

控制与决策

Control and Decision

预设跟踪性能下车辆队列执行器故障主动容错控制

刘小敏, 闫茂德, 杨盼盼, 王欣芮

引用本文:

刘小敏, 闫茂德, 杨盼盼, 王欣芮. 预设跟踪性能下车辆队列执行器故障主动容错控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(12): 3455–3464.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0064>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有执行器故障的四旋翼无人机自适应预定性能控制

Adaptive prescribed performance control of quadrotor with unknown actuator fault
控制与决策. 2021, 36(9): 2103–2112 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0083>

基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计

Vector set inversion interval filtering based fault observer design
控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system
控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

随机变批次长度的反馈辅助PD型量化迭代学习控制

Feedback-assisted PD-type quantized iterative learning control with randomly iteration varying lengths
控制与决策. 2021, 36(10): 2569–2576 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0273>

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint
控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

预设跟踪性能下车辆队列执行器故障主动容错控制

刘小敏, 闫茂德[†], 杨盼盼, 王欣芮

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘要: 研究预设跟踪性能下的车辆队列执行器故障主动容错控制问题. 考虑执行器部分失效和偏移故障情形, 设计 Luenberger 观测器和自适应残差阈值以实现执行器故障检测. 在此基础上, 为了确保执行器故障下的车辆队列暂态和稳态性能, 在预设跟踪性能框架下, 设计基于反步法的主动容错控制算法, 在满足预设性能的前提下, 实现车辆队列跟踪误差有界, 且车辆间距满足安全性和紧凑性约束. 仿真结果验证了所提出主动容错控制算法的有效性.

关键词: 车辆队列; 执行器故障; 主动容错控制; 预设跟踪性能; 反步法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0064

引用格式: 刘小敏, 闫茂德, 杨盼盼, 等. 预设跟踪性能下车辆队列执行器故障主动容错控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(12): 3455-3464.

Actuator active fault-tolerant control for vehicle platoons under prescribed tracking performance

LIU Xiao-min, YAN Mao-de[†], YANG Pan-pan, WANG Xin-rui

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

Abstract: The active fault-tolerant control for vehicle platoons with actuator fault under prescribed tracking performance is investigated. Considering the actuator partial loss of effectiveness and bias faults, a Luenberger observer and adaptive residual threshold are proposed for fault detection. Based on this, to guarantee the transient and steady state performance of vehicle platoons with actuator fault, a backstepping based fault-tolerant control algorithm under the prescribed tracking performance framework is developed, which is proved to be capable of achieving the bounded tracking errors with prescribed performance, meanwhile the safety, compactness inter-vehicle distance constraints are not violated. The effectiveness of the proposed active fault-tolerant control algorithm is demonstrated via simulation results.

Keywords: vehicle platoon; actuator fault; active fault-tolerant control; prescribed tracking performance; backstepping technique

0 引言

车辆队列作为智能交通系统的重要研究方向之一, 因其在提高行车效率、缓解交通压力和减少能源消耗等方面的巨大潜力受到了广泛关注^[1-3]. 受到车辆队列行驶安全性等现实需求的牵引, 可靠性逐渐成为车辆队列控制的研究热点. 车辆队列的可靠性不仅要求车辆队列的跟踪误差收敛, 更要求车辆队列在意外情况下仍然能够继续保持稳定行驶^[4]. 在实际应用中, 车辆队列的可靠性有赖于传感器精确地获取自身状态, 通信网络准确实时地与其他车辆交互以及执

行器有效地将控制信号转换为车辆动力^[5]. 然而, 由于结构损坏、部件老化和金属疲劳等原因造成的执行器故障难以避免^[6-7]. 在执行器故障下, 车辆动力无法实现期望的控制效果, 导致车辆队列的性能下降、不稳定甚至发生安全事故. 因此, 执行器故障容错控制已成为车辆队列行驶的研究热点.

目前, 研究人员已针对车辆队列的执行器故障容错控制问题展开了大量研究. 文献[8]通过构建滑模观测器进行状态估计, 与固定阈值比较判断执行器故障是否发生; 文献[9]开发了基于故障检测滤波器的

收稿日期: 2023-01-16; 录用日期: 2023-05-13.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA1000303); 陕西省重点研发计划项目(2022GY-255).

责任编辑: 魏秀琨.

[†]通讯作者. E-mail: mdyan@chd.edu.cn.

车辆主动悬架系统;文献[10]将执行器故障设为增广状态向量,设计了向量集逆区间滤波的故障观测器,通过补偿或消除故障对系统的影响,使得故障发生时车辆队列的性能保持在可接受的水平;文献[6]针对执行器故障下的车辆队列设计了PID滑模控制器,保证了车辆队列以及交通流的稳定性;文献[7]研究了车辆队列执行器故障下的自适应容错滑模控制问题,并提出了一种改进的二次间距策略;文献[11]设计了一种自适应神经容错滑模控制算法,解决了具有未知方向执行器故障的车辆队列控制问题。

上述文献主要侧重于对执行器故障下车辆队列的稳态控制问题的研究,但是,对于队列在行驶过程中跟踪误差的调节和变化关注不足,导致控制过程中系统暂态性能(如超调量、收敛速度等)指标缺失,无法满足动态调节过程中车辆队列的安全稳定要求^[12]。如车辆编队中的车辆间距,不仅要求其在稳态时收敛至期望值,还要求其在整个行驶阶段满足安全性和队列紧凑性要求^[13]。预设跟踪性能控制通过衰减函数将系统误差约束于预先定义的范围,是实现系统暂态控制的有效途径^[14]。目前,预设跟踪性能控制已在车辆队列控制中得到了一定的应用。文献[15]研究了车辆队列的预设性能跟踪控制问题,保证了车辆队列的稳态和暂态性能;文献[16]针对具有执行器饱和、未知参数和外部扰动的车辆队列,设计了预设跟踪性能滑模控制器;文献[17]设计了有限时间的动态增益控制算法,保证了车辆队列满足预设性能和可变车间距。

然而,针对车辆队列执行器主动容错控制的研究还存在一定的不足和难点:1)主动容错算法的故障检测环节多采用固定常数作为残差阈值,灵活性不足,难以实现对微小故障的有效检测;2)针对车辆队列的暂态性能,已有文献多基于运行状况良好的车辆队列设计预设性能控制器,即使考虑故障下的预设跟踪性能,也很少能够同时确保车辆间距的安全和紧凑性约束。

基于以上分析,本文研究预设跟踪性能下的车辆队列执行器主动容错控制问题。针对执行器部分失效和偏移故障,设计主动容错控制算法以保证车辆队列的稳定性。在此基础上,基于预设跟踪性能框架,保证执行器故障下的车辆队列满足预设跟踪性能,相比于现有成果:1)指数型递减的残差阈值能够适应观测误差随时间变化,可实现对于微小故障的有效检测;2)容错控制算法保证跟踪误差暂态性能的同时,车辆间距始终处于安全性与队列紧凑性距离范围内。

1 问题描述

1.1 车辆动力学模型

考虑一组由1辆领航车辆(标记为车辆0)和 n 辆跟随车辆($\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, n\}$)组成纵向行驶的车辆队列(如图1所示),队列中跟随车辆接收前车信息并跟踪前车行驶。队列中第 i 辆车的动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i, \\ \dot{v}_i = a_i, \\ \dot{a}_i = \frac{1}{m_i \tau_i} \frac{\eta_{T,i}}{r_{w,i}} T_{d,i} + f_i(v_i, a_i). \end{cases} \quad (1)$$

其中: p_i 、 v_i 、 a_i 分别为车辆的位置、速度以及加速度, τ_i 为车辆发动机时间常数, $\eta_{T,i}$ 为车辆传动系统的机械效率, $r_{w,i}$ 为车辆轮胎有效半径, $T_{d,i}$ 为车辆驱动力或制动力的力矩, $f_i(v_i, a_i)$ 的具体形式为

$$f_i(v_i, a_i) = -\frac{1}{m_i \tau_i} \left[\frac{1}{2} \mu_i C_{d,i} A_{F,i} (v_i^2 + 2\tau_i v_i a_i) + r_i m_i g \cos \theta + m_i g \sin \theta \right] - \frac{1}{\tau_i} a_i.$$

式中: $A_{F,i}$ 和 m_i 分别为车辆的迎风面积和质量, μ_i 和 $C_{d,i}$ 分别为空气密度和空气阻力系数, r_i 为滚动阻力系数, θ 为路面坡度, $\frac{\mu_i A_{F,i} C_{d,i}}{2} v_i^2$ 为车辆受到的空气阻力。

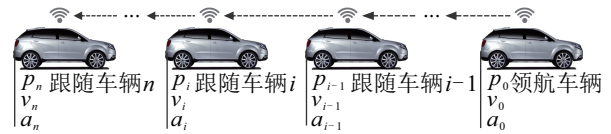


图1 纵向行驶的车辆队列

通过反馈线性化技术,设计以下控制输入:

$$T_{d,i} = m_i \tau_i \frac{r_{w,i}}{\eta_{T,i}} u_i + \frac{r_{w,i}}{2\eta_{T,i}} \mu_i C_{d,i} A_{F,i} (v_i^2 + 2\tau_i v_i a_i) + \frac{\tau_i r_{w,i}}{\eta_{T,i}} a_i - \frac{r_{w,i}}{\eta_{T,i}} (r_i m_i g \cos \theta + m_i g \sin \theta), \quad (2)$$

其中 u_i 为新的待设计的控制输入。车辆动力学模型转换为

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i, \\ \dot{v}_i = a_i, \\ \dot{a}_i = u_i. \end{cases} \quad (3)$$

注1 反馈线性化技术在非线性车辆队列控制领域具有广泛的应用^[18-20],为了便于研究,本文通过使用该技术,将车辆简化为质点模型,进行执行器故障下主动容错控制。

1.2 执行器故障模型

车辆在实际行驶过程中因金属疲劳、磨损、外力损伤等导致执行器的实际输出与期望输出产生偏差,使得执行器常常表现出部分失效和偏移故障。该故

障下车辆的动力学模型为

$$\dot{a}_i = b_i(t)u_i + \omega_i(t), \quad i \in \mathcal{N}, t \geq t_{f,i}. \quad (4)$$

其中: $b_i(t)$ 为 $t_{f,i}$ 时刻执行器发生故障时控制输入的有效部分, $\omega_i(t)$ 为执行器的偏移故障.

同时, 给出以下假设.

假设1 $b_i(t)$ 和 $\omega_i(t)$ 为未知的有界函数, 即 $b_i(t), \omega_i(t) \in \mathcal{L}_\infty$ 且存在常数 $\underline{b}_i, \bar{\omega}_i > 0$ 分别使得 $0 < \underline{b}_i \leq b_i(t) \leq 1$ 以及 $|\omega_i(t)| \leq \bar{\omega}_i < \infty (\forall t > 0)$.

假设2 车辆执行器的故障程度是可容忍的, 即通过设计容错控制算法能够使得车辆正常行驶并保持车辆队列稳定.

1.3 预设跟踪性能

定义车辆 i 与前车的间距以及间距误差分别为

$$\begin{cases} d_i = p_{i-1} - p_i - l_i, \\ \tilde{d}_i = d_i - d^*, \quad i \in \mathcal{N}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: l_i 为车辆 i 的车身长度, $d^* \in \mathfrak{R}_+$ 为期望的相邻车辆间距.

在车辆队列行驶过程中, 为了保证车辆安全以及队列的紧凑性, 相邻两车的车间距应限制在安全性约束距离与紧凑性约束距离范围间, 如图2所示, 即

$$d_{\text{safety}} < d_i < d_{\text{compactness}}, \quad i \in \mathcal{N}. \quad (6)$$

其中: $d_{\text{safety}} \in \mathfrak{R}_+$ 为安全约束距离; $d_{\text{compactness}} \in \mathfrak{R}_+$ 为紧凑性约束距离, 且 $d_{\text{compactness}} > d_{\text{safety}}$.



图2 车辆间距约束

对于车辆队列的初始状态给出如下假设.

假设3 车辆队列的初始状态满足车间距的安全性约束和紧凑性约束, 即

$$d_{\text{safety}} < d_i(0) < d_{\text{compactness}}, \quad i \in \mathcal{N}. \quad (7)$$

进一步地, 考虑车辆跟踪过程中误差的暂态性能, 对跟踪误差提出如下性能约束:

$$-\underline{l}_i \rho_i(t) < \tilde{d}_i(t) < \bar{l}_i \rho_i(t), \quad i \in \mathcal{N}, \forall t \geq 0. \quad (8)$$

其中: $(\underline{l}_i, \bar{l}_i) \in \mathfrak{R}_+^2$; $\rho_i(t)$ 为连续的性能函数, 满足:

- 1) $\rho_i(t) > 0$ 且严格递减;
- 2) $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i(t) = \rho_{\infty, i} > 0$.

同时, 给出以下队列稳定性定义^[12,21].

定义1 对于车辆队列跟踪误差系统(5), 给定任意 $\varepsilon > 0$, 若存在 $\delta > 0$, 使得

$$\|\tilde{d}_i(0)\| < \delta \Rightarrow \sup_{t \in [0, \infty)} \|\tilde{d}_i(t)\| < \varepsilon$$

成立, 则称该车辆队列具有队列稳定性.

1.4 控制目标

本文旨在研究预设跟踪性能下的车辆队列执行器故障主动容错控制问题, 实现执行器故障下的车辆队列稳定行驶和性能保持, 即:

1) 车辆队列稳定性: 采用故障检测算法监测车辆执行器故障是否发生, 采用容错控制算法对控制律进行重构, 保证车辆队列跟踪误差有界.

2) 车辆队列预设跟踪性能: 车辆队列跟踪误差的暂态性能满足预设性能, 且车间间距满足安全性和紧凑性约束.

2 主要结果

2.1 车辆队列执行器故障检测算法

本节针对车辆队列执行器故障设计状态观测器, 基于观测误差生成残差评估函数, 通过与设定的自适应阈值进行比较实现车辆队列执行器故障检测.

首先, 对车辆 i 构造如下 Luenberger 观测器:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{p}}_i \\ \dot{\hat{v}}_i \\ \dot{\hat{a}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p}_i \\ \hat{v}_i \\ \hat{a}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i + \Gamma_i \begin{bmatrix} p_i - \hat{p}_i \\ v_i - \hat{v}_i \\ a_i - \hat{a}_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 $\Gamma_i \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 为观测器增益矩阵.

令

$$e_i = \begin{bmatrix} p_i - \hat{p}_i \\ v_i - \hat{v}_i \\ a_i - \hat{a}_i \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

不失一般性, 假设车辆 i 发生执行器故障, 则

$$\dot{e}_i = (A - \Gamma_i)e_i + B((b_i - 1)u_i + \omega_i). \quad (11)$$

定义 $P_i \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 为正定对称矩阵, 选取适当的观测器增益 Γ_i , 使得

$$Q_i = -P_i(A - \Gamma_i) - (A - \Gamma_i)^T P_i - 2P_i B B^T P_i > 0. \quad (12)$$

注2 对于不等式(12), 可通过如下 LMI 计算其可解性并进行求解:

$$\begin{bmatrix} -P_i(A - \Gamma_i) - (A - \Gamma_i)^T P_i & \sqrt{2}P_i B \\ \sqrt{2}B^T P_i & I \end{bmatrix} > 0.$$

进一步地, 构造如下残差评估函数和自适应残差阈值:

$$\begin{cases} \chi_i(t) = \|e_i(t)\|, \\ \chi_{\text{th}, i}(t) = \sqrt{\frac{\bar{\lambda}(P_i)}{\underline{\lambda}(P_i)} e^{-\frac{\lambda(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)} t} \|e_i(0)\|^2}. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\bar{\lambda}(P_i)$ 和 $\underline{\lambda}(P_i)$ 分别为矩阵 P_i 的最大特征值和最小特征值, $\underline{\lambda}(Q_i)$ 为矩阵 Q_i 的最小特征值, $\|e_i(0)\|$ 为观测误差初始值的欧几里得范数.

注3 由式(11)可知, 车辆队列中无执行器故障发生时, 观测误差 e_i 以指数形式收敛. 基于这一思想, 本文通过 Lyapunov 函数求解观测误差欧几里得范数的上界, 并依此设计指数型残差阈值(13), 该阈值能够适应观测误差变化, 可实现对微小故障的检测.

根据残差评估函数和残差阈值, 给出以下车辆队列执行器故障检测定理.

定理1 考虑如式(1)所示的车辆队列, 通过观测器(9)、残差评估函数(13)和自适应残差阈值, 能够实现车辆队列执行器部分失效和偏移故障(4)的检测. 相应的执行器故障检测逻辑表示为

$$\begin{cases} \chi_i(t) \leq \chi_{th,i}(t) \Rightarrow \text{车辆}i\text{未发生执行器故障,} \\ \chi_i(t) > \chi_{th,i}(t) \Rightarrow \text{车辆}i\text{发生执行器故障.} \end{cases}$$

即当残差评估函数超过残差阈值时, 认为车辆 i 发生执行器故障; 否则, 无故障发生.

证明 构建如下 Lyapunov 函数:

$$V_{f,i} = e_i^T P_i e_i. \quad (14)$$

对 $V_{f,i}$ 求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{f,i} &= e_i^T ((A - \Gamma_i)P_i + P_i(A - \Gamma_i))e_i + \\ & 2e_i^T P_i B(b_i - 1)u_i + 2e_i^T P_i B\omega_i. \end{aligned} \quad (15)$$

由杨氏不等式, 以下不等式成立:

$$\begin{aligned} 2e_i^T P_i B(b_i - 1)u_i &\leq e_i^T P_i B B^T P_i e_i + ((b_i - 1)u_i)^2, \\ 2e_i^T P_i B\omega_i &\leq e_i^T P_i B B^T P_i e_i + \omega_i^2. \end{aligned}$$

进一步地, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{f,i} &\leq e_i^T (P_i(A - \Gamma_i) + (A - \Gamma_i)^T P_i + 2P_i B B^T P_i) e_i + \\ & (b_i - 1)^2 u_i^2 + \omega_i^2 = \\ & - e_i^T Q_i e_i + (b_i - 1)^2 u_i^2 + \omega_i^2. \end{aligned} \quad (16)$$

同时, 考虑

$$\begin{aligned} \underline{\lambda}(Q_i)\|e_i\|^2 &\leq e_i^T Q_i e_i, \\ \underline{\lambda}(P_i)\|e_i\|^2 &\leq V_{f,i} \leq \bar{\lambda}(P_i)\|e_i\|^2, \end{aligned}$$

有

$$\dot{V}_{f,i} \leq -\frac{\underline{\lambda}(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)}V_{f,i} + (b_i - 1)^2 u_i^2 + \omega_i^2. \quad (17)$$

对不等式(17)进行求解, 得到

$$\begin{aligned} V_{f,i} &\leq V_{f,i}(0) \exp\left(-\frac{\underline{\lambda}(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)}t\right) + \\ & ((b_i - 1)^2 u_i^2 + \omega_i^2) \frac{\bar{\lambda}(P_i)}{\underline{\lambda}(Q_i)} - \end{aligned}$$

$$((b_i - 1)^2 u_i^2 + \omega_i^2) \frac{\bar{\lambda}(P_i)}{\underline{\lambda}(Q_i)} \exp\left(-\frac{\underline{\lambda}(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)}t\right). \quad (18)$$

进一步地, 有

$$\begin{aligned} \|e_i\|^2 &\leq \frac{\bar{\lambda}(P_i)}{\underline{\lambda}(P_i)} \exp\left(-\frac{\underline{\lambda}(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)}t\right) \|e_i(0)\|^2 + \\ & \frac{\bar{\lambda}(P_i)((b_i - 1)^2 u_i^2 + \omega_i^2)}{\underline{\lambda}(P_i)\underline{\lambda}(Q_i)} \left(1 - \exp\left(-\frac{\underline{\lambda}(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)}t\right)\right). \end{aligned} \quad (19)$$

显然, 当车辆 i 的执行器未发生故障时, 必然有以下命题成立.

命题1 若车辆 i 的执行器未发生故障, 即 $b_i = 1$ 且 $\omega_i = 0$, 则不等式

$$\|e_i\|^2 \leq \frac{\bar{\lambda}(P_i)}{\underline{\lambda}(P_i)} e^{-\frac{\underline{\lambda}(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)}t} \|e_i(0)\|^2 \quad (20)$$

必然成立.

对于命题1, 其逆否命题也必然成立, 若

$$\|e_i\|^2 > \frac{\bar{\lambda}(P_i)}{\underline{\lambda}(P_i)} e^{-\frac{\underline{\lambda}(Q_i)}{\bar{\lambda}(P_i)}t} \|e_i(0)\|^2, \quad (21)$$

即 $\chi_i(t) > \chi_{th,i}(t)$, 则车辆 i 的执行器出现部分失效或偏移故障. \square

2.2 基于预设跟踪性能的容错控制器

本节基于预设跟踪性能控制框架, 首先进行性能函数选取和误差变换, 应用反步法设计车辆队列执行器故障容错控制律使得变换误差有界, 进而保证车辆队列跟踪误差有界且满足预设跟踪性能, 同时车辆间距满足安全性和紧凑性距离约束.

由式(8)的性能约束, 选择性能函数为

$$\rho_i(t) = \left(1 - \frac{\rho_{\infty,i}}{\max\{\underline{l}_i, \bar{l}_i\}}\right) e^{-\kappa_i t} + \frac{\rho_{\infty,i}}{\max\{\underline{l}_i, \bar{l}_i\}}. \quad (22)$$

其中: $i \in \mathcal{N}$, $\rho_{\infty,i} \in \mathfrak{R}_+$ 为预设的跟踪误差稳态时的上界, $\kappa_i \in \mathfrak{R}_+$ 与跟踪误差在暂态时收敛速度的下界相关. 在整个控制过程中, 跟踪误差的最大超调量不超过 $\bar{l}_i \rho_i(0) = \bar{l}_i$, 且始终处于 $\underline{l}_i \rho_i(t)$ 与 $\bar{l}_i \rho_i(t)$ 的包络范围内.

根据上述分析, 考虑车辆队列的安全性和紧凑性距离约束, 选取性能约束参数 \underline{l}_i 和 \bar{l}_i 分别为

$$\begin{cases} \underline{l}_i = d^* - d_{\text{safety}}, \\ \bar{l}_i = d_{\text{compactness}} - d^*. \end{cases} \quad (23)$$

由假设3, 显然有

$$-\underline{l}_i \rho_i(0) < \tilde{d}_i(0) < \bar{l}_i \rho_i(0). \quad (24)$$

考虑到 $\rho_i(t)$ 为严格递减的正函数, 进一步地, 有

$$-\underline{l}_i < \tilde{d}_i(t) < \bar{l}_i, \quad \forall t \geq 0 \quad (25)$$

以及

$$d_{\text{safety}} < d_i < d_{\text{compactness}}, \forall t \geq 0. \quad (26)$$

由上述分析可知,本文选取的性能函数在满足预设跟踪误差性能的同时,也能够保证车辆间距满足安全性和紧凑性距离约束.

根据预设跟踪性能控制设计框架,对 $\tilde{d}_i(t)$ 进行性能约束空间到无约束空间的对等转换. 定义变换误差为

$$z_{1,i}(t) = f_{\text{tran},i}^{-1}(\tilde{d}_i(t)/\rho_i(t)), i \in \mathcal{N}. \quad (27)$$

其中: $f_{\text{tran},i}^{-1}(\cdot)$ 为误差变换函数 $f_{\text{tran},i}(\cdot)$ 的反函数; $f_{\text{tran},i}(\cdot)$ 为光滑且严格递增的可逆函数,满足

$$\begin{cases} \lim_{z_{1,i} \rightarrow -\infty} f_{\text{tran},i}(z_{1,i}) = -\underline{L}_i, \\ \lim_{z_{1,i} \rightarrow \infty} f_{\text{tran},i}(z_{1,i}) = \bar{L}_i. \end{cases} \quad (28)$$

根据上述条件,选取误差变换函数 $f_{\text{tran},i}(z_{1,i})$ 为

$$f_{\text{tran},i}(z_{1,i}) = \frac{\bar{L}_i \exp(z_{1,i}) - \underline{L}_i \exp(-z_{1,i})}{\exp(z_{1,i}) + \exp(-z_{1,i})}, \quad (29)$$

则变换误差 $z_{1,i}(t)$ 的具体形式为

$$z_{1,i}(t) = \frac{1}{2} \ln \frac{\tilde{d}_i(t) + \underline{L}_i \rho_i(t)}{\bar{L}_i \rho_i(t) - \tilde{d}_i(t)}. \quad (30)$$

当 $z_{1,i}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ 时,即对于 $\forall t \geq 0$,若 $z_{1,i}(t)$ 有界,则有以下不等式成立:

$$-\underline{L}_i < f_{\text{tran},i}(z_{1,i}) < \bar{L}_i. \quad (31)$$

进一步地,不等式(8)成立,跟踪误差的性能约束得以满足. 下面基于反步法设计控制算法保证 $z_{1,i}(t)$ 有界. 首先,定义以下误差:

$$\begin{cases} z_{1,i}(t) = f_{\text{tran},i}^{-1}(\tilde{d}_i(t)/\rho_i(t)); \\ z_{2,i}(t) = v_i - \varphi_{1,i}; \\ z_{3,i}(t) = a_i - \varphi_{2,i}, i \in \mathcal{N}. \end{cases} \quad (32)$$

其中: $\varphi_{1,i}$ 、 $\varphi_{2,i}$ 为待设计的滤波器输出,详细定义在下文给出.

step 1: 对 $z_{1,i}(t)(i \in \mathcal{N})$ 求导,得到

$$\begin{aligned} \dot{z}_{1,i} &= \frac{\partial f_{\text{tran},i}^{-1}}{\partial(\tilde{d}_i/\rho_i)} \frac{1}{\rho_i} \left(\dot{\tilde{d}}_i - \frac{\tilde{d}_i \dot{\rho}_i}{\rho_i} \right) = \\ & r_i(v_{i-1} - v_i - \tilde{d}_i \dot{\rho}_i/\rho_i), \end{aligned} \quad (33)$$

其中 $r_i = (\partial f_{\text{tran},i}^{-1}/\partial(\tilde{d}_i/\rho_i))/\rho_i$.

设计虚拟控制律 $\alpha_{1,i}$ 为

$$\alpha_{1,i} = \frac{1}{r_i}(k_{1,i}z_{1,i} + r_i v_{i-1} - r_i \tilde{d}_i \dot{\rho}_i/\rho_i), \quad (34)$$

其中 $k_{1,i} \in \mathfrak{R}_+$ 为控制参数.

考虑反步法的“微分爆炸”问题,引入一阶低通滤波器对虚拟控制律进行滤波,有

$$\tau_{1,i} \dot{\varphi}_{1,i} + \varphi_{1,i} = \alpha_{1,i}, \varphi_{1,i}(0) = \alpha_{1,i}(0). \quad (35)$$

其中: $\tau_{1,i} \in \mathfrak{R}_+$ 为滤波时间常数, $\varphi_{1,i}(0)$ 和 $\alpha_{1,i}(0)$ 分别为 $\varphi_{1,i}$ 和 $\alpha_{1,i}$ 的初始值.

定义滤波误差 $\epsilon_{1,i} = \varphi_{1,i} - \alpha_{1,i}$, 其时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{1,i} &= \frac{\varphi_{1,i} - \alpha_{1,i}}{\tau_{1,i}} - \dot{\alpha}_{1,i} = \\ & -\epsilon_{1,i}/\tau_{1,i} + \vartheta_{1,i}, \end{aligned} \quad (36)$$

其中 $\vartheta_{1,i} = ((\dot{\tilde{d}}_i \dot{\rho}_i + \tilde{d}_i \ddot{\rho}_i) \rho_i - \tilde{d}_i \dot{\rho}_i^2) \rho_i^{-2} - a_{i-1} - k_{1,i}(\dot{z}_{1,i} + z_{1,i} \dot{r}_i/r_i)/r_i$.

设计如下 Lyapunov 函数:

$$V_{1,i} = \frac{1}{2} z_{1,i}^2 + \frac{1}{2} \epsilon_{1,i}^2. \quad (37)$$

对式(37)求导,得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1,i} &= z_{1,i} \dot{z}_{1,i} + \epsilon_{1,i} \dot{\epsilon}_{1,i} = \\ & -k_{1,i} z_{1,i}^2 - r_i z_{1,i} z_{1,2} - r_i z_{1,i} \epsilon_{1,i} - \frac{\epsilon_{1,i}^2}{\tau_{1,i}} + \epsilon_{1,i} \vartheta_{1,i}. \end{aligned} \quad (38)$$

step 2: $z_{2,i}(t)$ 的时间导数为

$$\dot{z}_{2,i} = \varphi_{2,i} + z_{3,i} - \dot{\varphi}_{1,i}. \quad (39)$$

为子系统(39)设计如下虚拟控制律:

$$\alpha_{2,i} = -k_{2,i} z_{2,i} + r_i z_{1,i} + \dot{\varphi}_{1,i}, \quad (40)$$

其中 $k_{2,i} \in \mathfrak{R}_+$ 为控制参数.

构造如下滤波器:

$$\tau_{2,i} \dot{\varphi}_{2,i} + \varphi_{2,i} = \alpha_{2,i}, \varphi_{2,i}(0) = \alpha_{2,i}(0). \quad (41)$$

其中: $\tau_{2,i} \in \mathfrak{R}_+$ 为滤波时间常数, $\varphi_{2,i}(0)$ 和 $\alpha_{2,i}(0)$ 分别为 $\varphi_{2,i}$ 和 $\alpha_{2,i}$ 的初始值.

定义滤波误差 $\epsilon_{2,i} = \varphi_{2,i} - \alpha_{2,i}$, 其时间导数为

$$\dot{\epsilon}_{2,i} = -\frac{\epsilon_{2,i}}{\tau_{2,i}} + \vartheta_{2,i}, \quad (42)$$

其中 $\vartheta_{2,i} = k_{2,i} \dot{z}_{2,i} - \dot{r}_i z_{1,i} - r_i \dot{z}_{1,i} - \dot{\varphi}_{1,i}$.

设计如下 Lyapunov 函数:

$$V_{2,i} = \frac{1}{2} z_{2,i}^2 + \frac{1}{2} \epsilon_{2,i}^2 + V_{1,i}. \quad (43)$$

对式(43)求导,得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2,i} &= -k_{1,i} z_{1,i}^2 - k_{2,i} z_{2,i}^2 - r_i z_{1,i} \epsilon_{1,i} - z_{2,i} \epsilon_{2,i} + \\ & z_{2,i} z_{3,i} - \frac{\epsilon_{1,i}^2}{\tau_{1,i}} + \epsilon_{1,i} \vartheta_{1,i} - \frac{\epsilon_{2,i}^2}{\tau_{2,i}} + \epsilon_{2,i} \vartheta_{2,i}. \end{aligned} \quad (44)$$

考虑紧集 $\Pi_{\rho,i} := \{(\rho_i, \dot{\rho}_i, \ddot{\rho}_i) \in \mathfrak{R}^3 : \rho_i^2 + \dot{\rho}_i^2 + \ddot{\rho}_i^2 \leq \varkappa_i\}$ 和紧集 $\Pi_{e,i} := \{(z_{1,i}, z_{2,i}, z_{3,i}, \epsilon_{1,i}, \epsilon_{2,i}) \in \mathfrak{R}^5 : z_{1,i}^2 + z_{2,i}^2 + z_{3,i}^2 + \epsilon_{1,i}^2 + \epsilon_{2,i}^2 \leq 2\xi_i\}(\varkappa_i, \xi_i \in \mathfrak{R}_+)$, 则函数 $\vartheta_{1,i}(\cdot)$ 和 $\vartheta_{2,i}(\cdot)$ 中的状态变量在紧集 $\Pi_{\rho,i} \times \Pi_{e,i}$ 中有界,即存在 $(\bar{\vartheta}_{1,i}, \bar{\vartheta}_{2,i}) \in \mathfrak{R}_+^2$, 使得 $|\vartheta_{1,i}| \leq \bar{\vartheta}_{1,i}$ 以及 $|\vartheta_{2,i}| \leq \bar{\vartheta}_{2,i}$.

令 $1/\tau_{1,i} \geq (r_i^2 - 1)/2 + \bar{\vartheta}_{1,i}^2/(2s_i) + k_{1,i}, 1/\tau_{2,i} \geq \bar{\vartheta}_{2,i}^2/(2s_i) + k_{2,i}$, 由杨氏不等式,得到

$$\begin{aligned}
 & -r_i z_{1,i} \epsilon_{1,i} - \epsilon_{1,i}^2 / \tau_{1,i} + \epsilon_{1,i} \vartheta_{1,i} \leq \\
 & z_{1,i}^2 / 2 - (k_{1,i} - 1/2) \epsilon_{1,i}^2 + s_i / 2, \\
 & -z_{2,i} \epsilon_{2,i} - \epsilon_{2,i}^2 / \tau_{2,i} + \epsilon_{2,i} \vartheta_{2,i} \leq \\
 & z_{2,i}^2 / 2 - (k_{2,i} - 1/2) \epsilon_{2,i}^2 + s_i / 2.
 \end{aligned}$$

进一步地,对于 $\dot{V}_{2,i}$ 有

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{2,i} \leq & -(k_{1,i} - 1/2)(z_{1,i}^2 + \epsilon_{1,i}^2) - \\
 & (k_{2,i} - 1/2)(z_{2,i}^2 + \epsilon_{2,i}^2) + z_{2,i} z_{3,i} + s_i. \quad (45)
 \end{aligned}$$

step 3: $z_{3,i}(t)$ 的时间导数为

$$\dot{z}_{3,i} = \dot{a}_i - \dot{\varphi}_{2,i}. \quad (46)$$

令 \mathcal{N}_f 为车辆队列中发生执行器故障的车辆集合,有

$$\begin{cases} \dot{z}_{3,i} = u_i - \dot{\varphi}_{2,i}, & i \in \mathcal{N}/\mathcal{N}_f; \\ \dot{z}_{3,i} = b_i u_i + \omega_i - \dot{\varphi}_{2,i}, & i \in \mathcal{N}_f. \end{cases} \quad (47)$$

由式(47),为车辆 i 设计如下主动容错控制算法:

$$u_i = u_{i,1} + (\text{sign}(\chi_i - \chi_{\text{th},i}) + 1)(u_{i,2} + u_{i,3})/2. \quad (48)$$

其中

$$\begin{cases} u_{i,1} = -k_{3,i} z_{3,i} - z_{2,i} + \dot{\varphi}_{2,i}, \\ u_{i,2} = -\bar{\omega}_i \text{sign}(z_{3,i}), \\ u_{i,3} = \frac{b_i - 1}{b_i} |u_{i,1} + u_{i,2}| \text{sign}(z_{3,i}). \end{cases} \quad (49)$$

将控制律(48)代入(47),得到

$$\begin{cases} \dot{z}_{3,i} = -k_{3,i} z_{3,i} - z_{2,i}, & i \in \mathcal{N}/\mathcal{N}_f; \\ \dot{z}_{3,i} = (b_i - 1)(u_{i,1} + u_{i,2}) - k_{3,i} z_{3,i} - z_{2,i} + \\ \quad b_i \frac{b_i - 1}{b_i} |u_{i,1} + u_{i,2}| \text{sign}(z_{3,i}) - \\ \quad \bar{\omega}_i \text{sign}(z_{3,i}) + \omega_i, & i \in \mathcal{N}_f. \end{cases}$$

进一步地,有:

1) 若 $i \in \mathcal{N}/\mathcal{N}_f$,则

$$z_{3,i} \dot{z}_{3,i} = -k_{3,i} z_{3,i}^2 - z_{2,i} z_{3,i}.$$

2) 若 $i \in \mathcal{N}_f$,则

$$\begin{aligned}
 z_{3,i} \dot{z}_{3,i} = & (b_i - 1)(u_{i,1} + u_{i,2}) z_{3,i} - k_{3,i} z_{3,i}^2 + \\
 & b_i \frac{b_i - 1}{b_i} |u_{i,1} + u_{i,2}| |z_{3,i}| - z_{2,i} z_{3,i} - \\
 & \bar{\omega}_i |z_{3,i}| + \omega_i z_{3,i} = \\
 & -k_{3,i} z_{3,i}^2 - z_{2,i} z_{3,i} - \varrho_i,
 \end{aligned}$$

其中 $\varrho_i \in \mathfrak{R}_+$.

设计如下Lyapunov函数:

$$V_i = \frac{1}{2} z_{3,i}^2 + V_{2,i}. \quad (50)$$

对式(50)求导,得到

1) 若 $i \in \mathcal{N}/\mathcal{N}_f$,则

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_i = & z_{3,i} \dot{z}_{3,i} + \dot{V}_{2,i} \leq \\
 & -(k_{1,i} - 1/2)(z_{1,i}^2 + \epsilon_{1,i}^2) - \\
 & (k_{2,i} - 1/2)(z_{2,i}^2 + \epsilon_{2,i}^2) - k_{3,i} z_{3,i}^2 + s_i. \quad (51)
 \end{aligned}$$

2) 若 $i \in \mathcal{N}_f$,则

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_i \leq & -(k_{1,i} - 1/2)(z_{1,i}^2 + \epsilon_{1,i}^2) - \\
 & (k_{2,i} - 1/2)(z_{2,i}^2 + \epsilon_{2,i}^2) - k_{3,i} z_{3,i}^2 + s_i - \varrho_i. \quad (52)
 \end{aligned}$$

选取控制增益 $k_{1,i}, k_{2,i}, k_{3,i}$,使得 $k_{1,i} - 1/2 > 0, k_{2,i} - 1/2 > 0, k_{3,i} > 0$,则有

$$\begin{cases} \dot{V}_i \leq -k_i V_i + s_i, & i \in \mathcal{N}/\mathcal{N}_f; \\ \dot{V}_i \leq -k_i V_i + s_i - \varrho_i, & i \in \mathcal{N}_f. \end{cases} \quad (53)$$

其中 $k_i = 2 \min\{k_{1,i} - 1/2, k_{2,i} - 1/2, k_{3,i}\}$.

定理2 考虑车辆队列(1),若其初始状态满足假设3以及 $V_i(0) \leq \xi_i$,则执行器故障(4)满足假设1和假设2,应用预设跟踪性能框架下的主动容错控制算法(9)、(13)以及(48),通过选取适当的参数,使得车辆队列满足:

1) 车辆队列稳定: 无论车辆队列中是否发生执行器故障,车辆队列闭环系统中所有信号都一致最终有界;

2) 车间距约束: 车辆队列中相邻两辆车间距始终处于安全性和紧凑性距离范围内,即 $d_{\text{safety}} < d_i < d_{\text{compactness}} (i \in \mathcal{N}, \forall t \geq 0)$;

3) 预设跟踪性能: 车辆队列跟踪误差在暂态和稳态下始终处于预设性能的包络范围内,即

$$-\bar{l}_i \rho_i(t) < \tilde{d}_i(t) < \bar{l}_i \rho_i(t), \quad i \in \mathcal{N}, \forall t \geq 0.$$

证明 构造如下Lyapunov函数:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (54)$$

由式(53),得到

$$\begin{aligned}
 \dot{V} \leq & -\sum_{i=1}^n k_i V_i + \sum_{i=1}^n s_i - \sum_{i \in \mathcal{N}_f} \varrho_i = \\
 & -\mathcal{K}V + \mathcal{S}. \quad (55)
 \end{aligned}$$

其中: $\mathcal{K} = \min\{k_i\}, \mathcal{S} = \sum_{i=1}^n s_i - \sum_{i \in \mathcal{N}_f} \varrho_i$. 对式(55)求解,有

$$0 \leq V \leq \left(V(0) - \frac{\mathcal{S}}{\mathcal{K}} \right) e^{-\mathcal{K}t} + \frac{\mathcal{S}}{\mathcal{K}}, \quad \forall t \geq 0. \quad (56)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e^{-\mathcal{K}t} \rightarrow 0$,闭环系统中的误差信号满足

$$|z_{1,i}| \leq \sqrt{2\mathcal{S}/\mathcal{K}}, \quad |z_{2,i}| \leq \sqrt{2\mathcal{S}/\mathcal{K}}, \quad |z_{3,i}| \leq \sqrt{2\mathcal{S}/\mathcal{K}},$$

$$|\epsilon_{1,i}| \leq \sqrt{2S/K}, |\epsilon_{2,i}| \leq \sqrt{2S/K}. \quad (57)$$

由式(57)可知,误差 $z_{1,i}$ 、 $z_{2,i}$ 、 $z_{3,i}$ 、 $\epsilon_{1,i}$ 以及 $\epsilon_{2,i}$ 一致最终有界,由式(27),跟踪误差 \tilde{d}_i 一致最终有界,由式(34)、(40)、(35)和(41),得到虚拟控制律 $\alpha_{1,i}$ 、 $\alpha_{2,i}$ 以及滤波输出 $\varphi_{1,i}$ 、 $\varphi_{2,i}$ 一致最终有界. 进一步地,由式(5)、(32)和(48)可知,车辆状态和控制输入一致最终有界. 因此,无论车辆队列中是否发生执行器故障,车辆队列保持稳定且系统中所有信号一致最终有界.

特别地,由式(56),变换误差 $z_{1,i}$ 满足

$$|z_{1,i}| \leq \sqrt{2N}, \forall t \geq 0. \quad (58)$$

其中 $N = (V(0) - S/K) \exp(-Kt) + S/K$.

由于 $f_{\text{tran},i}(z_{1,i})$ 为严格递增函数,有

$$\frac{\bar{l}_i \exp(-\sqrt{2N}) - l_i \exp(\sqrt{2N})}{\exp(-\sqrt{2N}) + \exp(\sqrt{2N})} \leq f_{\text{tran},i}(z_{1,i}) \leq \frac{\bar{l}_i \exp(\sqrt{2N}) - l_i \exp(-\sqrt{2N})}{\exp(\sqrt{2N}) + \exp(-\sqrt{2N})}, \forall t \geq 0. \quad (59)$$

显然,式(59)中: $\frac{\bar{l}_i \exp(-\sqrt{2N}) - l_i \exp(\sqrt{2N})}{\exp(-\sqrt{2N}) + \exp(\sqrt{2N})} > -l_i$, $\frac{\bar{l}_i \exp(\sqrt{2N}) - l_i \exp(-\sqrt{2N})}{\exp(\sqrt{2N}) + \exp(-\sqrt{2N})} < \bar{l}_i$, 进一步地,得到

$$-l_i < f_{\text{tran},i}(z_{1,i}) < \bar{l}_i, \forall t \geq 0. \quad (60)$$

对式(60)两边同时乘以 $\rho_i(t)$,有

$$-l_i \rho_i(t) < \tilde{d}_i(t) < \bar{l}_i \rho_i(t)$$

以及

$$d_{\text{safety}} < d_i < d_{\text{compactness}}, \forall t \geq 0$$

成立. \square

3 仿真示例

3.1 有效性验证

为了验证所提出预设跟踪性能下主动容错控制算法的有效性,采用由1辆领航车辆和5辆跟随车辆组成的车辆队列展开仿真研究. 车辆队列中车辆的初始状态设置如表1所示.

表1 车辆初始状态

车辆编号	0	1	2	3	4	5
初始位置 $p_i(0)/\text{m}$	58	50	37	28	19	8
初始速度 $v_i(0)/(\text{m/s})$	1	4	2	0	2	3
初始加速度 $a_i(0)/(\text{m/s}^2)$	0	0.1	0.5	1	0.1	0
车身长度 l_i/m	4.5	4	4.5	4.5	4	4

观测器初始观测位置 $\hat{p}(0) = [45, 40, 28, 10, 8] \text{m}$, 初始观测速度的值为 $\hat{v}(0) = [0, 0, 0, 0, 3] \text{m/s}$, 初始观测加速度的值为 $\hat{a}(0) = [1, 2, 1.1, 2, 0.01] \text{m/s}^2$. 选取故障检测算法的观测器增益 $\Gamma_i = 10 \times E$, 其中

$E \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示所有元素为1的全一矩阵. 通过求解LMI得到 P_i 为

$$P_i = \begin{bmatrix} 0.1294 & -0.0693 & -0.0436 \\ -0.0693 & 0.3116 & -0.2198 \\ -0.0436 & -0.2198 & 0.2688 \end{bmatrix}.$$

设定相邻两车间期望间距 $d^* = 5 \text{m}$, 车辆间安全约束距离 $d_{\text{safety}} = 0.05 d^* = 0.25 \text{m}$, 紧凑性约束距离 $d_{\text{compactness}} = 1.95 d^* = 9.75 \text{m}$, 则预设性能参数 $l_i = \bar{l}_i = 0.95 d^* = 4.75$. 假设车辆2在120s时发生执行器故障, $b_2 = 0.75 + 0.25 \cos(0.02t)$, $\omega_2 = 15(1 - \exp(-0.1t)) + 5 \sin(0.01t)$; 车辆3在8s发生执行器故障, $b_3 = 0.6 + 0.2 \cos(0.03t)$, $\omega_3 = 10(1 - \exp(-0.1t)) + 5 \sin(0.01t)$; 车辆5在3s时发生执行器故障, $\omega_5 = 3 \cos(0.01t)$. 控制器参数如表2所示.

表2 车辆控制器参数

控制参数	仿真数值
控制器增益	$k_{1,i} = 2, k_{2,i} = 15, k_{3,i} = 2$
滤波时间常数	$\tau_{1,i} = 0.05, \tau_{2,i} = 0.015$
性能函数参数	$\rho_{\infty,i} = 0.1, \kappa_i = 0.025$

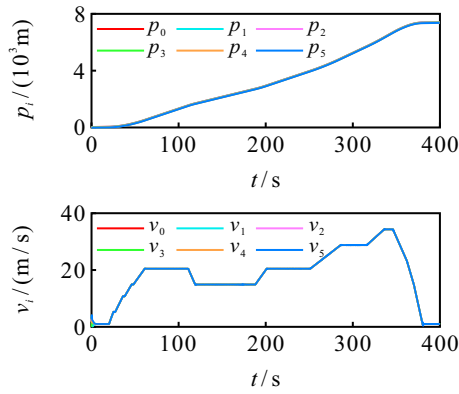
注4 由式(57)可知,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z_{i,1}$ 最终有界于 $\sqrt{2S/K}$, 通过选择适当的参数,使得 $z_{i,1}$ 任意趋近于0. 同时,在上述仿真参数设置中,通过选取 $l_i = \bar{l}_i = 0.95 d^*$, 可令 $f_{\text{tran},i}(0) = 0$, 进一步地,由式(29)可知,当变换误差 $z_{i,1} = 0$ 时,跟踪误差 $\tilde{d}_i = 0$.

设定领航车辆以市郊循环工况(NEDC)行驶,基于以上参数设置,仿真结果如图3所示.

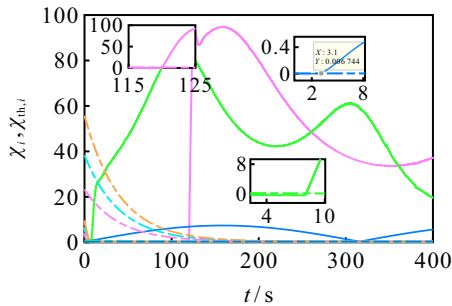
由图3(a)车辆位置和速度曲线可知,无论执行器故障与否,所提出算法均能够保证车辆队列的稳定性和跟踪性能,车辆的位置曲线没有发生重叠和交叉,表明在整个跟踪过程中没有发生车辆碰撞,验证了所提出容错控制算法能够有效保证车辆队列稳定性和安全性.

由图3(b)可见:车辆1和车辆4的残差评估函数在整个过程中均小于设置的自适应残差阈值,表明车辆无执行器故障;而车辆2、车辆3和车辆5的残差评估函数分别在120s、8.1s和3.1s时超过了对应的残差阈值,表明车辆执行器发生故障,该结果与仿真设定一致. 特别地,车辆5执行器发生的微小故障也成功检测,验证了所提出车辆队列执行器故障检测算法的有效性.

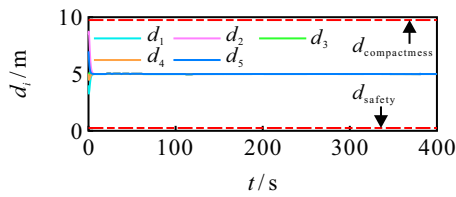
图3(c)中,无论执行器故障与否,变换误差 $z_{i,1}$ 均有界,从而保证了图3(d)所示的跟踪误差有界且始终处于预设性能的包络范围内,跟踪误差的最大超调量不超过4.75,收敛速度不低于性能函数 ρ_i 的收敛速度(如图中红色点划线所示). 同时,车辆队列中相邻两



(a) 车辆位置和速度曲线



(b) 残差评价函数和阈值曲线



(c) 车间距和转换误差曲线

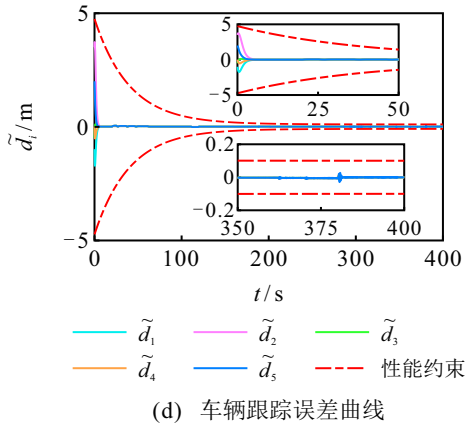


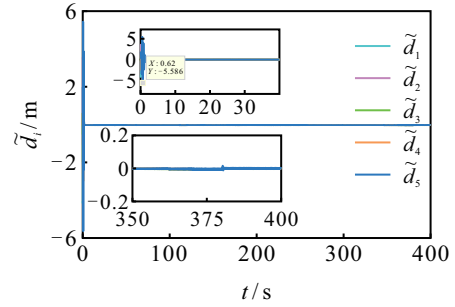
图3 仿真结果

车的车间距始终处于预设的0.25 m~9.75 m间,满足安全性和紧凑性距离约束,验证了所提出基于预设跟

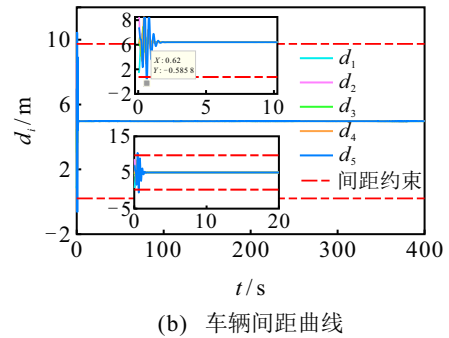
踪性能主动容错控制算法的有效型.

3.2 对比分析I

为了验证所提出预设跟踪性能下车辆主动容错控制算法的有效性,在相同仿真参数下对有无预设跟踪性能函数的车辆跟踪误差和车辆间距进行对比.设置车辆初始位置为 $p(0) = [55, 50, 37, 28, 19, 8]$,控制器增益 $k_{1,i} = 10, k_{2,i} = 15, k_{3,i} = 2$.仿真结果如图4和图5所示.

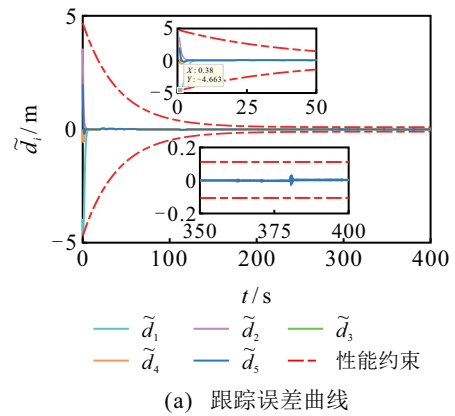


(a) 跟踪误差曲线

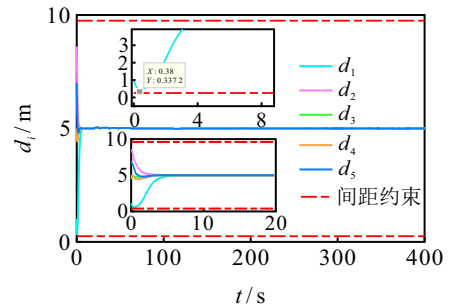


(b) 车辆间距曲线

图4 不使用预设性能下的车辆跟踪误差和间距曲线



(a) 跟踪误差曲线



(b) 车辆间距曲线

图5 预设性能下的车辆跟踪误差和间距曲线

图4中: 车辆5的跟踪误差一直保持有界, 且经过调节时间后, 跟踪误差保持较小范围. 然而, 在调节过程0.62 s时, 车辆5跟踪误差为-5.58 m, 导致其与前车间距达到-0.58 m, 即此时车辆5与前车发生了碰撞事件. 该现象与本文描述一致, 仅关注稳态误差无法满足在调节过程中队列的安全稳定要求. 图5中: 通过应用所提出预设跟踪性能控制算法, 所有车辆的跟踪误差一直处于性能函数的包络范围内. 在此约束下, 所有车辆与前车的间距均大于0, 且始终处于安全性和紧凑距离的范围内, 验证了所提出预设跟踪性能下车辆主动容错控制算法的有效性.

3.3 对比分析II

为了进一步验证所提出算法的有效性, 采用文献[12]中性能函数 $\rho_i(t) = (\rho_{0i} - \rho_{\infty i}) \exp(-\kappa_i t) + \rho_{\infty i}$, 仿真结果如图6所示. 由图6可见, 车辆跟踪误差一直处于预设的性能函数包络范围内. 然而, 车辆1与前车的车间距在0.62 s时为0.10 m, 超出了车辆安全性距离约束, 具有一定的安全隐患. 在图5中, 采用所使用的预设跟踪性能函数, 车辆1与其前车间距最小值为0.33 m, 处于车辆安全性距离约束内, 进一步验证了所提出预设跟踪性能下车辆主动容错控制算法的有效性.

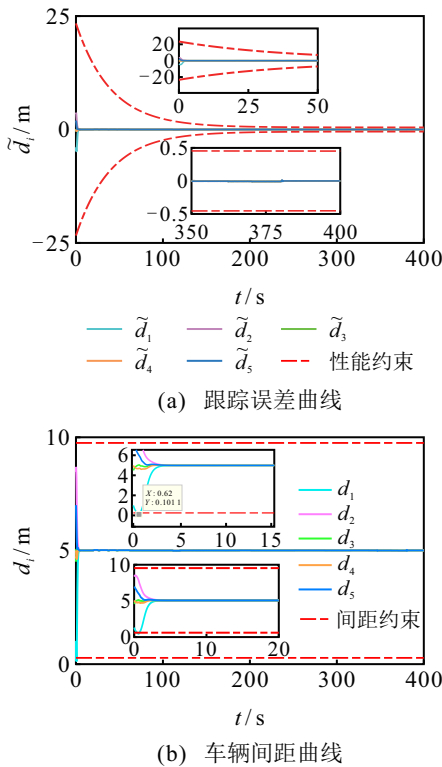


图6 文献[12]中预设性能函数下车辆跟踪误差和间距曲线

由上述仿真与对比分析可知, 所提出预设跟踪性能下的主动容错控制算法能够有效实现故障检测, 保证车辆队列稳定. 同时, 所提出算法不仅能够满足车

辆跟踪误差的暂态性能要求, 还能兼顾车辆安全性和队列紧凑性的车辆间距约束.

4 结论

本文针对具有执行器部分失效和偏移故障的车辆队列, 提出了考虑预设跟踪性能的主动容错控制算法. 首先, 基于Luenberger观测器和自适应残差阈值实现了车辆队列执行器故障检测; 然后, 基于预设跟踪性能框架的容错控制算法在实现车辆队列跟踪误差满足有界和预设性能目标的同时, 车辆间距满足安全距离和紧凑性距离约束; 最后, 通过仿真示例验证了所提出算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Loke S W. Cooperative automated vehicles: A review of opportunities and challenges in socially intelligent vehicles beyond networking[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4(4): 509-518.
- [2] 左磊, 刘小敏, 闫茂德, 等. 敏感度函数未知下的非均匀直线覆盖控制算法设计与 PLEXE 仿真[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2095-2102.
(Zuo L, Liu X M, Yan M D, et al. Nonuniform line coverage control for a group of unmanned vehicles with unknown density function and its simulation in PLEXE[J]. Control and Decision, 2021, 36(9): 2095-2102.)
- [3] 陈龙, 何德峰, 李壮. 约束非线性车辆队列分布式多目标模型预测控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3122-3128.
(Chen L, He D F, Li Z. Distributed multi-objective model predictive control for constrained nonlinear vehicle platoons[J]. Control and Decision, 2022, 37(12): 3122-3128.)
- [4] Ding S X. Advanced methods for fault diagnosis and fault-tolerant control[M]. Heidelberg: Springer, 2021.
- [5] 石怀涛, 侯马骁, 吴玉厚, 等. 基于改进观测器的故障检测方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2033-2039.
(Shi H T, Hou M X, Wu Y H, et al. Research of fault detection method based on modified observer[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 2033-2039.)
- [6] Guo G, Li P, Hao L Y. Adaptive fault-tolerant control of platoons with guaranteed traffic flow stability[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 6916-6927.
- [7] Guo G, Li P, Hao L Y. A new quadratic spacing policy and adaptive fault-tolerant platooning with actuator saturation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(2): 1200-1212.
- [8] Biron Z A, Pisu P. Distributed fault detection and estimation for cooperative adaptive cruise control system

- in a platoon[C]. Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society. San Diego, 2015: 711-716.
- [9] Zhu X D, Xia Y Q, Chai S C, et al. Fault detection for vehicle active suspension systems in finite-frequency domain[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(3): 387-394.
- [10] 王子赟, 张梦迪, 王艳, 等. 基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 2973-2981.
(Wang Z Y, Zhang M D, Wang Y, et al. Vector set inversion interval filtering based fault observer design[J]. Control and Decision, 2021, 36(12): 2973-2981.)
- [11] Guo X G, Xu W D, Wang J L, et al. Distributed neuroadaptive fault-tolerant sliding-mode control for 2-D plane vehicular platoon systems with spacing constraints and unknown direction faults[J]. Automatica, 2021, 129: 109675.
- [12] 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.
- [13] 杨泽宇, 黄晋, 胡展溢, 等. 严格避撞的车辆队列分布式鲁棒控制[J]. 汽车工程, 2020, 42(10): 1312-1319.
(Yang Z Y, Huang J, Hu Z Y, et al. Distributed robust control of vehicle platoon for strict collision avoidance[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(10): 1312-1319.)
- [14] 辛红伟, 李昊齐, 祝国强, 等. 基于自调节有限时间预设性能函数的多智能体系统动态面状态约束量化控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1319-1326.
(Xin H W, Li H Q, Zhu G Q, et al. Dynamic surface state constrained quantized control for multi-agent system with an adjustable finite-time prescribed performance function[J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1319-1326.)
- [15] Verginis C K, Bechlioulis C P, Dimarogonas D V, et al. Robust distributed control protocols for large vehicular platoons with prescribed transient and steady-state performance[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(1): 299-304.
- [16] Li D D, Guo G. Prescribed performance concurrent control of connected vehicles with nonlinear third-order dynamics[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14793-14802.
- [17] Wang J G, Luo X Y, Wong W C, et al. Specified-time vehicular platoon control with flexible safe distance constraint[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 10489-10503.
- [18] Dai Y L, Yang Y W, Zhong H M, et al. Stability and safety of cooperative adaptive cruise control vehicular platoon under diverse information flow topologies[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 4534692.
- [19] Wang J Y, Zheng H Q, Guo J H, et al. Distributed adaptive robust H_∞ control of intelligent-connected electric vehicles platooning subject to communication delay[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2021, 15(5): 699-711.
- [20] Huang D R, Li S Q, Zhang Z Y, et al. Design and analysis of longitudinal controller for the platoon with time-varying delay[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 23628-23639.
- [21] Li Y F, Chen W B, Peeta S, et al. Platoon control of connected multi-vehicle systems under V2X communications: Design and experiments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 1891-1902.

作者简介

刘小敏(1996—), 男, 博士生, 从事智能网联车辆队列控制系统故障诊断及其容错控制等研究, E-mail: xiaominliu@chd.edu.cn;

闫茂德(1974—), 男, 教授, 博士, 从事非线性控制理论及应用、自主车队建模与队形控制、交通信息集成技术等研究, E-mail: mdyan@chd.edu.cn;

杨盼盼(1985—), 男, 副教授, 博士, 从事交通信息物理融合系统、智能网联汽车队列控制等研究, E-mail: panpanyang@chd.edu.cn;

王欣芮(1999—), 女, 博士生, 从事智能网联车辆队列控制、混合交通流特性等研究, E-mail: xinruiwang@chd.edu.cn.