

基于全局快速积分终端滑模的智能车队 有限时间纵向控制

殷春芳¹, 谢永权¹, 施德华², 汪少华², 李春³

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 江苏大学汽车工程研究院, 212013, 江苏镇江;

3. 金龙联合汽车工业(苏州)有限公司, 215026, 江苏苏州)

摘要: 针对智能车辆队列纵向协同控制问题,提出一种基于终端滑模和非光滑趋近律的有限时间控制算法以提高车队系统车间距的收敛性能和强队列稳定性。首先,为加快车辆队列车间距误差的收敛速度,实现目标车速的快速跟踪,构建包含车间距误差积分项的全局快速积分终端滑模面(GFITSMS)。其次,针对由外部干扰作用造成的车间距稳态收敛误差,提出连续但不可导的非光滑趋近律(NSRL),并基于提出的 GFITSMS 和 NSRL 构建全局快速积分终端滑模控制器(GFITSMC),通过构造 Lyapunov 函数,分析车队系统的队列有限时间稳定性和车间距误差的快速收敛性。研究表明,在首车-跟随(LF)通信拓扑结构下,相较于普通滑模控制器(SMC)和双幂次滑模控制器(DPSMC),所提有限时间控制器使车间距误差收敛时间分别减少了56.3%和50%,误差峰值分别降低了72%和58%。在前车-跟随(PF)通信拓扑结构下,车间距误差收敛时间分别减少了51.4%和48.6%。这表明所提有限时间控制算法在两种不同通信拓扑结构下均能有效地提高车间距误差的快速收敛性能和鲁棒性能,并显著改善由控制器产生抖振导致的车辆频繁加减速现象。

关键词: 智能车辆队列;纵向协同驾驶;有限时间控制;终端滑模;非光滑趋近律

中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202307005 **文章编号:** 0253-987X(2023)07-0050-12

Finite Time Longitudinal Control of Intelligent Vehicle Platoon Based on Global Fast Integral Terminal Sliding Mode

YIN Chunfang¹, XIE Yongquan¹, SHI Dehua², WANG Shaohua², LI Chun³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

3. Higer Bus Company Limited, Suzhou, Jiangsu 215026, China)

Abstract: For the longitudinal cooperative control of intelligent vehicle platoon, a finite time control algorithm based on terminal sliding mode and non-smooth reaching law is proposed to improve the convergence performance of vehicle spacing and string stability for vehicle platoon. Firstly, in order to speed up the convergence of vehicle spacing error in the vehicle platoon and achieve fast tracking of the target vehicle speed, a global fast integral terminal sliding mode surface (GFITSMS) which includes

收稿日期: 2022-08-26。 作者简介: 殷春芳(1976—),女,副教授,硕士生导师;施德华(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905219);江苏省重点研发计划资助项目(BE2021011-2, BE2021011-3);青年人才托举工程资助项目(2020QNR001)。

网络出版时间: 2023-02-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230216.1511.004.html>

the integral term of vehicle spacing error is constructed. After that, for the steady-state convergence error of vehicle spacing caused by external disturbance, a continuous but non-derivable non-smooth reaching law (NSRL) is proposed, and a global fast integral terminal sliding mode controller (GFITSMC) is further designed based on the GFITSMS and NSRL proposed. By constructing Lyapunov function, the finite time stability of intelligent vehicle platoon and the fast convergence performance of vehicle spacing error are analyzed. Research results demonstrate that, under the leading-following (LF) communication topology, compared with regular sliding mode controller (SCM) and double power sliding mode controller (DPSMC), the finite-time control strategy proposed effectively reduce the time of the vehicle spacing error convergence by 56.3% and 50%, peak error by 72% and 58% respectively. Under the preceding-following (PF) communication topology, the time of the vehicle spacing error convergence is reduced by 51.4% and 48.6%. Those reductions demonstrate that the finite-time control algorithm proposed herein will effectively improve the fast convergence and robust performance of the vehicle spacing error under both communication topologies, and also significantly improve the frequent vehicle acceleration and deceleration caused by the controller chattering.

Keywords: intelligent vehicle platoon; longitudinal cooperative driving; finite-time control; terminal sliding model; non-smooth approaching law

智能车辆队列驾驶作为智能交通系统的重要技术之一,对建立环保交通、提高道路通行效率以及减少交通事故具有重要意义^[1-2]。智能车队是由可相互通信的单一智能车辆组成的车辆队列,车队中的每辆车都可通过V2V通信技术和毫米波雷达等车载传感器获取首车和前方车辆的位置、速度以及加速度等状态信息,从而动态调整车辆跟车间距和车队车速。智能车队不仅能提高道路行驶的安全性,而且有助于提高道路车道的利用率,在缓解交通压力方面具有较大的优势^[3-4]。

如何实现最小安全车间距的自适应跟车,并保证车队的队内及队列稳定性,是智能车辆队列纵向控制的核心内容^[5-6]。目前,车队控制决策算法主要包括比例积分(PI)控制^[7]、 H_∞ 鲁棒控制^[8]、模型预测控制(MPC)^[9]、滑模控制(SMC)^[10]以及基于强化学习等先进智能算法的车队纵向跟随性能优化控制,如车辆位置、速度或加速度最优跟踪控制^[11]等。此外,车队系统控制中,车间距误差的收敛时间也是需要关注的重要指标之一。目前大多数研究普遍基于无限时间的Lyapunov渐近稳定性进行车队控制器的分析与综合,导致控制结果难以实现时间最优。研究表明,有限时间闭环控制系统相较于渐近稳定控制系统具有更好的鲁棒性和抗干扰性能^[12-13]。因此,采用有限时间控制算法设计智能车队纵向协同控制系统具有重要意义。

滑模控制作为一种先进控制算法,在外部不确

定干扰和内部参数干扰下具有很强的鲁棒性^[14-15]。终端滑模控制(TSMC)是实现有限时间控制的重要途径之一,近年来已在较多领域^[16-18]得到了成功应用,包括以智能车队为代表的多智能体系统^[19-21]。Coppola等^[19]基于有限时间技术设计了车队间距有限时间控制算法,实现了车队间距的有限时间快速收敛,但其未考虑车队系统的队列稳定性。余伶俐等^[20]针对车间距误差快速收敛问题,提出基于非奇异积分终端滑模面(NITSM)-自适应幂次趋近律(APIRL)的车辆队列分布式自适应有限时间算法,但其未考虑车队行驶中的信息流拓扑结构。郭戈等^[21]分析了三阶车辆动力学模型,并基于两种信息流拓扑结构设计分布式自适应终端滑模控制算法,通过引入自适应律来处理车辆行驶过程中受到的不确定性扰动,实现了车队行驶间距的有限时间收敛稳定的同时保证了车队系统的鲁棒性,但是当车队系统以前车-跟随(PF)信息流拓扑结构行驶时,车队中相邻车辆间距收敛过程存在稳态误差。

针对车队协同控制系统中由渐近稳定分析算法导致的智能车队纵向跟车间距误差收敛慢、抗干扰性能弱的问题,本文受文献[22]中非光滑控制(NSC)的启发,结合全局快速积分终端滑模面(GFITSMS)和非光滑趋近律(NSRL),设计了基于快速积分终端滑模控制的智能车辆队列的有限时间纵向协同策略。

(1)为了解决基于无限时间稳定的控制器综合

算法导致车队车间距误差难以快速收敛的难题,本文在快速终端滑模面的基础上,提出一种全局快速积分终端滑模面,通过构造误差积分项,加快车间距误差收敛时间,在保证车队系统队内及队列有限时间稳定的同时提高了系统的全局鲁棒性。

(2)引入连续但不可导的 NSRL,解决智能车队车间距误差达到稳态时由于受到外部干扰作用而只能收敛到有界区域的问题。同时,由于 NSRL 的连续性,避免了滑模状态到达滑模面时抖振引起的车辆频繁加减速现象。

1 智能车辆队列控制问题描述

考虑由一辆首车和若干辆跟随车组成的车队,如图 1 所示,其中 x_i, v_i, a_i 分别表示第 i ($i = 0, 1, 2, 3, \dots$) 辆车的位置、速度和加速度。若车队中车辆可通过车间通信获取首车车辆信息,包括首车位置 x_0 、首车速度 v_0 、首车加速度 a_0 ,则此时车队通信方式为首车-跟随(LF)拓扑结构;若车队中车辆仅通过车载传感器获取前车的位置、速度以及加速度等信息,则此时车队通信方式为前车-跟随(PF)拓扑结构。

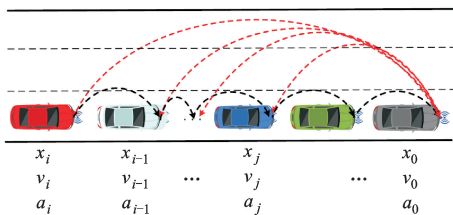


图 1 车队纵向行驶示意图

Fig. 1 Longitudinal driving diagram of the vehicle fleet

忽略车辆行驶时的横向作用力,采用固定车头时距(CTH)^[23]描述车队中相邻车辆的相对间距信息,记为

$$e_{d,i,j} = x_j - x_i - h_i v_i - (i - j)C \quad (1)$$

式中: $e_{d,i,j}$ 表示第 i 辆车和第 j 辆车的行驶车间距与期望安全车间距误差,其中 $i \neq j$; h_i 表示车间距系数,取值为 $1 \sim 2$; C 为安全车间距。

车队纵向动力学方程可表示为如下非线性模型

$$\begin{cases} \dot{e}_{d,i,j} = \dot{x}_j - \dot{x}_i - h_i \dot{v}_i \\ \dot{e}_{v,i,j} = a_i - a_j \\ \dot{a}_i = -\frac{1}{\tau_i} a_i + \frac{1}{m_i \tau_i} \left[\frac{i_g i_0 \eta_i T_{e,i}}{r_{w,i}} - F_i - f_i \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $e_{v,i,j}$ 表示第 i 辆车与前车的相对车速; m_i 表示目标车辆的质量; τ_i 表示目标车辆发动机时间常数; η_i 是目标车辆传动系的机械效率; i_g, i_0 分别代表

目标车辆变速器和主减速器系数; $T_{e,i}$ 表示发动机输出转矩; $r_{w,i}$ 表示目标车辆车轮的滚动半径; f_i 表示车辆行驶时受到的未知外部干扰; F_i 为车辆行驶阻力,表示为

$$F_i = m_i g f \cos \beta + 0.5 C_D A \rho v_i^2 + m_i g \sin \beta \quad (3)$$

其中, g 表示重力加速度, f 表示滚动阻力系数, C_D 表示空气阻力系数, A 表示车辆迎风面积, ρ 表示空气密度, β 表示路面坡度。

假设目标车辆以期望加速度 a_{dmd} 行驶,此时发动机期望输出转矩可表示为

$$T_{e,i} = \frac{1}{i_g i_0 \eta_i} [F_i + m_i a_{\text{dmd}}] r_{w,i} \quad (4)$$

车队纵向非线性模型可进一步改写为

$$\begin{cases} \dot{e}_{d,i,j} = \dot{x}_j - \dot{x}_i - h_i \dot{v}_i \\ \dot{e}_{v,i,j} = a_i - a_j \\ \dot{a}_i = -\frac{1}{\tau_i} a_i + \frac{1}{\tau_i} u_i - D_i \end{cases} \quad (5)$$

式中 $u_i = a_{\text{dmd}}$ 为第 i 辆车的控制输入,表示车辆行驶期望加速度,假设未知扰动有界且满足 $\left| D_i = \frac{1}{m_i \tau_i} f_i \right| \leq D, D$ 为正常数。

根据建立的智能车队纵向动力学模型,考虑相邻车辆相对间距的有限时间收敛性和车队队列行驶的稳定性,控制目标表示为

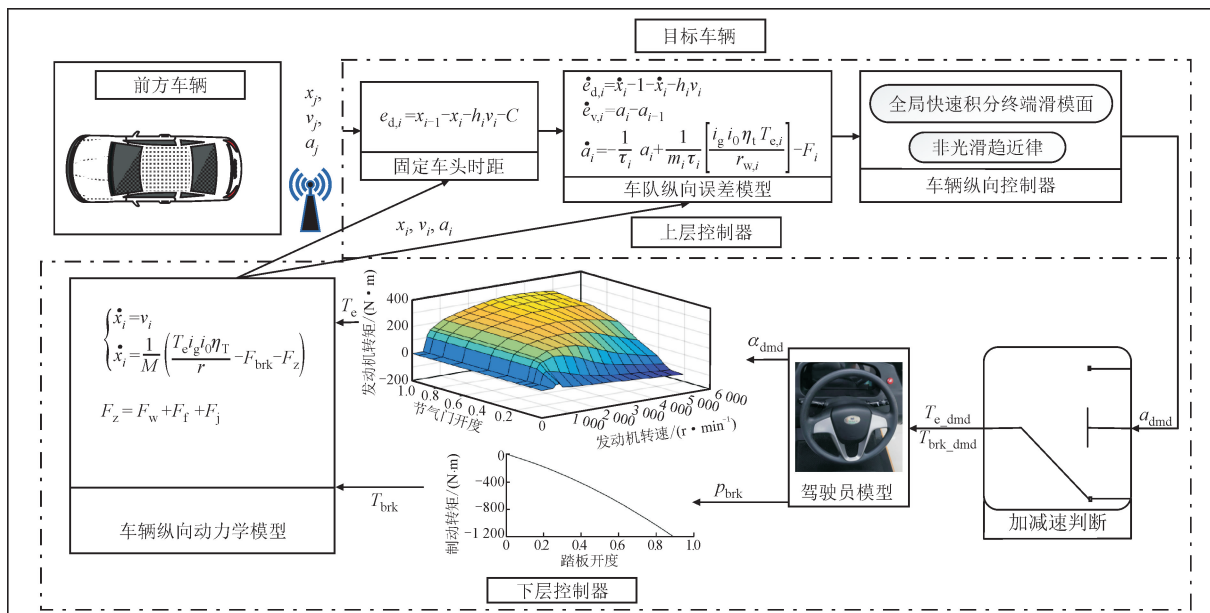
$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T_s} |e_{d,i,j}(t)| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow T_s} |e_{v,i,j}| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow T_s} |\dot{e}_{v,i,j}| = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_s 表示车辆相对间距收敛且车队达到稳定时所需要的时间,为常数,取正值。

此外,为了更好地进行车队控制系统的综合与性能分析,作如下假设:车队系统中每辆车的质量一致;车间通信无延时、无信号丢包现象;忽略轮胎侧滑和横摆角的影响。

2 控制器设计与分析

针对智能车辆队列的纵向有限时间控制,构建如图 2 所示的分层控制架构。其中,上层控制器以相邻车辆车间距误差为控制输入,通过全局快速积分终端滑模面(GFITSMS)和非光滑趋近律(NSRL)构造有限时间车队纵向滑模控制器,以获得最小安全跟车距离所需的期望加速度 a_{dmd} ;下层控制器根据所需的期望加速度求解对应的发动机节气门开度 α_{cmd} 和制动踏板开度 p_{brk} 。



棒性。

2.1.2 基于 NSRL 的车队纵向有限时间控制器设计

由于车辆行驶过程中存在外部不确定干扰,车间距误差状态量无法保证一直处于滑模面上,导致系统全局鲁棒性恶化。为了满足车间距误差变量对滑模面的可达性,同时避免传统趋近律由符号函数不连续导致误差变量到达滑模面时系统产生抖振现象等负面影响,构建智能车辆队列有限时间滑模控制的 NSRL 为

$$\dot{s}_i(t) = -k_1 s_i - k_2 \text{sig}^\theta(s_i) \quad (15)$$

式中: $k_1 > 0$, $k_2 > 1$, $0 < \theta < 1$; $\text{sig}^\theta(s_i) = s_i^\theta \text{sgn}(s_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots$, $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数。

为使车队行驶时相邻车辆的车间距能够快速稳定地到达期望安全跟车间距,从而提高车道的利用率并减少交通事故的发生,基于构建的 GFITSMS 和 NSRL 设计全局快速积分终端滑模控制器以实现车队系统的快速收敛及有限时间稳定。

根据前文分析,得到 GFITSMS 的一阶导数为

$$\dot{s}_i(t) = A_1 \dot{e}_{d,i,j}(t) + A_2 e_{d,i,j}^{p/q} + A_3 \ddot{e}_{d,i,j}(t) \quad (16)$$

将式(5)所示的车队纵向误差系统代入式(16)并结合构建的 NSRL,可得实现智能车队车间距跟踪误差有限时间收敛的 GFITSMC 为

$$u_i(t) = \frac{\tau_i}{h_i A_3} [A_1 (e_{v,i,j} - h_i a_i) + A_2 e_{d,i,j}^{p/q} + A_3 \dot{e}_{v,i,j} + k_1 s_i + k_2 \text{sig}^\theta(s_i)] + a_i \quad (17)$$

引理 1^[13] 对于如下非线性系统

$$\dot{x}(t) = f[x(t)] + D_i \quad (18)$$

式中: $f[x(t)]$ 为关于状态量 $x(t)$ 的非线性函数; D_i 为外部干扰。如果存在连续且一阶可导的正函数 $V(x)$, 使得不等式(19)成立, 则如式(18)所示的非线性系统是快速实际有限时间稳定的。

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &\leq -\varphi_1 V(x)^\gamma - \varphi_2 V(x) + \varphi_3 \\ x &\in D/\{0\} \end{aligned} \quad (19)$$

且系统收敛时间满足

$$\begin{aligned} t &\leq \max \left\{ \left[\ln \frac{k\theta_0 V^{1-\gamma}(x_0) + \varphi_1}{\varphi_1} \right] / [k\theta_0(1-\gamma)], \right. \\ &\quad \left. \left[\ln \frac{kV^{1-\gamma}(x_0) + \theta_0 \varphi_1}{\varphi_1} \right] / [k(1-\gamma)] \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $\varphi_i > 0$, $0 < \gamma < 1$, $k > 0$, $\theta_0 > 0$, $V(x(0))$ 表示 $V(x)$ 的初始值。

引理 2^[24] 当未知外部干扰 D_i 不为零时, 若不等式

$$\int_0^{T_s} \|e_{d,i,j}\|^2 dt \leq \gamma_d^2 \int_0^{T_s} \|D_i\|^2 dt \quad (21)$$

成立, 则式(21)所示的非线性系统对于干扰具有强鲁棒性, 其中 $0 < \gamma_d < 1$, 为鲁棒增益系数。

结论 2 对于本文研究的车队系统, 当车辆车间距误差状态处于 GFITSMS 上时, 车间距误差将有限时间收敛至零; 当车辆车间距误差不在 GFITSMS 上时, 基于构建的 NSRL, 车间距误差将在有限时间到达滑模面且保持车队系统车间距误差有限时间收敛至零, 实现车队系统的鲁棒性。

当车辆车间距误差状态处于 GFITSMS 上时, 2.1.1 小节中结论 1 已证得车间距误差将有限时间收敛至零, 此处不再赘述。下面将证明当车辆车间距误差不在 GFITSMS 上时, 车间距误差将在有限时间到达滑模面且保持车队系统车间距误差有限时间收敛至零。

证明 定义 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \frac{1}{2} s_i^2(t) \quad (22)$$

对 $V(t)$ 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \\ s_i \dot{s}_i &= s_i \{A_1 \dot{e}_{d,i} + A_2 e_{d,i}^{p/q} + A_3 [a_{i-1} + \\ &\quad (h_i/\tau_i - 1)a_i - (h_i/\tau_i)u_i + h_i D_i]\} \end{aligned} \quad (23)$$

将式(17)所示的有限时间控制器代入式(23)后, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = s_i \dot{s}_i &= s_i [-k_1 s_i - k_2 \text{sig}^\theta(s_i)] - h_i D_i \leq \\ &-k_1 s_i^2 - k_2 \text{sig}^{\theta+1}(s_i) + h_i D_i \leq \\ &-k_1 |s_i|^2 - k_2 |s_i|^{\theta+1} + h_i D_i \end{aligned} \quad (24)$$

(1) 假设系统所受未知外部干扰 $D_i = 0$ 时, 则不等式(24)可进一步转化成

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -k_1 |s_i|^2 - k_2 |s_i|^{\theta+1} \\ &\leq -\sqrt{2} k_1 V(t) - \sqrt{2} k_2 V^{\frac{\theta+1}{2}}(t) \end{aligned} \quad (25)$$

由引理 1 知, 此时系统将在有限时间 t_1 到达滑模面, 且

$$\begin{aligned} t_1 &\leq \max \left\{ \left[\ln \frac{k\theta_0 V^{(1-\theta)/2}(x_0) + \sqrt{2} k_1}{\sqrt{2} k_1} \right] / k\theta_0 \left(\frac{1-\theta}{2} \right), \right. \\ &\quad \left. \ln \frac{kV^{(1-\theta)/2}(x_0) + \theta_0 \sqrt{2} k_1}{\sqrt{2} k_1} / k \left(\frac{1-\theta}{2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

此时车队纵向系统车间距误差将在有限时间 $t \leq T_s + t_1$ 内收敛。

(2) 假设车辆所受未知外部干扰 $D_i \neq 0$, 则不等

式(26)可进一步转化成

$$\dot{V}(t) \leq -k_2 \|s_i\|^2 + h_i \|D_i\|^2 \leq -\sqrt{2}k_2 V(t) + h_i D \quad (27)$$

对不等式(27)两边同时积分,得

$$\int_{t_2}^0 \frac{dV(t)}{-\sqrt{2}k_2 V(t) + h_i D} \leq \int_{t_2}^0 dt \quad (28)$$

求解上述不等式可得

$$t_2 \leq \frac{1}{\sqrt{2}k_2} \ln \left[\frac{-\sqrt{2}k_2 V(t) + h_i D}{h_i D} \right] \Big|_{t_2}^0 = \frac{1}{\sqrt{2}k_2} \ln \left[\frac{-\sqrt{2}k_2 V(0) + h_i D}{h_i D} \right] \quad (29)$$

因此,当车队中存在未知干扰时,系统将在有限时间 t_2 到达滑模面,此时车队纵向系统车间距误差将在有限时间 $t \leq T_s + t_2$ 内收敛。

为证明车队系统存在未知干扰时,在本文所设计的有限时间控制律作用下系统的鲁棒性,同样地,对不等式(27)两边同时积分,得

$$\int_0^t \dot{V}(\tau) d\tau \leq \int_0^t h_i \|D_i\|^2 d\tau - \int_0^t k_2 \|s_i\|^2 d\tau \quad (30)$$

由于 $V(t) > 0$, 所以

$$\int_0^t k_2 \|s_i\|^2 d\tau \leq \int_0^t h_i \|D_i\|^2 d\tau \quad (31)$$

进一步地

$$\int_0^t k_2 \|s_i\|^2 d\tau \leq \int_0^t \left(\sqrt{\frac{h_i}{k_2}} \right)^2 \|D_i\|^2 d\tau \quad (32)$$

由引理2可知,当 $k_2 > h_i$ 时,即 $k_2 > 1$,即使系统存在未知干扰的情况,但在有限时间控制律作用下,依然能够保证强鲁棒性。结论2证毕。

2.1.3 车辆队列稳定性分析

引理3^[25] 假设车队系统的车间距误差传递函数比值为

$$G(s) = \frac{E_{i+1}(s)}{E_i(s)} \quad (33)$$

当满足 $0 < |G(s)| < 1$ 时,车间距误差为衰减收敛,车辆满足强队列稳定。

对于车辆队列而言,除了保持车队中单车的稳定性外,通常也希望队列中相邻车辆之间的相对车间距向车队队尾传递过程中逐渐减小,即车队中车间距误差向后传递,保持车队队列强稳定性。假设 $\phi_i = Qs_i - s_{i+1}$,根据前文分析可知, $s_i(t)$ 将在有限时间内收敛至零,所以在有限时间内 ϕ_i 等于零。将式(8)代入 ϕ_i ,同时进行拉普拉斯变换,可得

$$\frac{E_{i+1}(s)}{E_i(s)} = \frac{Q(a_3 s_i^2 + a_1 s_i + a_2 E_i^{(p-q)/q})}{a_3 s_i^2 + a_1 s_i + a_2 E_{i+1}^{(p-q)/q}} \quad (34)$$

方程两侧同时取极限后,可得

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{E_{i+1}(s)}{E_i(s)} = Q^{q/p} \quad (35)$$

当 $0 < |Q| < 1$ 时,则 $E_{i+1} < E_i$,根据引理3可知,此时车队系统满足队列强稳定性。

2.2 下层控制器

下层控制器根据最小安全跟车距离所需的期望加速度 a_{dmd} 进行加减速判断,其判断逻辑为

$$\begin{cases} a_{\text{dmd}} > 0, \text{加速} \\ a_{\text{dmd}} = 0, \text{匀速} \\ a_{\text{dmd}} < 0, \text{减速} \end{cases} \quad (36)$$

加速时,发动机提供车辆驱动转矩为

$$T_{e_dmd} = \frac{[m_i a_{\text{dmd}} + F_i] r_{w,i}}{i_g i_0 \eta_t} \quad (37)$$

减速时,车辆所需制动力矩为

$$T_{brk_dmd} = \frac{|-m_i a_{\text{dmd}} - F_i|}{k_b} \quad (38)$$

式中, k_b 为制动增益系数。

根据所得到的加/减速时的驱动/制动转矩,分别由逆发动机转矩特性 Map 曲线和制动器逆模型得到节气门开度 α_{cmd} 和制动踏板深度 p_{brk} ,其中逆发动机转矩特性 Map 如图3所示。

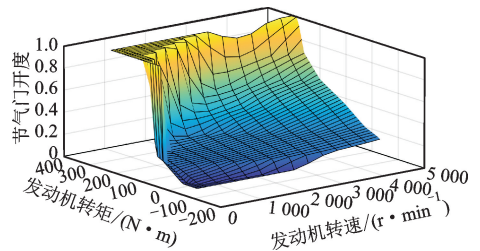


图3 逆发动机转矩特性 Map 曲线

Fig. 3 Characteristic Map of the inverse engine torque

3 仿真结果分析

为了验证本文所提出的控制方法的有效性,针对图1所示仿真场景,分别对 LF 和 PF 两种通信方式下的智能车辆队列进行控制性能的仿真验证,仿真场景采用1辆领导车和4辆跟随车,每辆车的初始位置分别为 $x_i = [0 \text{ m}, -55 \text{ m}, -110 \text{ m}, -165 \text{ m}, -220 \text{ m}]$ ($i=0,1,\dots,4$),车辆参数如表1所示。

表 1 车辆参数
Table 1 Vehicle parameters

参数	数值
车身质量 m/kg	1 370
空气加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8
安全车间距 C/m	50
车身长度 L/m	4.674
固定车头时距系数 h	1
车轮半径 r/m	0.257
变速器变比 i_g	3.43,1.81,1.21,0.86,0.6
主减速器速比 i_0	3.24
机械效率 η_i	0.92
空气阻力系数 C_D	0.30
迎风面积 A/m^2	0.26
滚动阻力系数 f	0.02
发动机响应常数 τ_b	0.40

设定车队首车巡航车速如图 4 所示,初始时刻速度为 0 m/s,7 s 开始加速到峰值速度 13.9 m/s 后保持匀速,加速时长为 26 s。经过两次减速,最终保持静止状态,其中第一次减速时长为 8 s,第二次减速时长为 12 s。

所述控制器分别与普通滑模控制器和双幂次滑模控制器进行对比。其中 SMC 滑模面如式(10)所示,采用指数趋近律 $\dot{s}_i = -k_1 s_i - k_2 \text{sgn}(s_i)$;DPSMC 采用如式(11)所示滑模面与双幂次趋近律 $\dot{s}_i = -k_1 \text{sig}^{\theta_1}(s_i) - k_2 \text{sig}^{\theta_2}(s_i)$ 构建的控制器,仿真步长为 0.01 s。控制器参数如表 2 所示。为了分析验证不同控制器的鲁棒性,仿真时施加纵向干扰为 $0.8\sin(2\pi t)\text{e}^{(10-t)/5}, t > 10 \text{ s}$ 。

表 2 不同滑模控制器的具体参数

参数	SMC	DPSMC	GFITSMC
A_1	3.75	25.00	25.0
A_2	—	2.50	2.5
A_3	—	0.70	0.7
k_1	3.70	0.90	5.0
k_2	1.00	0.85	7.0
p	—	—	2.5
q	—	—	1.0
θ	—	0.85,0.60	0.2

3.1 LF 拓扑结构仿真结果

智能车队在 LF 通信拓扑结构下的仿真结果如图 5~8 所示。图 5 对比了 SMC、DPSMC、GFITSMC 3 种控制策略作用下的车辆位置变化曲线。图 6~8 分别对比了前述 3 种控制策略下的车辆相对车间距、车速及加速度行为。为更直观比较控制器性能,3 种控制器作用下车队跟随车辆状态对比信息如表 3 所示。

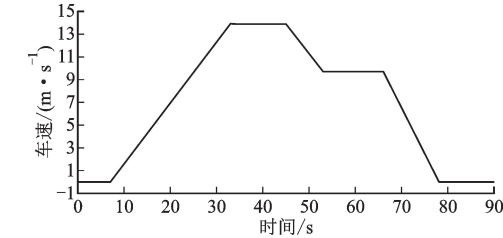


图 4 巡航车速
Fig. 4 Cruise speed

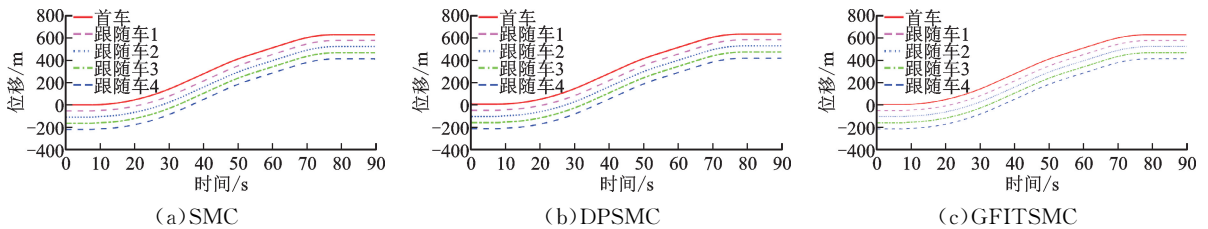


图 5 LF 拓扑结构下 3 种控制策略的车辆位移变化曲线
Fig. 5 Vehicles position curve of three control strategies under the LF topology

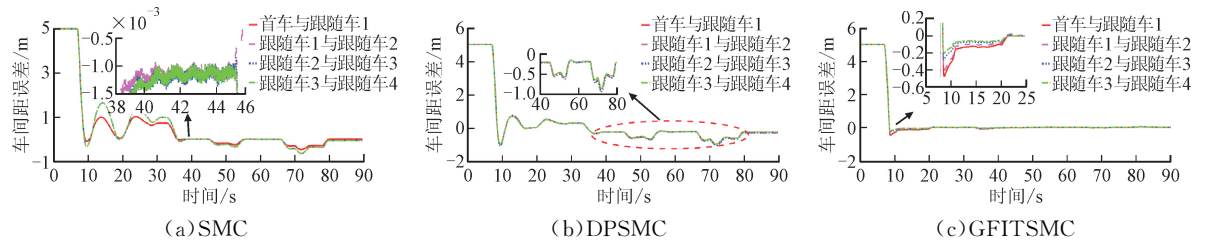


图 6 LF 拓扑结构下 3 种控制策略的车辆相对车间距变化曲线
Fig. 6 Relative spacing curve of the vehicle fleet of three control strategies under the LF topology

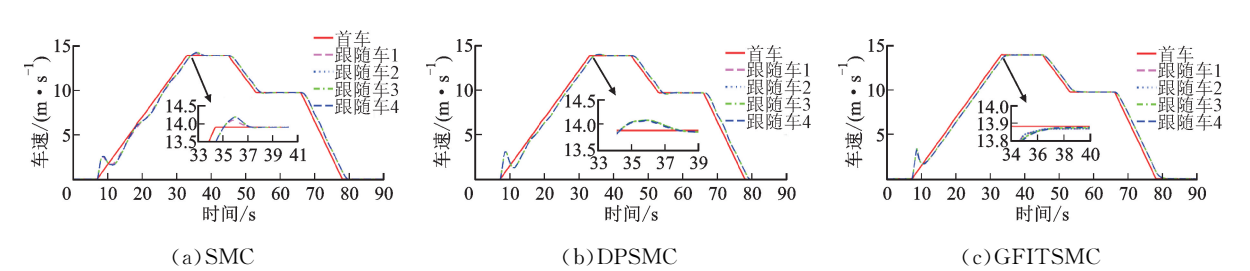


图 7 LF 拓扑结构下 3 种控制策略跟随车辆车速变化曲线

Fig. 7 Speed curve of the following vehicles of three control strategies under the LF topology

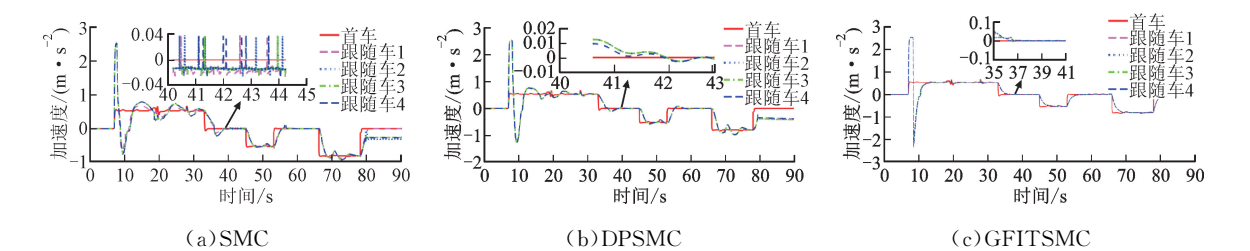


图 8 LF 拓扑结构下 3 种控制策略跟随车加速度变化曲线

Fig. 8 Acceleration curve of the following vehicles of three control strategies under the LF topology

表 3 LF 拓扑结构车辆跟随性能

Table 3 Vehicle following performance under the LF topology

参数	车辆位置	相对车间距			车速的最大超调量/%	加速度抖振
		收敛时间/s	稳态误差/m	误差峰值/m		
SMC	无重叠	32	无	±1.5	3.57	有
DPSMC	无重叠	28	0.25	±1.0	1.89	无
GFITSMC	无重叠	14	无	-0.42	0	无

结合图 5~8 和表 3 可知,3 种控制策略下的跟随车辆位置均无重叠,因此 3 种控制策略均能保证车队行驶的安全性,即保证车队队内稳定。图 6 为 3 种控制策略下车队中每辆车的相对车间距变化曲线,从图 6(a) 可以看到,在 SMC 策略作用下,车队中最后一辆车与其前方车辆相对车间距达到设定的安全车间距所需时间为 32 s。当车辆队列稳定时,由于控制器的不连续,车辆相对车间距出现频率较高的抖振现象,且车间距调整过程中,车辆队列相对车间距幅值较大,车间距误差收敛峰值在 ±1.5 m 左右。相较于 SMC 策略,在 DPSMC 策略的作用下,车辆队列相对车间距收敛过程中的抖振现象得到了有效改善,车间距误差收敛峰值从 ±1.5 m 降低到 ±1 m,仿真结果如图 6(b) 所示,车队中最后一辆车与其前方车辆相对车间距达到设定的安全车间距所需的时间为 28 s,但是当车速稳定时,相对车间距只能收敛到有界区域,车队系统相对车间距收敛存在 0.25 m 的稳态误差。而从图 6(c) 可以看到,车辆从静止加速 5 s 后,车辆相对车间距误差快速达到稳定的有界区域,8 s 后完全收敛至零,总耗时 14 s,对

比于 SMC 和 DPSMC 两种控制器,车间距误差收敛时间分别缩短了 56.3% 和 50%,误差收敛峰值绝对值降低到 0.42 m,误差峰值分别降低了 72% 和 58%。由于所设计的 GFITSMC 策略不含显式切换项,因此不仅解决了 SMC 策略作用时车队相对车间距收敛过程中产生的抖振问题,而且消除了 DPSMC 策略作用时产生的稳态误差。当车队首车巡航车速从加速达到第一次匀速时,SMC 算法和 DPSMC 算法分别存在 3.57% 和 1.89% 的最大超调量,而本文所设计的 GFITSMC 算法无超调量,如图 7 所示。此外,从图 8(a) 可以看到,车队中车辆达到第一次匀速时,车队中的 4 辆跟随车由于相对车间距的抖振问题造成了车队系统车辆在接近稳定区域时造成频繁加减速现象,影响了驾驶舒适性;图 8(b) 中 DPSMC 策略虽然不会出现频繁加减速,但是车队达到队内稳定时,4 辆跟随车均存在加速度波动,与首车巡航加速度存在一定偏差;图 8(c) 中跟随车车速调整阶段 GFITSMC 策略的作用下车辆加速度变化幅值虽然大于前两者控制方法,其中 SMC 和 DPSMC 策略的最大加速度变化幅值分别

为 0.8 m/s^2 和 1.4 m/s^2 , GFITSMC 策略的加速度变化幅值最大为 2.2 m/s^2 , 但是仍然在合理范围内, 且首车车速稳定时, 车队中每辆车的加速度跟踪较平稳。

3.2 PF 拓扑结构仿真结果

智能车队采用 PF 通信拓扑下的仿真结果如图

9~12 所示。图 9 对比了 SMC、DPSMC、GFITSMC 3 种控制算法作用下的车辆位置变化曲线。图 10~12 分别对比了前述 3 种控制策略下的车辆相对车间距、车速及加速度行为。为更直观比较控制器性能, 3 种控制器作用下车队跟随车辆状态对比信息如表 4 所示。

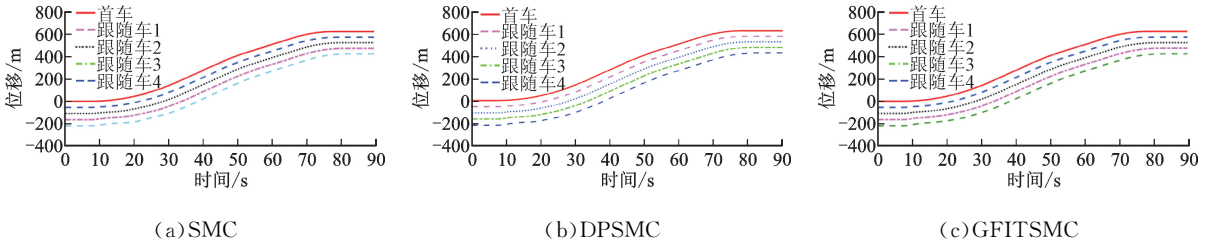


图 9 PF 拓扑结构下车辆位移变化曲线

Fig. 9 Vehicles position curve under the PF topology

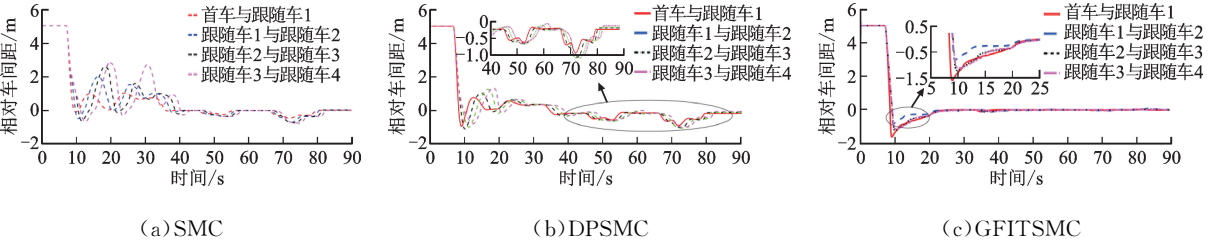


图 10 PF 拓扑结构下车辆相对车间距变化曲线

Fig. 10 Relative spacing curve of the vehicle fleet under the PF topology

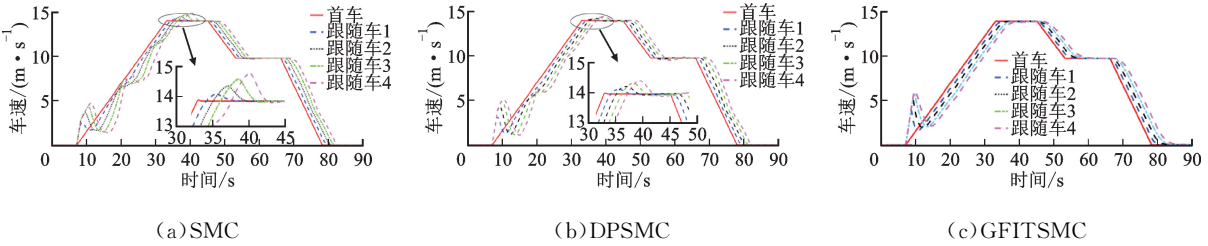


图 11 PF 拓扑结构下跟随车辆车速变化曲线

Fig. 11 Speed curve of the following vehicles under the PF topology

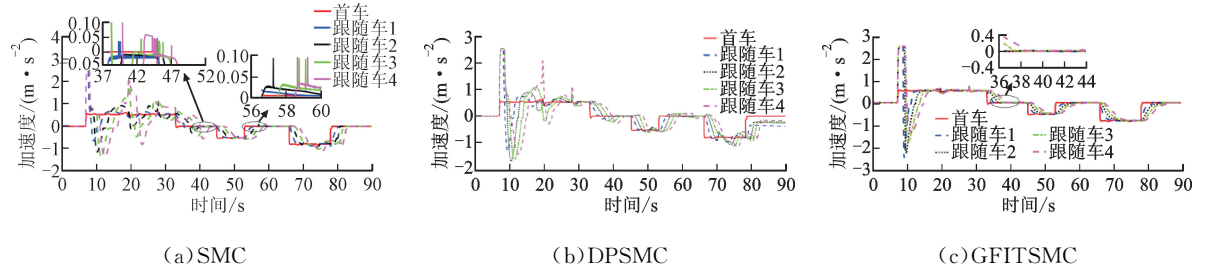


图 12 PF 拓扑结构下跟随车加速度变化曲线

Fig. 12 Acceleration curve of the following vehicles under the PF topology

表 4 PF 拓扑结构跟随车辆状态
Table 4 Vehicle following performance under the PF topology

策略	车辆位置	相对车间距			车速最大超调量/%	加速度抖振
		收敛时间/s	稳态误差/m	误差峰值/m		
SMC	无重叠	37	无	±3	5.71	有
DPSMC	无重叠	35	0.25	±1.4	4.29	无
GFITSMC	无重叠	18	无	-1.6	0	无

结合图 9~12 和表 4 可知,与 LF 结构一样,3 种控制策略下的跟随车辆位置均无重叠,因此两种通信拓扑结构下 3 种控制方法均能实现车辆纵向队列的队内稳定性,保证车队行驶的安全性。图 10 为 3 种控制策略下车队中每辆车的相对车间距变化曲线,从图 10(a)可以看到,在 SMC 控制方法作用下,车队中最后一辆车与其前方车辆相对车间距达到设定的安全车间距时所需时间为 37 s,车间距误差收敛峰值达到±3 m 左右;图 10(b)中 DPSMC 策略下,车队中最后一辆车与其前方车辆相对车间距达到设定的安全车间距时所需时间为 35 s,车间距误差收敛峰值达到±1.4 m,但是车速稳定时,相对车间距依然只能收敛至有界区域,车队系统相对车间距收敛存在 0.25 m 的稳态误差;从图 10(c)可以看到,在 25 s 时,车队中每辆跟随车与前车的相对车间距均达到稳定的安全车间距,总耗时 18 s,收敛时间相比 SMC 和 PPSMC 分别减少了 51.4% 和 48.6%,车间距误差收敛峰值的绝对值为 1.6 m。由于 PF 拓扑结构中,每辆车只能获取到前车信息,因此 3 种控制方法下的收敛时间均要慢于 LF 拓扑结构。相比较之下,在 PF 拓扑结构中,采用 SMC 策略时车队达到队列稳定时的时间需增加 5 s, DPSMC 策略需增加 7 s,而本文所提出的 GFITSMC 策略只增加 4 s。当车队首车巡航车速从加速达到第一次匀速时,SMC 策略和 DPSMC 策略分别存在 5.71% 和 4.29% 的最大超调量,在数值上高于 LF 拓扑时的超调量,而本文所设计的 GFITSMC 算法与 LF 拓扑时一致,依然无超调量,如图 11 所示。此外,从图 12(a)可以看到,车队中车辆达到第一次匀速时,车队中的 4 辆跟随车由于控制律的不连续,造成了车队系统车辆在接近稳定区域时造成频繁加减速现象;图 12(b)中 DPSMC 策略虽然改善了频繁加减速的问题,但是车队达到队内稳定时,4 辆跟随车均存在加速度波动,与首车巡航加速度存在一定偏差,且车速在接近稳定时最后一辆跟随车存在加速度突增现象,将影响车辆的驾驶舒适性;图 12(c)中 PF 拓扑时的跟随车加速度

比起 LF 拓扑时存在小范围内的跟踪滞后,这是由于 PF 拓扑下首车开始巡航时车队中的跟随车辆并不能及时动作,但是滞后范围仍然在可接受范围内。

4 结 论

- (1) 针对车间距误差收敛慢的不足,本文设计了全局快速积分终端滑模控制面,通过调整积分上下限的大小,可使车间距误差在初始时刻处于滑模面,从而加快车间距误差的收敛速度,并保持全局的鲁棒性。
- (2) 针对指数趋近律容易产生抖振造成车辆频繁加减速、双幂次趋近律使得车间距误差无法完全收敛等现象,设计了一种连续但不可导的 NSRL,当车辆行驶过程受外部环境干扰,导致车间距误差无法一直处于滑模面时,设计的趋近律可使车间距误差在有限时间内收敛至滑模面,降低抖振现象的同时消除了稳态误差,提高了驾驶舒适性。
- (3) 仿真结果表明,对于不同的通信拓扑结构,基于 GFITSMS-NSRL 有限时间控制器作用下的相对车间距收敛速度均比 SMC 和 DPSMC 策略快,在首车-跟随(LF)通信拓扑结构下,车间距误差收敛时间分别减少了 56.3% 和 50%,峰值误差分别降低了 72% 和 58%。在前车-跟随(PF)通信拓扑结构下,车间距误差收敛时间分别减少了 51.4% 和 48.6%。虽然 3 种控制策略均能使车队最终保持在稳定的安全跟车间距,但是在两种不同拓扑结构下,SMC 和 DPSMC 策略在车间距收敛过程中均存在超调现象,且 LF 拓扑结构下 SMC 策略存在较严重的抖振,这将使得车辆行驶过程中平顺性和舒适性下降。相比较而言,本文设计的有限时间控制器显著减小了车间距收敛过程的超调以及控制器输出抖振现象。此外,无论是本文所设计的 GFITSMC 策略还是所比较的 SMC 和 DPSMC 策略,LF 拓扑结构的车辆状态响应速度均快于 PF 拓扑结构。

参考文献:

[1] ZHUANG Weichao, XU Liwei, YIN Guodong, Ro-

- bust cooperative control of multiple autonomous vehicles for platoon formation considering parameter uncertainties [J]. *Automotive Innovation*, 2020, 3(1): 88-100.
- [2] WANG Jiawei, MA Fangwu, WU Liang, et al. Hybrid adaptive event-triggered platoon control with package dropout [J]. *Automotive Innovation*, 2022, 5(4): 347-358.
- [3] 潘世举, 李永乐, 李子先, 等. 基于改进纯跟踪的智能车路径跟随方法 [J]. *汽车工程*, 2023, 45(1): 1-8, 19.
PAN Shiju, LI Yongle, LI Zixian, et al. Path following method of intelligent vehicles based on improved pure tracking [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(1): 1-8, 19.
- [4] GUANETTI J, KIM Y, BORRELLI F. Control of connected and automated vehicles: state of the art and future challenges [J]. *Annual Reviews in Control*, 2018, 45: 18-40.
- [5] 赵健, 杜金朋, 朱冰, 等. 基于自适应动态滑模控制的智能汽车纵向巡航控制 [J]. *汽车工程*, 2022, 44(1): 8-16.
ZHAO Jian, DU Jinpeng, ZHU Bing, et al. Longitudinal cruise control of intelligent vehicles based on adaptive dynamic sliding mode control [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(1): 8-16.
- [6] FENG Shuo, ZHANG Yi, LI SE, et al. String stability for vehicular platoon control: definitions and analysis methods [J]. *Annual Reviews in Control*, 2019, 47: 81-97.
- [7] 于晓海, 郭戈. 车队控制中的一种通用可变时距策略 [J]. *自动化学报*, 2019, 45(7): 1335-1343.
YU Xiaohai, GUO Ge. A general variable time headway policy in platoon control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(7): 1335-1343.
- [8] 宋家成, 闫茂德, 杨盼盼, 等. 基于数据驱动的鲁棒反步自适应巡航控制 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(3): 485-493.
SONG Jiacheng, YAN Maode, YANG Panpan, et al. Robust backstepping adaptive cruise control based on data-driven [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(3): 485-493.
- [9] ZHAO Shuaidong, ZHANG Kuilin. A distributionally robust stochastic optimization-based model predictive control with distributionally robust chance constraints for cooperative adaptive cruise control under uncertain traffic conditions [J]. *Transportation Research: Part B Methodological*, 2020, 138: 144-178.
- [10] GUO Jinghua, LUO Yugong, LI Keqiang. Adaptive neural-network sliding mode cascade architecture of longitudinal tracking control for unmanned vehicles [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 87(4): 2497-2510.
- [11] DESJARDINS C, CHAIB-DRAA B. Cooperative adaptive cruise control: a reinforcement learning approach [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1248-1260.
- [12] CAO Yongcan, REN Wei. Finite-time consensus for multi-agent networks with unknown inherent nonlinear dynamics [J]. *Automatica*, 2014, 50(10): 2648-2656.
- [13] 刘洋, 井元伟, 刘晓平, 等. 非线性系统有限时间控制研究综述 [J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(1): 1-12.
LIU Yang, JING Yuanwei, LIU Xiaoping, et al. Survey on finite-time control for nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(1): 1-12.
- [14] SUN Haibin, HOU Linlin, ZONG Guangdeng. Continuous finite time control for static var compensator with mismatched disturbances [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 85(4): 2159-2169.
- [15] LIANG Yixiao, LI Yinong, YU Yinghong, et al. Path-following control of autonomous vehicles considering coupling effects and multi-source system uncertainties [J]. *Automotive Innovation*, 2021, 4(3): 284-300.
- [16] 陈曦, 陈华, 雷衍, 等. 终端滑模的(1, 2)型非完整机器人有限时间镇定 [J]. *控制工程*, 2017, 24(5): 1102-1106.
CHEN Xi, CHEN Hua, LEI Yan, et al. Finite-time stabilization for type (1, 2) nonholonomic mobile robots with terminal sliding mode control [J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(5): 1102-1106.
- [17] 赵新运, 于剑桥. 导弹敏捷转弯段的新型非奇异终端滑模控制 [J]. *宇航学报*, 2022, 43(4): 454-464.
ZHAO Xinyun, YU Jianqiao. Novel non-singular terminal sliding mode control for missile's agile turn [J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(4): 454-464.
- [18] 刘凌, 司徒杰文, 林起联. 支持向量机预测可变参数的永磁同步电机快速终端滑模控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(6): 53-60.
LIU Ling, SI Jiewen, LIN Qilian. A fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor with variable parameters predicted by SVM [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(6): 53-60.
- [19] COPPOLA A, LUI D G, PETRILLO A, et al. Distributed fixed-time leader-tracking control for hetero-

- geneous uncertain autonomous connected vehicles platoons [C]//2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 554-559.
- [20] 余伶俐, 况宗旭, 王正久, 等. 智能车辆队列横纵向有限时间滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38(8): 1299-1312.
- YU Lingli, KUANG Zongxu, WANG Zhengjiu, et al. Intelligent vehicle platoon lateral and longitudinal control based on finite-time sliding mode control [J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(8): 1299-1312.
- [21] 郭戈, 赵梓唯. 网联车辆队列有限时间终端滑模控制 [J/OL]. 控制理论与应用: 1-10 [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20220321.1312.050.html>.
- GUO Ge, ZHAO Ziwei. Finite-time terminal sliding mode control of connected vehicle platoons [J]. Control Theory & Applications: 1-10 [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20220321.1312.050.html>.
- [22] DING Shihong, SUN Jinlin. Direct yaw-moment control for 4WID electric vehicle via finite-time control technique [J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 88(1): 239-254.
- [23] 马育林, 吴青, 张蕊, 等. 模拟自治车队行驶过程变工况速度跟踪控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 140-147.
- MA Yulin, WU Qing, ZHANG Rui, et al. Speed tracking control for a simulated intelligent vehicle platoon under variable road conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7): 140-147.
- [24] YANG Chao, JIAO Xiaohong, LI Liang, et al. A robust H_∞ control-based hierarchical mode transition control system for plug-in hybrid electric vehicle [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 326-344.
- [25] GUO Ge, LI Dandan. Adaptive sliding mode control of vehicular platoons with prescribed tracking performance [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7511-7520.

(编辑 亢列梅)