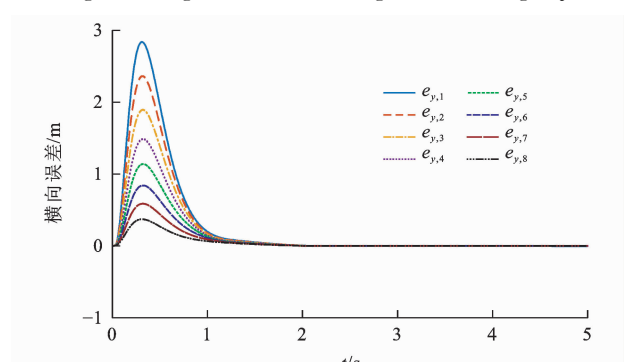


图 30 大规模载具群的横向误差  
 Fig. 30 Lateral errors of large-scale vehicle group

的响应曲线,以充分表明算法在不同初始间距、初始速度偏差下的鲁棒性。为进一步检测算法在大规模车辆队列中的可行性,图 29~31 给出由一辆领航车和 8 辆跟随车组成的救援队列运行的仿真结果,从中可以看出存在交通流稳定性和在多车链式传递中发挥作用的队列网格稳定性。图 32~35 和图 36~39 分别给出不同前述场景下的无人机路径引导车辆协同的仿真结果。其充分展示了在多变交通环境下,地面车辆可在空中无人机的合理引导下,保持稳定、安全且高效的协同运行,证实了所提控制方法在实际部署中的广泛适应性与工程应用前景。

## 4 结 语

(1) 本文围绕基于无人机引导的车辆协同控制问题展开研究,针对传统误差动态在转向场景中易引发切角行为及误差初始值非零所带来的控制算法限制问题,提出一种基于指数间距策略的扩展前瞻零初始耦合误差动态。该方法不仅能够有效补偿转向误差和保证误差零初始,还为后续控制器设计奠定稳定基础。

(2) 在所提出的误差动态基础上,本文设计了分布式协同控制器,并从理论层面严格证明了所构造

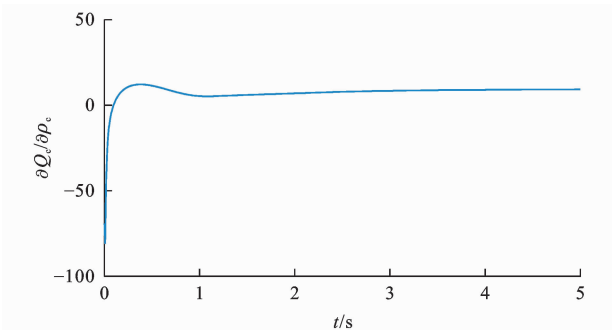


图 31 大规模载具群的交通流速率关于交通密度的梯度  
Fig. 31 Gradient of traffic flow rate with respect to traffic density for large-scale vehicle groups

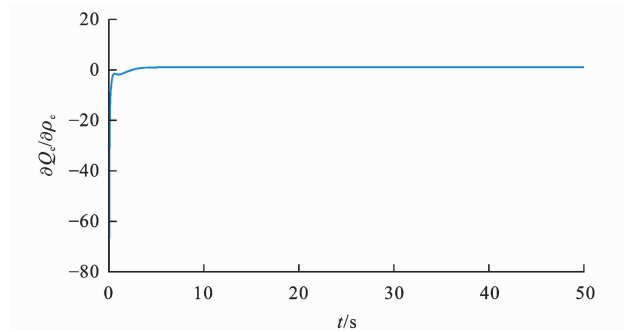


图 35 新场景 1 下的交通流速率关于交通密度的梯度  
Fig. 35 Gradient of traffic flow rate with respect to traffic density under a new scenario 1

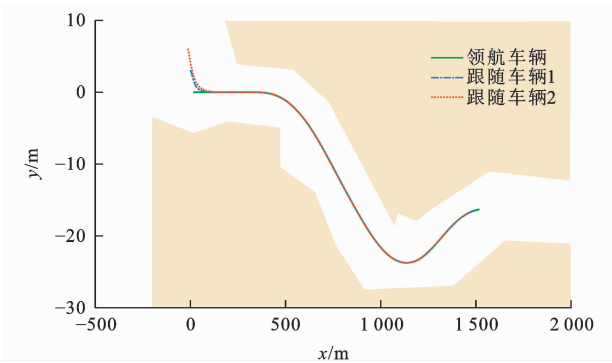


图 32 新场景 1 下的运行轨迹  
Fig. 32 Motion trajectories under a new scenario 1

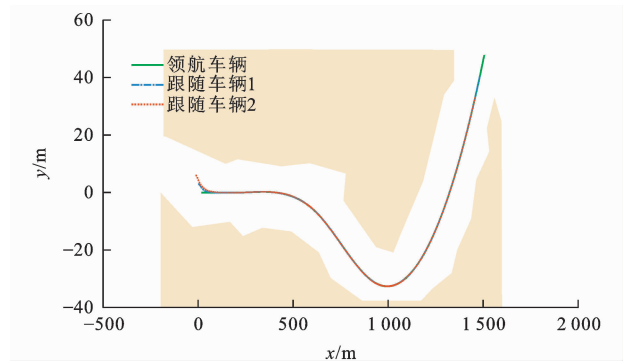


图 36 新场景 2 下的运行轨迹  
Fig. 36 Motion trajectories under a new scenario 2

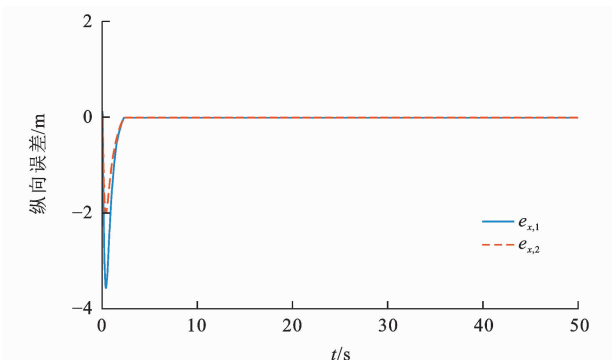


图 33 新场景 1 下的纵向误差  
Fig. 33 Longitudinal errors under a new scenario 1

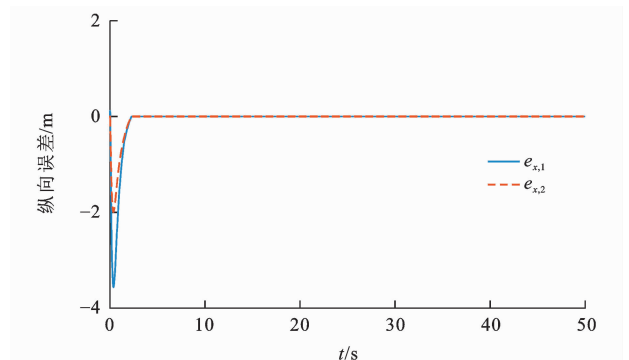


图 37 新场景 2 下的纵向误差  
Fig. 37 Longitudinal errors under a new scenario 2

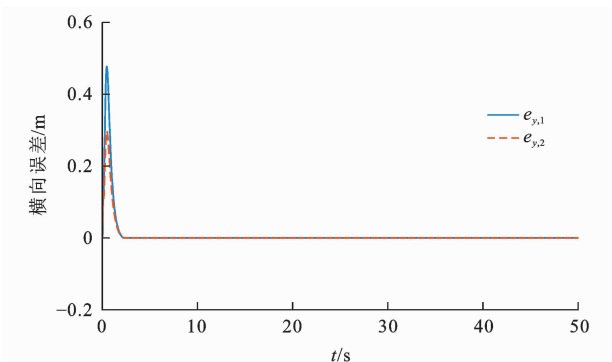


图 34 新场景 1 下的横向误差  
Fig. 34 Lateral errors under a new scenario 1

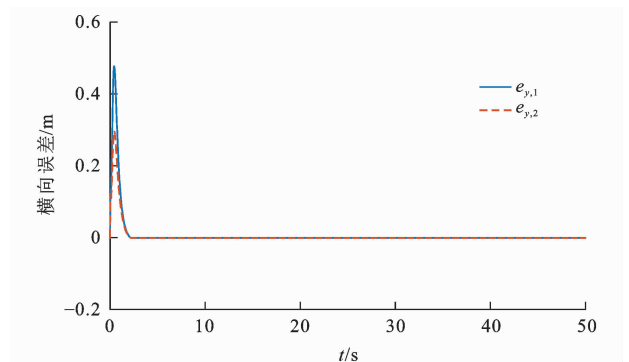


图 38 新场景 2 下的横向误差  
Fig. 38 Lateral errors 2 under a new scenario 2

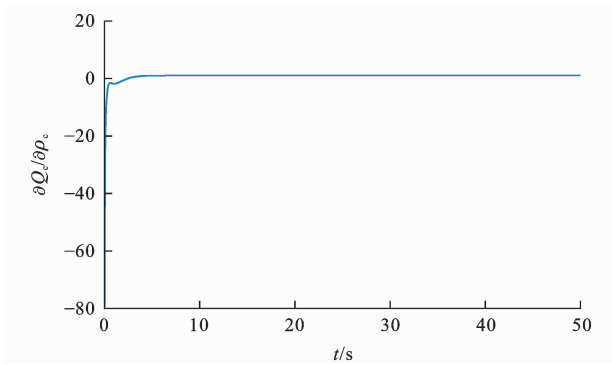


图 39 新场景 2 下的交通流速率关于交通密度的梯度

Fig. 39 Gradient of traffic flow rate with respect to traffic density under a new scenario 2

控制策略在单载具层面的预设时间稳定性、整体队列的网格稳定性,以及交通流的全局稳定性,确保系统在预设时间内实现高效协同。

(3)本研究成果对于提升复杂城市交通环境下车辆协同的响应速度与路径跟踪精度具有重要意义,尤其适用于灾害应急运输、智能物流调度等对响应时间和运行稳定性要求较高的智慧交通场景。此外,所提出的方法具有良好的分布式特性与可扩展性,可为未来大规模载具协同系统提供理论支撑与技术方案。

(4)本文在控制设计中假设通信链路理想可靠,未考虑现实场景中易存在通信带宽受限、数据丢包与延时等问题,而带宽受限易导致关键信息更新频率降低,从而削弱控制器对车辆状态变化的实时响应能力;数据丢包会引得状态信息不完整或不连续,进而导致协同误差收敛速度下降甚至发散;通信延时则可能破坏控制输入与系统状态之间的同步性,增加系统振荡风险,降低甚至破坏队列网格稳定性和交通流稳定性。此外,所考虑的交通流稳定性仅针对被控队列,未涉及服务水平规范下的指标体系,且由于资源限制,缺乏真实场景下的测试验证。未来研究将优先开展实际环境测试,关注道路交通服务水平规范评价指标,并在非理想通信环境下考虑引入冗余传输法、自动传送请求机制、前向纠错编码法、事件触发机制等以进一步完善协同控制策略,增强系统的鲁棒性与实用性。

#### 参考文献:

#### References:

[1] YANMAZ E, BALANCI H M, GÜVEN İ. Dynamic multi-UAV path planning for multi-target search and connectivity[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(7): 10516-10528.

[2] WU D, ZHANG Y B, WU W T, et al. Tunnel prescribed

performance control for distributed path maneuvering of multi-UAV swarms via distributed neural predictor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(8): 3830-3834.

- [3] TALUKDAR N, RAGHAV A, HAZRA A, et al. A deep deterministic policy gradient method for optimizing task completion time and energy efficiency in UAV-assisted IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(15): 31907-31917.
- [4] ZHAO M X, ZHANG R Q, HE Z L, et al. Joint optimization of trajectory, offloading, caching, and migration for UAV-assisted MEC[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(3): 1981-1998.
- [5] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513, 540. LI De-ren, LI Ming. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 505-513, 540.
- [6] ZHANG Q, GUO G. Improved spacing policy-based predefined-time cooperative control of vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(8): 11929-11938.
- [7] ZHANG Q, GUO G. Prescribed-time cooperative control of connected and autonomous vehicles on rough roads[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 140-151.
- [8] KHAN R, MEHMOOD A, SONG H B, et al. A decentralized, secure, and reliable vehicle platoon formation with privacy protection for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(5): 6441-6450.
- [9] KEIJZER T, CHANFREUT P, MARÍA MAESTRE J, et al. Collaborative vehicle platoons with guaranteed safety against cyber-attacks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(1): 295-308.
- [10] 郭景华,李克强,罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(2): 151-159. GUO Jing-hua, LI Ke-qiang, LUO Yu-gong. Review on the research of motion control for intelligent vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016, 7(2): 151-159.
- [11] YU H L, MEIER K, ARGYLE M, et al. Cooperative path planning for target tracking in urban environments using unmanned air and ground vehicles[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2): 541-552.
- [12] GROCHOLSKY B, KELLER J, KUMAR V, et al. Cooperative air and ground surveillance[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13(3): 16-25.
- [13] ZHANG L L, GAO F, DENG F, et al. Distributed estimation of a layered architecture for collaborative air-ground target geolocation in outdoor environments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2822-2832.
- [14] LIAO H J, JIA Z H, ZHOU Z Y, et al. Cloud-edge-end collaboration in air-ground integrated power IoT: A semi-distributed learning approach[J]. IEEE Transactions on

- Industrial Informatics, 2022, 18(11): 8047-8057.
- [15] TANG H, CHEN Y, ALI I. Cross-dimensional distributed control for heterogeneous UAV-UGV systems with nonzero leader input[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(10): 6354-6368.
- [16] MU C X, YAO J Y, YANG H J, et al. Cooperative control for air-ground systems via bidirectional signal connection in complex environment[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024, 54(9): 5680-5691.
- [17] WANG G D, WANG X Y, LI S H. Node task expansion based finite-time formation-containment control for ground-air collaboration systems[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(4): 3346-3357.
- [18] KWON J W, CHWA D. Adaptive bidirectional platoon control using a coupled sliding mode control method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2040-2048.
- [19] ZHENG X Q, LI S B, LUO X Y, et al. Fast distributed platooning of connected vehicular systems with inaccurate velocity measurement[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(10): 5996-6006.
- [20] MA G Q, GE S S. Robust string stabilization of connected vehicles with jerk feedforward[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2025, 70(6): 3992-3999.
- [21] QIU M, LIU D, WANG H, et al. A cooperative implementation of mesh stability in vehicular platoons[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2023, 10(3): 1537-1550.
- [22] BOO J, CHWA D. Robust bidirectional platoon control for mesh stability of vehicular systems with uncertain kinematics and dynamics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2025, 10(4): 2304-2318.
- [23] 史 昕,胡欣倩,赵祥模,等.基于神经常微分方程的自适应图时空同步交通流预测方法[J].交通运输工程学报,2025, 25(2):170-188.
- SHI Xin, HU Xin-qian, ZHAO Xiang-mo, et al. Adaptive graph spatio-temporal synchronization for traffic flow prediction based on NODEs[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2): 170-188.
- [24] 周 靓,夏金凤,李中奇.改进的动车组速度跟踪系统的无模型自适应控制[J].交通运输工程学报,2024,24(2):267-280.
- ZHOU Liang, XIA Jin-feng, LI Zhong-qi. Improved model-free adaptive control for EMUs velocity tracking system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(2): 267-280.
- [25] 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, 2020, 28(3): 790-803.
- [26] 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, 8(4): 695-708.
- [27] CHEN L M, XIAO J P, WEI RUI TEO C, et al. Air-ground collaborative control for angle-specified heterogeneous formations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2025, 10(3): 1483-1497.
- [28] DOMINGUEZ S, ALI A, GARCIA G, et al. Comparison of lateral controllers for autonomous vehicle: Experimental results[C]//IEEE. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2016: 1418-1423.
- [29] 高一凡,马小平,陈小英,等.空天地一体化技术在列车群车联网中的应用框架研究[J].现代城市轨道交通,2020(5):86-91.
- GAO Yi-fan, MA Xiao-ping, CHEN Xiao-ying, et al. Research on application framework of integration of rail systemwide technology in the train group network[J]. Modern Urban Transit, 2020(5): 86-91.
- [30] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [31] PLOEG J, VAN DE WOUW N, NIJMEIJER H.  $L_p$  string stability of cascaded systems; Application to vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 786-793.
- [32] GUO G, LI P, HAO L Y. A new quadratic spacing policy and adaptive fault-tolerant platooning with actuator saturation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(2): 1200-1212.
- [33] GUO G, ZHANG Q, ZHOU Z D. Fixed-time cooperative control of vehicles with connectivity preservation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(10): 15109-15119.
- [34] GAO Z Y, SUN Z C, GUO G. Adaptive predefined-time tracking control for vehicular platoons with finite-time global prescribed performance independent of initial conditions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(11): 16254-16267.
- [35] XIE S Z, CHEN Q. Adaptive nonsingular predefined-time control for attitude stabilization of rigid spacecrafts[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(1): 189-193.
- [36] SUNGU H E, INOUE M, IMURA J I. Nonlinear spacing policy based vehicle platoon control for local string stability and global traffic flow stability[C]//IEEE. 2015 European Control Conference (ECC). New York: IEEE, 2015: 3396-3401.
- [37] 陈妍妍,田大新,林椿昀,等.端到端自动驾驶系统研究综述[J].中国图象图形学报,2024,29(11):3216-3237.
- CHEN Yan-yan, TIAN Da-xin, LIN Chun-mian, et al. Survey of end-to-end autonomous driving systems[J]. Journal of Image and Graphics, 2024, 29(11): 3216-3237.
- [38] GAO Z Y, WEI Z Y, LIU W, et al. Adaptive finite-time prescribed performance control with small overshoot for uncertain 2-D plane vehicular platoons[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 587-598.