考虑车辆跟驰作用和通信时延的网联车辆队列轨迹跟踪控制

李永福 [1] 邬昌强 [1] 朱 浩 [1] 唐晓铭 [1]

摘 要 针对智能网联车辆轨迹跟踪问题, 本文通过考虑车辆跟驰作用和车车通信过程中存在的通信时延, 提出了一种分布式非线性轨迹跟踪控制器. 具体来讲, 首先, 提出一种双向领导跟随通信拓扑来描述智能网联环境下车辆间的通信连接. 其次, 考虑车辆跟驰作用和通信时延, 设计一种分布式非线性轨迹跟踪控制器. 然后, 使用 Lyapunov 方法证明了所设计控制器的稳定性. 最后, 考虑速度干扰作用于领导者车辆, 针对无时延、同质时延和异质时延等三种场景进行数值仿真实验. 仿真结果表明: 本文所设计的控制器不仅保证了车辆位置跟踪误差收敛到原点, 而且车辆运动规律符合交通流理论, 即无负位置跟踪误差和负速度现象.

关键词 智能网联车辆, 轨迹跟踪, 跟驰作用, 通信时延

引用格式 李永福, 邬昌强, 朱浩, 唐晓铭. 考虑车辆跟驰作用和通信时延的网联车辆队列轨迹跟踪控制. 自动化学报, 2021, **47**(9): 2264−2275

DOI 10.16383/j.aas.c190046

Trajectory Tracking Control for Connected Vehicle Platoon Considering Car-Following Interactions and Time Delays

LI Yong-Fu[1] WU Chang-Qiang[1] ZHU Hao[1] TANG Xiao-Ming[1]

Abstract For the trajectory tracking problem of connected vehicles (CVs), a distributed nonlinear trajectory tracking controller is proposed by incorporating the car-following interactions between vehicles and time delays in this study. In particular, a bidirectional leader-follower communication topology is utilized to characterize the connections among CVs. Then, considering the car-following interactions between vehicles and time delays, a distributed nonlinear trajectory tracking controller for follower vehicles is proposed. Further, the stability of the proposed controller is analyzed using the Lyapunov technique. Finally, simulations are performed for leader with external disturbance and three scenarios: no time delays, homogeneous time delays, and heterogeneous time delays. The simulation results show that the proposed controller in this study not only ensures that position tracking error converges to the origin, but also the vehicle motion is consistent with the traffic flow theory, which means that the negative position tracking error and negative velocity are avoided.

Key words Connected vehicle (CV), trajectory tracking, car-following interactions, communication time delays

Citation Li Yong-Fu, Wu Chang-Qiang, Zhu Hao, Tang Xiao-Ming. Trajectory tracking control for connected vehicle platoon considering car-following interactions and time delays. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(9): 2264−2275

收稿日期 2019-01-08 录用日期 2019-07-10
Manuscript received January 8, 2019; accepted July 10, 2019
国家自然科学基金 (61773082), 重庆市自然科学重点研发项目基金 (cstc2018jszxcyzdX0064), 重庆市重点基金 (cstc2017jcyjBX0018), 国家重点研发计划 (2016YFB0100906, 2018YFB1600502), 重庆邮电大学重点专项基金 (A2018-02) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61773082), Key Project of Chongqing (cstc2018jszxcyzdX0064), Key Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2017jcyjBX0018), National Key Research and Development Program of China (2016YFB0100906, 2018YFB1600502), and Key Project of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2018-02)
本文责任编委 赵旭东
Recommended by Associate Editor ZHAO Xu-Dong
1. 重庆邮电大学自动化学院智能空地协同控制重庆市高校重点实验室 重庆 400065
1. Key Laboratory of Intelligent Air-Ground Cooperative Control for Universities in Chongqing, College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065

近年来, 随着车车/车路 (Vehicle-to-vehicle/vehicle-to-infrastructure, V2V/V2I, 简称 V2X)[1] 通信技术的迅速发展, 使智能网联车辆 (Connected vehicles, CVs)[2−4] 能够通过 V2X 通信技术实现车、路和后台的互联互通, 从而为智能交通系统的环境感知、建模、协同控制及管理决策提供了完备的信息. 轨迹跟踪控制 (Trajectory tracking control)[5−6] 是智能网联车辆运动控制的关键问题, 轨迹跟踪控制形成的车辆队列行驶模式可以有效地减缓交通拥堵、减少能源消耗和增加道路通行能力[7−9]. 因此, 车辆轨迹跟踪控制问题已经成为中外学者研究的热点, 绝大部分研究主要通过保证位置跟踪误差和速度的一致性来解决轨迹跟踪控制问题.

对于车辆轨迹跟踪控制问题, 控制理论和交通

工程这两个角度有着不同的关注点. 从控制理论的角度出发, 是将车辆看作一个独立的节点. 然后, 专注于车辆状态信息, 设计轨迹跟踪控制器来确保轨迹跟踪性能. 然而, 车辆运动之间的耦合关系和速度约束经常被忽略, 导致负的位置跟踪误差和负速度的出现, 即意味着车辆间的安全距离不能被保证, 更严重的是追尾事故有可能发生. 从交通工程的角度出发, 主要提出合适的交通流模型来刻画车辆间的非线性关系.

在车辆轨迹跟踪控制的文献中, 轨迹跟踪控制方法主要分为线性控制和非线性控制. 在线性控制方面, 基于几何学的控制框架, Invernizzi 和 Lovera[10] 提出一种控制律来保证位置跟踪误差渐进收敛到零. 考虑一个互联的领导跟随多车系统, 领导者车辆和跟随者车辆的状态信息都能够相互感知, Cai 和 Hu[11] 仅利用车辆的状态信息提出一种分布式轨迹跟踪控制律. 基于相邻车辆状态估计, Hong 等[12] 提出一种跟踪控制策略来解决时变通信拓扑下的多车系统一致性问题. 结合前馈控制和鲁棒控制, Kayacan 等[13] 基于轨迹跟踪误差模型提出了一种轨迹跟踪控制策略, 实现了车辆跟踪直线道路和曲线道路轨迹. 然而, 车辆是一个高度非线性和强耦合系统, 线性的轨迹跟踪控制算法有一定的局限性, 不能刻画车辆间的非线性关系.

在非线性控制方面. 基于虚拟结构方法, 跟随者车辆跟踪虚拟车辆预定的轨迹, Zhang 等[14] 提出了一种协同路径跟踪控制律, 从而让车辆保持一个期望的队列. 利用人工势场法与模型预测控制理论, 徐杨等[15] 提出一种针对无人车辆轨迹规划和跟踪控制的控制方法, 根据参考轨迹来调节纵横向输入以实现跟踪控制. Liang 等[16] 通过分析状态变量和控制变量之间的函数关系, 利用滑模控制方法设计的速度控制律, 提高了轨迹跟踪误差收敛速度和增强了抗干扰能力. 针对模型参数不确定的问题, Aguiar 等[17] 基于反步法提出了一种自适应轨迹跟踪控制方法. 在此基础之上, Guo 等[18] 研究了考虑参数不确定和额外的干扰的问题, 提出一种自适应非线性轨迹跟踪控制策略. 针对未知扰动的问题, 沈智鹏等[19] 引入神经网络对模型不确定性部分进行逼近, 设计一种非线性增益递归滑模的轨迹跟踪动态自适应神经网络控制器, 该控制器对系统模块参数摄动以及外界扰动具有较强的鲁棒性, 并且跟踪响应快和精度高. Yu 和 Liu[20] 通过考虑速度干扰提出了一种自适应轨迹跟踪控制方法, 实现了无界扰动的抑制和跟踪误差的渐近收敛. Wang[21] 利用神经网络和自适应估计的方法, 通过考虑模型参数和车辆动力学不确定性问题, 提出一种分布式自适应协同轨迹跟踪控制策略.

针对通信时延的问题, Peters 等[22] 考虑通信时延提出一种领导跟随结构控制策略, 保证了车辆队列的串稳定性. 基于滑模控制方法, Kim 等[23] 提出一种快速终端滑模时延控制器来保证车辆位置跟踪误差渐进收敛. 采用分层框架的方法来降低控制器设计和分析的复杂性, Zhang 等[24] 考虑时延和参数不确定性提出一种自适应滑模控制器. 考虑通信时延和参数不确定性, Yan 等[25] 提出了一种协同轨迹跟踪控制策略, 实现了多车的协同跟踪任务. 然而, 上述的控制算法忽略了车辆跟驰作用, 导致负的位置跟踪误差出现在文献 [20−21] 和负速度出现在文献 [14] 中. 最近, Song 等[26] 考虑车辆跟驰作用来研究车辆轨迹跟踪控制问题, 但采用线性的方法来描述车辆间的关系, 并不能够完全刻画车辆间的非线性关系.

目前, 车辆轨迹跟踪问题最主要的挑战是在设计控制算法时考虑车辆间的非线性关系, 使所提控制器不仅保证位置跟踪误差收敛到零, 而且使车辆运动规律符合交通流理论, 因此需要提出一种更实际的控制器来解决轨迹跟踪问题. 为了解决以上提到的问题, 我们之前的工作[6] 考虑车辆跟驰作用来解决智能网联车辆轨迹跟踪问题. 这个工作专注于一个理想的通信环境和领导者车辆速度恒定, 但是没有考虑车车通信过程中存在的通信时延问题.

本文的主要贡献如下: 1) 在车辆互联环境中, 提出一种双向领导跟随通信拓扑来描述车辆间的通信连接, 队列内的车辆可以通过双向领导跟随通信拓扑进行信息交互; 2) 不同于文献 [14, 20−21], 设计控制器时忽略了车辆跟驰作用, 本文考虑车辆跟驰作用和通信时延, 提出一种分布式非线性轨迹跟踪控制器. 所提控制器不仅保证位置跟踪误差收敛到原点, 而且使车辆运动规律符合交通流理论, 即避免了负的位置误差和负速度出现; 3) 在仿真实验中, 考虑速度干扰作用于领导者车辆, 设计三种场景: 无时延、同质时延和异质时延进行数值仿真实验, 数值仿真实验证明了所提控制器的有效性.

本文结构如下: 第 1 节给出了预备知识及问题描述; 第 2 节提出一种非线性轨迹跟踪控制器, 然后给出了所提控制器稳定性的证明; 第 3 节给出了仿真实验与实验结果分析和对比; 第 4 节为本文结论.

1　预备知识及问题描述

如图 1 所示的交通场景中, 由 n 辆智能网联车辆组成的车辆队列行驶在道路上, 车辆队列包含

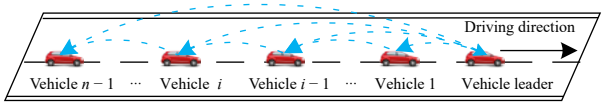


图 1 双向领导跟随通信拓扑示意图

Fig. 1 Information flow of BDLF communication topology

一个领导者车辆 (标记为 Vehicle leader) 和 $n-1$ 个跟随者车辆 (标记为 Vehicle 1 ~ Vehicle $n-1$). 初始时刻, 车辆的初始状态不同, 相邻车辆之间的初始间距是不相等的. 如图 2 所示, 因此本文通过考虑车辆跟驰作用和有界的通信时延提出一个分布式非线性控制器, 所提控制器保证跟随者车辆能够跟踪领导者车辆轨迹并和领导者保持期望的间距 $\boldsymbol{D}_{i,L}$, 其中, $\boldsymbol{D}_{i,L}=(d^x_{i,L},d^y_{i,L})^{\mathrm{T}}$ 包括跟随车辆和领导者之间期望的纵向和侧向间距.

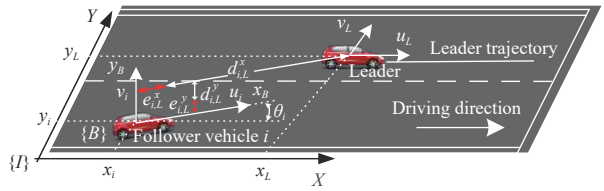


图 2 轨迹跟踪示意图

Fig. 2 Trajectory tracking of follower vehicle i profile

1.1 车辆模型

车辆的运动学模型如下[10]:

$$\dot{\eta}_i=\boldsymbol{R}_i v_i \tag{1a}$$

$$\dot{R}_i=\boldsymbol{R}_i\phi(\omega_i) \tag{1b}$$

如图 2 所示, 记 $\boldsymbol{I}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 分别表示惯性坐标系和车体移动坐标系. $\eta_i=(x_i,y_i)^{\mathrm{T}}$ 表示车辆 i 在惯性坐标系 $\boldsymbol{I}$ 下的位置坐标, $(x_i,y_i)^{\mathrm{T}}$ 表示车辆 i 在惯性坐标系 $\boldsymbol{I}$ 下的位置, θ_i 为沿 X 轴逆时针得到的车辆 i 运动方向. $v_i=(u_i,v_i)^{\mathrm{T}}$ 和 ω_i 分别表示在移动坐标系 $\boldsymbol{B}$ 下的线速度和角速度. 反对称矩阵 $\phi(\cdot)$ 定义为 $\phi(\omega_i)=\begin{pmatrix}0 & -\omega_i\\ \omega_i & 0\end{pmatrix}$, 其中, $R_i=\begin{pmatrix}\cos\theta_i & -\sin\theta_i\\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\end{pmatrix}$ 是旋转矩阵, 且有 $||R_i||=1,\ \forall\theta\in[0,2\pi]$.

车辆的动力学模型如下[17]:

$$M\dot{v}_i=-\phi(\omega_i)Mv_i+\sigma_v(v_i)+g_vF_i \tag{2a}$$

$$J\dot{\omega}_i=\sigma_\omega(\omega_i)+G_\omega N_i \tag{2b}$$

其中, $M=\mathrm{diag}\{m,m\}$ 表示斜对称质量矩阵; J 表示转动惯量; F_i 和 N_i 分别表示驱动力和扭矩. g_v 是一个恒定的非零向量, G_ω 是非零常数, 其中 $\sigma_v(v_i)=-\mathrm{diag}\ \{d_v,d_v\}v_i$, $\sigma_\omega(\omega_i)=-d_\omega\omega_i$. d_v和 d_ω 分别表示粘性摩擦系数和旋转摩擦系数.

1.2 图论

为了更好地描述车辆间的信息流向, 本文提出一种双向领导跟随 (Bidirectional leader-follower, BDLF) 通信拓扑来表征车辆互联环境下网联车辆之间的信息交互. 如图 1 所示, 跟随者车辆之间的信息流通过带有节点的有向图 $\vartheta=\{o,\zeta\}$ 表示. 其中, $o=\{1,2,\cdots,n-1\}$ 为图中 $n-1$ 个顶点构成的集合, $\zeta\subseteq o\times o$ 为图中所有边构成的集合, $A=[a_{ij}]\in\mathbf{R}^{(n-1)\times(n-1)}$ 代表从车辆 j 到车辆 i 通信连接的邻接矩阵. 当 $a_{ij}=1$ 时, 表示从车辆 j 到车辆 i 有通信连接; 当 $a_{ij}=0$ 时, 表示从车辆 j 到车辆 i 没有通信连接. 除此之外, 设定向图中没有自循环, 即 $a_{ii}=0$ 对于所有车辆 $\{i=0,\cdots,n-1\}$.

注 1. 如图 1 所示, 在 V2V 通信环境中, 队列中的车辆通过 BDLF 通信拓扑建立通信连接. 队列中的每个跟随者车辆可以获得领导者和最邻近前导车辆状态信息, 即位置、速度和加速度信息. 同时, 领导者车辆也可以通过 BDLF 通信拓扑获得跟随者车辆的状态信息.

1.3 控制目标

如图 2 所示, 领导者车辆在惯性坐标系 $\boldsymbol{I}$ 下的位置坐标表示为 $\eta_L=(x_L,y_L)^{\mathrm{T}}$, $(x_L,y_L)^{\mathrm{T}}$ 表示领导者车辆在惯性坐标系下的位置, θ_L 为领导者车辆的运动方向. $v_L=(u_L,v_L)^{\mathrm{T}}$ 和 ω_L 分别表示在移动坐标系 $\boldsymbol{B}$ 下领导者车辆的线速度和角速度. 跟随者车辆 i 的位置跟踪误差被定义为 $e_{i,L}=R_i^{\mathrm{T}}(\eta_L-\eta_i-D_{i,L})$. 其中

$$e_{i,L}=\begin{pmatrix}\cos\theta_i & \sin\theta_i\\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_L-x_i-d^x_{i,L}\\ y_L-y_i-d^y_{i,L}\end{pmatrix} \tag{3}$$

因此, 本文的控制目标是实现位置跟踪误差收敛到原点, 即

$$\lim_{t\to\infty}||\eta_L(t)-\eta_i(t)-D_{i,L}||\le \mathrm{e}^{-\lambda t}c_0+\vartheta \tag{4}$$

其中, c_0 和 ϑ 是非负数.

注 2. 在本文中, 领导者车辆轨迹是连续可微且有界, 即领导者车辆的速度 (v_L) 和加速度 (a_L) 有界, 且假设领导者车辆做匀速运动, 即领导者车辆的速度是常数.

1.4 轨迹跟踪控制框架

为了解决智能网联车辆轨迹跟踪问题, 本节提出了轨迹跟踪控制框架. 如图 3 所示, 该轨迹跟踪

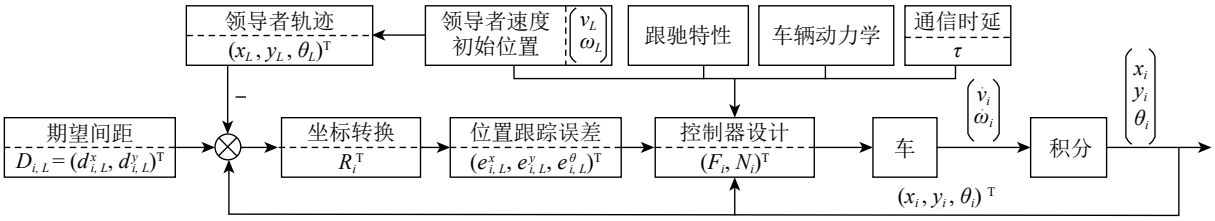


图 3　轨迹跟踪控制框架

Fig. 3　Trajectory tracking control framework

控制框架由产生领导者车辆轨迹、设计控制器和得到跟随者车辆轨迹三部分组成.

首先, 领导者轨迹由初始设定的领导者速度和初始位置产生, 位置跟踪误差通过坐标变换定义得到. 然后, 通过考虑车辆跟驰作用、通信时延和跟随者与领导者车辆间的间距差和速度差, 提出一种分布式非线性轨迹跟踪控制器. 最后, 根据车辆运动学模型 (1) 积分可以得到跟随者车辆的轨迹.

2　控制器设计及稳定性分析

2.1　控制器设计

为解决在第 1 节中提出的问题, 基于车辆动力学模型, 本文考虑车辆跟驰作用和有界的通信时延提出一种分布式非线性轨迹跟踪控制器. 所提控制器如下:

$$\alpha_i(t) = \varpi_i(t) - \vartheta_i(t) - \partial_i(t) + n_i(t) \tag{5}$$

$$N_i(t) = \chi_i(t) + \xi_i(t) \tag{6}$$

其中, $\varpi_i(t) = B^{-1}(t)(-\sigma_v(t) + MR_i^{\mathrm{T}}(t)\ddot{\eta}_L(t-\tau_{i,L}) - M^{-1}k_\varphi\delta)$, $\vartheta_i(t) = B^{-1}(t)(M^{-1}k_\varphi + k_eI)(v_i\times(t) - R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot{\eta}_L(t-\tau_{i,L}))$, $\partial_i(t) = (M^{-1}k_\varphi + M^{-1})R_i^{\mathrm{T}}\times(t)(\eta_i(t) - \eta_L(t-\tau_{i,L}) + D_{i,L})$, $n_i(t) = M\sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}\times(\kappa(V(\eta_{ij}^B(t-\tau_{ij})) - v_i(t)) + \beta(v_i(t) - v_j(t-\tau_{ij})))$, $\chi_i(t) = -G_\omega^{-1}\sigma_\omega(t)$, $\xi_i(t) = G_\omega^{-1}((0,\mathrm{J})\dot{\alpha}_i(t) - (-\phi\times(M\delta) + \Gamma(t)^{\mathrm{T}})M\varphi(t) - k_z z_2(t))$.

注 3. 在控制器 (5) 中, $\varpi_i(t)$ 表示车辆所受摩擦力和领导者车辆 L 的加速度, $B(t) = (g_v, \phi(M\delta) + \Gamma(t)) \in \mathbf{R}^{2\times2}$, $\delta \in \mathbf{R}^{2\times1}$是常系数, $\Gamma(t) = \phi(MR_i^{\mathrm{T}}\dot{\eta}_L) - M\phi(R_i^{\mathrm{T}}\dot{\eta}_L)$, $k_\varphi = \mathrm{diag}\{k_\varphi, k_\varphi\}$, k_φ是非负常数; $\vartheta_i(t)$ 表示车辆 i 与领导者车辆 L 的速度误差, k_e 是非负常数, $I = \mathrm{diag}\{1,1\} \in \mathbf{R}^{2\times2}$; $\partial_i(t)$ 表示车辆 i 与领导者车辆 L 间的位置误差; $n_i(t)$ 表示车辆 i 与车辆 j间的非线性作用关系, 即车辆跟驰作用. 在控制器 (6) 中, $\chi_i(t)$ 表示车辆 i 的动力学特性; $\xi_i(t)$ 表示车辆 i 的角速度误差以及车辆 i 与领导者车辆 L 的速度误差和位置误差, $\varphi(t) = z_1(t) - \delta$, $z_1(t) = v_i(t) - R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot{\eta}_L(t) + k_eM^{-1}e_{i,L}$, k_z是非负常数, $z_2(t) = \omega_i(t) - (0,1)\alpha_i(t)$.

注 4. 在控制器 (5) 中, $\tau_{i,L}$ 表示跟随车辆 i 与领导者车辆 L 间的通信时延, $\tau_{i,j}$ 表示跟随车辆 i 与跟随车辆 j 间的通信时延. 在 IEEE802.11p 中, 端到端的平均通信时延数量级是 10^{-2} s[27]. 本文考虑通信时延是有界的, 即 $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$. 其中, $\alpha_i(t) = (F_i(t), \omega_i^*(t))$, $F_i(t) = (1,0)\alpha_i(t)$, $F_i(t)$ 是驱动力控制输入, $N_i(t)$ 是扭矩控制输入.

令

$$Q(\cdot) = \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}(\kappa(V(\eta_{i,j}^B(\cdot)) - v_i) + \beta(v_i - v_j(t-\tau_{i,j})))$$

非线性函数 $Q(\cdot)$ 用来描述车辆的跟驰作用, 其中

$$V\left(\eta_{i,j}^B(t-\tau_{i,j})\right) = E_1 + E_2\tanh(C_1(R_i^{\mathrm{T}}(\eta_{i,j}(t-\tau_{i,j})) - l_c) - C_2) \tag{7}$$

$$\eta_{i,j}(t-\tau_{i,j}) = \frac{(\eta_j(t-\tau_{i,j}) - \eta_i(t) - L_{i,j})}{i-j} \tag{8}$$

其中, κ 和 β 是非负数, E_1, E_2, C_1 和 $C_2 \in \mathbf{R}^{2\times1}$ 是常数向量, $\tanh(\cdot)$ 是双曲正切函数.

注 5. 非线性函数 $Q(\cdot)$ 用来描述车辆间的跟驰作用, 且 $Q(\cdot)$ 是有界的, 即 $||Q(\cdot)_{\max}|| \le K_q$, K_q 是一个非负常数[9].

2.2　稳定性分析

引理 1 (Young 不等式[17]). 如果 $||e_{i,L}(t)|| \ge 0$, $||\rho|| \ge 0$ 和 $\gamma > 0$, 则有

$$e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)\frac{\gamma}{2}e_{i,L}(t) + \frac{1}{2\gamma}||\rho||^2 \ge e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)\rho$$

当 $e_{i.L}^{\mathrm{T}}e_{i,L} = ||\rho||^2$ 时, $e_{i,L}^{\mathrm{T}}\rho = e_{i,L}^{\mathrm{T}}\frac{\gamma}{2}e_{i,L} + \frac{1}{2\gamma}||\rho||^2$.

定理 1. 在 BDLF 通信拓扑环境下, 假设领导者车辆做匀速运动, 基于车辆动力学模型 (2), 跟随者车辆采用控制器 (5) 和 (6). 如果参数 k_e, k_φ 和 γ 满足 $k_eM^{-1} - \gamma I$ 和 $k_\varphi - \gamma I$ 是正定矩阵且 $\gamma = (\varepsilon^2 + \Theta^2)/(\vartheta^2\lambda)$, $\varepsilon^2 = ||\delta||^2 + ||M^2K_q||^2$, $\Theta = \Omega\tau_{\max}$, $\Omega = ||k_v||$, $k_v \in \mathbf{R^{2\times1}}$ 是常系数. 则跟随者车辆位置跟踪

误差可实现

$$||\eta_L(t)-\eta_i(t)-D_{i,L}||\le \mathrm{e}^{-\lambda t}c_0+\vartheta \tag{9}$$

证明. 选取 Lyapunov 函数 $V(t)$ 为

$$V(t)=V_1(t)+V_2(t)+V_3(t) \tag{10}$$

其中, $V_1(t)=\dfrac{1}{2}e_{i.L}^{\mathrm{T}}(t)e_{i,L}(t)$, $V_2(t)=\dfrac{1}{2}\varphi^{\mathrm{T}}(t)M^2\varphi(t)$, $V_3(t)=\dfrac{1}{2}z_2^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{J}z_2(t)$. 在 $V_2(t)$ 中, $\varphi(t)=z_1(t)-\delta$, $z_1(t)=\upsilon_i(t)-R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot\eta_L(t)+k_eM^{-1}e_{i,L}$. 在 $V_3(t)$ 中, $z_2(t)=\omega_i(t)-(0,1)\alpha_i(t)$. 对 $V_1(t)$ 求导可得到

$$\dot V_1(t)=-k_e e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)M^{-1}e_{i,L}(t)+e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)z_1(t) \tag{11}$$

对 $z_1(t)$ 求导可得

$$\begin{aligned}\dot z_1(t)=&\dot\upsilon_i(t)-\dot R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot\eta_L(t)-\dot R_i^{\mathrm{T}}(t)\ddot\eta_L(t)+\\&k_eM^{-1}\left(\phi(\omega_i)e_{i,L}-\dot z_1(t)-k_eM^{-1}e_{i,L}\right)\end{aligned} \tag{12}$$

则可得到 $z_1(t)$ 的动力学方程

$$\begin{aligned}M\dot z_1(t)=&M\dot\upsilon_i(t)-M\dot R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot\eta_L(t)-MR_i^{\mathrm{T}}(t)\ddot\eta_L(t)-\\&k_e\phi(\omega_i)e_{i,L}+k_ez_1(t)-k_e^2M^{-1}e_{i,L}\end{aligned} \tag{13}$$

将车辆动力学模型 (2a) 代入式 (13) 中, 得到

$$\begin{aligned}M\dot z_1(t)=&-\phi(\omega_i)M\upsilon_i+\sigma_\upsilon(\upsilon_i)+g_\upsilon F_i-\\&M\dot R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot\eta_L(t)-MR_i^{\mathrm{T}}(t)\ddot\eta_L(t)-\\&k_e\phi(\omega_i)e_{i,L}+k_ez_1(t)-k_e^2M^{-1}e_{i,L}\end{aligned} \tag{14}$$

将 $\upsilon_i(t)=z_1(t)+R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot\eta_L(t)-k_eM^{-1}e_{i,L}$ 代入式 (14)中, 得到

$$\begin{aligned}M\dot z_1(t)=&-\phi(\omega_i)Mz_1(t)-\phi(\omega_i)MR_i^{\mathrm{T}}(t)\dot\eta_L(t)+\\&\phi(\omega_i)k_ee_{i,L}+\sigma_\upsilon(\upsilon_i)+g_\upsilon F_i-\\&M\dot R_i^{\mathrm{T}}(t)\dot\eta_L(t)-MR_i^{\mathrm{T}}(t)\ddot\eta_L(t)-\\&k_e\phi(\omega_i)e_{i,L}+k_ez_1(t)-k_e^2M^{-1}e_{i,L}\end{aligned} \tag{15}$$

根据定义的 $\Gamma(t),h(t)$, 则式 (15) 整理后, 得到

$$M\dot z_1(t)=\phi(Mz_1)\omega_i(t)+g_\upsilon F_i-\Gamma(t)\omega_i+h(t) \tag{16}$$

对 $V_2(t)$ 求导可得

$$\begin{aligned}\dot V_2(t)=&\varphi^{\mathrm{T}}(t)(MB_i(\,\cdot\,)\alpha_i(t)+Mh(t)+\\&M\left(\phi(M\delta)+\Gamma(t)z_2(t)\right))\end{aligned} \tag{17}$$

其中, $h(t)=\sigma_\upsilon(t)-MR_L^{\mathrm{T}}(t)\ddot\eta_L(t)+k_ez_1(t)-k_e^2M^{-1}\times e_{i,L}(t)$, 同理, 可求得 $z_2(t)$ 的动力学方程

$$J\dot z_2(t)=J\dot\omega_i-(0,\ J)\dot\alpha_i(t) \tag{18}$$

将车辆动力学模型 (2b) 代入式 (18) 中, 则得到

$$J\dot z_2(t)=\sigma_\omega(\omega_i)+G_\omega N_i-(0,\ J)\dot\alpha_i(t) \tag{19}$$

对 $V_3(t)$ 求导可得到

$$\dot V_3(t)=z_2(t)(G_\omega N_i(t)+\sigma_\omega(\omega_i)-(0,\ J)\dot\alpha_i(t)) \tag{20}$$

基于式 (10), (11), (17) 及式 (20), 可得到

$$\begin{aligned}\dot V(t)=&-k_e e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)M^{-1}e_{i,L}(t)+e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)z_1(t)+\\&\varphi^{\mathrm{T}}(t)(MB_i(\,\cdot\,)\alpha_i(t)+Mh(t)+\\&\varphi^{\mathrm{T}}(t)M(\phi(M\delta)+\Gamma(t)z_2(t))+\\&z_2(t)(G_\omega N_i(t)+\sigma_\omega(\omega_i)-(0,\ J)\dot\alpha_i(t))\end{aligned} \tag{21}$$

将式 (5) 和式 (6) 代入式 (14) 中, 可得到

$$\begin{aligned}\dot V(t)=&-k_e e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)M^{-1}e_{i,L}(t)+e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)\delta-\\&\varphi^{\mathrm{T}}(t)k_\varphi\varphi(t)+M^2\varphi^{\mathrm{T}}(t)Q(\cdot)+\\&\varphi^{\mathrm{T}}(t)(M^2R_i^{\mathrm{T}}(t)(\ddot\eta_L(t-\tau_{i,L})-\\&\ddot\eta_L(t))+k_eR_i^{\mathrm{T}}(t)(\dot\eta_L(t-\tau_{i,L})-\dot\eta_L(t))+\\&R_i^{\mathrm{T}}(t)(\eta_L(t-\tau_{i,L})-\eta_L(t)))-z_2^{\mathrm{T}}(t)k_zz_2(t)\end{aligned} \tag{22}$$

根据 Leibniz-Newton 定理[28], 注意到

$$\eta_L(t-\tau_{i,L})=\eta_L(t)-\int_{-\tau_{i,L}}^{0}\dot\eta_L(t+s)\mathrm{ds}$$

$$\dot\eta_L(t-\tau_{i,L})=\dot\eta_L(t)-\int_{-\tau_{i,L}}^{0}\ddot\eta_L(t+s)\mathrm{ds}$$

以及

$$\ddot\eta_L(t-\tau_{i,L})=\ddot\eta_L(t)-\int_{-\tau_{i,L}}^{0}\dddot\eta_L(t+s)\mathrm{ds}$$

假设头车做匀速运动, 则 $\dot\eta_L(t)=k_\upsilon$, $k_\upsilon\in\mathbf{R}^{2\times1}$, $\ddot\eta_L(t)=0$, $\dddot\eta_L(t)=0$, 故有

$$\begin{cases}\eta_L(t-\tau_{i,L})=\eta_L(t)-k_\upsilon\tau_{i,L}\\ \dot\eta_L(t-\tau_{i,L})=\dot\eta_L(t)\\ \ddot\eta_L(t-\tau_{i,L})=\ddot\eta_L(t)\end{cases} \tag{23}$$

将式 (23) 代入式 (22), 式 (22) 变成

$$\begin{aligned}\dot V(t)=&-k_e e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)M^{-1}e_{i,L}(t)+e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)\delta-\\&\varphi^{\mathrm{T}}(t)k_\varphi\varphi(t)+\varphi^{\mathrm{T}}(t)M^2Q(\cdot)-\\&\varphi^{\mathrm{T}}(t)R_i^{\mathrm{T}}(t)k_\upsilon\tau_{i,L}-z_2^{\mathrm{T}}(t)k_zz_2(t)\end{aligned} \tag{24}$$

基于引理 1, 对于任意的 $\gamma>0$, 式 (24) 中的 $e_{i,L}(t)\delta$, $\varphi^{\mathrm{T}}(t)M^2Q(\cdot)$, $R_i^{\mathrm{T}}(t)k_\upsilon\tau_{i,L}$ 变成

$$\begin{cases}e_{i,L}^{\mathrm{T}}\dfrac{\gamma I}{2}e_{i,L}(t)+\dfrac{1}{2\gamma}||\delta||^2\ge e_{i,L}(t)\delta\\ \varphi^{\mathrm{T}}(t)\dfrac{\gamma I}{2}\varphi(t)+\dfrac{1}{2\gamma}||M^2Q(\cdot)||^2\ge\varphi^{\mathrm{T}}(t)M^2Q(\cdot)\\ \varphi^{\mathrm{T}}(t)\dfrac{\gamma I}{2}\varphi(t)+\dfrac{1}{2\gamma}||k_\upsilon\tau_{i,L}||^2\ge-\varphi^{\mathrm{T}}(t)R_i^{\mathrm{T}}(t)k_\upsilon\tau_{i,L}\end{cases} \tag{25}$$

令 $\Omega = ||k_v||$, $\Theta = \Omega\tau_{\max}$. 因为 $\tau_{i,L} \leq \tau_{\max}$, 则可得到

$$\varphi^{\mathrm{T}}(t)\frac{\gamma I}{2}\varphi(t) + \frac{1}{2\gamma}||k_v\tau_{\max}||^2 \geq -\varphi^{\mathrm{T}}(t)R_i^{\mathrm{T}}(t)k_v\tau_{i,L} \tag{26}$$

基于式 (25) 和式 (26), 则式 (24) 变成

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) \leq\ & -e_{i,L}^{\mathrm{T}}(t)(k_eM^{-1} - \frac{\gamma I}{2})e_{i,L}(t) + \frac{1}{2\gamma}||\delta||^2 - \\ & \varphi^{\mathrm{T}}(t)(\frac{k_\varphi}{2} - \frac{\gamma I}{2})\varphi(t) + \frac{1}{2\gamma}||M^2Q(\cdot)||^2 - \\ & \varphi^{\mathrm{T}}(t)(\frac{k_\varphi}{2} - \frac{\gamma I}{2})\varphi(t) + \frac{1}{2\gamma}\Theta^2 - z_2^{\mathrm{T}}(t)k_z z_2(t)\end{aligned} \tag{27}$$

选取一个足够小的非负数 λ, 得到

$$\dot{V}(t) \leq -\lambda V(t) + \frac{||\delta||^2 + ||M^2Q(\cdot)||^2 + \Theta^2}{2\gamma} \tag{28}$$

因为 $||Q(\cdot)_{\max}|| \leq K_q$, 令 $\varepsilon^2 = ||\delta||^2 + ||M^2K_q||^2$, 则有

$$V(t) \leq \mathrm{e}^{-\lambda t}V(0) + \frac{\varepsilon^2 + \Theta^2}{2\lambda\gamma}, \quad t > 0 \tag{29}$$

通过式 (29) 可得, $V(t)$ 可以收敛到 $(\varepsilon^2 + \Theta^2)/(2\lambda\gamma)$. 则由式 (10) 可得出位置跟踪误差 $||e_{i,L}||$ 可以收敛到 $\sqrt{(\varepsilon^2 + \Theta^2)/(\lambda\gamma)}$. 接下来将证明 $||e_{i,L}||$ 可以收敛到原点附近. 通过选择 $\gamma = (\varepsilon^2 + \Theta^2)/(\vartheta^2\lambda)$ 可得到 $\sqrt{(\varepsilon^2 + \Theta^2)/(\lambda\gamma)} = \vartheta$. 因为 $e_{i,L}(t) = R_i^{\mathrm{T}}(t)(\eta_L(t) - \eta_i(t) - D_{i,L})$, $||R_i^{\mathrm{T}}(t)|| = 1$, 和 $||e_{i,L}(t)|| = ||R_i^{\mathrm{T}}(t)|| \times ||\eta_L(t) - \eta_i(t) - D_{i,L}||$, 则可得到 $\lim_{t\to\infty} ||\eta_L(t) - \eta_i(t) - D_{i,L}|| \leq \mathrm{e}^{-\lambda t}c_0 + \vartheta$.

注 6. 根据定理 1, 控制参数 k_e 和 k_φ 需满足 $k_eM^{-1} - \gamma I$ 和 $k_\varphi - \gamma I$ 是正定矩阵, 即矩阵 $k_eM^{-1} - \gamma I$ 和 $k_\varphi - \gamma I$ 的特征值必须都为正, 则得到通信时延的上界 $\tau_{\max} < \min(\sqrt{m^{-1}k_e\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega, \sqrt{k_\varphi\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega)$. 因此, 通信时延需满足 $\tau_{\max} < \min(\sqrt{m^{-1}k_e\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega, \sqrt{k_\varphi\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega)$, 此时系统才能趋于稳定.

3　数值仿真

在本节中, 通过数值仿真实验来验证所提出的轨迹跟踪控制器的性能. 智能网联车辆队列由 1 个领导者和 5 个跟随者车辆组成, 此外, 为了研究通信时延对轨迹跟踪性能的影响, 进行无时延、两组同质时延和异质时延数值仿真实验.

3.1　仿真设置

对 6 辆智能网联车组成的车辆队列进行数值仿真, 领导者车辆的初始条件为: $x_L(0) = 45$ m, $\theta_L(0) = 0$ rad 和 $\omega_L(0) = 0$ rad/s. 假设头车做匀速运动, 为研究所提车辆轨迹跟踪控制器的抗干扰能力, 速度干扰作用于领导者车辆, 即: $u_L(t) = k_v + \xi_L(t)$, 其中 $k_v = 10$ m/s

$$\xi_L(t) = \begin{cases} -\dfrac{10}{1+\mathrm{e}^{0.4t-8}}\ \mathrm{m/s}, & t \in [0\ \mathrm{s}, 35\ \mathrm{s}) \\ 0\ \mathrm{m/s}, & t \in [35\ \mathrm{s}, 45\ \mathrm{s}] \\ -\dfrac{10}{1+\mathrm{e}^{-0.4t+24}}\ \mathrm{m/s}, & t \in (45\ \mathrm{s}, 90\ \mathrm{s}] \end{cases}$$

$v_L(t) = 0$ m/s. 跟随者车辆的初始条件设置为: $x(0) = [37, 28.5, 19.5, 10, 0]^{\mathrm{T}}$ m, $y(0) = [\,0, 0, 0, 0, 0\,]^{\mathrm{T}}$ m, $u\,(0) = [\,0, 0, 0, 0, 0\,]^{\mathrm{T}}$ m/s, $v\,(0) = [\,0, 0, 0, 0, 0\,]^{\mathrm{T}}$ m/s, $\theta(0) = [0, 0, 0, 0, 0]^{\mathrm{T}}$ rad, $\omega(0) = [\,0, 0, 0, 0, 0\,]^{\mathrm{T}}$ rad/s, $d_L^x(0) = [5,\ 10, 15, 20, 25]^{\mathrm{T}}$ m, $d_L^y(0) = [0, 0, 0, 0, 0]^{\mathrm{T}}$ m. 显然, 车辆之间期望的纵向间距为 5 m. 在仿真实验中, 采样间隔设置为 $\Delta t = 0.01$ s. 另外, 表 1 中列出了与控制器相关的参数值.

在本文中, 考虑通信时延是有界的, 即 $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$, 其中 $\tau_{\min} = 0$, $\tau_{\max} < \min(\sqrt{m^{-1}k_e\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega, \sqrt{k_\varphi\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega)$. 为了探究通信时延对轨迹跟踪性能的影响, 本文共设置 4 组数值仿真实验, 包括无时延、两组同质时延以及异质时延. 两组同质通信时延分别设定为 $\tau = 0.02$ s 和 $\tau = 0.10$ s, 异质通信时延设置为 $\tau = [0.1,\ 0.26,\ 0.2,\ 0.18,\ 0.3\,]^{\mathrm{T}}$ s.

表 1　控制器参数

Table 1　Controller parameters

参数	值	单位
E_1	7.5 $(1,1)^{\mathrm{T}}$	m/s
E_2	8.79 $(1,1)^{\mathrm{T}}$	m/s
C_1	0.14 $(1,1)^{\mathrm{T}}$	m^{-1}
C_2	1.74 $(1,1)^{\mathrm{T}}$	—
l_c	5	m
κ	0.45	s^{-1}
β	2.22	s^{-1}
J	0.047	kg·m^2
k_e	1.5	—
g_v	$(1,0)^{\mathrm{T}}$	—
k_z	8	—
k_ϕ	8 **I**	—
d_v	4.5	kg/s
d_ω	0.41	kg·m/s
δ	$(-0.05,0)^{\mathrm{T}}$	—
G_ω	1	—
B	$(1,0;0,0.2)^{\mathrm{T}}$	—
m	5.5	kg

3.2 结果讨论

仿真结果如图 4~9 所示. 图 4 给出了在所提控制器下的位置轨迹图. 图 4 表明, 在设置的无时延、两组同质时延和异质时延 4 个场景里, 队列内的 5 个跟随者车辆可以平稳地跟踪领导者车辆轨迹. 当领导者车辆受速度的干扰时, 在本文所提控制器 (5) 和 (6) 作用下, 队列内的所有跟随者车辆速度也能收敛到和领导者车辆速度一致, 并保持期望的安全间距.

图 5 是控制输入 $F(t)$ 图. 由图 5 可知, 跟随者车辆的控制输入随着领导者停止行驶而趋于零. 由图 5(a)得出, 无时延情况下, 跟随者车辆的控制输入平滑, 且没有出现负的控制输入. 由图 5(c) ~ 5(d) 得出, 通信时延对控制输入有一定的影响, 控制输入在稳定前出现了波动, 且出现了负的控制输入.

图 6 是位置跟踪误差图. 由图 6 得出, 位置跟踪误差都能稳定地收敛到零, 表明相邻车辆之间的纵向间距都能稳定地收敛到 5 m. 本文提出的控制器能有效地保证队列中的跟随者车辆完成轨迹跟踪并稳定地形成车辆队列. 图 6(a) 以及图 6(c)~6(d) 可知, 在无时延、同质时延 $\tau = 0.10$ s 和异质时延下, 跟随者车辆跟踪领导者车辆并形成稳定的车辆队列时间分别是 $t = 10$ s 、$t = 20$ s 和 $t = 26$ s, 表明通信时延对车辆轨迹跟踪有一定的影响, 异质时延的影响最大, 在时延的影响下, 出现了负的位置跟踪误差. 由图 6(a)可知, 负的位置跟踪误差被避免, 因为本文设计控制器时考虑了车辆跟驰作用.

图 7 给出了队列内所有车辆的速度图. 基于图 7, 领导者车辆做匀速运动, 最后队列中跟随者车辆的速度都能稳定收敛到和领导者速度一致. 图 7(a) 表明无时延下, 跟随者车辆在稳定地跟踪领导者车辆之前, 跟随者车辆最大速度为 7.4 m/s, 且没有负速度的出现. 图 7(c)~7(d) 表明在同质时延 $\tau = 0.10$ s 和异质通信时延下, 跟随者车辆也能跟踪领导者车辆轨迹. 但由于设置通信时延超过了通信时延的上界, 有负速度的出现.

图 8 表明速度误差都能稳定收敛到 0 m/s. 基于图 8(a) 以及图 8(c)~8(d), 在无通信时延、同质时延 $\tau = 0.10$ s 和异质时延下, 速度误差收敛到 0 m/s 的时间分别为 $t = 10$ s 、$t = 20$ s 和 $t = 26$ s. 其中, 在通信时延的影响下, 速度误差在收敛到零之前, 出现了一定程度的波动. 在同质时延 $\tau = 0.10$ s 和异质时延下, 速度误差振幅最大值分别为 0.2 m/s 和 0.3 m/s.

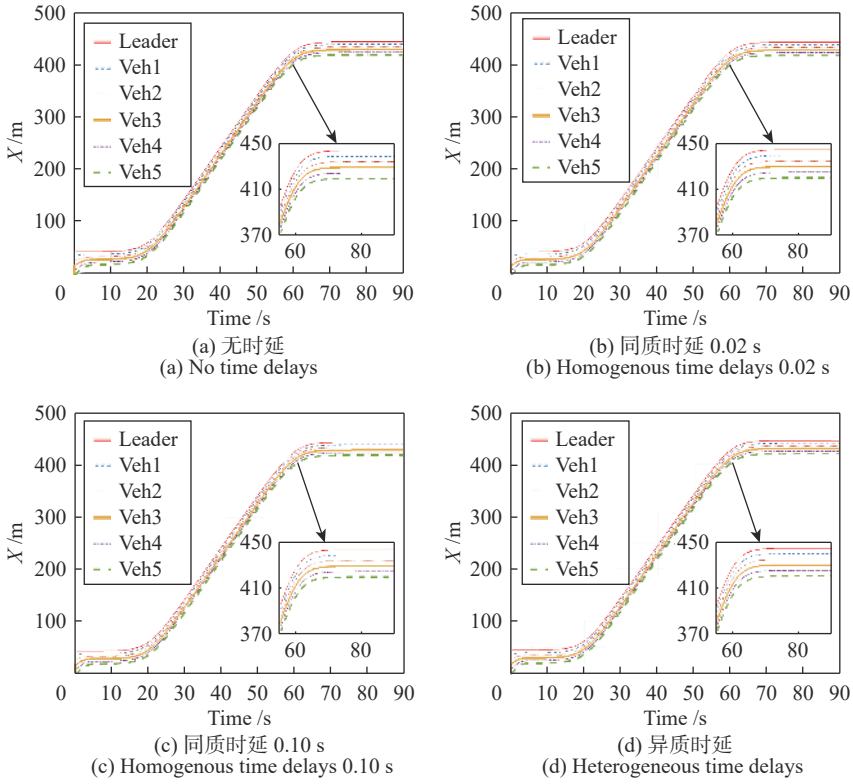
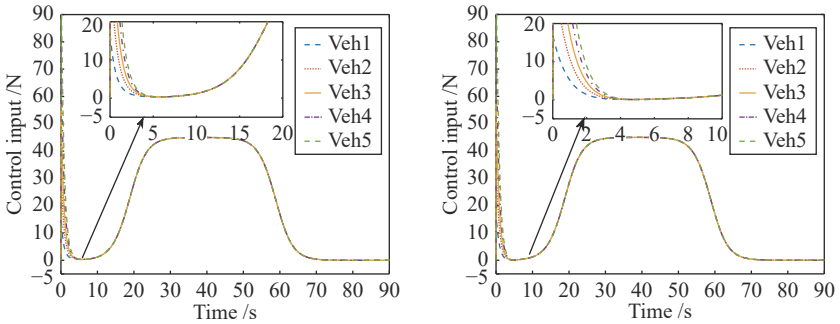


图 4 位置轨迹图

Fig. 4 Position trajectory profile



(a) 无时延
(a) No time delays

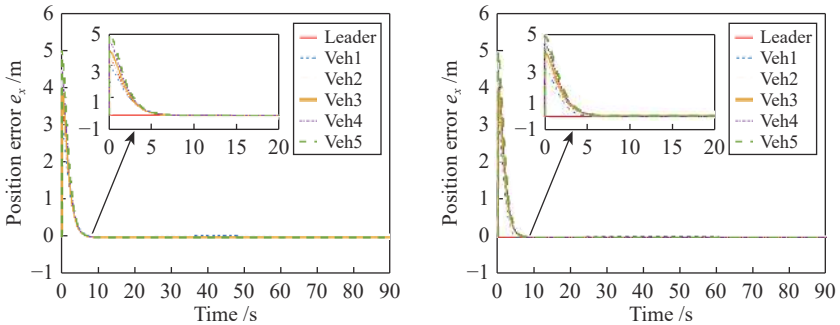
(b) 同质时延 0.02 s
(b) Homogenous time delays 0.02 s

(c) 同质时延 0.10 s
(c) Homogenous time delays 0.10 s

(d) 异质时延
(d) Heterogeneous time delays

图 5　控制输入 $F(t)$ 图

Fig. 5　Control input $F(t)$ profile



(a) 无时延
(a) No time delays

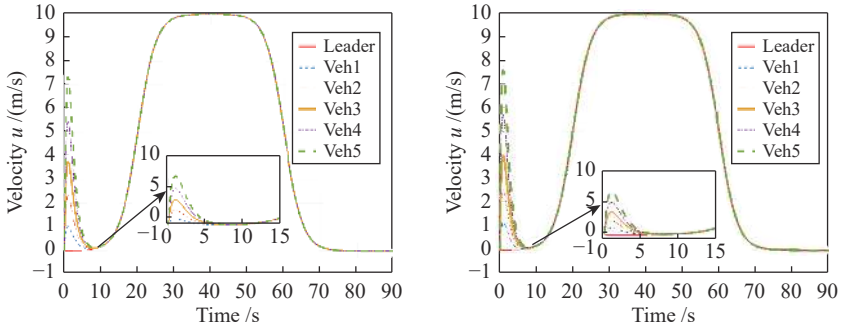
(b) 同质时延 0.02 s
(b) Homogenous time delays 0.02 s

(c) 同质时延 0.10 s
(c) Homogenous time delays 0.10 s

(d) 异质时延
(d) Heterogeneous time delays

图 6　位置跟踪误差图

Fig. 6　Position error profile



(a) 无时延
(a) No time delays

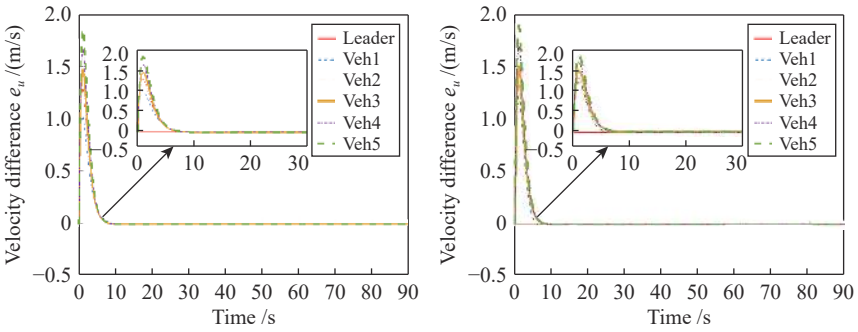
(b) 同质时延 0.02 s
(b) Homogenous time delays 0.02 s

(c) 同质时延 0.10 s
(c) Homogenous time delays 0.10 s

(d) 异质时延
(d) Heterogeneous time delays

图 7 速度图

Fig. 7 Velocity profile



(a) 无时延
(a) No time delays

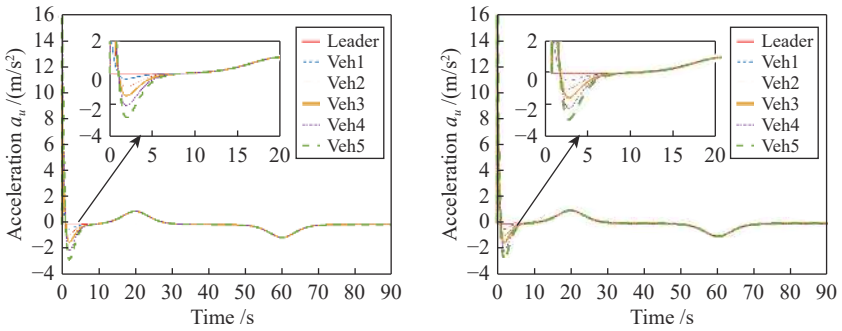
(b) 同质时延 0.02 s
(b) Homogenous time delays 0.02 s

(c) 同质时延 0.10 s
(c) Homogenous time delays 0.10 s

(d) 异质时延
(d) Heterogeneous time delays

图 8 速度误差图

Fig. 8 Velocity difference profile



(a) 无时延
(a) No time delays

(b) 同质时延 0.02 s
(b) Homogenous time delays 0.02 s

(c) 同质时延 0.10 s
(c) Homogenous time delays 0.10 s

(d) 异质时延
(d) Heterogeneous time delays

图 9　加速度图

Fig. 9　Acceleration profile

图 9 给出了所提控制器下的加速度图. 基于图 9(a) 以及图 9(b)～9(d), 在无时延、同质时延 $\tau = 0.02$ s, 0.10 s 和异质时延下, 加速度振幅分别为 2.2 m/s²、2.3 m/s²、2.6 m/s² 和 2.8 m/s². 时延对加速度有一定的影响, 在异质时延下加速度的振幅比同质时延下加速度的振幅大.

本文设置两组同质时延 (即 $\tau = 0.02$ s, $\tau = 0.10$ s) 数值仿真实验, 其目的是为探究通信时延对轨迹跟踪性能的具体影响. 针对本文所提车辆轨迹跟踪控制器 (5) 和 (6) 设置的仿真场景以及所给控制器参数 ($k_e = 1.5$, $k_\varphi = 8$), 根据仿真结果图 4(a)～9(a)、图 4(b)～9(b) 以及图 4(c)～9(c) 可知, 当 $\tau \in [0\text{ s}, 0.02\text{ s}]$ 时, 负的控制输入、负的位置跟踪误差以及负速度不会出现; 当 $\tau \in [0.02\text{ s}, \tau_{\max}]$ ($\tau_{\max} < \min(\sqrt{m^{-1}k_e\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega, \sqrt{k_\varphi\lambda\vartheta^2 - \varepsilon^2}/\Omega)$) 时, 负的控制输入、负的位置跟踪误差以及负速度会出现, 但此时系统会趋于稳定.

综上, 图 4～9 给出的位置轨迹、控制输入、位置跟踪误差、速度、速度误差和加速度图, 表明了本文提出的控制器对智能网联车辆的轨迹跟踪控制有很好的控制效果, 不仅能保证跟随者车辆跟踪领导者车辆轨迹, 而且使车辆运动规律符合交通流理论, 即避免了负的位置跟踪误差和负速度的出现. 此外, 数值实验表明, 时延对轨迹跟踪效果有一定的影响, 异质时延对轨迹跟踪性能的影响比同质时延对轨迹跟踪性能的影响显著. 通信时延对轨迹跟踪性能的影响比较如表 2 所示.

表 2　不同时延下的性能比较

Table 2　Performance comparisons under different time delays

性能	无时延	$\tau = 0.02$ s	$\tau = 0.10$ s	异质时延
控制输入	正	正	负	负
位置跟踪误差	正	正	负	负
速度	正	正	负	负
速度误差振幅 (m/s)	0	0	0.2	0.3
加速度振幅 (m/s²)	2.2	2.3	2.6	2.8

3.3　对比分析

对比位置跟踪误差图, 在文献 [20–21] 中, 有负的位置跟踪误差出现的现象, 即意味着车辆间的间距小于安全间距, 车辆追尾事故有可能发生. 其中, 在文献 [20] 中, 负的位置跟踪误差超过了 6 m, 这是严重不合理的. 由图 6(a) 可知, 所提控制器可以避免负的位置跟踪误差, 因为本文设计非线性控制

器时考虑了车辆跟驰作用.

在文献 [14] 中, 有负速度出现的现象, 即意味车辆在道路上出现倒车的现象, 这在实际的交通中是不合理的. 由图 7(a) 可知, 在轨迹跟踪过程中, 队列中的车辆在所提控制器的作用下可以避免负的速度, 因为本文设计非线性跟踪控制器时考虑了车辆跟驰作用.

数值仿真实验结果证明了本文所提控制器的有效性, 不仅保证跟随者车辆能够跟踪领导者车辆轨迹, 而且避免了负的位置跟踪误差和负速度的出现.

4 结束语

本文考虑车辆跟驰作用和车车通信过程中存在的通信时延问题, 基于车辆动力学模型, 提出了一种分布式非线性轨迹跟踪控制器解决来智能网联车辆轨迹跟踪控制问题. 不仅保证位置跟踪误差收敛到原点, 而且使车辆运动规律符合交通流理论, 即无负的位置跟踪误差和负速度的出现. 在车辆互联环境中, 提出一种双向领导跟随通信拓扑来表征车辆间的通信连接, 队列内的车辆通过双向领导跟随通信拓扑进行信息交互. 通过考虑车辆跟驰作用、有界的通信时延、车辆间距差以及速度差提出一种分布式非线性轨迹跟踪控制器. 利用 Lyapunov 方法证明了所提控制器的稳定性. 最后, 考虑速度干扰作用于领导者车辆, 针对无时延、同质时延和异质时延三种场景进行数值仿真实验, 仿真结果验证了所提控制器的有效性.

References

1 Shieh W Y, Hsu C C, Wang T H. Vehicle positioning and trajectory tracking by infrared signal-direction discrimination for short-range vehicle-to-infrastructure communication systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, **19**(2): 368−379

2 Li Y F, Tang C C, Peeta S, Wang Y B. Integral-sliding-mode braking control for connected vehicle platoon: Theory and application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, **66**(6): 4618−4628

3 Li Y F, Tang C C, Li K Z, He X Z, Peeta S, Wang Y B. Consensus-based cooperative control for multiplatoon under the connected vehicles environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, **20**(6): 2220−2229

4 Li Y F, Tang C C, Peeta S, Wang Y B. Nonlinear consensus-based connected vehicle platoon control incorporating car-following interactions and heterogeneous time delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, **20**(6): 2209−2219

5 Chatzikomis C, Sorniotti A, Gruber P, Zanchetta M, Willans D, Balcombe B. Comparison of path tracking and torque-vectoring controllers for autonomous electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018, **3**(4): 559−570

6 Li Y F, Wu C Q, Peeta S, Wang Y B. Trajectory tracking control for connected vehicle platoon. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, **51**(9): 92−97

7 Li Y F, Tang C C, Li K Z, Peeta S, He X Z, Wang Y B. Nonlinear finite-time consensus-based connected vehicle platoon control under fixed and switching communication topologies. *Transportation Research Part C*, 2018, **93**: 525−543

8 Li Y F, Yang B, Zheng T X, Li Y G, Gui M Y, Peeta S. Extended-state-observer-based double-loop integral sliding-mode control of electronic throttle valve. *IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems*, 2015, **16**(5): 2501−2510

9 Li Y F, Zhang L, Zheng H, He X Z, Peeta S, Zheng T X, Li Y G. Nonlane-discipline-based car-following model for electric vehicles in transportation-cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, **19**(1): 38−47

10 Invernizzi D, Lovera M. Trajectory tracking control of thrust-vectoring UAVs. *Automatica*, 2018, **95**: 180−186

11 Cai H, Hu G Q. Distributed tracking control of an interconnected leader-follower multi-agent system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**(7): 3494−3501

12 Hong Y G, Hu J P, Gao L X. Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology. *Automatica*, 2018, **42**(7): 1177−1182

13 Kayacan E, Ramon H, Saeys W. Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, **21**(2): 806−814

14 Zhang Q, Lapierre L, Xiang X B. Distributed control of cooperative path tracking for networked nonholonomic mobile vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 472−484

15 Xu Yang, Lu Li-Ping, Chu Duan-Feng, Huang Zi-Chao. Unified modeling method of trajectory planning and tracking for unmanned vehicle. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(4): 799−801
(徐杨, 陆丽萍, 褚端峰, 黄子超. 无人车辆轨迹规划与跟踪控制的统一建模方法. 自动化学报, 2019, **45**(4): 799−801)

16 Liang Z X, Ren Z, Shao X Y. Decoupling trajectory tracking for gliding reentry vehicles. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015, **2**(1): 115−120

17 Aguiar A, Hespanha J. Trajectory-tracking and pathfollowing of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, **52**(8): 1362−1379

18 Guo J H, Luo Y G , Li K Q. Adaptive non-linear trajectory tracking control for lane change of autonomous four-wheel independently drive electric vehicles. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, **12**(7): 712−720

19 Shen Zhi-Peng, Zhang Xiao-Ling. Recursive sliding-mode dynamic surface adaptive control for ship trajectory tracking with nonlinear gains. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(10): 1833−1841
(沈智鹏, 张晓玲. 基于非线性增益递归滑模的船舶轨迹跟踪动态面自适应控制. 自动化学报, 2018, **44**(10): 1833−1841)

20 Yu X, Liu L. Target enclosing and trajectory tracking for a mobile robot with input disturbances. *IEEE Control Systems Letters*, 2017, **1**(2): 221−226

21 Wang J. Distributed coordinated tracking control for a class of uncertain multiagent systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **62**(7): 3423−3429

22 Peters A, Middleton H, Mason O. Leader tracking in homogen-

eous vehicle platoons with broadcast delays. *Automatica*, 2014, **50**: 64−74

23 Kim J, Joe H, Yu S C, Lee J S, Kim M. Time-delay controller design for position control of autonomous underwater vehicle under disturbances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(2): 1052−1061

24 Zhang L J, Sun J, Orosz G. Hierarchical design of connected cruise control in the presence of information delays and uncertain vehicle dynamics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, **26**(1): 7435−7443

25 Yan Z P, Liu X L, Zhou J J, Wu D. Coordinated target tracking strategy for multiple unmanned underwater vehicles with time delays. *IEEE Access*, 2018, **6**: 10348−10357

26 Song D, Tharmarasa R, Kirubarajan T, Fernando X N. Multi-vehicle tracking with road maps and car-following models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, **19**(5): 1375−1386

27 Alasmary W, Zhuang W H. The mobility impact in IEEE 802.11p infrastructureless vehicular networks. *Ad Hoc Networks*, 2012, **10**(2): 222−230

28 Ponnusamy S. Series: Convergence and divergence. *Foundations of Mathematical Analysis. Birkhäuser*, Boston, MA, USA, 2012.

李永福 博士, 重庆邮电大学自动化学院教授, 智能空地协同控制重庆市高校重点实验室主任. 主要研究方向为智能网联汽车和空地协同控制. 本文通信作者.
E-mail: liyongfu@cqupt.edu.cn
(**LI Yong-Fu** Ph.D., professor at the College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers connected and automated vehicles and air-ground cooperative control. Corresponding author of this paper.)

邬昌强 重庆邮电大学自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为车辆轨迹跟踪控制.
E-mail: wucq h1228@163.com
(**WU Chang-Qiang** Master student at the College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers tracking control of vehicles.)

朱 浩 博士, 重庆邮电大学自动化学院副教授. 主要研究方向为智能车环境感知与信息融合.
E-mail: zhuhao@cqupt.edu.cn
(**ZHU Hao** Ph.D., associate professor at the College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers environmental perception of intelligent vehicles and information fusion.)

唐晓铭 博士, 重庆邮电大学自动化学院副教授. 主要研究方向为网络化控制和模型预测控制.
E-mail: tangxm@cqupt.edu.cn
(**TANG Xiao-Ming** Ph.D., associate professor at the College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers networked control and model predictive control.)