

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.11.001

基于固定时间扰动观测器的智能网联车辆 协同队列控制

李 想, 孙振超, 高振宇

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 针对含有模型不确定及外部扰动的智能网联自主车辆快速协同队列控制问题, 提出了一种基于扰动观测器的固定时间队列控制方案. 首先, 构建了固定时间扰动观测器, 在设定时间内精确估计由模型不确定及外部扰动构成的复合扰动. 其次, 基于扰动观测器、反步法及固定时间理论, 设计了一种固定时间协同队列控制器, 使得车辆队列控制系统是固定时间收敛的, 保证了车辆间跟踪误差在给定时间内收敛到零, 且收敛时间只与控制器参数有关. 通过Lyapunov理论, 分别证明了单车稳定性及队列稳定性. 最后通过5辆车组成的队列控制仿真验证了给定方案的有效性.

关 键 词: 智能网联车辆; 队列控制; 扰动观测器; 固定时间控制; 反步法控制

中图分类号: U 492.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)11-1521-08

Cooperative Platoon Control of Connected and Automated Vehicles Based on Fixed-Time Disturbance Observer

LI Xiang, SUN Zhen-chao, GAO Zhen-yu

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: GAO Zhen-yu, E-mail: 18840839109@163.com)

Abstract: The cooperative platoon control of connected and automated vehicles with model uncertainties and external disturbances is investigated. A fixed-time disturbance observer (DO) is proposed, with which the compound disturbance (i. e., model uncertainties and external disturbances) can be estimated accurately within settling time. Based on the DO, backstepping method and fixed-time theory, a novel controller is further designed to ensure that all signals of the closed-loop system have fixed-time stability, which ensures that the tracking error between vehicles converges to zero within a settling time, and the convergence time only depends on the controller parameters. Through Lyapunov stability theory, both individual vehicle stability and string stability are guaranteed. Finally, a simulation of five-vehicle platoon control verifies the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: connected and automated vehicle; platoon control; disturbance observer; fixed-time control; backstepping control

随着汽车工业的发展、城市化进程的加快, 交通需求日益增长, 交通拥堵、道路安全、能源浪费以及环境污染已经成为交通系统中亟待解决的问题. 众所周知, 以前城市中改善交通环境以及提高交通流量的重要方式是大规模地修建道路. 由于城市的空间有限, 通过大量地修建道路

来改善城市交通环境是不现实的. 面对日益严峻的道路交通问题, 发展智能交通系统^[1] (intelligent transportation system, ITS) 已成为社会热点. 随着人工智能技术和自动化技术的发展, ITS通过将这些技术结合, 逐步实现车辆和交通道路的信息交互, 用以解决城市道路交通问

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62303101); 河北省自然科学基金资助项目(F2023501001); 河北省在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2024179).

作者简介: 李 想(2000-), 男, 山东德州人, 东北大学硕士研究生; 高振宇(1989-), 男, 山东聊城人, 东北大学副教授, 硕士生导师.

题,提高道路利用率和运输效率,提升车辆的通行量和安全性,从而改善交通拥堵.

智能网联车辆 (connected and automated vehicle, CAV) 协同队列控制作为 ITS 中的重要技术之一,通过优化车辆行驶模式可有效减少交通事故、提高运输效率、改善环境以及增加驾驶的舒适性^[1]. 队列控制要求车辆之间保持预设的距离,并通过车辆之间的信息交互,设计队列控制器驱使同向车辆按照队列行驶. 目前针对车队控制的研究方法有很多,例如 PID 控制^[2]、滑模控制^[3]、反步法控制^[4]、模型预测控制^[5]等.

随着行驶效率以及行驶舒适性的不断提高,使得队列实现的快速性成为追求的目标,即要求队列控制系统具有较快的收敛速度. 然而,目前队列控制的研究成果大部分只能保证渐近收敛或者指数稳定,也就是队列控制在时间趋于无穷时才可以实现^[6]. 针对此弊端,学者提出了有限时间控制理论,且运用到车辆队列控制中^[7-8]. 文献[7]提出了一种分布式积分型滑模控制方法,只能保证跟踪误差在滑动模式的有限时间收敛,而在滑模面上的运动仍然是渐近收敛的,无法保证全局有限时间收敛. 基于非奇异终端滑模理论,文献[8]提出了一种新的队列控制算法,获得了全局有限时间的控制效果. 需要强调的是,以上算法虽然可以获得局部或者全局有限时间稳定控制效果,但系统收敛时间严格依赖系统初始状态. 针对部分初始状态未知的场景,以上算法失效,大大降低了其应用范围. 固定时间稳定理论^[9]的提出,不但消除了依赖初始状态的限制,且展现出了更好的鲁棒性. 基于该理论可以实现固定时间队列控制,这将会大大增加队列行驶的适用性与安全性.

行驶环境的多变性及车辆自身动态变化等因素都会对车辆产生不确定影响,如未建模动态、参数不确定及环境未知扰动等. 此外,由于车辆间的互联性,单一车辆的动态不确定和外部扰动都会影响到整个车队的稳定性. 因此,有效处理队列中的不确定影响至关重要. 当前解决外部扰动和模型不确定最常用的方法有基于近似方法(如:神经网络逼近^[6]、模糊逻辑逼近^[10]),基于滑模控制法^[11]及基于扰动观测器法^[12]. 因滑模控制易存在抖振和奇异值问题,近似法中有难以消除的固有残差,使得基于扰动观测器的方法在控制领域得到广泛研究与应用. 然而,当前基于扰动观测器法的观测效果多为渐近稳定或最终一

致有界,也就是只有当时间趋于无穷时,才能实现扰动估计,无法控制扰动的估计时间^[12]. 如果可以实现扰动在有限时间内的精确估计,将会为网联车辆在有限时间内实现队列控制提供可能. 然而,当前还没有基于扰动观测器保证队列系统全局固定时间稳定的成果. 因为该研究既要求扰动观测器可以固定时间内精确估计扰动,又要求队列目标在设定时间内实现,获得全局固定时间稳定的效果.

1 问题描述及预备知识

1.1 问题描述

如图 1 所示,基于前车-跟随 (predecessor-following, PF) 通信拓扑结构,考虑一个由 $N+1$ 辆 CAV 组成的队列,包括一个标号为 0 的领队车 (即车辆 0) 和 N 辆标号为 i 的跟随车 (即车辆 i). 领队车的动力学方程描述为

$$\dot{x}_0(t) = v_0(t), \dot{v}_0(t) = a_0(t). \quad (1)$$

其中: $x_0(t)$, $v_0(t)$ 和 $a_0(t)$ 分别为领队车的位置、速度和加速度,速度和加速度信息是给定的已知函数.

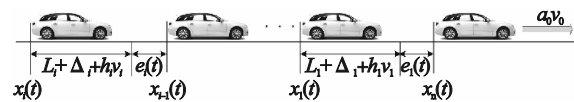


图 1 同构 CAV 队列构型

Fig. 1 Configuration of homogeneous CAV

跟随车的车辆动力学建模为一个非线性三阶系统^[7]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) &= a_i(t), \\ \dot{a}_i(t) &= f_i(v_i, a_i) + g_i u_i + d_i(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} f_i(v_i, a_i) &= -\frac{1}{\tau_i} \left(\frac{\rho_i A_i C_i}{2m_i} v_i^2 + g \sin \theta_i + \mu_i g \cos \theta_i \right) - \\ &\quad \frac{\rho_i A_i C_i}{m_i} v_i a_i - \frac{1}{\tau_i} a_i, \\ g_i &= \frac{1}{\tau_i m_i}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中: $x_i(t)$, $v_i(t)$, $a_i(t)$ 分别为跟随车 i 在 t 时刻的位置、速度和加速度; τ_i 为发动机时间常数; ρ_i 为空气密度; A_i , C_i , m_i , g , θ_i , μ_i 分别为车辆 i 的横截面积、阻力系数、质量、重力加速度、路面坡度及道路阻力滚动系数; $\rho_i A_i C_i / (2m_i)$ 为空气阻力; u_i 为控制输入,代表期望的驱动力、制动力或加

速度; $d_i(t)$ 为由风、道路坡度等引起的外部扰动.

由于车辆动态及其自身特性、工作环境及速度等因素都是相关的,而这些因素时常变化且难以预知.为了更真实地反映车辆动态信息,非线性函数 $f_i(v_i, a_i, t)$ 写成含有不确定项形式:

$$f_i(v_i, a_i, t) = f_{i0}(v_i, a_i, t) + f_{i\Delta}(v_i, a_i, t). \quad (4)$$

基于式(4),式(2)可以写成:

$$\dot{a}_i = f_{i0}(v_i, a_i, t) + g_i u_i + \omega_i. \quad (5)$$

式中: $\omega_i = f_{i\Delta}(v_i, a_i, t) + d_i(t)$ 表示作用到CAV上的由模型不确定和外界扰动构成的复合扰动项.

假设1 式(5)中 ω_i 是有界的,满足 $\omega_i \leq \rho < \infty$.其中, ρ 为已知常数.

注1 由于CAV运行速度携带能源的约束以及外界扰动能量的有限性,可知假设1是合理的.

采用固定时距策略,定义相邻车辆间间距跟踪误差为

$$e_i = x_{i-1} - x_i - h v_i - \delta_i. \quad (6)$$

其中: δ_i 为车辆间期望间距; h 为车辆间行驶时距.

1.2 控制目标

根据本文提出的控制问题及模型,设计基于扰动观测器的固定时间队列控制器,满足如下要求:

1) 单车稳定.相邻车辆间距跟踪误差在与系统的初始状态无关的时间内收敛到零,描述为

$$\lim_{t \rightarrow T_i} e_i(t) = 0, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i(t) = 0, \forall t \geq T_i. \quad (8)$$

其中, T_i 为单车收敛时间,为正常数.

2) 弱队列稳定^[13].整个队列跟踪误差在与系统的初始状态无关的时间内收敛至零,描述为

$$\lim_{t \rightarrow T} \sum_{i=1}^n e_i(t) = 0, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i(t) = 0, \forall t \geq T. \quad (10)$$

其中, T 表示整个队列收敛时间.

1.3 预备知识

引理1^[9] 如果存在一个函数 $V(x)$ 是连续有界的,同时满足:

$$1) V(x) = 0 \Leftrightarrow x = 0,$$

2) 对于任何 $x(t)$ 均可满足不等式 $\dot{V}(x) \leq -\gamma_1 V^p(x) - \gamma_2 V^q(x)$,其中, γ_1, γ_2, p 和 q 均为正常数,且 $0 < p < 1, q > 1$,则 $x(t)$ 是固定时间稳定的,收敛时间 T 满足:

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\lambda_1(1-p)} + \frac{1}{\lambda_2(q-1)}. \quad (11)$$

注2 由式(11)可以看出,系统的收敛时间只与系统参数 $\lambda_1, \lambda_2, p, q$ 有关,与系统初始状态无关.在实际工程中,对收敛时间有严格要求的情况,此算法更加适用.

引理2^[14] 取 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M \geq 0$,则

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^v &\geq \left(\sum_{i=1}^M \varepsilon_i \right)^v, 0 < v \leq 1; \\ \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^v &\geq M^{1-v} \left(\sum_{i=1}^M \varepsilon_i \right)^v, 1 < v \leq \infty. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: v 为正常数; M 为正整数.

2 主要方法

2.1 扰动观测器设计

为了设计观测器,定义变量:

$$s_i = a_i - \chi_i. \quad (13)$$

式中,辅助变量 χ_i 关于时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_i &= k_{i1} s_i + k_{i2} \text{sign}(s_i) + k_{i3} [s_i]^p + \\ &k_{i4} [s_i]^q + g_i u_i + f_{i0}(v_i, a_i). \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}$ 均为正常数; $0 < p < 1; q > 1$; $[s_i]^p = |s_i|^p \text{sign}(s_i)$.

根据式(14)和式(5),对 s_i 求导得

$$\dot{s}_i = \dot{a}_i - \dot{\chi}_i = w_i - k_{i1} s_i - k_{i2} \text{sign}(s_i) - k_{i3} [s_i]^p - k_{i4} [s_i]^q. \quad (15)$$

这里,扰动估计 \hat{w}_i 设计为

$$\hat{w}_i = k_{i1} s_i + k_{i2} \text{sign}(s_i) + k_{i3} [s_i]^p + k_{i4} [s_i]^q. \quad (16)$$

其中, $k_{i2} \geq \rho$.

定理1 在假设1下,所设计的扰动观测器(16)可以在固定时间内对扰动 w_i 精确估计,收敛时间为 T_{i0} 且估计误差为零.

证明 为了证明扰动观测器的收敛性,选择Lyapunov函数:

$$V_{i0} = \frac{1}{2} s_i^2. \quad (17)$$

其导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i0} &= s_i \dot{s}_i = s_i (\dot{a}_i - \dot{\chi}_i) = \\ &-k_{i1} s_i^2 - k_{i2} |s_i| - k_{i3} |s_i|^{p+1} - k_{i4} |s_i|^{q+1} + s_i w_i \leq \\ &-k_{i1} s_i^2 - k_{i3} |s_i|^{p+1} - k_{i4} |s_i|^{q+1} \leq \\ &-k_{i3} 2^{\frac{p+1}{2}} \left(\frac{1}{2} s_i^2 \right)^{\frac{p+1}{2}} - k_{i4} 2^{\frac{q+1}{2}} \left(\frac{1}{2} s_i^2 \right)^{\frac{q+1}{2}} = \\ &-k_{i3} 2^{\frac{p+1}{2}} V_{i0}^{\frac{p+1}{2}} - k_{i4} 2^{\frac{q+1}{2}} V_{i0}^{\frac{q+1}{2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

根据引理1, V_{i0} 是固定时间稳定的,收敛时间

T_{i0} 满足:

$$T_{i0} \leq T_{i0, \max} = \frac{1}{\iota_{i1}(1-\tilde{p})} + \frac{1}{\iota_{i2}(\tilde{q}-1)}. \quad (19)$$

其中: $\iota_{i1} = k_{i3} 2^{\frac{p+1}{2}}$; $\iota_{i2} = k_{i4} 2^{\frac{q+1}{2}}$; $\tilde{p} = \frac{p+1}{2}$; $\tilde{q} = \frac{q+1}{2}$.

因此, 当时间 $t \geq T_{i0}$ 时, $\dot{V}_{i0} = 0$, 由此可得

$$\dot{s}_i = 0, \quad t \geq T_{i0}. \quad (20)$$

定义扰动估计误差 \tilde{w}_i 满足:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_i &= \hat{w}_i - w_i = k_{i1}s + k_{i2}\text{sign}(s) + k_{i3}[s_i]^p + k_{i4}[s_i]^q - \\ &\quad \dot{a}_i + g_i u_i + f_{i0}(v_i, a_i) = -\dot{s}_i. \end{aligned} \quad (21)$$

因此, 有

$$\tilde{w}_i = 0, \quad t \geq T_{i0}. \quad (22)$$

即在固定时间内给定观测器可以实现对扰动的精确估计.

注 3 文献[15-16]中提出的扰动观测器可以保证估计扰动以指数律收敛到实际扰动, 只能保证估计误差的渐近收敛性, 无法获得精确的估计时间. 基于固定时间稳定性理论, 本文提出的扰动观测器可以在时间 T_{i0} 内以零误差估计未知扰动.

2.2 控制器设计

基于扰动观测器、反步法及固定时间理论, 设计队列控制器, 步骤如下:

第 1 步 定义虚拟误差 z_{i1} :

$$z_{i1} = e_i = x_{i-1} - x_i - hv_i - \delta_i. \quad (23)$$

其导数为

$$\dot{z}_{i1} = v_{i-1} - v_i - ha_i. \quad (24)$$

定义虚拟误差 z_{i2} :

$$z_{i2} = v_{i-1} - v_i - ha_i - \alpha_{i1} = \dot{z}_{i1} - \alpha_{i1}. \quad (25)$$

为保证 z_{i2} 收敛, 设计虚拟控制输入 α_{i1} 为

$$\alpha_{i1} = -\lambda_{i1}[z_{i1}]^p - \lambda_{i2}[z_{i1}]^q. \quad (26)$$

选取 Lyapunov 函数:

$$V_{i1} = \frac{1}{2} z_{i1}^2. \quad (27)$$

对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i1} &= z_{i1} \dot{z}_{i1} = \\ & z_{i1} (z_{i2} + \alpha_{i1}) = \\ & z_{i1} z_{i2} - \lambda_{i1} |z_{i1}|^{p+1} - \lambda_{i2} |z_{i1}|^{q+1}. \end{aligned} \quad (28)$$

第 2 步 对虚拟误差 z_{i2} 求导可得

$$\dot{z}_{i2} = a_{i-1} - a_i - h\dot{a}_i - \dot{\alpha}_{i1}. \quad (29)$$

选取 Lyapunov 函数:

$$V_{i2} = V_{i1} + \frac{1}{2} z_{i2}^2. \quad (30)$$

对其求导可得

$$\dot{V}_{i2} = \dot{V}_{i1} + z_{i2} \dot{z}_{i2} = z_{i2} (z_{i1} + \dot{z}_{i2}) - \lambda_{i1} |z_{i1}|^{p+1} - \lambda_{i2} |z_{i1}|^{q+1}. \quad (31)$$

根据式(29)和式(31), 设计队列控制器:

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{1}{hg_i} \left\{ z_{i1} + a_{i-1} - a_i - \dot{\alpha}_{i1} + \lambda_{i3} [z_{i2}]^p + \right. \\ & \left. \lambda_{i4} [z_{i2}]^q - hf_{i0}(v_i, a_i, t) - h\hat{w}_i \right\}. \end{aligned} \quad (32)$$

其中, \hat{w}_i 为扰动估计值.

2.3 收敛性分析

定理 2 考虑队列模型(2), 设计基于扰动观测器(16)的固定时间反步控制器(32), 可以使跟踪误差 $e_i(t)$ 、虚拟误差 $z_{i2}(t)$, 在给定时间 T_i 内收敛到零, 且 $T_i \leq T_{i0} + T_{is}$. 同时, 车队的弱队列稳定性也可以在稳定时间 T 内得到保证.

证明 将控制输入 u_i 代入式(31)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i2} &= \dot{V}_{i1} + z_{i2} \dot{z}_{i2} = z_{i2} (z_{i1} + \dot{z}_{i2}) - \lambda_{i1} |z_{i1}|^{p+1} - \lambda_{i2} |z_{i1}|^{q+1} - \\ & \lambda_{i1} |z_{i1}|^{p+1} - \lambda_{i2} |z_{i1}|^{q+1} - \lambda_{i3} |z_{i2}|^{p+1} - \lambda_{i4} |z_{i2}|^{q+1} + \\ & \tilde{w}_i = -\lambda_{i1} (z_{i1}^2)^{\frac{p+1}{2}} - \lambda_{i2} (z_{i1}^2)^{\frac{q+1}{2}} - \lambda_{i3} (z_{i2}^2)^{\frac{p+1}{2}} - \\ & \lambda_{i4} (z_{i2}^2)^{\frac{q+1}{2}} + \tilde{w}_i. \end{aligned} \quad (33)$$

根据引理 2, 进一步得

$$\dot{V}_{i2} \leq -\alpha_i V_{i2}^{\frac{p+1}{2}} - \beta_i V_{i2}^{\frac{q+1}{2}} + \tilde{w}_i. \quad (34)$$

其中: $\alpha_i = \min \left\{ 2^{\frac{p+1}{2}} \lambda_{i1}, 2^{\frac{p+1}{2}} \lambda_{i3} \right\}$; $\beta_i = \min \{ 2\lambda_{i2}, 2\lambda_{i4} \}$.

根据引理 1, 可知当 $t \in [0, T_{i0}]$ 时, 存在一个正常数 Δ_i 使得 $|\tilde{w}_i| \leq \Delta_i$, 当 $t > T_{i0}$ 时, $\tilde{w}_i = 0$. 因此, 当 $t > T_{i0}$ 时, 式(34)可写为

$$\dot{V}_{i2} \leq -\alpha_i V_{i2}^{\frac{p+1}{2}} - \beta_i V_{i2}^{\frac{q+1}{2}}. \quad (35)$$

类似地, V_{i2} 也是全局固定时间稳定的, 收敛时间 T_{is} 满足:

$$T_{is} \leq T_{is, \max} = \frac{2}{\alpha_i(1-p)} + \frac{2}{\beta_i(q-1)}. \quad (36)$$

根据以上分析, 当 $T_i \geq T_{i0} + T_{is}$ 时, 可以保证单车跟踪系统是全局固定时间稳定的, 即单车稳定.

为了验证整个系统的收敛性, 即弱队列稳定, 首先选取 Lyapunov 函数为

$$V_0 = \sum_{i=1}^n V_{i0}. \quad (37)$$

对其求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \sum_{i=1}^n \dot{V}_{i0} \leq -\lambda_{\min}(k_3) 2^{\frac{p+1}{2}} \left((V_{10})^{\frac{p+1}{2}} + \dots + (V_{n0})^{\frac{p+1}{2}} \right) - \\ & \lambda_{\min}(k_4) 2^{\frac{q+1}{2}} \left((V_{10})^{\frac{q+1}{2}} + \dots + (V_{n0})^{\frac{q+1}{2}} \right) \leq \\ & -\lambda_{\min}(k_3) 2^{\frac{p+1}{2}} V_0^{\frac{p+1}{2}} - \lambda_{\min}(k_4) 2^{\frac{q+1}{2}} n^{\frac{1-q}{2}} V_0^{\frac{q+1}{2}}. \end{aligned} \quad (38)$$

收敛时间为 T_0 满足:

$$T_0 \leq T_{0,\max}: = \frac{2}{\lambda_{\min}(k_3)2^{\frac{p+1}{2}}(1-p)} + \frac{2}{\lambda_{\min}(k_4)2^{\frac{q+1}{2}}n^{\frac{1-q}{2}}(q-1)}. \quad (39)$$

其中: $k_3=[k_{13}, \dots, k_{n3}]; k_4=[k_{14}, \dots, k_{n4}]$.

队列稳定性,选取全局 Lyapunov 函数:

$$V_s = \sum_{i=1}^n V_{i2}. \quad (40)$$

当 $t > T_0$ 时,求得

$$\dot{V}_s = \sum_{i=1}^n \dot{V}_{is} \leq -\alpha V_s^{\frac{p+1}{2}} - \beta V_s^{\frac{q+1}{2}}. \quad (41)$$

式中: $\alpha = \min\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}; \beta = \min\{\beta_1, \dots, \beta_n\}n^{\frac{1-q}{2}}$.

收敛时间为 T_s 满足:

$$T_s \leq T_{s,\max}: = \frac{2}{\alpha(1-p)} + \frac{2}{\beta(q-1)}. \quad (42)$$

因此,当 $T \geq T_0 + T_s$ 时,系统所有跟踪误差为全局固定时间稳定的,误差将收敛到零.根据弱队列稳定定义,整个车队为队列稳定的.

3 数值仿真

在仿真中,仿真参数根据文献[6]设置为:发动机常数 $\tau_i=0.25$,空气密度 $\rho_i=1.2 \text{ kg/m}^3$,第 i 辆车的横截面积 $A_i=2.2 \text{ m}^2$,空气阻力系数 $C_i=0.35$,每辆车的质量 $m_i=1650 \text{ kg}$,重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$,道路坡度 $\theta_i=0$,道路滚动阻力系数 $\mu_i=0.02$,外部扰动 $d_i(t)=0.6 \tanh(t)$.期望的车间距为 $\delta_i=19 \text{ m}, h=1 \text{ s}$.初始位置和速度为 $x_0(0)=200 \text{ m}, v_0(0)=0$.跟随车的初始位置和速度为 $x_i(0)=[180.5, 165, 140.2, 125.5] \text{ m}, v_i(0)=0$.领航车加速度设置为

$$a_0(t) = \begin{cases} 0, & 0s \leq t < 3s; \\ 0.5t, & 3s \leq t < 4s; \\ 2, & 4s \leq t < 9s; \\ -0.5t + 6.5, & 9s \leq t < 13s; \\ 0, & t \geq 13s. \end{cases} \quad (43)$$

3.1 仿真设置

情况 1 设 $f_{ia}(v_i, a_i, t)=0$,即只存在环境扰动.扰动观测器参数设计如下: $k_{i1}=1, k_{i2}=5, k_{i3}=2, k_{i4}=1, p=3/7, q=7/5$.控制器参数设计为: $\lambda_{i1}=10, \lambda_{i2}=0.05, \lambda_{i3}=0.5, \lambda_{i4}=0.5$,结果如图 2~图 8 所示.

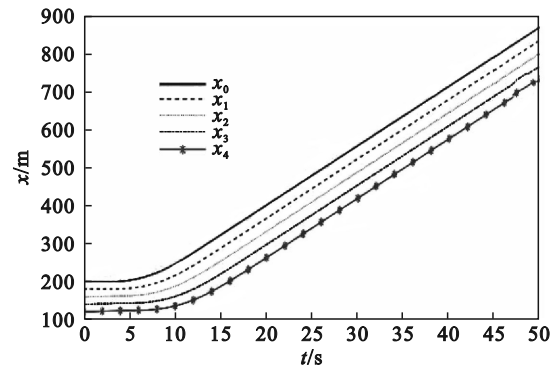


图 2 各车辆的位置信息 $x_i(t)$
Fig. 2 Position $x_i(t)$ of each vehicle

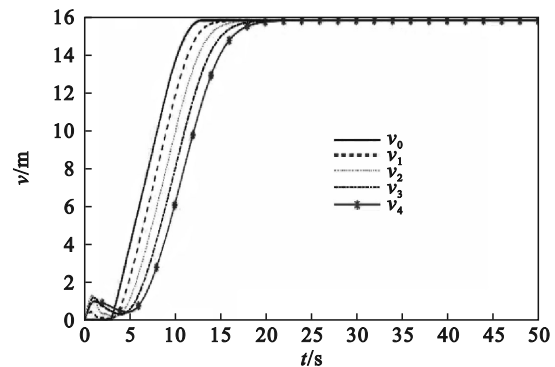


图 3 各车辆的速度信息 $v_i(t)$
Fig. 3 Velocity $v_i(t)$ of each vehicle

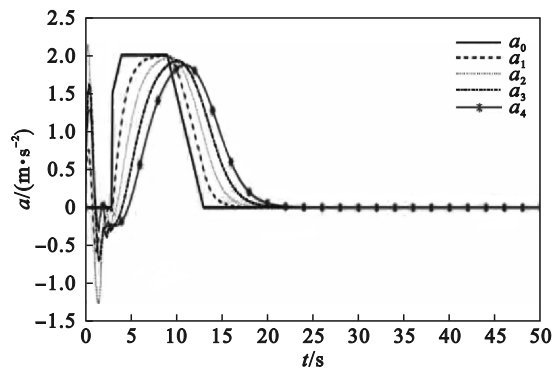


图 4 各车辆的加速度信息 $a_i(t)$
Fig. 4 Acceleration $a_i(t)$ of each vehicle

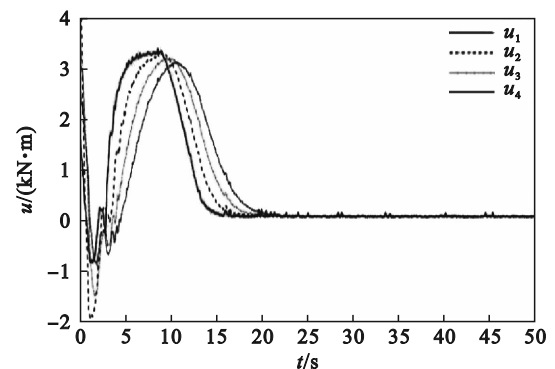


图 5 各车辆的控制输入信息 $u_i(t)$
Fig. 5 Control input $u_i(t)$ of each vehicle

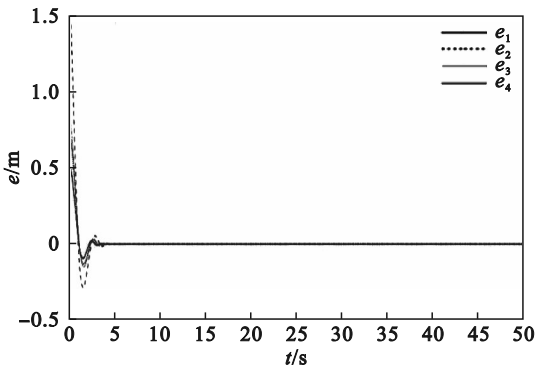


图 6 各车辆的跟踪误差 $e_i(t)$

Fig. 6 Tracking error $e_i(t)$ of each vehicle

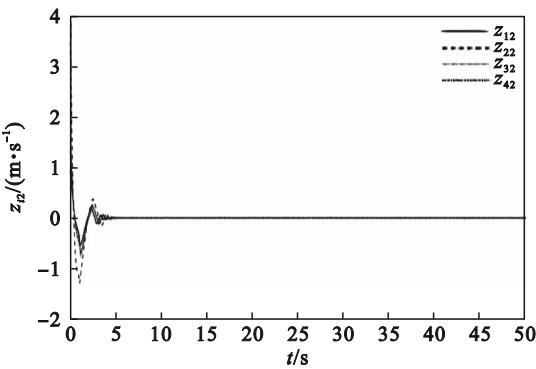


图 7 各车辆的虚拟误差 $z_i(t)$

Fig. 7 Virtual error $z_i(t)$ of each vehicle

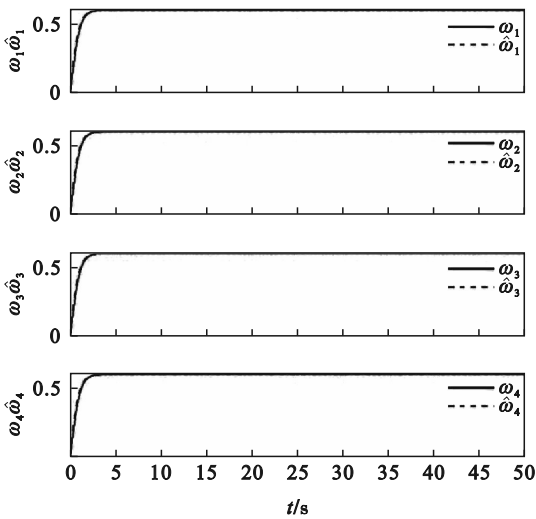


图 8 各车辆的实际扰动 $\omega_i(t)$ 与估计扰动 $\hat{\omega}_i(t)$

Fig. 8 Actual disturbance $\omega_i(t)$ and estimated disturbance $\hat{\omega}_i(t)$ of each vehicle

图 2~图 4 分别给出了车辆的位置信息、速度信息及加速度信息,可以看出,跟随车可以在固定时间内跟上领队车,且按照领队车的速度和加速度行驶.图 5 给出了控制输入信息.图 6 和图 7 表明跟踪误差和虚拟误差都可以在固定时间内快速收敛.图 8 给出了扰动的真实值和估计值,表明所设计的观测器可以实现对扰动的精确估计.

情况 2 设 $f_{i\Delta}(v_i, a_i, t) = 0.3f_{i0}(v_i, a_i, t)$, 即存在外界环境扰动及模型不确定.扰动观测器参数设计如下: $k_{i1} = 1, k_{i2} = 5, k_{i3} = 2, k_{i4} = 1, p = 3/7, q = 7/5$. 控制器参数设计为: $\lambda_{i1} = 10, \lambda_{i2} = 0.05, \lambda_{i3} = 2, \lambda_{i4} = 1$. 图 9~图 15 给出了仿真结果,表明所设计的扰动观测器及队列控制器仍然是有效的.

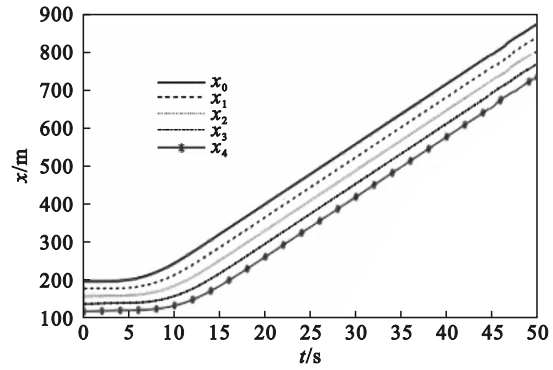


图 9 各车辆的位置信息 $x_i(t)$

Fig. 9 Position $x_i(t)$ of each vehicle

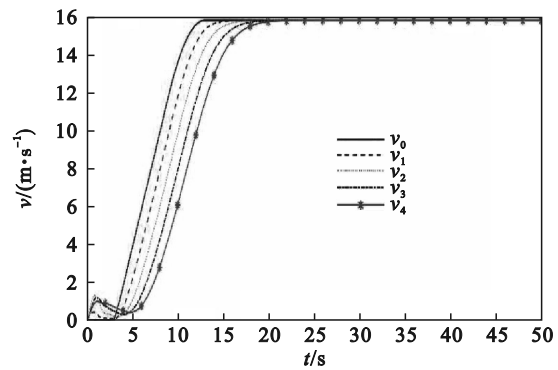


图 10 各车辆的速度信息 $v_i(t)$

Fig. 10 Velocity $v_i(t)$ of each vehicle

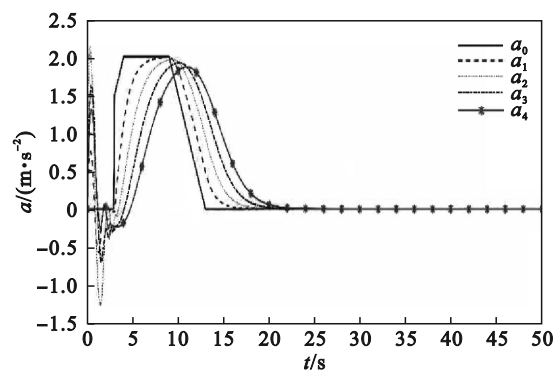


图 11 各车辆的加速度信息 $a_i(t)$

Fig. 11 Acceleration $a_i(t)$ of each vehicle

3.2 仿真对比

为了更好地证明本文所提扰动观测器的优越性,与传统扰动观测器 $\dot{\chi}_i = k_{i1}s_i + k_{i2}\text{sign}(s_i)$ 进行仿真比较,参数设计如下: $k_{i1} = 1, k_{i2} = 5$.

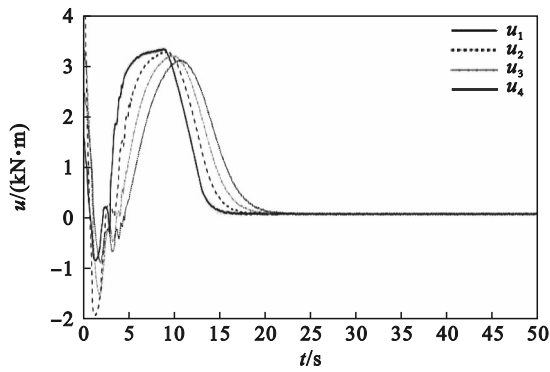


图 12 各车辆的控制输入信息 $u_i(t)$
Fig. 12 Control input $u_i(t)$ of each vehicle

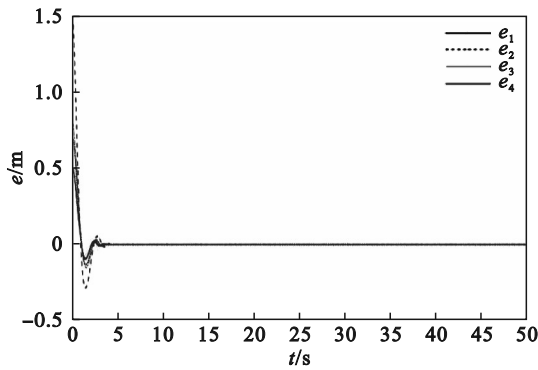


图 13 各车辆的跟踪误差 $e_i(t)$
Fig. 13 Tracking error $e_i(t)$ of each vehicle

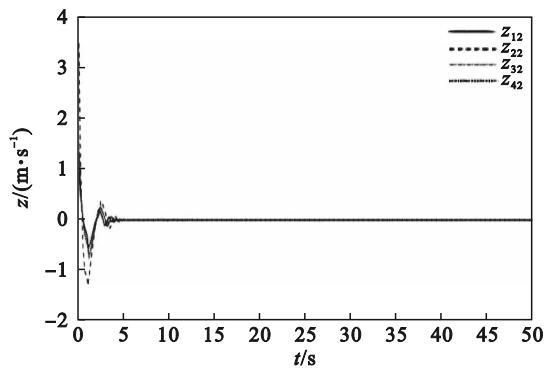


图 14 各车辆的虚拟误差 $z_i(t)$
Fig. 14 Virtual error $z_i(t)$ of each vehicle

本文分别针对上述情况 1, 2 进行仿真对比, 效果如图 16~图 17 所示. 通过对比图 16 和图 17 发现, 本文所设计的固定时间扰动观测器能快速精确地对实际扰动进行辨识和处理, 而传统的观测器不能对实际扰动进行快速辨识和处理, 大概在 $t=5$ s 时才开始处理. 仿真结果表明, 本文所设计的固定时间扰动观测器能快速精确地对不确定项进行辨识和处理, 大大提升车队控制系统的稳定性, 所以本文给定的扰动观测器在观测精度及观测速度上都优于传统扰动观测器.

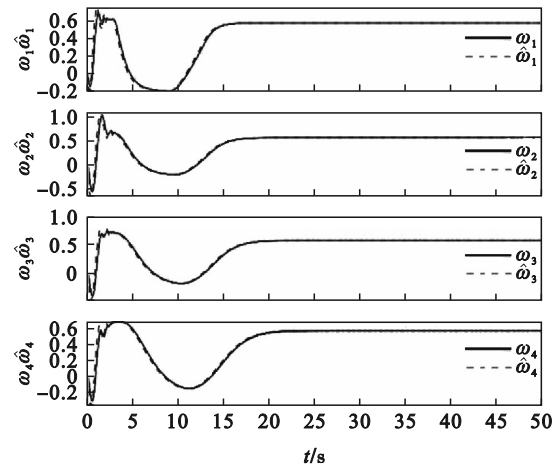


图 15 实际扰动 $\omega_i(t)$ 与估计扰动 $\hat{\omega}_i(t)$
Fig. 15 Actual disturbance $\omega_i(t)$ and estimated disturbance $\hat{\omega}_i(t)$ of each vehicle

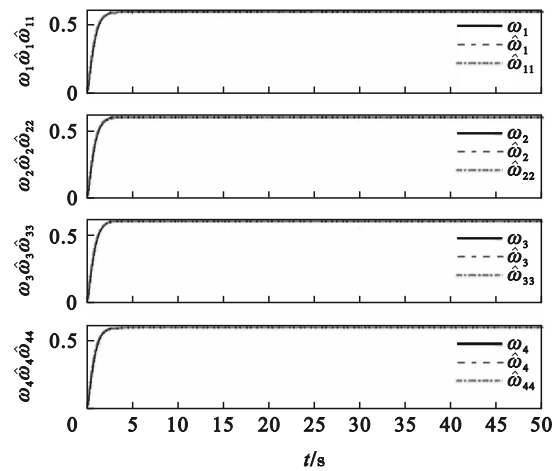


图 16 基于固定时间扰动观测器的实际扰动 $\omega_i(t)$ 与估计扰动 $\hat{\omega}_i(t)$
Fig. 16 Actual disturbance $\omega_i(t)$ and estimated disturbance $\hat{\omega}_i(t)$ based on fixed-time DO

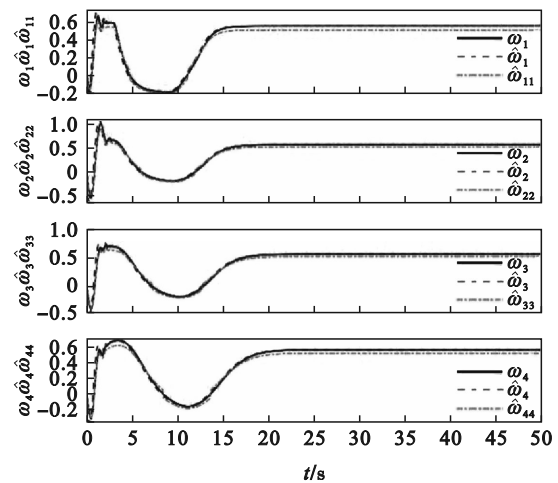


图 17 基于传统扰动观测器的实际扰动 $\omega_i(t)$ 与估计扰动 $\hat{\omega}_i(t)$
Fig. 17 Actual disturbance $\omega_i(t)$ and estimated disturbance $\hat{\omega}_i(t)$ based on traditional DO

为了进一步验证系统在所涉及的控制律下的收敛时间与初始状态无关,针对跟随车辆在不同初始位置验证算法的有效性.简单起见,这里只针对跟随车辆 1 的初始位置分别在 180.5, 180, 179.5 m 进行验证,如图 18 所示,仿真结果验证了控制算法的正确性和有效性.不同初始状态下,该控制器可以确保相同时间内达到系统稳定,实现车辆队列控制目标.

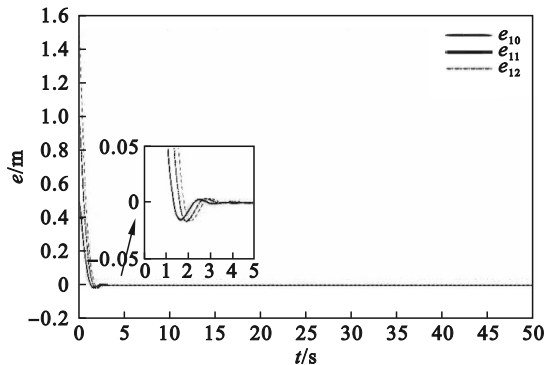


图 18 不同初始位置跟踪误差 $e_i(t)$

Fig. 18 Tracking error $e_i(t)$ of different initial positions

4 结 论

1) 通过设计固定时间扰动观测器有效补偿由模型不确定及外部扰动构成的复合扰动,获得精确的扰动估计效果.

2) 基于扰动观测器,结合固定时间理论、反步法等设计队列控制器,使队列系统能够在固定时间内实现控制目标,即车辆间跟踪误差设定时间内收敛至零,且收敛时间只与控制参数有关,同时保证了队列稳定性.

参考文献:

- [1] Chu S, Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future[J]. *Nature*, 2012, 488(7411): 294-303.
- [2] 文世喜, 郭戈, 苏晓鹭. 考虑行车能见度状况的车辆队列协作控制[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(7): 1153-1164. (Wen Shi-xi, Guo Ge, Su Xiao-lu. Cooperative control of vehicle platoons according to driving visibility status[J]. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(7): 1153-1164.)
- [3] Li Y F, Tang C C, Peeta S, et al. Integral-sliding-mode braking control for a connected vehicle platoon: theory and application[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4618-4628.
- [4] Zhu Y, Zhu F. Distributed adaptive longitudinal control for uncertain third-order vehicle platoon in a networked environment[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(10): 9183-9197.
- [5] 罗捷, 鲁良叶, 何德峰, 等. 通信拓扑切换下车辆队列分布式模型预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(7): 887-896. (Luo Jie, Lu Liang-ye, He De-feng, et al. Distributed model predictive control of vehicle platoons with switching communication topologies[J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(7): 887-896.)
- [6] Guo G, Li D D. Adaptive sliding mode control of vehicular platoons with prescribed tracking performance [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7511-7520.
- [7] Guo X G, Wang J L, Liao F, et al. Distributed adaptive integrated-sliding-mode controller synthesis for string stability of vehicle platoons [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2419-2429.
- [8] Li Y F, Tang C C, Li K Z, et al. Nonlinear finite-time consensus-based connected vehicle platoon control under fixed and switching communication topologies [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 93: 525-543.
- [9] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 57(8): 2106-2110.
- [10] Zhang C Z, Hu J F, Qiu J B, et al. A novel fuzzy observer-based steering control approach for path tracking in autonomous vehicles [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(2): 278-290.
- [11] Rabiee H, Ataei M, Ekramian M. Continuous nonsingular terminal sliding mode control based on adaptive sliding mode disturbance observer for uncertain nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2019, 109: 108515.
- [12] Wang J M, Luo X Y, Yan J, et al. Distributed integrated sliding mode control for vehicle platoons based on disturbance observer and multi power reaching law[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(4): 3366-3376.
- [13] Swaroop D, Hedrick J K, Choi S B. Direct adaptive longitudinal control of vehicle platoons [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, 50(1): 150-161.
- [14] Huang X Q, Lin W, Yang B. Global finite-time stabilization of a class of uncertain nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2005, 41(5): 881-888.
- [15] Wang J M, Luo X Y, Wang L, et al. Integral sliding mode control using a disturbance observer for vehicle platoons[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(8): 6639-6648.
- [16] Na G, Park G, Turri V, et al. Disturbance observer approach for fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(5): 748-767.