

传感器测量误差下的非线性车辆队列控制

王 鹏, 左 磊, 朱 旭

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘要: 传感器测量误差对车辆队列的有效控制与稳定性造成了较大的影响; 通常情况下, 大多研究成果将传感器测量误差设定为分布规律已知的随机数列(如高斯分布, 泊松分布等), 以便采用特定的数理方法消除误差影响; 然而对于控制系统中仅满足有界条件的测量误差, 仍需开展进一步的深入研究; 针对此类现状, 以非线性车辆队列控制为研究对象, 综合考虑车载传感器的有界测量误差与车辆之间的有向通信拓扑, 设计一种基于滑模的车辆队列控制方法; 该方法能有效解决有界传感器测量误差下的车辆队列控制问题; 此外, 在控制过程中利用预设性能控制(PPC, prescribed performance control)理论, 进一步约束车辆队列跟踪误差, 确保车辆队列的队列稳定性; 最后, 通过数值仿真的方式验证本文所提出控制算法的有效性和可行性。

关键词: 车辆队列; 传感器测量误差; 滑模控制; 预设性能控制; 队列稳定性

Nonlinear Vehicle Platoon Control with Sensor Measurement Errors

WANG Peng, ZUO Lei, ZHU Xu

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The sensor measurement errors have a strong influence on the effective control and the stability of vehicle platoon. Generally, most studies regard the sensor measurement errors as the random series (such as Gaussian, Poisson distribution) whose distributions are known, such that the specific mathematical methods can be employed to remove their impacts. However, there are no effective approaches for the bounded measurement errors in the control system. With respect to this, the nonlinear vehicle dynamics is studied, and consider the bounded measurement errors of onboard sensors and the directed communication topology among vehicles, a sliding mode based control algorithm of vehicle platoon is proposed. This method can effectively solve the vehicle platoon control problem with bounded sensor measurement errors. Moreover, by using prescribed performance control, the tracking error can be constrained, such that the string stability of vehicle platoon is guaranteed. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed control method are validated through numerical simulations.

Keywords: vehicle platoon; sensor measurement errors; sliding mode control; prescribed performance control; string stability

0 引言

近几年来, 车辆队列控制由于在改善交通环境方面的突出表现越来越受国内外学者的青睐^[1-4]。研究

表明, 车辆以队列形式在道路上行驶, 可有效提高道路通行效率、车辆燃油经济性和行驶安全性^[5-6]。

现有车辆队列控制的研究, 大部分是在车辆传感器能够准确获得其他车辆信息的前提下展开的^[7]。而

收稿日期:2021-06-16; 修回日期:2021-08-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(62003054, 71006401, 51909008);陕西省重点研发计划项目(2020GY113, 2019GY218);中央高校基本科研业务费资助项目(2020GY-113)。

作者简介:王 鹏(1995-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事智能网联车队列控制方向的研究。

通讯作者:左 磊(1989-),男,陕西西安人,博士,副教授,主要从事多智能体协同控制,车路协同控制、模型预测控制等方向的研究。

引用格式:王 鹏,左 磊,朱 旭. 传感器测量误差下的非线性车辆队列控制[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 128-134, 140.

在实际中, 传感器大多会受到噪声的干扰, 存在一定的测量误差, 而这势必会对车辆队列的稳定行驶造成严重影响^[8-9]。为了解决这一问题, 众多学者纷纷对其展开了研究。文献 [10-11] 采用观测器对车辆状态进行估计, 避免了传感器测量误差对车辆行驶的影响; 文献 [12] 设计了一种基于噪声控制信号的分布式诊断算法, 以确保车辆队列行驶不受传感器测量误差的影响; 文献 [13-15] 利用卡尔曼滤波器对传感器测量误差进行了滤波处理; 文献 [16] 利用粒子滤波器来消除传感器测量误差。文献 [17] 设计了一种切换控制策略在保证车辆队列稳定行驶的同时解决了传感器测量误差问题。上述文献的研究均以车辆的线性模型作为研究对象。然而实际中车辆模型大多为非线性, 在线性化描述的车辆模型中, 难免会出现更多的不确定性和模型精度降低等问题。另外, 在处理传感器测量误差时, 对测量误差的设定也过于理想化, 导致所设计控制方法的实际应用效果较差。

对于车辆队列而言, 若既能加强车辆队列的队列稳定性, 又同时能够将车辆跟踪误差始终约束在预设范围内, 则可大幅度提升车辆队列的控制效果。预设性能控制 (prescribed performance control, PPC) 是一种约束系统跟踪误差的有力工具, 最早由希腊学者 Bechlioulis 等^[18] 提出, 是指在跟踪误差收敛到一个预先设定的任意小区域的同时, 保证收敛速度及超调量满足预先设定的条件^[19]。PPC 与其他控制方法相结合可进一步提升车辆队列的行驶性能^[20-21]。目前基于 PPC 理论的车队控制方法可以对跟踪误差进行全过程约束, 但在保证车辆队列的队列稳定性方面还存在进一步改善的空间。

鉴于此, 本文将非线性车辆队列为研究对象, 令综合考虑有界传感器测量误差与有向通信拓扑, 利用滑模控制理论设计一种新型的车辆队列控制算法, 保证车辆队列行驶稳定性不受传感器测量误差的影响。并通过预设性能控制理论, 进一步约束车辆队列跟踪误差, 以确保车辆队列的队列稳定性。相对于其他车辆队列控制文献, 本文解决了仅满足有界测量误差与有向通信拓扑下的车辆队列控制问题, 弥补了现有文献针对不服从任何已知分布的传感器测量误差而无有效处理方法的不足, 打破了在有向通信模式下无法保证车辆队列的队列稳定性的限制, 且车辆队列的动力学模型为非线性, 有效地提高了控制算法的应用

性与适用性。

1 问题描述

考虑 N 辆车在道路上以队列形式朝同一方向行驶。车间通信方式为有向通信, 即每辆车所搭载的传感器只能探测到前车的信息。具体的通信拓扑如图 1 所示。

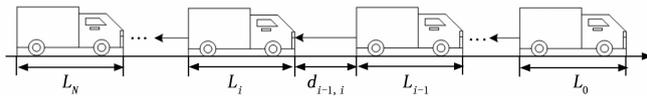


图 1 前车跟随式通信拓扑

车辆的非线性动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) + f_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $p_i(t)$, $v_i(t)$ 分别车辆的位置和速度, $u_i(t)$ 为车辆的控制输入。 $f_i(t)$ 为非线性不确定项, 具体表示为:

$$f_i(t) = -\frac{1}{2m_i}\sigma A_i c_{di} v_i(t)^2 - \frac{\Omega}{m_i}(a + b v_i(t)) - \frac{k\Omega}{m_i}$$

其中: m_i , A_i , c_{di} 分别为第 i 辆车的质量、横截面积、拽力系数; Ω 为车轮负荷, k 为轮胎附着率; a , b 为滚动阻力系数; σ 为空气质量密度。

由于传感器测量误差的存在, 每辆车所搭载的传感器并不能获得准确的车辆位置信息, 所得的车间距信息也是不准确的^[22-23]。因此第 i 和第 j 辆车的车间距应该表示为:

$$d_{ij}(t) = p_j(t) - p_i(t) - (i - j)L + \Delta_{ij}(t) \quad (2)$$

其中: L 表示车身长度, $\Delta_{ij}(t)$ 表示传感器位置测量误差, 满足 $|\Delta_{ij}(t)| \leq \Delta_{i,\max}$, $\Delta_{i,\max}$ 为正常数。

基于上述分析, 定义存在传感器测量误差的车间距误差为:

$$\bar{e}_i(t) = d_{ij}(t) - (i - j)d_{ij}^* \quad (4)$$

其中: d_{ij}^* 为期望车间距。

将式 (2) 代入式 (4) 可得:

$$\bar{e}_i(t) = e_i(t) + \Delta_{ij}(t) \quad (5)$$

其中: $e_i(t)$ 为实际车间距误差, 具体表示为:

$$e_i(t) = p_j(t) - p_i(t) - (i - j)(d_{ij} + L) \quad (6)$$

经过上述分析, 本文将设计一种滑模控制算法以实现如下控制目标:

- 1) 传感器测量误差 $\Delta_{ij}(t)$ 被有效消除, 车辆队列行驶稳定性不受其影响。
- 2) 车辆之间保持安全距离, 并能稳定地行驶。
- 3) 车辆队列的队列稳定性得以保证。

为了便于后续的分析与论证, 现给出以下两个引

理。其中，引理 1 用于车辆模型中非线性不确定项的估计，引理 2 用于车辆内部稳定性的证明。

引理 1^[24]：对于任意非线性函数 f ，可用如下 RBF 神经网络模型进行逼近：

$$f(x) = \mathbf{W}^* \mathbf{H}(x)$$

式中， x 为网络的输入信号； $\mathbf{H} = [\mathbf{h}, 1]^T$ ，其中 \mathbf{h} 为径向基函数； $\mathbf{W}^* = [\mathbf{w}^*, \epsilon]^T$ ，其中 \mathbf{w}^* 为理想神经网络权值， ϵ 为神经网络逼近误差，满足 $|\epsilon| \leq \epsilon_{\max}$ ， ϵ_{\max} 为常数。

非线性函数 f 的估计值可表示为：

$$\hat{f}(x) = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{H}(x)$$

式中， $\hat{\mathbf{W}} = [\hat{\mathbf{w}}, \hat{\epsilon}]$ ， $\hat{\mathbf{w}}$ 为网络估计权值， $\hat{\epsilon}$ 为逼近误差估计值。

引理 2^[25]：对于连续函数 $V(t) \geq 0$ ，且 $V(0)$ 有界。如果 $\dot{V}(t) \leq -q_1 V(t) + q_2$ ，其中 $q_1 > 0, q_2 > 0$ ，则 $V(t)$ 有界并收敛。

2 预设性能控制

考虑到车间有向通信，即每辆车只能接收到前车的信息，车辆队列的队列稳定性因此难以得到维持。为了进一步提高车辆队列的稳定性，利用 PPC 理论在约束车辆跟踪误差的同时，可以保证车辆队列的队列稳定性。

首先，设计预设性能函数：

$$\rho_i(t) = (\rho_0 - \rho_\infty) \exp(-\varphi_i t) + \rho_\infty \quad (7)$$

其中： ρ_0, ρ_∞ 分别满足 $\lim_{t \rightarrow 0} \rho_i(t) = \rho_0, \lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i(t) = \rho_\infty$ ，且有 $\rho_\infty < \rho_0$ ； φ_i 为 $\rho_i(t)$ 的衰减系数， $\rho_0, \rho_\infty, \varphi_i$ 均为正常数。

跟踪误差 $e_i(t)$ 的约束范围可表述为：

$$\begin{cases} -\xi \rho_i(t) < e_i(t) < \rho_i(t), & e_i(t) \geq 0 \\ -\rho_i(t) < e_i(t) < \xi \rho_i(t), & e_i(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中：参数 ξ 满足 $0 < \xi \leq 1$ 。

结合式 (6) 定义重构误差：

$$z_i = \psi_i^{-1}(\delta_i(t)) \quad (9)$$

其中： $\delta_i(t) = \frac{e_i(t)}{\rho_i(t)}$ ， $\psi_i(\cdot)$ 为光滑且严格递增的函数， $\psi_i^{-1}(\cdot)$ 为 $\psi_i(\cdot)$ 的反函数。 $\psi_i(\cdot)$ 的具体形式如下：

$$\psi_i(z_i) = \begin{cases} \frac{e^{\xi z_i} - \xi_i e^{-z_i}}{e^{\xi z_i} + e^{-z_i}}, & e_i(0) \geq 0 \\ \frac{\xi_i e^{z_i} - e^{-z_i}}{e^{\xi z_i} + e^{-z_i}}, & e_i(0) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中， $e_i(0)$ 为跟踪误差初值，满足 $|e_i(0)| < \rho_i(0)$ 。函数 $\psi_i(\cdot)$ 有界，满足：

$$\begin{cases} -\xi < \psi_i(z_i) < 1, & e_i(0) \geq 0 \\ -1 < \psi_i(z_i) < \xi, & e_i(0) < 0 \end{cases}$$

基于式 (10) 和式 (11) 可知：

$$\psi_i^{-1}(\delta_i(t)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln \frac{\xi + \delta_i(t)}{1 - \delta_i(t)}, & e_i(0) \geq 0 \\ \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \delta_i(t)}{\xi - \delta_i(t)}, & e_i(0) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

为了提高车辆队列的队列稳定性，对预设性能函数 $\rho_i(t)$ 中的衰减系数 φ_i 的取值进行进一步的分析。衰减系数 φ_i 的大小决定着预设性能函数 $\rho_i(t)$ 约束车辆跟踪误差 $e_i(t)$ 的强弱，即 φ_i 越大，对车辆跟踪误差的抑制能力越强。因此，令每辆车的衰减系数满足 $\varphi_i \leq \varphi_{i+1}$ ，可防止误差不扩散，车辆队列的队列稳定性因此可得到保证。

另外，需要注意的是，车辆跟踪误差初值会对车辆队列行驶稳定性产生较大的影响。在只考虑车辆跟踪误差初始值大于 0 的情况下，由式 (11) 可知，如果 $e_i(t) \geq \rho_i(t)$ 或 $e_i(t) \leq -\xi \rho_i(t)$ ，就会使 $\delta_i(t) \geq 1$ 或 $\delta_i(t) \leq -\xi$ ，进而会导致重构误差 $\psi_i^{-1}(\delta_i(t))$ 中出现奇异和复数现象，致使算法中的数学运算无法继续进行，从而对车辆队列的行驶造成严重影响。因此，为了保证车辆队列的行驶稳定性和安全性，车辆跟踪误差初值的选取必须满足式 (8) 中的条件。

3 基于滑模的车辆队列控制器

为了保证车辆队列行驶稳定性不受传感器测量误差的影响，且车队能够按照期望轨迹安全行驶，设计一种滑模的车辆队列控制器，并对车辆队列的稳定性进行证明。

首先，令 $z_i(t) = \psi_i^{-1}(\delta_i(t))$ ，设计滑模面：

$$s_i(t) = cz_i(t) + \dot{z}_i(t) \quad (12)$$

其中： $c > 0$ 。

结合式 (1)、(7)、(9)，对式 (12) 进行求导，并经整理可得：

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) &= c\dot{z}_i(t) + \ddot{z}_i(t) = \\ R_{i1}[\dot{v}_{i-1}(t) - \beta_i(t) - u_i(t) - f_i(t)]/\rho_i(t) + \\ &cR_{i1}\dot{a}_i(t) + R_{i2}a_i^2(t) + \omega_i(t) \end{aligned} \quad (13)$$

其中：

$$R_{i1} = \frac{\partial \psi_i^{-1}}{\partial \delta_i}, R_{i2} = \frac{\partial^2 \psi_i^{-1}}{\partial \delta_i^2}$$

$$\begin{aligned} \alpha_i(t) &= [\dot{e}_i(t) - e_i(t)\dot{\rho}_i(t)/\rho_i(t)]/\rho_i(t) \\ \beta_i(t) &= 2\alpha_i(t)\dot{\rho}_i(t) + e_i(t)\ddot{\rho}_i(t)/\rho_i(t) \\ \omega_i(t) &= R_{i1}[cn_{i1}(t) - n_{i2}(t)] + \\ &\quad R_{i2}[2\alpha_i(t)n_{i1}(t) + n_{i2}^2(t)] \\ n_{i1}(t) &= [\dot{\Delta}_{i,i-1}(t) - \Delta_{i,i-1}(t)\dot{\rho}_i(t)/\rho_i(t)]/\rho_i(t) \\ n_{i2}(t) &= [2n_{i1}(t)\dot{\rho}_i(t) + \Delta_i(t)\ddot{\rho}_i(t)/\rho_i(t)]/\rho_i(t) \end{aligned}$$

式 (13) 中的 $\omega_i(t)$ 为由传感器测量误差造成的车辆系统内部干扰项, 由于 $\Delta_{i,i-1}(t), \rho_i(t)$ 有界, 因此 $\omega_i(t)$ 有界, 满足 $\omega_i(t) \leq |\omega_{\max}|, \omega_{\max} \geq 0$ 。为了消除 $\omega_i(t)$ 对车辆队列稳定性的影响, 设计车辆控制器:

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \dot{v}_{i-1}(t) - \beta_i(t) - \hat{f}_i(t) + [Ks_i(t) + \\ &\quad \eta\mathfrak{s}_i(t)/(|s_i(t)| + \lambda) + cR_{i1}\alpha_i(t) + R_{i2}\alpha_i^2(t)] \end{aligned} \quad (14)$$

其中: K, η, λ 为正常数。

值得注意的是, 在滑模控制中, 一般采用趋近律的方式使系统能够按照预定的滑动模态轨迹运动。车辆控制器 (14) 中采用的趋近律为指数趋近律 $-Ks_i(t) - \eta\mathfrak{s}_i(t)/(|s_i(t)| + \lambda)$, 但传统的指数趋近律为 $-Ks_i(t) - \eta\text{sgn}(s_i(t))$, 其中 $\text{sgn}(s_i(t))$ 为符号函数。这里将符号函数 $\text{sgn}(s_i(t))$ 连续化为 $s_i(t)/(|s_i(t)| + \lambda)$, 可避免符号函数 $\text{sgn}(s_i(t))$ 给车辆系统带来的抖振, 从而可以减弱甚至消除由抖振给车辆执行器带来的损坏。

对于车辆系统中的非线性不确定项 $f_i(t)$, 采用 RBF 神经网络进行逼近, 以提高车辆的控制精度。根据引理 1, 第 i 辆车非线性不确定项的估计误差可表示为:

$$\tilde{f}_i = f_i - \hat{f}_i = \tilde{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i) \quad (15)$$

式中, $\tilde{\mathbf{W}}_i = \mathbf{W}_i^* - \hat{\mathbf{W}}_i$ 。

根据式 (15), 可确定用来逼近车辆模型中非线性不确定项的 RBF 神经网络参数自适应律:

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}}_i = 2K\hat{\mathbf{W}}_i - \gamma \frac{R_{i1}}{\rho_i(t)} s_i(t) \mathbf{H}_i \quad (16)$$

其中: $\gamma > 0$ 。

为了证明所设计的控制算法的有效性, 给出如下定理。

定理 1: 考虑由若干车辆组成的队列, 其动力学模型可由式 (1) 所描述。在车间有向通信拓扑的前提下, 车辆跟踪误差可由式 (5) 表示。在此基础上, 利用式 (14) 中的控制律和式 (16) 中的参数自适应律, 在满足 $\eta \geq \omega_i(t)[\text{sgn}(s_i(t)) + \lambda/s_i(t)]$ 的条件下可消除传感器测量误差对车辆队列行驶稳定性的影

响, 并使车辆队列满足:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|p_{i-1}(t) - p_i(t)\| = d_{i-1,i}^* + L \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_{i-1}(t) - v_i(t)\| = 0 \end{cases} \quad (17)$$

证明: 考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} s_i^2(t) + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i \right] \quad (18)$$

对式 (18) 进行求导:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^N [s_i(t)\dot{s}_i(t) + \gamma^{-1} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_i] \quad (19)$$

将式 (14) 代入式 (19), 并结合式 (7)、(15)、(16) 可知:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^N \{s_i(t) [-\frac{R_{i1}}{\rho_i(t)} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{H}_i - Ks_i(t) - \\ &\quad \eta\mathfrak{s}_i(t)/(|s_i(t)| + \lambda) + \omega_i(t)] - \gamma^{-1} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_i\} = \\ &= \sum_{i=1}^N \{-Ks_i^2(t) - \tilde{\mathbf{W}}_i^T [\frac{R_{i1}}{\rho_i(t)} s_i(t) \mathbf{H}_i + \gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_i] + \\ &\quad \omega_i(t)s_i(t) - \eta\mathfrak{s}_i^2(t)/(|s_i(t)| + \lambda)\} = \\ &= \sum_{i=1}^N \{-Ks_i^2(t) - \frac{2K}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i + \omega_i(t)s_i(t) - \\ &\quad \eta\mathfrak{s}_i^2(t)/(|s_i(t)| + \lambda)\} \end{aligned}$$

特别地, 对于由传感器测量误差 $\Delta_{i,i-1}(t)$ 造成的车辆系统内部干扰项 $\omega_i(t)$, 可通过调节控制器 (15) 中的参数 η 消除。因此, 上式中,

$$\begin{aligned} \omega_i(t)s_i(t) - \eta\mathfrak{s}_i^2(t)/(|s_i(t)| + \lambda) &\leq \\ \omega_i(t)s_i(t) - \omega_i(t)[\text{sgn}(s_i(t)) + \\ \lambda/s_i(t)]s_i^2(t)/(|s_i(t)| + \lambda) &= \\ \omega_i(t)s_i(t) - \omega_i(t)s_i(t) &= 0 \end{aligned}$$

\dot{V} 因此可表示为:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^N \{-Ks_i^2(t) - \frac{2K}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i\} \quad (22)$$

由 Young's 不等式可知:

$$-\frac{2K}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i \leq \frac{K}{\gamma} (\mathbf{W}_i^{*T} \mathbf{W}_i^* - \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i)$$

因此, 式 (22) 可化简为:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^N \{-Ks_i^2(t) + \frac{K}{\gamma} (\mathbf{W}_i^{*T} \mathbf{W}_i^* - \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i)\} = \\ &= \sum_{i=1}^N \{-Ks_i^2(t) - \frac{K}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i + \frac{K}{\gamma} \mathbf{W}_i^{*T} \mathbf{W}_i^*\} = \\ &= \sum_{i=1}^N \{-2K \left[\frac{1}{2} s_i^2(t) + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{W}}_i \right] + \frac{K}{\gamma} \|\mathbf{W}_i^*\|^2\} \leq \\ &= \sum_{i=1}^N \{-\kappa V + \nu\} \end{aligned}$$

其中： $\kappa = 2K$ ， $v \geq \sum_{i=1}^N \frac{K}{\gamma} \|W_i^*\|^2$ ， $\|\cdot\|$ 表示向量的二范数。由引理 2 可知，车辆队列渐进稳定，式 (17) 中的控制目标可实现。

由于车间的通信方式为有向通信，即每辆车只能接收到前车信息，而后车信息无法获得，因此不能通过构建耦合滑模面的方式保证车辆队列的队列稳定性。本文通过设计不同衰减速率 φ_i 来保证车辆队列的队列稳定性。具体的控制方法如定理 2 所示。

定理 2：若车辆队列里的所有车间距初值满足 $d_{1,2}(0) \geq d_{2,3}(0) \geq \dots \geq d_{N-1,N}(0)$ ，且每辆车对应的衰减速率 φ_i 满足 $\varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \dots \leq \varphi_N$ ，则 $|e_1| \geq |e_2| \geq \dots \geq |e_N|$ ，车辆队列的队列稳定性因此得以保证。

证明：当 $d_{1,2}(0) \geq d_{2,3}(0) \geq \dots \geq d_{N-1,N}(0)$ 时，则跟踪误差初值满足 $e_1(0) \geq e_2(0) \geq \dots \geq e_N(0)$ 。在控制器的作用下，车辆跟踪误差 $e_i(t)$ 可以此趋势进行收敛。当 $\varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \dots \leq \varphi_N$ 时，预设性能函数满足 $\rho_1(t) \geq \rho_2(t) \geq \dots \geq \rho_N(t)$ 。由式 (9) 可知，沿着车队越靠后，预设性能函数 $\rho_i(t)$ 对第 i 辆车的跟踪误差 $e_i(t)$ 的抑制能力越强， $e_i(t)$ 的变化范围也因此变得越小，可在一定条件下满足 $|e_1| \geq |e_2| \geq \dots \geq |e_N|$ 。因此，车辆队列的队列稳定性得以保证。

将 PPC 与积分滑模相结合所设计的控制器，可大幅提高车辆队列的行驶性能，车辆队列的稳定性和安全性也因此得到了极大的提升。

4 数值仿真

为了验证本文所提出的控制算法的有效性和可行性，对由 1 辆领航车和 5 辆跟随车组成的车辆队列进行仿真。控制器参数如表 1 所示，车辆参数 I 和车辆参数 II 分别如表 2 和表 3 所示。

表 1 控制器参数

符号	K	η	λ	c	ρ_0	ρ_∞	γ
值	0.001	0.4	0.1	1	0.7	0.1	0.001

表 2 车辆参数 I

符号	$\sigma / (\text{m} \cdot \text{s}^{-3})$	A_i / m^2	m_i / kg	L_i / m	$d_{i,j}^* / \text{m}$
值	0.98	2.2	1500	3	5

表 3 车辆参数 II

符号	c_{di}	Ω	k	a	b
值	0.35	0.5	1	0.1	0.2

RBF 神经网络中的径向基函数取高斯基函数，其具体形式如下：

$$h_{k,i} = \exp\left(-\frac{\|x_i - c_{k,i}\|^2}{2b_{k,i}^2}\right), k = 1, 2, \dots, m$$

其中： m 为 RBF 神经网络隐层神经元的个数； $c_{k,i}$ 为中心向量； $b_{k,i}$ 为基宽参数。

用于估计非线性不确定项的 RBF 神经网络结构为 4-7-1（即 4 个输入信号，7 个隐层节点和 1 个输出）。网络输入信号取： $x_i = [e_i, \dot{e}_i, p_i, v_i]^T$ ，高斯基函数的基宽参数为： $b_{k,i} = [10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10]^T$ ，隐层节点的中心点为：

$$c_{k,i} = \begin{bmatrix} -1 & -0.8 & -0.5 & 0 & 0.5 & 0.8 & 1 \\ -1 & -0.8 & -0.5 & 0 & 0.5 & 0.8 & 1 \\ -1 & -0.8 & -0.5 & 0 & 0.5 & 0.8 & 1 \\ -1 & -0.8 & -0.5 & 0 & 0.5 & 0.8 & 1 \end{bmatrix}$$

第 i 辆车对应的衰减速率 φ_i 依次为：0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5。

所有跟随车的初始位置和初始速度为：

$$\begin{bmatrix} p_i(0) \\ v_i(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33 \text{ m} & 24.6 \text{ m} & 16.3 \text{ m} & 8.1 \text{ m} & 0 \text{ m} \\ 0 \text{ m/s} & 0 \text{ m/s} & 0 \text{ m/s} & 0 \text{ m/s} & 0 \text{ m/s} \end{bmatrix}$$

领航车初始位置为： $p_0(0) = 41.5 \text{ m}$ 。领航车的运动轨迹为：

$$v_0(t) = \begin{cases} t, & 0 \leq t < 10 \\ 10, & 10 \leq t < 45 \\ -t + 40, & 45 \leq t < 50 \\ 5, & t \geq 50 \end{cases}$$

传感器测量误差 $\Delta_{ij}(t)$ 可具体表示为：

$$\Delta_{ij}(t) = [1 + 3\sin(0.001\omega_i t + 10(j-i)\theta_i)]\Delta_{i,\max}/4$$

其中： ω_i, θ_i 都为正常数。

传感器相关参数：第 i 辆车对应的 ω_i 依次为：

1.5, 12, 8, 0.5, 2.1； θ_i 依次为： $\pi/6, \pi/3, \pi/2, \pi/4, \pi/5$ ； $\Delta_{i,\max}$ 依次为：0.32, 0.24, 0.45, 0.18, 0.36。

值得注意的是，传感器测量误差 $\Delta_{ij}(t)$ 中的 $\Delta_{i,\max}$ 代表误差的上下界， ω_i 代表误差变化的频率。两者值越大，误差波动范围越大，变化频率越高，则测量误差对车辆队列行驶稳定性的影响就越大。

仿真结果如图 2~8 所示。其中，图 2 为传感器位置测量误差；图 3 为传感器速度测量误差；由图 2

和图 3 可知, 传感器所测量的位置误差和速度误差始终未收敛, 且伴随着高频的振荡, 这势必对车辆队列的稳定性造成较大的影响。

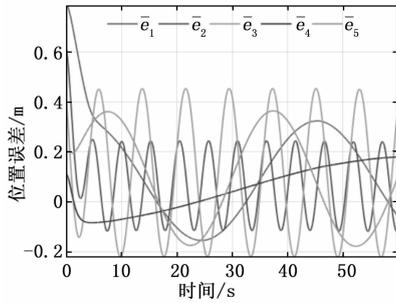


图 2 传感器位置测量误差

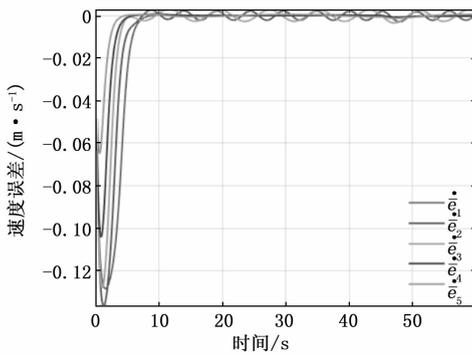


图 3 传感器速度测量误差

图 4~7 分别为车辆位置、车辆速度、车辆位置误差和车辆速度误差。由仿真结果可知, 即使在图 2 和图 3 那样的采样误差下, 本文所设计的控制器依然能够使车辆队列的实际位置误差和速度误差在短时间内收敛 (如图 6 和图 7 所示), 车辆状态最终趋于一致 (如图 5 所示), 车辆队列的行驶稳定性因而得到保证。另外, 在 PPC 的作用下, 车辆位置误差始终被约束在允许的范围内, 同时车辆队列的队列稳定性也得以保证 (如图 6 所示)。因此, 本文所设计的控制算法可以保证车辆队列不受传感器测量误差的影响, 在保证车辆队列的队列稳定性方面是有效且可行的。

图 8 为车辆队列的控制输入。从图 8 中可以看到, 在初始时刻, 由于车辆跟踪误差为非 0 值, 控制输入在该时段内随着车辆状态的收敛而收敛。当车辆趋于稳定后, 所有车辆对应的控制输入趋于同一恒值。值得注意的是: 当车辆为匀速状态时, 控制输入为 0; 当车辆为非匀速状态时, 控制输入不为 0。由此可知, 控制输入的变化与车辆的速度状态有着密切的关系。文中所设计的控制算法可保证无论车辆状态如何变化,

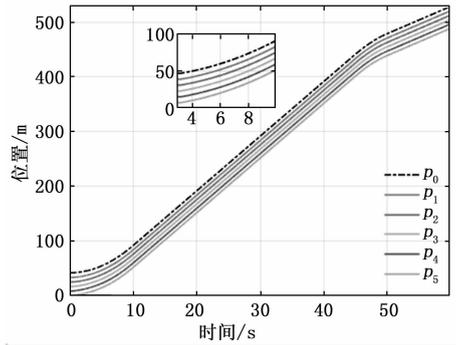


图 4 车辆位置

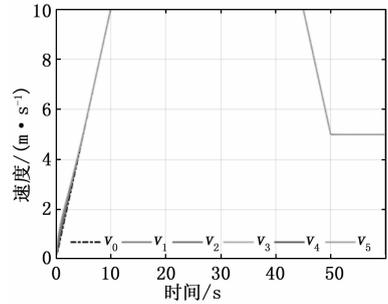


图 5 车辆速度

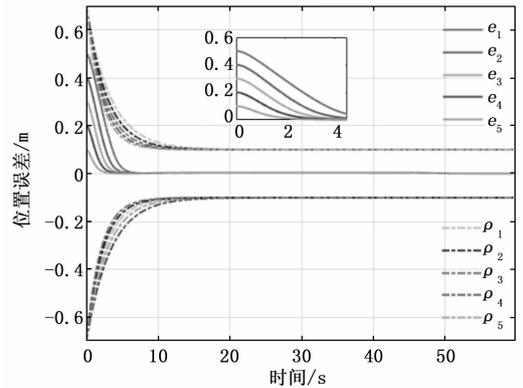


图 6 车辆位置误差

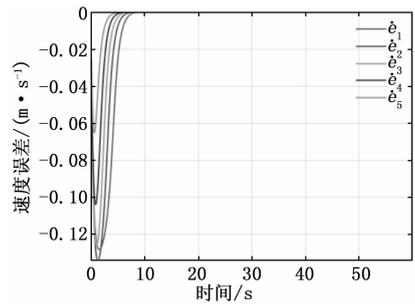


图 7 车辆速度误差

车辆的控制输入可始终保持允许的范围内。

5 结束语

针对有向通信下车载传感器中存在测量误差的问

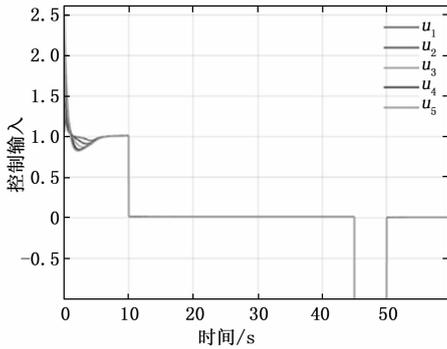


图 8 车辆控制输入

题, 本文主要研究了传感器测量误差对车辆队列的影响及对应的非线性控制方法。首先, 考虑到传感器测量误差只满足有界条件和车间有向通信拓扑, 设计了一种基于滑模控制理论的车辆控制器, 可保证车辆队列的行驶稳定性不受传感器测量误差的影响。其次, 利用 PPC 理论, 在有效约束车辆跟踪误差的同时, 保证了车辆队列的队列稳定性, 车辆队列的行驶稳定性因此得到了进一步的提升。最后, 通过数字仿真验证了所提出的控制算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] JIA D Y, LU K J, WANG J P, et al. A survey on platoon-based vehicular cyber-physical systems [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18 (1): 263-284.
- [2] 冉 斌, 谭华春, 张 健, 等. 智能网联交通技术发展现状及趋势 [J]. 汽车安全与节能学报, 2018, 9 (2): 119-130.
- [3] 郭 戈, 许阳光, 徐 涛, 等. 网联共享车路协同智能交通系统综述 [J]. 控制与决策, 2019, 34 (11): 2375-2389.
- [4] WANG Z, BIAN Y, SHLADOVER S E, et al. A Survey on Cooperative Longitudinal Motion Control of Multiple Connected and Automated Vehicles [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2020, 12 (1): 4-24.
- [5] ZHANG J P, WANG F Y, WANG K F, et al. Data-driven intelligent transportation systems: A survey [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12 (4): 1624-1639.
- [6] ALI A, GARCIA G, MARTINET P. The Flatbed Platoon Towing Model for Safe and Dense Platooning on

- Highways [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2015, 7 (1): 58-68.
- [7] DOU L, SONG C, WANG X, et al. Coverage control for heterogeneous mobile sensor networks subject to measurement errors [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63 (10): 3479-3486.
- [8] HABIBI J, MAHBOUBI H, AGHDAM A G. Distributed Coverage Control of Mobile Sensor Networks Subject to Measurement Error [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61 (11): 3330-3343.
- [9] MAHBOUBI H, VAEZI M, LABEAU F. Mobile sensors deployment subject to location estimation error [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66 (1): 668-678.
- [10] JU Z, ZHANG H, TAN Y. Deception Attack Detection and Estimation for a Local Vehicle in Vehicle Platooning Based on a Modified UFIR Estimator [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7 (5): 3693-3705.
- [11] LAN J, ZHAO D, TIAN D. Robust Cooperative Adaptive Cruise Control of Vehicles on Banked and Curved Roads with Sensor Bias [C] // 2020 American Control Conference (ACC), 2020: 2276-2281.
- [12] MERCOR R, BIRON Z A, PISU P. Replay Attack Detection in a Platoon of Connected Vehicles with Cooperative Adaptive Cruise Control [C] // 2018 Annual American Control Conference (ACC), 2018: 5582-5587.
- [13] JU Z, ZHANG H, TAN Y. Distributed Deception Attack Detection in Platoon-Based Connected Vehicle Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69 (5): 4609-4620.
- [14] CHAKRABORTY T, YAMAGUCHI S, DATTA S K. Sensor Fusion and Adaptive Cruise Control for Self Driving Platoon [C] // 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2018: 231-235.
- [15] 孙效杰, 陆正刚, 程道来. 轨道车辆系统信息估计技术的容错性 [J]. 中国铁道科学, 2018, 39 (5): 97-102.
- [16] SUZUKI H, NAKATSUJI T. Dual particle filter to identify headway distance of platooned vehicles [C] // 2014 World Automation Congress (WAC), 2014: 297-302.
- [17] FIDAN B, ANDERSON B D O. Switching control for robust autonomous robot and vehicle platoon formation maintenance [C] // 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, 2007: 1-6.

(下转第 140 页)