

保证队列稳定的非线性车辆队列无模型 分散控制

宋家成¹, 张雅楠^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘要: 针对车辆队列安全间距控制问题, 提出一种仅基于局部信息的预设性能输出反馈无模型间距分散控制算法, 实现间距误差的性能约束和速度干扰的衰减, 保证车辆队列的队列稳定性。针对车辆队列分离或合并点头车的速度自主控制, 设计一种预设性能无模型速度控制算法, 实现车辆队列分离后子车队的自主巡航、与多个车辆队列稳定合并的一体化控制。仿真结果验证了所提无模型分散控制算法的有效性、灵活性及车辆队列系统的队列稳定性保证能力。
关键词: 汽车电子与智能化技术; 非线性车辆队列; 队列稳定性; 无模型控制; 分散控制; 预设性能控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1671-5497(2026)08-2249-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250038

String stability and model free decentralized control for nonlinear vehicle platoon

SONG Jia-cheng¹, ZHANG Ya-nan^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To maintain a safe distance between adjacent vehicles in a vehicle platoon, a prescribed performance output feedback model-free decentralized control algorithm based solely on local information is proposed. This algorithm ensures that distance control errors are constrained within a preset range, speed disturbances are attenuated, and string stability is guaranteed. Additionally, a prescribed performance model-free speed control algorithm was designed to address the autonomous speed control problem of the leading vehicle during the separation or merging of vehicle platoon. This algorithm can achieve the integrated control of autonomous cruise of sub-fleets after vehicle platoon separation and stable merging of multiple vehicle platoons. The simulation results have verified the effectiveness, flexibility, and ability to assure string stability of the proposed model-free decentralized control algorithm for nonlinear vehicle platoon systems.

收稿日期: 2025-01-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA1000303); 中央高校基本科研业务费项目(Z1090122053, Z1090124102); 陕西省博士后一等项目(2023BSHYDZZ63).

作者简介: 宋家成(1993-), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 智能网联车辆队列控制. E-mail: jiacheng.song@nwafu.edu.cn

Key words: automotive electronics and intelligent technology; nonlinear vehicle platoon; string stability; model free control; decentralized control; prescribed performance control

0 引言

为优化高速公路交通流,并通过减少空气阻力来降低能耗,车辆队列已成为智能交通系统的重要研究方向之一^[1,2],主要方式是通过设计车辆自动控制器使得车辆队列在较小的间距内安全运行^[3,4]。车辆队列控制的经典研究多数集中在车辆队列分散控制技术上,即商用成功的自适应巡航技术^[5,6]。随着智能交通的发展,对车辆队列控制提出了“车辆队列稳定”要求,主要表现为控制误差在车辆队列传播时不会放大。特别是,领头车的减速不应导致“幽灵堵车”,即每辆跟随车的减速幅度都会比前一辆车大一些,车辆队列最终停滞不前^[7]。然而,对于线性的车辆模型,现有技术仅使用局部信息和固定间距策略,无法保证车辆队列稳定^[8]。

为解决该问题,部分学者引进额外通信,提出了基于分布式控制的车辆队列控制技术^[9-11]。文献[12]将车辆队列控制问题转化为领航-跟随一致性问题,设计了一种分布式线性控制器,并证明了车辆队列系统的队列稳定性;文献[13]考虑了通信拓扑变化下的车辆队列控制问题,提出了一种分布式模型预测控制算法,并证明了车辆队列系统的范数队列稳定性;文献[14]考虑了随机干扰下的车辆队列控制问题,提出了一种分布式随机模型预测控制算法,旨在提升控制器的鲁棒性。然而,以上研究均需要建立车辆精确的动力学模型,对于异构车辆及车辆的非线性与不确定性,算法的鲁棒性不足。

为此,基于数据驱动的非模型控制技术被应用于车辆队列控制^[15,16]。文献[17]将非线性车辆模型转化为线性数据模型,提出一种基于数据驱动的分布式车辆队列控制算法;文献[18]研究了具有拒绝服务攻击的非线性车辆队列的数据驱动控制问题,提出一个无模型自适应车辆队列控制框架,并将该框架推广至文献[19],结合动态事件触发控制技术,研究了传感器故障条件下车辆队列无模型自适应车辆队列容错控制问题。然而,上述研究均需要构建基于数据的车辆线性等效模型,引入等效模型的参数自适应律;同时,由于通

信拓扑结构的变化影响车辆队列系统的队列稳定性,上述基于分布式技术的车辆队列控制均仅针对车辆队列保持控制,鲜有考虑车辆队列分离、合并等问题。

综上,车辆队列控制设计的现实问题和需求是:①车辆具有非线性特性及不确定性干扰,建模困难;②控制器的设计尽可能采用局部信息;③车辆队列控制器需具有可靠性、灵活性,不仅要实现车辆队列保持,还要实现车辆的合并与分离。

本文研究异构非线性车辆队列控制问题,旨在构建一种能保证车辆队列系统的队列稳定性,且能够实现灵活分离与合并的无模型分散控制方法。

符号定义: $\mathbf{R}_{\geq 0}=[0, \infty)$; $\|x\|$ 表示 $x \in \mathbf{R}^n$ 的欧几里得范数; L^∞ 表示有界函数 $f(\bullet)$ 在某区间的勒贝格测度空间; $\mathcal{W}^{1,\infty}$ 表示具有 k 阶连续导数函数的索伯列夫空间。

1 问题描述

1.1 车辆动力学模型

考虑由 N 辆非线性异构车辆组成纵向行驶的车辆队列系统(如图 1 所示),描述为 $N=\{0, 1, i, \dots, N\}$, 车辆的动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t); \\ m_i \dot{v}_i(t) = u_i(t) - f_i(t, x_i(t), v_i(t)) + d_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i(t) \in \mathbf{R}$ 和 $v_i(t) \in \mathbf{R}$ 分别表示第 i 辆车的位置和速度; m_i 表示第 i 辆车的质量,其值可变,车辆队列异构; $d_i(t) \in L^\infty(\mathbf{R}_{\geq 0}, \mathbf{R})$ 为有界干扰(描述建模误差、系统不确定性和噪音);非线性项 $f_i(t, x_i(t), v_i(t))$ 表示车辆受到的坡道阻力、风阻和滚动阻力之和,具体形式为:

$$f_i(t, x_i(t), v_i(t)) = F_{i,g}(x_i) + F_{i,a}(t, x_i, v_i) + F_{i,r}(v_i) \quad (2)$$

式中: $F_{i,g}: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}, x_i \mapsto m_i g \sin \theta_i(x_i)$

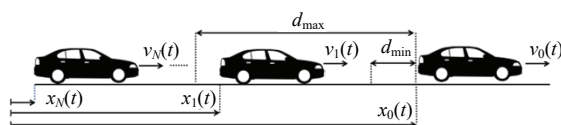


图 1 车辆队列结构

Fig. 1 Vehicle platoon structure

$$F_{i,a}: \mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R} \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R},$$

$$(t, x_i, v_i) \mapsto \frac{1}{2} \rho_i(t, x_i) C_{i,d} A_i \operatorname{sgn}(v_i) v_i^2$$

$$F_{i,r}: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}, v_i \mapsto m_i g C_{i,r} \operatorname{sgn}(v_i)$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ 为重力加速度; } \theta_i(x_i) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$$

和 $\rho_i(t, x_i)$ 分别表示第 i 辆车在 t 时刻 x_i 位置的道路坡度和空气密度(有界); $C_{i,d}$ 、 $C_{i,r}$ 和 A_i 分别表示第 i 辆车的空气阻力系数、滚动阻力系数和的迎风面积; u_i 表示第 i 辆车的控制输入, 其物理意义为车辆与路面接触产生的力, 该力由发动机提供。

由于不连续的滚动阻力不利于控制器的设计和稳定性分析, 本研究采用平滑误差函数逼近 $F_{i,a}$ 和 $F_{i,r}$ 中的 $\operatorname{sgn}(v_i)$ 函数, 具体形式为:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt, z \in \mathbf{R} \quad (3)$$

式中: 对于所有的 z , 存在 $\lim_{a \rightarrow \infty} \operatorname{erf}(az) = \operatorname{sgn}(z)$ 。

因此, 车辆的风阻和滚动阻力可建模为:

$$F_{i,a}: \mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R} \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R},$$

$$(t, x_i, v_i) \mapsto \frac{1}{2} \rho_i(t, x_i) C_{i,d} A_i \operatorname{erf}(\alpha v_i) v_i^2$$

$$F_{i,r}: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}, v_i \mapsto m_i g C_{i,r} \operatorname{erf}(\alpha v_i)。$$

对于式(1)的车辆动力学模型, 初始状态为:

$$x_i(0) = x_i^0 \in \mathbf{R}, v_i(0) = v_i^0 \in \mathbf{R}, x_i^0 < x_{i-1}^0 \quad (4)$$

式中: $x_0^0 = x_0(0) \in \mathbf{R}$ 表示车辆队列中领航者的初始位置, 领航者具有已知的位置轨迹 $x_0 \in C^2(\mathbf{R}_{\geq 0}, \mathbf{R})$, 其速度定义为 $v_0 := \dot{x}_0$ 。

构建上述模型仅用来分析系统稳定性及实验数据的更新, 任何模型信息不包含在控制算法中, 控制算法仅依赖于传感器测得的车辆状态数据, 因此, 所设计的控制算法为无模型算法。

1.2 控制目标

1.2.1 车辆队列保持控制目标

O1: 保证任何相邻两辆车之间的安全距离;
O2: 保证车辆队列的队列稳定性; O3: 应为仅基于被控车辆局部信息的分散控制。

首先, 为实现控制目标(O1), 假设给定了所需的最小安全距离 $d_{\min} > 0$ 和所需的车辆最大距离 $d_{\max} > 0$, 构造车辆间距约束条件为:

$$\forall i = 1, \dots, N, \forall t \geq 0: \\ d_{\min} < x_{i-1}(t) - x_i(t) < d_{\max} \quad (5)$$

若控制算法能使式(5)中的间距约束条件得

以控制, 则控制目标(O1)将能够保证实现。上述间距误差未考虑车身长度的原因在于: ① 车身长度为固定值, 在设计控制算法时, 对其求导为零, 不影响算法设计和系统的稳定性证明; ② 车辆间距通常由测距雷达测得, 无需考虑车身长度。

其次, 针对控制目标(O2)和“幽灵堵车”现象, 给出车辆队列系统队列稳定性概念。

定义1(车辆队列速度稳定性) 将领航车辆的速度曲线 v_0 视为干扰, 若其他车辆 $i = 1, 2, \dots, N$ 的速度 v_i 均匀地与 v_0 成线性有界关系, 且与车辆队列的车辆数 N 无关(避免“幽灵堵车”现象), 同时, 允许存在偏移量, 该偏移量在车辆 i 和 N 中同样均匀, 定义这一特性为车辆队列速度稳定性, 具体形式为:

$$\exists C_1, C_2 > 0,$$

$$\forall N \in \mathbf{N} \forall i = 1, 2, \dots, N, \forall v_0 \in L^\infty(\mathbf{R}_{\geq 0}, \mathbf{R}):$$

$$\|v_i\| \leq C_1 + C_2 \|v_0\|_\infty \quad (6)$$

推论1(车辆队列的队列稳定性) 若式(6)满足, 对于车辆速度跟踪误差 $v_{i+1} - v_i$, 给定任意 $\epsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$ 使得:

$$\|v_{i+1}(0) - v_i(0)\| < \delta \Rightarrow \sup_{t \in [0, \infty)} \|v_{i+1}(t) - v_i(t)\| \leq \epsilon \quad (7)$$

若式(7)成立, 则称该车辆队列具有队列稳定性。

推论2(车辆队列的强队列稳定性) 若式(7)满足, 对于车辆跟踪跟踪误差 $v_{i+1} - v_i$, 存在

$$\frac{\|v_{i+2}(t) - v_{i+1}(t)\|}{\|v_{i+1}(t) - v_i(t)\|} \leq 1 \quad (8)$$

若式(8)成立, 则称该车辆队列具有强队列稳定性。

对于具有非线性动力学特性的车辆系统(1), 队列速度稳定性的定义仅根据 v_0 对 v_i 进行线性估计, 原因是 $F_{i,a}$ 引起的非线性部分总具有一个减速效应, 因此总会更好地满足队列稳定性条件。

最后, 为实现目标(O3), 对于车辆 i , 本文所设计的控制器仅包含瞬时测量的距离 $x_{i-1}(t) - x_i(t)$ 、车辆速度 $v_i(t)$ 和相对速度 $v_{i-1}(t) - v_i(t)$ 。上述3个量均为局部信息, 可通过传感器测量得到。除了测量数据外, 控制器无需确切包含车辆的任何信息(模型、参数或者初始值)。

1.2.2 车辆队列合并与分离控制目标

车辆队列的合并与分离(统称分合点)表示有

新车或新的车辆队列加入现有队列,或者车辆队列中某一辆车及其后向车辆脱离车辆队列。为此,分合点处的车辆控制包含:①分合点处头车的自适应巡航阶段;②新的车辆队列保持阶段。具体任务为 O4:分合点处头车的自适应巡航阶段,如果该车距离前方车辆队列较远,或者发出分离请求时,控制器仅需要使其按照期望的速度 $v_r(t)$ 运行;O5:当自适应巡航车辆向车辆队列发出加入请求,且自身状态满足车辆队列保持控制所需的初始条件时,切换为车辆队列保持控制。

2 车辆队列保持无模型分散控制

2.1 无模型分散控制算法设计

为实现控制目标(O1)~(O3)。定义相邻车辆间距与最小安全距离的间距误差:

$$\xi_i(t) = x_i(t) - x_{i-1}(t) + d_{\min} \quad (9)$$

根据控制目标(O1)和(O2)可知,第 i 与 $i-1$ 辆车的距离须满足 $d_{\min} < x_{i-1}(t) - x_i(t) < d_{\max}$, 即 $-M < \xi_i(t) < 0$, M 定义为:

$$M = d_{\max} - d_{\min} \quad (10)$$

为了刻画车辆安全性,引入变量:

$$\omega_i(t) = v_i(t) - v_{i-1}(t) - \frac{1}{\xi_i(t)} - \frac{1}{M + \xi_i(t)} \quad (11)$$

由于 $-M < \xi_i(t) < 0$, 所以 $\omega_i(t)$ 具有以下特性: ① 当 $\xi_i(t) \nearrow 0$ 时, $\omega_i(t) \rightarrow \infty$; ② 当 $\xi_i(t) \searrow -M$ 时, $\omega_i(t) \rightarrow -\infty$ 。 $\nearrow$ 表示单调递增, $\searrow$ 表示单调递减。由于 $\omega_i(t)$ 刻画了安全性,必须保证其有界性,因此,引入预设性能函数:

$$S_{\phi_i} = \{(t, \omega_i) \in \mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R} \mid |\omega_i| < \phi_i\} \quad (12)$$

式中: ϕ_i 归属于可允许变化的预设边界集合。

$$\Phi = \left\{ \phi_i \in \mathcal{W}^{\infty}(\mathbf{R}_{\geq 0}, \mathbf{R}) \mid \begin{cases} \phi_i(t) > 0 \forall t \geq 0, \\ \liminf_{t \rightarrow \infty} \phi_i(t) > 0 \end{cases} \right\} \quad (13)$$

若 $(t, \omega_i(t)) \in S_{\phi_i}$, 则(O1)将得以实现。

为实现控制目标(O2),结合固定时间间隔策略固有的衰减干扰能力,定义误差变量:

$$e_i(t) = \xi_i(t) + \lambda_i v_i(t) \quad (14)$$

具体而言,如果 $e_i(t)$ 是常数,则 $\dot{e}_i(t) = 0$, 进而得到:

$$\dot{v}_i(t) = -\frac{1}{\lambda} v_i(t) + \frac{1}{\lambda} v_{i-1}(t) \quad (15)$$

对式(15)进行拉普拉斯变换,可得:

$$\frac{V_i(s)}{V_{i-1}(s)} = \frac{1}{1 + \lambda s} < 1, \lambda > 0 \quad (16)$$

式(16)表明了领航车速度的干扰如何通过车辆队列进行衰减,从而保证车辆队列稳定性。

进而,设计第 i 辆车的控制律为:

$$u_i(t) = -k_{i,1}(v_i(t) - v_{i-1}(t)) - k_{i,2}e_i(t) - k_{i,3}\omega_i(t) \quad (17)$$

式中: $k_{i,1} > 0$ 和 $k_{i,2} > 0$ 为控制增益; $k_{i,3} = \frac{1}{(\phi_i(t) - |\omega_i(t)|)}$ 为基于预设性能函数 $\phi_i(t)$ 的时变控制增益。

综上,车辆队列分散控制器(O3)为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i(t) = x_i(t) - x_{i-1}(t) + d_{\min} \\ e_i(t) = \xi_i(t) + \lambda_i v_i(t) \\ \omega_i(t) = v_i(t) - v_{i-1}(t) - \frac{1}{\xi_i(t)} - \frac{1}{M + \xi_i(t)} \\ k_{i,3} = \frac{1}{(\phi_i(t) - |\omega_i(t)|)} \\ u_i(t) = -k_{i,1}(v_i(t) - v_{i-1}(t)) - k_{i,2}e_i(t) - k_{i,3}\omega_i(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中控制器的参数满足:

$$\begin{cases} d_{\max} > d_{\min} > 0 \\ M = d_{\max} - d_{\min} \\ \lambda, k_{i,1}, k_{i,2} > 0, \phi_i \in \Phi \end{cases} \quad (19)$$

由(18)可知,所设计的车辆队列分散控制器仅依赖于被控车辆及其前车的速度 v_i, v_{i-1} 以及两车之间的距离 $x_{i-1}(t) - x_i(t)$ 。因此,车辆队列无模型分散控制律可简写为:

$$u_i(t) = U(t, x_{i-1}(t) - x_i(t), v_i(t), v_{i-1}(t)) \quad (20)$$

需要注意的是 $\phi_i(t) \in \Phi$ 是控制器(18)中重要的参数,由设计者自行选择。根据预设边界集合的定义可知,对于任意的 $t > 0$, 存在 $\mu > 0$ 使 $\phi_i(t) \geq \mu$ 。一般情况下,尽管 $\phi_i(t)$ 无需单调递减,但通常选择以下形式:

$$\phi_i(t) = \alpha e^{-\beta t} + \gamma, \alpha \geq 0, \beta > 0, \gamma > 0 \quad (21)$$

所设计的分散控制律(18)在闭环微分方程中引入了几个潜在的奇点,例如, $\xi_i(t) = 0, \xi_i(t) = -M$ 和 $|\omega_i(t)| = \phi_i(t)$ 。为了说明所设计的控制器能够满足控制目标(O1),确保车辆队列的安全运行,需要证明闭环系统潜在奇点不存在,且任何解均满足: ① $-M < \xi_i(t) < 0$, 即 $d_{\min} < x_{i-1}(t) - x_i(t) < d_{\max}$; ② $|\omega_i(t)| < \phi_i(t)$ 。

2.2 车辆队列分散控制闭环系统稳定性分析

定义2 对于一个包含 N 辆车的车辆队列,若车辆队列的初始状态(4)成立, (x, v) 局部绝对连续, $(x, v) = (x_1, \dots, x_N, v_1, \dots, v_N): [0, w) \rightarrow \mathbf{R}^{2N}$ 称为由式(1)和式(18)组成闭环系统的解, $w \in (0, \infty]$ 。如果对于 $[0, w)$, (x, v) 没有同解的右扩展,则称 (x, v) 为最大解。

为了便于稳定性分析,依据车辆队列的物理规则 and 实际需求做如下假设。

假设1 对于车辆队列中的所有车辆 $i = 1, 2, \dots, N$, θ_i 和 ρ_i 是连续的。同时,当 $t \geq 0$ 且 $x \in \mathbf{R}$ 时,对于所有的车辆存在 $\bar{h} > 0, \bar{\rho} > 0$ 和 $\bar{m} > 0$,使 $|F_{i,g}(x) + F_{i,d}(t, x, v) + F_{i,r}(v)| \leq \bar{h}$, $m_i \leq \bar{m}, 0 \leq \frac{1}{2} \rho_i(t, x) C_{i,d} A_i \leq \bar{\rho}$ 。

假设2 领航者的位置轨迹 $x_0 \in C^2$ 能使其速度 $v_0: = \dot{x}_0$ 和加速度 $\dot{v}_0$ 有界。此外,存在常数 $\delta > 0$,对于车辆队列中所有的车辆 $i = 1, 2, \dots, N$,使 $-M + \delta \leq \xi_i(0) \leq -\delta$ 和 $|\omega_i(0)| \leq \xi_i(0) - \delta$ 。另外,对于车辆队列中所有的车辆 $i = 1, 2, \dots, N$,车辆初始速度的边界为 $|v_i(0)| \leq \frac{M}{\lambda}$ 。

$$D := \left\{ (t, x, v) \in \mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R}^N \times \mathbf{R}^N \left| \begin{array}{l} d_{\min} < x_0(t) - x_1(t) < d_{\max}, d_{\min} < x_{i-1}(t) - x_i(t) < d_{\max}, \\ \left| v_i - v_0 - \frac{1}{x_1 - x_0 + d_{\min}} - \frac{1}{x_1 - x_0 + d_{\max}} \right| < \phi_1(t), \\ \left| v_i - v_{i-1} - \frac{1}{x_i - x_{i-1} + d_{\min}} - \frac{1}{x_i - x_{i-1} + d_{\max}} \right| < \phi_i(t), \\ i = 2, 3, \dots, N \end{array} \right. \right\} \quad (22)$$

所定义的集合 D 是 $\mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R}^N \times \mathbf{R}^N$ 的相对开集,同时,根据假设2可知, D 中包含点 $0, x(0), v(0)$ 。该定义可理解为集合 D 是与车辆队列中任意相邻两车相关性能函数的交集。定义函数 $g: D \rightarrow \mathbf{R}^{2N}$

$$g(t, x, v) = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_N \\ \mathcal{U}(t, x_1 - x_0, v_1, v_0) - f_1 + d_1 \\ \vdots \\ \mathcal{U}(t, x_N - x_{N-1}, v_N, v_{N-1}) - f_N + d_N \end{pmatrix} \quad (23)$$

进而,式(1)与式(18)构成的闭环系统描述为:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{v}(t) \end{pmatrix} = g(t, x(t), v(t)) \quad (24)$$

定理1 考虑具有式(1)所描述非线性动力学特性和初始条件式(4)的包含 N 辆车的异构车辆队列系统,其中 $x_0 \in C^2(\mathbf{R}_{\geq 0}, \mathbf{R})$ 为领航者的位置,其速度定义为 $v_0: = \dot{x}_0$ 。若假设1和假设2满足,则将所设计的控制器(18)和控制参数(19)应用于式(1)中生成闭环系统的解存在,且每个解可以扩展为一个最大解,即 $(x, v) = (x_1, \dots, x_N, v_1, \dots, v_N): [0, w) \rightarrow \mathbf{R}^{2N}, w \in (0, \infty]$ 。该解具有以下特性:

① 存在全局解,即, $w = \infty$;

② 当 $t \geq 0$ 时,对于所有的车辆 $i = 1, 2, \dots, N$,存在与车辆编号 i 和车辆队列的长度 N 无关的参数 $\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$,使 $-M + \epsilon_1 \leq \xi_i(t) \leq -\epsilon_1, |\omega_i(t)| \leq \xi_i(t) - \epsilon_2$;

③ 对于所有的车辆,满足

$$\|u\|_{\infty} \leq \frac{M}{\lambda} + \frac{1}{\lambda k_{i,2}} \left(\frac{\|\phi_i\|_{\infty}}{\epsilon_2} + \bar{h} \right) + \left(\frac{k_{i,1}}{k_{i,2} + \lambda k_{i,2}} \right)^i \|u_0\|_{\infty};$$

④ 对于所有的车辆, v_i 和 u_i 有界,且与车辆编号 i 和车辆队列的长度 N 无关。

证明

步骤1 最大解的存在性证明。

定义集合 D :

$f_1, f_2, \dots, f_N$ 连续,干扰满足 $d_i(t) \in L^{\infty}(\mathbf{R}_{\geq 0}, \mathbf{R})$,可以推导出 g 在 t 中可测量,局部可积,且在 (x, v) 中是连续的。因此,根据常微分方程理论可知,存在一个最大解,即 $(x, v): [0, w) \rightarrow \mathbf{R}^{2N}, w \in (0, \infty]$ 。此外,根据最大性, (x, v) 的闭包不是 D 的紧子集。

步骤2 $-M + \epsilon_1 \leq \xi_i(t) \leq -\epsilon_1$ 证明。

定义与编号 i 和车辆队列长度 N 无关的参数 ϵ_1 :

$$\epsilon_1 := \left(\|\phi\|_{\infty} + \frac{1}{\delta} \right)^{-1} < \delta \quad (25)$$

式中: δ 与假设2中定义相同。

利用反证法证明对车辆队列中所有车,当 $t \in [0, w)$ 时存在 ϵ_1 满足 $-M + \epsilon_1 \leq \xi_i(t) \leq -\epsilon_1$ 。

假设存在 $t_1 \in [0, w)$,使 $\xi_i(t_1) < -M + \epsilon_1$ 。

根据假设 2, 则存在:

$$t_0 = \max \{t \in [0, t_1] \mid \xi_i(t) = -M + \epsilon_1\}$$

进而, 可以推导出:

$$\xi_i(t) \leq -M + \epsilon_1 < -M + \delta \leq -\delta$$

根据 $|\omega_i(t)| < \phi_i(t)$, 可以推导出:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i(t) &= v_i(t) - v_{i-1}(t) = \omega_i(t) + \frac{1}{\xi_i(t)} + \\ &\frac{1}{M + \xi_i(t)} \geq -\|\phi_i\|_\infty - \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\epsilon_1} = 0 \quad (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{m_i}{2} \frac{dv_i(t)^2}{dt} &= v_i(t)(u_i(t) - f_i(t, x_i(t), v_i(t)) + d_i(t)) \leq -\bar{h}|v_i(t)| - k_{i,1}(v_i(t) - v_{i-1}(t))v_i(t) - \\ &k_{i,2}e_i(t)v_i(t) - k_{i,3}\omega_i(t)v_i(t) + \bar{d}|v_i(t)| \leq -(k_{i,1} + \lambda_i k_{i,2})v_i(t)^2 + \\ &\{\bar{d} + k_{i,2}M + k_{i,3}\phi_i(t) + k_{i,1}|v_{i-1}(t)|\}|v_i(t)| \quad (28) \end{aligned}$$

进一步, 可以得出:

$$\begin{aligned} \forall t \in [0, w): |v_i(t)| &\leq \max \left\{ |v_i(t)|, \right. \\ &\left. \frac{\bar{d} + k_{i,2}M + k_{i,3}\phi_i(t) + k_{i,1}|v_{i-1}(t)|}{k_{i,1} + \lambda_i k_{i,2}} \right\} \quad (29) \end{aligned}$$

3a: 首先, 对于第 1 辆车, 证明存在 $\hat{\epsilon}_{2,1}$, 使得 $|\omega_1(t)| < \phi_1(t) - \hat{\epsilon}_{2,1}$ 适用于所有的 $t \in [0, w)$ 。

选择 $\phi \geq \phi_i, i = 1, \dots, N$, 并定义 $\chi = \inf_{t \geq 0} \phi(t)$, 并

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d\omega_1(t)^2}{dt} &= \omega_1(t) \left(\dot{v}_1(t) - \dot{v}_0(t) + \dot{\xi}_1(t) \left(\frac{1}{\xi_1(t)^2} + \frac{1}{(M + \xi_1(t)^2)} \right) \right) \\ \omega_1(t) &\left(-\frac{k_{1,1}}{m_1}(v_1(t) - v_0(t)) - \frac{k_{1,2}}{m_1}(\xi_1(t) + \lambda_1 v_1(t)) - \frac{k_{1,3}(t)}{m_1}\omega_1(t) + \frac{(d_1 - f_1(t, x_1, v_1))}{m_1} - \right. \\ &\left. \dot{v}_0(t) + \left(\omega_1(t) + \frac{1}{\xi_1(t)} + \frac{1}{M + \xi_1(t)} \right) \left(\frac{1}{\xi_1(t)^2} + \frac{1}{(M + \xi_1(t)^2)} \right) \right) \stackrel{\text{Step 2}}{\leq} \\ &- \left(\frac{k_{1,1}}{m_1} + \frac{\lambda_1 k_{1,2}}{m_1} + \frac{1}{m_1 \hat{\epsilon}_{2,1}} - \frac{2}{\epsilon_1^2} \right) \omega_1(t)^2 + |\omega_1(t)| \left(\left(\frac{k_{1,1}}{m_1} + \frac{\lambda_1 k_{1,2}}{m_1} \right) \frac{2}{\epsilon_1} + \frac{k_{1,2}}{m_1} M + \right. \\ &\left. \frac{\lambda_1 k_{1,2}}{m_1} |v_0(t)| + |\dot{v}_0(t)| + \frac{\bar{h}}{m_1} + \frac{\bar{\rho}}{m_1} \left(\|\phi\|_\infty + \frac{2}{\epsilon_1} + |v_0(t)| \right)^2 + \frac{4}{\epsilon_1^3} \right) \quad (30) \end{aligned}$$

选择 $k_{1,2}$ 使 $k_{1,1} + \lambda_1 k_{1,2} \geq \frac{2m_1}{\epsilon_1^2}$ 。由于 v_0 和 $\dot{v}_0$

有界, 且 $|\omega_1| \geq \frac{\chi}{2}$, 可知, 存在常数 $b_1, b_2 > 0$, 使:

$$\forall t \in [t_0, t_1]: \frac{d\omega_1(t)^2}{2dt} / \omega_1(t) \leq \frac{\chi}{2m_1 \hat{\epsilon}_{2,1}} + k_{1,2}b_1 + b_2,$$

式中: $b_1 = \frac{\lambda_1}{m_1} \frac{2}{\epsilon_1} + \frac{1}{m_1} M + \frac{\lambda_1}{m_1} |v_0(t)|$;

可知 $\xi_i(t_0) \leq \xi_i(t_1)$, 至此, 得到矛盾的结果:

$$-M + \epsilon_1 = \xi_i(t_0) \leq \xi_i(t_1) < -M + \epsilon_1 \quad (27)$$

因此, 反证出, 存在 $\epsilon_1 = \left(\|\phi\|_\infty + \frac{1}{\delta} \right)^{-1}$ 使

$$-M + \epsilon_1 \leq \xi_i(t) < -\epsilon_1。$$

步骤 3 $|\omega_i(t)| \leq \xi_i(t) - \epsilon_2$ 证明。

对 v_i 的范围进行估计, 当 $t \in [0, w)$ 时, 推

导出:

$$\text{选择 } \hat{\epsilon}_{2,1} \leq \min \left\{ \delta, \frac{\chi}{2} \right\}。$$

假设存在 $t_1 \in [0, w)$ 使 $|\omega_1(t_1)| > \phi(t_1) -$

$\hat{\epsilon}_{2,1}$, 根据假设 2, 则存在:

$$t_0 = \max \{t \in [0, t_1] \mid |\omega_1(t)| = \phi(t) - \hat{\epsilon}_{2,1}\}$$

进而, 对于 $t \in [t_0, t_1]$, 存在

$$|\omega_1(t)| > \phi(t) - \hat{\epsilon}_{2,1} \geq \frac{\chi}{2}, k_{1,3} = \frac{1}{\phi(t) - |\omega_1(t)|} \geq \frac{1}{\hat{\epsilon}_{2,1}}$$

在 $t \in [t_0, t_1]$ 范围内, 进行如下计算

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{k_{1,1}}{m_1} \frac{2}{\epsilon_1} + |\dot{v}_0(t)| + \frac{\bar{h}}{m_1} + \frac{\bar{\rho}}{m_1} \left(\|\phi\|_\infty + \frac{2}{\epsilon_1} + |v_0(t)| \right)^2 + \frac{4}{\epsilon_1^3}。 \\ &|v_0(t)| \end{aligned}$$

选择 $\hat{\epsilon}_{2,1} \leq \frac{2m_1}{\chi} (k_{1,2}b_1 + b_2 + \|\phi\|_\infty)^{-1}$ 可得:

$$\begin{aligned} |\omega_1(t_1)| - |\omega_0(t_0)| &= \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) / 2 |\omega_1(t)| dt \leq \\ &\int_{t_0}^{t_1} \|\dot{\phi}\| dt \leq \phi(t_1) - \phi(t_0) \end{aligned} \quad (31)$$

式(31)所得到的结论与假设条件 $\hat{\epsilon}_{2,1} = |\omega_1(t_0)| - \phi(t_0) \geq |\omega_1(t_1)| - \phi(t_1) > \hat{\epsilon}_{2,1}$ 矛盾。因此,对于第 1 辆车, $|\omega_1(t)| \leq \xi_1(t) - \epsilon_2$ 得以证明。

3b: 对于车辆队列中的第 $i=2, 3, \dots, N$ 辆车,证明存在 $\hat{\epsilon}_{2,i}$, 使 $|\omega_i(t)| < \phi(t) - \hat{\epsilon}_{2,i}$ 适用于所有的 $t \in [0, w)$ 。在 step3a 中,第 2 条特性中的观点对于 $i=1$ 得以证明,借助归纳法,对于 $i \in \{2, \dots, N\}$, 假设第 i 辆车之前的车 $j=2, \dots, i-1$, 第 2 条中的观点同样适用。特别是,当 $\hat{\epsilon}_{2,i-1} \leq \hat{\epsilon}_{2,i-2} \leq \dots \leq \hat{\epsilon}_{2,1}$ 和 $|\omega_j(t)| \leq \phi(t) - \hat{\epsilon}_{2,i-1}$, 根据式(29)可以推导出

$$\begin{aligned} \forall t \in [0, w): |v_{i-1}(t)| &\leq \\ \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \omega_i(t)^2 &\stackrel{\text{Step2}}{\leq} - \left(\frac{k_{i,1}}{m_i} + \frac{\lambda k_{i,2}}{m_i} + \frac{1}{m_i \hat{\epsilon}_{2,i}} - \frac{2}{\epsilon_1^2} \right) \omega_i(t)^2 + |\omega_i(t)| \left(\left(\frac{k_{i,1}}{m_i} + \frac{\lambda k_{i,2}}{m_i} \right) \frac{2}{\epsilon_1} + \frac{k_{i,1}}{m_{i-1}} \left(\|\phi\|_{\infty} + \frac{2}{\epsilon_1} \right) \right. \\ &\quad \left. + k_{i,2} M \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_{i-1}} \right) + \lambda k_{i,2} |v_{i-1}(t)| \left| \frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_{i-1}} \right| + \frac{\phi(t)}{m_{i-1} \hat{\epsilon}_{2,i-1}} + 2\bar{h} \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_{i-1}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\bar{\rho}}{m_i} \left(\|\phi\|_{\infty} + \frac{2}{\epsilon_1} + |v_{i-1}(t)| \right)^2 + \frac{\bar{\rho}}{m_{i-1}} |v_{i-1}(t)|^2 + \frac{4}{\epsilon_1^3} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

结合 $k_{i,1} + \lambda_1 k_{i,2} \geq \frac{2m_i}{\epsilon_1^2}$ 和式(32),可推导出,存在 $l_1, l_2, l_3, l_4 > 0$, 使得:

$$\begin{aligned} \forall t \in [t_0, t_1]: \frac{d\omega_1(t)}{2dt} / |\omega_1(t)| &\leq - \frac{\phi(t) - \hat{\epsilon}_{2,i}}{m_i \hat{\epsilon}_{2,i}} + \\ &\frac{\phi(t)}{m_{i-1} \hat{\epsilon}_{2,i-1}} + \frac{\phi(t)}{\hat{\epsilon}_{2,i-1}} \left| \frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_{i-1}} \right| + \frac{l_1}{m_i k_{i,2} \hat{\epsilon}_{2,i-1}} + \\ &\frac{l_2}{m_i k_{i,2}^2 \hat{\epsilon}_{2,i-1}^2} + \frac{k_{i,2}}{m_i} l_3 + \frac{l_4}{m_i} \end{aligned} \quad (35)$$

对于(35),存在足够小的 $\hat{\epsilon}_{2,i}$, 使 $\frac{d}{dt} \omega_i(t)^2 / (2|\omega_i(t)|) \leq -\|\dot{\phi}\|_{\infty}$, 与 3a 相同,该结论反证出, $|\omega_i(t)| \leq \xi_i(t) - \epsilon_2$ 。

综合 3a 和 3b 的结果,定理中的特性 2 得以证明。

步骤 4 $w = \infty$ 证明。假设 $w < \infty$, 考虑步骤 2 和步骤 3, 可以得出解 (x, v) 是 D 的紧子集, 与步骤 1 矛盾。因此, $w = \infty$ 得证。

$$\max \left\{ \frac{M}{\lambda}, \frac{\bar{h} + k_{i-1,2} M + \frac{\phi(t)}{\hat{\epsilon}_{2,i-1}} + k_{i-1,1} |v_{i-2}(t)|}{k_{i-1,1} + \lambda k_{i-1,2}} \right\} \quad (32)$$

式中: $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ 。进而可得:

$$\begin{aligned} \forall t \in [0, w): |v_{i-1}(t)| &\leq \frac{M}{\lambda} + \frac{\bar{h}}{\lambda k_{i,2}} + \frac{\phi(t)}{\lambda k_{i,2} \hat{\epsilon}_{2,i-1}} + \\ &\left(\frac{k_{i,1}}{k_{i,2} + \lambda k_{i,2}} \right)^i \|v_0\| \end{aligned} \quad (33)$$

接下来,选择 $\hat{\epsilon}_{2,i} \leq \hat{\epsilon}_{2,i-1} \leq \hat{\epsilon}_{2,1} \leq \min \left\{ \delta, \frac{\chi}{2} \right\}$ 。

利用反证法进行证明,假设存在 $t_1 \in [0, w)$ 使 $|\omega_i(t_1)| > \phi(t_1) - \hat{\epsilon}_{2,i}$ 。根据假设 2, 则存在:

$$t_0 := \max \{ t \in [0, t_1) \mid |\omega_i(t)| = \phi(t) - \hat{\epsilon}_{2,i} \}$$

进而,对于 $t \in [t_0, t_1]$, 存在

$$|\omega_i(t)| \geq \phi(t) - \hat{\epsilon}_{2,i}, k_{i,3} = \frac{1}{\phi(t) - |\omega_i(t)|} \geq \frac{1}{\hat{\epsilon}_{2,i}}$$

与 3a 相同,在 $t \in [t_0, t_1]$ 范围内,存在:

步骤 5 车辆队列的队列稳定性(特性③)证明。根据式(33)可知,其满足车辆队列的速度稳定性的定义(6)。因此,车辆队列的速度队列稳定性得证。

进而,可推导出:

$$\begin{aligned} |v_{i+1}(t)| - |v_i(t)| &\leq \frac{1}{\lambda k_{i+2,2}} \bar{h} - \frac{1}{\lambda k_{i+1,2}} \bar{h} + \\ &\frac{\phi(t)}{\lambda k_{i+2,2} \hat{\epsilon}_{2,i+1}} - \frac{\phi(t)}{\lambda k_{i+1,2} \hat{\epsilon}_{2,i}} + \left(\frac{k_{i+2,1}}{k_{i+2,2} + \lambda k_{i+2,2}} \right)^{i+2} \times \\ &\|v_0\| - \left(\frac{k_{i+1,1}}{k_{i+1,2} + \lambda k_{i+1,2}} \right)^{i+1} \|v_0\| \end{aligned} \quad (36)$$

若选取 $k_{i+2,1} = k_{i+1,1} = k_1, k_{i+2,2} = k_{i+1,2} = k_2$, 且车辆速度均为正,则有:

$$\begin{aligned} |v_{i+1}(t) - v_i(t)| &= |v_{i+1}(t)| - |v_i(t)| \leq \\ &(\mathcal{K}^{i+2} - \mathcal{K}^{i+1}) \|v_0\| \end{aligned} \quad (37)$$

式中: $\mathcal{K} = \frac{k_1}{k_2 + \lambda k_2}$, 满足队列稳定性的定义(7)。

因此,车辆队列的速度队列稳定性得证。

进一步,可以推导出:

$$\frac{|v_{i+1}(t) - v_i(t)|}{|v_i(t) - v_{i-1}(t)|} \leq \frac{\mathcal{K}^{i+2} - \mathcal{K}^{i+1}}{\mathcal{K}^{i+1} - \mathcal{K}^i} \quad (38)$$

可通过参数选取 $\mathcal{K} \leq 1$, 使得:

$$\frac{|v_{i+1}(t) - v_i(t)|}{|v_i(t) - v_{i-1}(t)|} \leq 1 \quad (39)$$

式(39)满足车辆队列的强队列稳定性的定义(8)。因此,车辆队列的强队列稳定性得证。

步骤 6 v_i 和 u_i 的有界性证明。根据步骤 5 和假设 2 中 v_0 的有界性,可以得出 v_i 有界且与 i 和 N 无关。由于 ξ_i 被 M 限定, $k_{i,3}$ 被 $1/\epsilon_2$ 限定,其与 i 和 N 无关,因此可以推导出 u_i 的有界性。

3 车辆队列合并与分离无模型控制

由定理 1 可知,所设计的车辆队列保持控制器与车辆队列中车辆的数量无关,仅与被控车辆及其前车的局部信息有关,因此车辆队列合并与分离可以转化为分合车辆的控制(控制目标 O4~O5)。

3.1 车辆队列分合处头车速度无模型控制设计

若某车辆队列距离前方车辆队列较远,或者现有车辆队列中某车辆及其跟随车辆分离现有车辆队列时,其头车控制器仅需要使其按照期望的速度 $v_r(t)$ 运行。在该阶段,车辆模型(1)中的第一个方程可以忽略,因为其不影响系统的输入-输出特性,系统模型简化为一阶微分方程:

$$m_c \dot{v}_c(t) = u_c(t) - f_c(t, x_c(t), v_c(t)) + d_c(t) \quad (40)$$

式中: $m_c(t)$ 、 $v_c(t)$ 、 $x_c(t)$ 、 $d_c(t)$ 、 $u_c(t)$ 分别表示分合处头车的质量、速度、位置、干扰及控制输入。

此时,控制器的目标是对车辆一阶非线性模型(40)设计速度控制器,使其按照期望的速度 $v_r(t) \in W^{1,\infty}(\mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R})$ 运行。但是,为了使车辆队列稳定地合并或者分离,需对其速度误差 $e_v(t) = v_c(t) - v_r(t)$ 进行约束,使其在预设的范围 $S_{\phi_v} = \{(t, e_v(t)) \in \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R} \mid \phi_v(t) |e_v(t)| < 1\}$ 内演化,其中 ϕ_v 属于:

$$\Phi_v := \{\phi_v \in W^{1,\infty}(\mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}) \mid \phi_v(s) > 0\}, s > 0$$

因此,基于头车速度控制的车辆队列合并与分离控制器设计为:

$$u_c(t) = -k_v(t) \alpha_v(\phi_v(t) |e_v(t)|) e_v(t) \quad (41)$$

式中: $\alpha_v(s) = \frac{1}{1-s^2}$, 且初始状态满足,对于一阶

非线性系统(40)与控制器(41)构成闭环系统的稳定性证明与定理 1 相似,不再赘述。

3.2 车辆队列合并、分离与保持无模型一体化控制

上述内容已经设计出车辆队列保持控制算法和车辆队列分合处头车速度控制算法,本部分给出车辆队列保持、分离与合并无模型一体化控制算法。

算法 1 车辆队列合并、分离与保持无模型一体化控制算法

Result: 所有车辆的位置、速度等信息

Data: 车辆队列长度、所有车辆的基本参数、初始状态信息、控制参数等

Initialization

while (1) do

1. 车辆队列每一辆车采用编队保持控制器(18)自动运行;

if 发出分离请求且 $v_r(t) - v_c(t)$

then

1. 该车采用速度控制器(41)

2. 其他车辆继续采用队列保持控制器(18)自动运行;

else

拒绝分离

end

if 新车与车辆队列之间满足

$-M + \delta \leq \xi_i(0) \leq -\delta$,

$|\omega_i(0)| < \xi_i(0) - \delta, |v_i(0)| \leq \frac{M}{\lambda}$

then

1. 新车采用队列保持控制器(18);

else

拒绝合并

end

end

4 仿真示例

4.1 有效性验证

为验证所提出的车辆队列保持、分离与合并无模型分散控制算法有效性,采用由 8 辆车组成的车辆队列展开仿真研究。

参数设置:如表 1 所示。

场景设置:假设车辆队列运行包含 3 个阶段,车辆队列保持-车辆队列分离-车辆队列合并。

(1) 8 辆车的初始状态满足车辆队列保持控制约束条件,验证所设计队列保持算法的有效性。

(2) 第 10 s,倒数第 4 辆车发出分离请求,并设定 $v_r(t) = 25 + \sin(3t)$, $\phi_v(t) = (6e^{-0.2t} + 0.1)^{-1}$ 。

(3) 第 40 s,倒数第 4 辆车设定 $v_r(t) = 35$,

表 1 车辆编队控制参数		
Table.1 Vehicle platoon control parameters		
参数类别	值	单位
m_i	$1\,500 + (-1)^i \times 300$	kg
ρ_i	1.30	kg/m ³
$C_{i,d}$	0.32	—
$C_{i,r}$	0.01	—
A_i	2.40	m ²
$\theta_i(x_i)$	0	rad
$x_i(0)$	$8 \times 4 - (i-1) \times 4$	m
$v_i(0)$	$20 + (-1)^i \times 3$	m/s
$d_{\min}$	2	m
$d_{\max}$	7	m
M	5	—
$k_{i,1}$	9\,000	—
$k_{i,2}$	9\,000	—
λ_i	0.1	—
$\phi_i(t)$	$2e^{2t} + 0.1$	—

$$\phi_v(t) = (15e^{-0.2t} + 0.1)^{-1}.$$

仿真结果:图 2 给出了仿真结果,0~10 s,车辆队列属于队列保持阶段,每一辆车与其前车的距离保持在预设的安全范围内(2~7 m),未发生碰撞,车辆队列中每辆车的速度趋于一致。第 10 s 开始,第 5 辆车及其后向车辆分离车辆队列,且 $v_r(t) < v_{c-1}(t)$,由图 2(a)可以看出,两个车辆队列的间距

$x_3 - x_4$ 逐渐放大,但是从图 2(a)的子图可以看出,新生成的两个车辆队列均保持稳定的车辆队列运行,相邻两辆车的距离均控制在预设的范围内。另外,从图 2(b)的子图可以看出,分合处的头车(第 5 辆车)由于采用速度无模型控制,即使在期望速度 $v_r(t)$ 频繁变化的情况下,其运行速度仍能被限制在预设的演化范围内。第 40 s 开始,第 5 辆车的期望速度 $v_r(t)$ 变大,且 $v_r(t) > v_{c-1}(t)$,由图 2 可以看出,在保证两个子队列稳定的基础上,两个车辆队列的间距 $x_3 - x_4$ 逐渐减小,同时,第 5 辆车的速度仍能被限制在预设的演化范围内。第 75 s 开始,从图 2(a)看出,落后的车辆队列追赶上前向车辆队列,两个车辆队列满足合并要求,此时,第 5 辆车切换为车辆队列保持控制,从图 2(b)可以看出,其运行速度与前向车辆队列趋向一致。

仿真分析:不管车辆队列分离还是合并,新的车辆队列内部的距离一直被控制在期望的范围内,且新的车辆队列中车辆的速度满足队列稳定性条件。这说明所设计的算法对车辆队列结构的变化具有很强的鲁棒性。同时,由于算法仅基于采样数据,对车辆质量,运行阻力环境参数,不确定干扰等因素的变化同样具有很强的鲁棒性。

4.2 车辆队列稳定性及灵活性验证

为进一步说明所设计算法的队列稳定性及扩展能力,在有效性验证实验的基础上,将车辆队列的长度提升至 40 辆车,参数设置与场景设置不变,仿真结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,即使领航车减速,40 辆车组成的车辆队列可以保证车辆队列速度稳定性,避免“幽灵堵车”,保证车辆队列稳定,控制效果几乎不受车辆数量增加的影响。相比于 8 辆车,车辆队列速度稳定的时间稍长,但也符合实际现象。因此,所设计的算法在车辆队列的保持、分离与合并上具有良好的灵活性。

4.3 对比验证

为验证所提算法优势,本文在 4.1 节的基础上,将 10 s~40 s 之间的分合点处头车的速度控制算法改为 PID 算法,通过对比仿真验证本文算法在严格保证误差范围演化约束上的优势。

仿真结果如图 4 所示,图 4(a)虽然保证了安全间距,但是从图 4(b)可以看出,10 s 后,第 4 辆车及其后车分离现有车队时,分合点处车辆的速度曲线无法严格限定在预设范围内,说明了本文算法在暂态过程控制的优势。

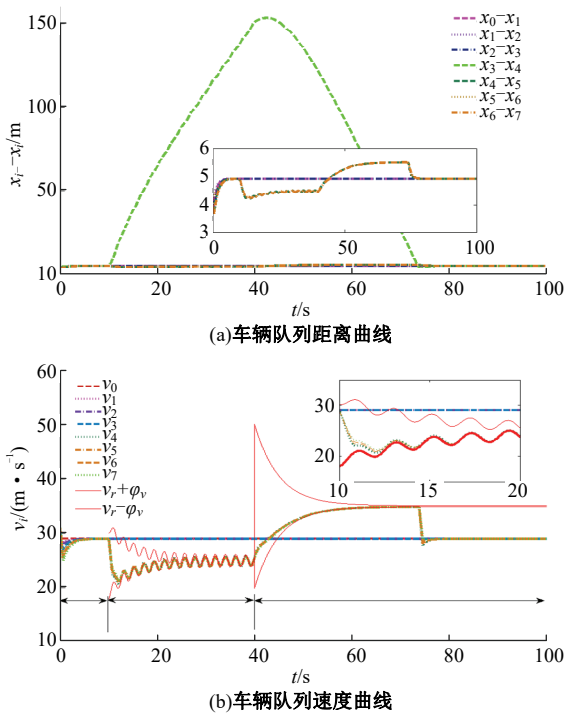


图 2 算法有效性分析仿真结果

Fig. 2 Algorithm effectiveness analysis simulation results

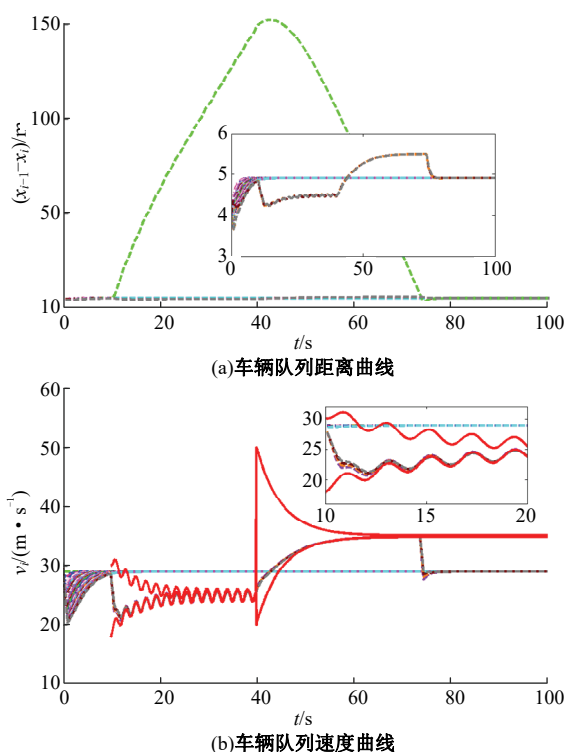


图 3 算法队列稳定性及灵活性验证仿真结果

Fig. 3 Simulation results of string stability and flexibility

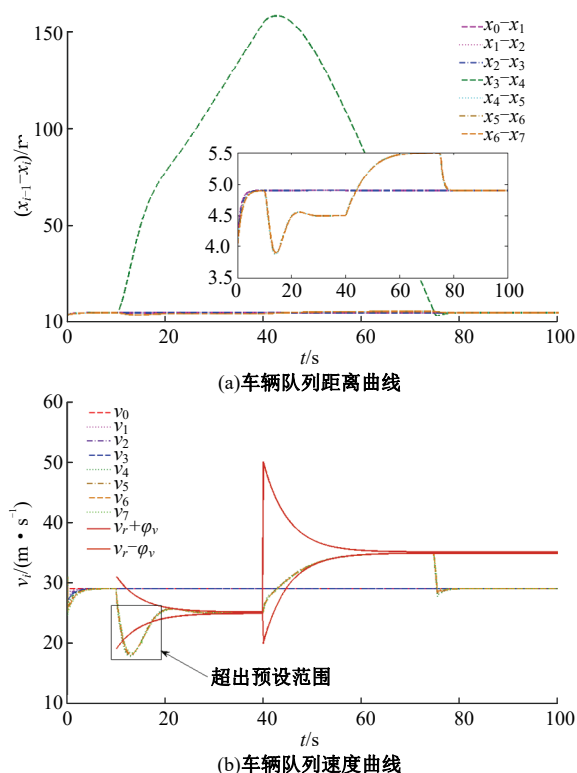


图 4 PID 算法仿真结果

Fig. 4 Simulation results of PID

5 结束语

本文分别设计车辆队列保持安全间距分散控

制算法、车辆队列分离或合并处头车自主控制算法,以及车辆队列保持、分离与合并控制切换策略,实现车辆队列保持、车辆队列分离后子车队的自主巡航以及多个车辆队列稳定合并的一体化控制。所设计的算法能够保证车辆队列的队列稳定性,且均仅采用被控车辆的局部信息,无需车辆的精确模型。通过 8 辆车组成的车辆队列仿真结果验证了所设计的控制算法能有效实现车辆队列保持、分离与合并。通过 40 辆车组成的车辆队列验证了所设计算法对车辆队列系统队列稳定性的保证以及算法在车辆队列扩展上的灵活性。通过 PID 对比实验验证了所设计算法在暂态性能保证方面的优势。

参考文献:

- [1] 李永福,周发涛,黄龙旺,等. 基于深度强化学习的网联车辆队列纵向控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1879-1887.
Li Yong-fu, Zhou Fa-tao, Huang Long-wang, et al. Longitudinal control of connected vehicle platoon based on deep reinforcement learning[J]. Control and Decision, 2024, 39(6): 1879-1887.
- [2] Li Q W, Chen Z W, Li X P. A review of connected and automated vehicle platoon merging and splitting operations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 22790-22806.
- [3] 何德峰,周丹,罗捷. 跟随式车辆队列高效协同弦稳定预测控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(3): 726-734.
He De-feng, Zhou Dan, Luo Jie. Efficient cooperative predictive control of predecessor-following vehicle platoons with guaranteed string stability[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(3): 726-734.
- [4] 郭戈,张忍永康,杨冬琪,等. 网联车辆有限时间分布式轨迹优化和协同控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2355-2363.
Guo Ge, Zhang Ren-yongkang, Yang Dong-qi, et al. Finite-time distributed trajectory optimization and collaborative control of connected vehicle platoon[J]. Control and Decision, 2023, 38(8): 2355-2363.
- [5] 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 Jia-cheng, Yan Mao-de, Yang Pan-pan, et al. Robust backstepping adaptive cruise control based on data-driven[J]. Journal of Zhejiang University (Engi-

- neering Science), 2022, 56(3): 485-493.
- [6] Zhang Y N, Song J C. Model-free robust backstepping adaptive cruise control[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2023(1): 8839650.
- [7] Vegamoor V K, Darbha S, Rajagopal K R. A review of automatic vehicle following systems[J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2019, 99: 567-587.
- [8] Wijnbergen P, Besselink B. Existence of decentralized controllers for vehicle platoons: on the role of spacing policies and available measurements[J]. Systems & Control Letters, 2020, 145: 104796.
- [9] Feng S, Zhang Y, Li E S B, et al. String stability for vehicular platoon control: definitions and analysis methods[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47: 81-97.
- [10] Zhang H, Liu J, Wang Z P, et al. Distributed adaptive event-triggered control and stability analysis for vehicular platoon[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(3): 1627-1638.
- [11] Chen J Z, Liang H, Li J, et al. Connected automated vehicle platoon control with input saturation and variable time headway strategy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(8): 4929-4940.
- [12] Chen Y Z, Yan B Z. Vehicle platoon control based on third-order heterogeneous model and predictive spacing strategy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 4458-4469.
- [13] Wang P W, Deng H, Zhang J, et al. Model predictive control for connected vehicle platoon under switching communication topology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 7817-7830.
- [14] Zhang P Y, Zhou J S, Tian D X, et al. Stability of sampled-data systems with application to networked control systems[C]//Proc of the Int'l ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications. Montreal Quebec: ACM, 2023: 77-83.
- [15] Zhu P P, Jin S T, Bu X H. Distributed data-driven control for a connected autonomous vehicle platoon subjected to false data injection attacks[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(4): 7527-7538.
- [16] Weng Y F, Salehi R, Ge X Y, et al. Model-free speed management for a heterogeneous platoon of connected ground vehicles[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020, 26(2): 183-197.
- [17] Ma Y S, Che W W, Deng C, et al. Data-driven distributed vehicle platoon control for heterogeneous nonlinear vehicle systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(3): 2373-2381.
- [18] Yue B, Che W W. Data-driven resilient platooning control for vehicular platooning systems with denial-of-service attacks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32: 7099-7112.
- [19] Yue B, Che W W. Data-driven dynamic event-triggered fault-tolerant platooning control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(7): 8418-8426.