

非线性车辆队列系统的分布式自适应控制

钟 斌, 王兴虎, 盛 捷

(中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230027)

摘要: 研究了车辆队列系统的分布式自适应控制问题. 车辆的纵向动力学建模为含有不确定参数的二阶非线性模型, 队列中车辆之间的信息传递拓扑关系采用有向图来刻画. 首先, 结合动态增益技术, 提出了不依赖全局队列信息的分布式自适应控制器. 然后, 进一步分析了内部车辆驶离或者外部车辆汇入队列的实际情况. 只要有向拓扑结构包含以领航车辆作为根节点的生成树, 则不需要重新设计控制器, 就能够维持新的队列结构稳定. 最后, 数值仿真验证了控制算法的有效性.

关键词: 车辆队列; 分布式控制; 自适应控制; 动态增益技术; 参数不确定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.07.009

引用格式: 钟斌, 王兴虎, 盛捷. 非线性车辆队列系统的分布式自适应控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(7): 588-594.

ZHONG Bin, WANG Xinghu, SHENG Jie. Distributed adaptive control of nonlinear vehicular platoons [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(7): 588-594.

Distributed adaptive control of nonlinear vehicular platoons

ZHONG Bin, WANG Xinghu, SHENG Jie

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The distributed adaptive control problem of vehicular platoon is considered. The vehicle longitudinal dynamics is modeled by a second-order nonlinear model with uncertain parameters. And the directed graph is used to describe the relationship of information transmission between vehicles. By utilizing dynamic gain technique, a distributed adaptive controller independent of the global platoon information is proposed. Moreover, when the split/join maneuver happens, it is shown that the control objective can be reached without redesigning the distributed controller as long as the interaction graph contains a directed spanning tree with the leading vehicle as the root. The numerical simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control law.

Key words: vehicular platoon; distributed control; adaptive control; dynamic gain technique; parameter uncertainties

0 引言

近年来,随着交通堵塞和道路事故发生的频率

不断增高,车辆队列系统逐渐引起了研究人员的广泛关注.这是因为车辆队列行驶能够显著地提高道路的通行效率、降低燃料消耗和尾气排放以及增强

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2019-06-15

基金项目: 统筹推进世界一流大学和一流学科建设专项资金(YD2100002002)资助.

作者简介: 钟斌, 男, 1992年生, 硕士研究生, 研究方向: 车辆队列分布式控制. E-mail: binz@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 王兴虎, 博士/副研究员. E-mail: xinghuw@ustc.edu.cn

驾驶安全性. 队列控制目标是使所有车辆按相同速度且保持期望的紧凑跟车间距协同行驶^[1-3].

研究表明, 车辆间信息流拓扑结构对实现队列行驶目标有重要影响. 早期的队列研究所涉及的信息流拓扑结构较为简单, 如前车跟随式、前车-领航者跟随式和双向跟随式^[4-7]. 目前, 队列中出现了更加多样化的信息流传递方式, 如双向-领航者跟随式和多前车跟随式等^[8-9]. 这种车辆间更丰富的信息交互意味着队列系统具有更好的鲁棒性和可扩展性, 因此有学者考虑从多自主体系统的角度出发, 利用图的概念来建模车辆间的信息流拓扑. 文献[10]考虑将车辆队列问题看作多自主体系统的分布式控制问题, 证明了确保队列行驶目标的充要条件是领航车辆的状态信息可以被所有跟随车辆直接获得. 文献[11]研究了无向信息流拓扑结构和多前车跟随式拓扑结构对队列系统稳定性的影响. 基于代数图论、矩阵分析和 Routh-Hurwitz 判据, 得到了线性分布式控制器增益需要满足的条件.

注意到, 现有的研究工作大多基于反馈线性化的方法, 将非线性车辆纵向动力学转化为线性模型研究队列控制问题. 该方法的缺点是需要已知系统的动力学参数. 实际车辆行驶中, 不可避免地出现各种不确定性, 且文献[10-11]所设计的控制器是依赖于某些全局队列信息, 如队列规模和信息流拓扑 Laplacian 矩阵. 当队列结构发生改变时, 原控制器将无法满足要求, 从而造成队列波动, 甚至破坏队列结构.

为了克服上述控制方法存在的不足, 本文研究在一般有向信息流拓扑结构下, 考虑存在参数不确定性的非线性车辆队列自适应控制问题. 结合动态增益技术, 设计了不依赖于任何全局队列信息的分布式自适应控制器. 另外, 本文还分析了队列中发生内部车辆驶离或外部车辆汇入后, 只要有向信息流拓扑结构包含以领航车辆作为根节点的生成树, 原分布式自适应控制器依然能够维持新的队列以期望间距稳定行驶的情况. 最后, 仿真结果验证了控制器设计的有效性.

1 问题描述

考虑一个行驶在平直道路上的车辆队列系统, 如图 1 所示.

车辆的纵向动力学本质上是强非线性的. 根据文献[12-13], 将车辆纵向动力学建模为

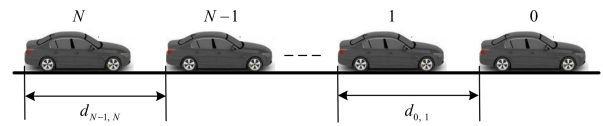


图 1 车辆队列系统

Fig.1 Platoon of vehicles

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= \frac{\eta}{mr} u_i - \frac{C_A}{m} v_i^2, \quad i = 0, 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $[s_i, v_i]^T \in \mathbb{R}^2$ 是第 i 辆车的状态, s_i 为位置, v_i 为速度, $u_i \in \mathbb{R}$ 是控制输入. m 是车辆质量, η 是传动系统的机械效率, r 是轮胎半径, C_A 是空气阻力系数, g 是重力加速度, f 是滚动阻力系数. 令 $\omega := [m, \eta, r, C_A, g, f]^T \in \mathbb{W}$ 表示不确定参数向量, 且 $\mathbb{W} \subset \mathbb{R}^6$ 是一个未知的紧集. 图 1 所示的队列中共有 $N+1$ 辆车, 包括一个领航车辆 (编号记为 0) 和 N 个跟随车辆 (编号记为 1 ~ N). 参考文献[10-11]对队列系统(1), 用有向图 $G := \{V, E, A\}$ 来描述车辆间的信息传递拓扑关系, 其中 $V := \{0, 1, 2, \dots, N\}$ 为图的节点 (车辆) 集, $E \subset V \times V$ 为图的边集且图中没有自环, $A = [a_{ij}]_{i,j=0}^N$ 为图相应的邻接矩阵. 邻接矩阵的元素 $a_{ij} \geq 0$, 如果节点 i 可以获得节点 j 的信息, 即 $(j, i) \in E$, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. 令 $N_i := \{j \in V \mid a_{ij} = 1\}$ 为节点 i 的邻居节点集合. 有向图对应的拉普拉斯矩阵记为 $L = [l_{ij}]_{i,j=0}^N$, 其中 $l_{ii} = \sum_{j=0}^N a_{ij}, l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j$. 在有向图 G 中, 如果除了一个节点 (称为根节点) 以外, 每个节点都有且仅有一个父节点, 即从根节点到其他任意节点都有一条有向路径, 则此有向图称为一棵有向生成树.

在车辆队列中, 领航车辆描绘了整个队列的参考运动轨迹, 并且最终趋于匀速行驶. 队列行驶的目标如下:

$$\left. \begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |v_i(t) - v_0(t)| &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |s_{i-1}(t) - s_i(t) - d_{i-1,i}| &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $i = 1, \dots, N, d_{i-1,i}$ 是第 $i-1$ 辆车和第 i 辆车间的期望间距. 本文采用固定车间距策略, 意味着所有的车辆维持一个固定的队形并跟踪领航车辆行驶轨迹. 不失一般性, 假设 $d_{i-1,i} = d_0$. 从图 1 中可以看出 d_0 包含了车身的长度.

对于每个 $i = 1, \dots, N$, 定义

$$\left. \begin{aligned} \bar{s}_i &:= s_i - s_0 - id_0 \\ \bar{v}_i &:= v_i - v_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

表示第 i 辆车与其期望轨迹之间的跟踪误差. 由于该跟踪误差信息无法直接应用于控制器设计. 在实际队列行驶中, 根据车辆间的信息流拓扑结构, 每个跟随车辆 i 仅可以获得其与邻居车辆的相对状态信息, 即

$$\left. \begin{aligned} s_{mi} &:= \sum_{j \in N_i} (s_i - s_j - (i - j)d_0) \\ v_{mi} &:= \sum_{j \in N_i} (v_i - v_j) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

接下来, 描述本文的队列控制问题如下.

问题 1.1 (车辆队列控制问题) 对于车辆队列系统(1), 设计如下形式的分布式自适应控制器

$$\begin{aligned} u_i &= f_{u_i}(k_i, s_{mi}, v_{mi}), \\ \dot{k}_i &= f_{k_i}(k_i, s_{mi}, v_{mi}), \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

使得对任意的初始状态 $s_i(0), v_i(0)$ 和任意的不确定性 $\omega \in \mathbb{W}$, 队列闭环系统的解在时间区间 $[0, +\infty)$ 上存在, 并且跟踪误差满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\bar{s}_i(t), \bar{v}_i(t)]^T = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

为了进行后面的分析, 我们需要两个假设.

假设 1.1 有向图 G 包含一个以领航车辆为根节点的有向生成树.

移除有向图 G 对应的拉普拉斯矩阵 L 的第一行和第一列, 可以得到一个 $N \times N$ 的子矩阵, 用 H 表示. 由文献[14]可知, 如果有向信息流拓扑结构满足假设 1.1, 那么矩阵 H 的所有特征值都具有正实部, 并且存在一个正定对角矩阵 $R = \text{diag}(r_1, \dots, r_N)$, 使得矩阵

$$I - RH - H^T R \quad (7)$$

是负定的.

假设 1.2 领航车辆的速度 v_0 和控制输入 u_0 都是有界的.

假设 1.1 表明存在有向路径可以从领航车辆到达任意跟随车辆, 这意味着所有的跟随车辆都能够直接或间接地获取领航车辆的状态信息. 注意到假设 1.1 被广泛用于多自主体系统的分布式控制研究中^[15-18], 且从实际的角度来看, 假设 1.2 同样是合理的. 不失一般性, 假定存在常数 $h > 0$, 有

$$|v_0| \leq h, \quad |u_0| \leq h \quad (8)$$

2 主要结论

首先, 我们给出车辆队列控制问题 1.1 的解, 设计出不依赖于任何全局队列信息的分布式自适应控制器. 然后, 分析队列中出现车辆驶离或汇入情

形时, 设计的控制器依然能够维持新的队列以期望间距稳定行驶.

2.1 分布式自适应控制器设计

为了便于叙述, 令

$$\left. \begin{aligned} \bar{s} &:= [\bar{s}_1, \dots, \bar{s}_N]^T, \quad s_m := [s_{m1}, \dots, s_{mN}]^T \\ \bar{v} &:= [\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_N]^T, \quad v_m := [v_{m1}, \dots, v_{mN}]^T \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据式(3)和式(4), 可得

$$s_m = H\bar{s}, \quad v_m = H\bar{v} \quad (10)$$

式中, 在假设 1.1 的条件下, 矩阵 H 是非奇异的. 因此, 式(6)等价于

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\|s_m(t)\| + \|v_m(t)\|) = 0 \quad (11)$$

基于式(4), 我们将车辆队列系统在坐标系 $(s_{mi}, v_{mi}), i = 1, \dots, N$ 上重写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_{mi} &= v_{mi} \\ \dot{v}_{mi} &= \omega_1 \sum_{j=0}^N a_{ij} (u_i - u_j) + \Omega_i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中,

$$\omega_1 = \frac{\eta}{mr} > 0, \quad \omega_2 = \frac{C_A}{m} > 0,$$

$$\Omega_i = -\omega_2 \sum_{j=0}^N a_{ij} (v_i^2 - v_j^2).$$

不难看出, 如果找到一个控制器使得闭环系统(12)在平衡点 $(s_m, v_m) = (0, 0)$ 处的镇定问题得到解决时, 则该控制器可以解决问题 1.1.

在给出结论之前, 定义

$$\left. \begin{aligned} \bar{s}_{mi} &= s_{mi} \\ \bar{v}_{mi} &= v_{mi} + 2\bar{s}_{mi} \\ i &= 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

并且令 $\bar{s}_m := [\bar{s}_{m1}, \dots, \bar{s}_{mN}]^T, \bar{v}_m := [\bar{v}_{m1}, \dots, \bar{v}_{mN}]^T$.

定理 2.1 对于车辆队列系统(1), 在假设 1.1 和假设 1.2 的条件下, 分布式自适应控制器

$$\begin{aligned} u_i &= -k_i c (1 + \bar{v}_{mi}^2)^3 \bar{v}_{mi} - h \text{sgn}(\bar{v}_{mi}), \\ \dot{k}_i &= (1 + \bar{v}_{mi}^2) \bar{v}_{mi}^2, \quad k_i(0) \geq 1, \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $c \geq 1$ 为任意常数, $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数, 能够解决问题 1.1.

证明 首先, 考虑子系统 s_{mi} . 定义

$$V(\bar{s}_m) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \bar{s}_{mi}^2 \quad (15)$$

可以发现, 沿着系统(12)和(14)的轨迹, 对上式求得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^N \bar{s}_{mi} (\bar{v}_{mi} - 2\bar{s}_{mi}) \leq \\ & - \sum_{i=1}^N \bar{s}_{mi}^2 + \sum_{i=1}^N \bar{v}_{mi}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

其次, 考虑子系统 v_{mi} . 定义

$$\begin{aligned} W(\bar{v}_m, \tilde{k}) = & \sum_{i=1}^N 2\omega_1 k_i r_i \int_0^{\bar{v}_{mi}} (1+s)^3 ds + \\ & \frac{\epsilon}{2} \omega_1^2 \sum_{i=1}^N \tilde{k}_i^2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $\tilde{k} := [\tilde{k}_1, \dots, \tilde{k}_N]^T$, $\tilde{k}_i = k_i - \bar{k}_i$, \bar{k}_i 为待定正常数, r_i 由式(7)中矩阵 R 给出, ϵ 为待定正常数. 存在 K_∞ 函数

$$\left. \begin{aligned} \underline{\alpha}_1(\|\bar{v}_m, \tilde{k}\|) &= l_1 \|\bar{v}_m, \tilde{k}\|^2 \\ \bar{\alpha}_1(\|\bar{v}_m, \tilde{k}\|) &= l_2(\|\bar{v}_m, \tilde{k}\|^2 + \|\bar{v}_m, \tilde{k}\|^{10}) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中, l_1 和 l_2 为正常数, 使得 W 满足

$$\left. \begin{aligned} \underline{\alpha}_1(\|\bar{v}_m, \tilde{k}\|) &\leq W(\bar{v}_m, \tilde{k}) \leq \\ &\bar{\alpha}_1(\|\bar{v}_m, \tilde{k}\|) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

W 沿着系统(12)和(14)的轨迹对时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{W} \leq & 4 \sum_{i=1}^N (-c \Xi_i + r_i \theta_i \prod_{i_1} + r_i \theta_i \prod_{i_2}) + \\ & \sum_{i=1}^N 2\omega_1 r_i \dot{k}_i \int_0^{\bar{v}_{mi}} (1+s)^3 ds + \\ & \sum_{i=1}^N \epsilon \omega_1^2 \tilde{k}_i \dot{k}_i \end{aligned} \quad (20)$$

式中,

$$\begin{aligned} \theta_i &= \omega_1 k_i (1 + \bar{v}_{mi}^2)^3 \bar{v}_{mi}, \\ \Xi_i &= r_i \theta_i \sum_{j=0}^N a_{ij} (\theta_i - \theta_j), \theta_0 \equiv 0, \\ \prod_{i_1} &= \omega_1 \sum_{j=1}^N a_{ij} (-h \operatorname{sgn}(\bar{v}_{mi}) + h \operatorname{sgn}(\bar{v}_{mj})) + \\ & \omega_1 a_{i0} (-h \operatorname{sgn}(\bar{v}_{mi}) - u_0), \\ \prod_{i_2} &= \Omega_i + 2\bar{v}_{mi} - 4\bar{s}_{mi} \end{aligned} \quad (21)$$

令 $\theta := [\theta_1, \dots, \theta_N]^T$. 矩阵(7)是负定的表明

$$-4c \sum_{i=1}^N \Xi_i = -4c \theta^T R H \theta \leq -2 \|\theta\|^2 \quad (22)$$

注意到, 对于每个 $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N$ 以及任意的 $\bar{v}_{mi} \in \mathbb{R}$, 由式(8)可得

$$\left. \begin{aligned} a_{i0} \bar{v}_{mi} (-h \operatorname{sgn}(\bar{v}_{mi}) - u_0) &\leq 0 \\ a_{ij} \bar{v}_{mi} (-h \operatorname{sgn}(\bar{v}_{mi}) + h \operatorname{sgn}(\bar{v}_{mj})) &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

在式(20)中, 有

$$4r_i \theta_i \prod_{i_2} \leq \frac{1}{2} \theta_i^2 + 8r_i^2 \prod_{i_2}^2 \quad (24)$$

此外, 由文献[19]中引理 7.8 可知, 对于每个 $i = 1, \dots, N$ 和任意的 $\omega \in \mathbb{W}$, 下面不等式成立

$$|\omega_2 (v_i^2 - v_0^2)| \leq c_1 \sum_{j=1}^N v_{mj}^2$$

其中, 常数 $c_1 > 0$, 因此结合上式, 存在正常数 \bar{c}_1 使得

$$\sum_{i=1}^N 8r_i^2 \prod_{i_2}^2 \leq \bar{c}_1 \sum_{i=1}^N ((1 + \bar{s}_{mi}^2) \bar{s}_{mi}^2 + (1 + \bar{v}_{mi}^2) \bar{v}_{mi}^2) \quad (25)$$

另一方面, 由于 $(1 + \bar{v}_{mi}^2)^{\frac{5}{4}} \geq |\bar{v}_{mi}|^{\frac{5}{2}}$, 可以得到

$$\begin{aligned} 2\omega_1 r_i \dot{k}_i \int_0^{\bar{v}_{mi}} (1+s)^3 ds \leq & 2\omega_1 r_i (1 + \bar{v}_{mi}^2) \bar{v}_{mi}^2 (1 + \bar{v}_{mi}^2)^3 \bar{v}_{mi} \leq \\ & \frac{7r_i^5}{\omega_1^3} (1 + \bar{v}_{mi}^2) \bar{v}_{mi}^2 + \frac{4\omega_1^2}{5} (1 + \bar{v}_{mi}^2)^6 \bar{v}_{mi}^2 \end{aligned} \quad (26)$$

将不等式(22)~(26)代入到(20)中, 由于 $k_i(t) \geq 1$, 得到

$$\begin{aligned} \dot{W} \leq & \sum_{i=1}^N \bar{c}_1 (1 + \bar{s}_{mi}^2) \bar{s}_{mi}^2 + \\ & \sum_{i=1}^N \left[-\left(\frac{3}{2} - \frac{4}{5} - \epsilon\right) \omega_1^2 k_i^2 (1 + \bar{v}_{mi}^2)^6 \bar{v}_{mi}^2 - \right. \\ & \left. (\epsilon \omega_1^2 \bar{k}_i - \frac{7r_i^5}{\omega_1^3} - \bar{c}_1) (1 + \bar{v}_{mi}^2) \bar{v}_{mi}^2 \right] \end{aligned} \quad (27)$$

最后, 选择如下的 Lyapunov 函数

$$U(\bar{s}_m, \bar{v}_m, \tilde{k}) = (1 + \bar{c}_1)(V + V^2) + W \quad (28)$$

由式(15)和式(19)可知, 存在 K_∞ 函数

$$\left. \begin{aligned} \underline{\alpha}(\zeta) &= \bar{l}_1 \zeta^2 \\ \bar{\alpha}(\zeta) &= \bar{l}_2 (\zeta^2 + \zeta^{10}) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中, $\zeta = \|\bar{s}_m, \bar{v}_m, \tilde{k}\|$, \bar{l}_1 和 \bar{l}_2 为正常数, 使得 U 满足

$$\left. \begin{aligned} \underline{\alpha}(\|\bar{s}_m, \bar{v}_m, \tilde{k}\|) &\leq U(\bar{s}_m, \bar{v}_m, \tilde{k}) \leq \\ &\bar{\alpha}(\|\bar{s}_m, \bar{v}_m, \tilde{k}\|) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

U 沿着系统(12)和(14)的轨迹, 对时间的导数可以得到

$$\begin{aligned} \dot{U} \leq & - \sum_{i=1}^N (1 + \bar{s}_{mi}^2) \bar{s}_{mi}^2 + \\ & \sum_{i=1}^N \left[-\left(\frac{3}{2} - \frac{4}{5} - \epsilon\right) \omega_1^2 k_i^2 (1 + \bar{v}_{mi}^2)^6 \bar{v}_{mi}^2 - \right. \\ & \left. (\epsilon \omega_1^2 \bar{k}_i - \frac{7r_i^5}{\omega_1^3} - 2\bar{c}_1 - 1) (1 + \bar{v}_{mi}^2) \bar{v}_{mi}^2 \right] \end{aligned} \quad (31)$$

在式(31)中, 选择正常数 ϵ 和 k_i 使得

$$\left. \begin{aligned} \frac{3}{2} - \frac{4}{5} - \epsilon &\geq 1 \\ \epsilon \omega_1^2 \bar{k}_i - \frac{7r_i^5}{\omega_1^3} - 2\bar{c}_1 - 1 &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

得到不等式

$$\dot{U} \leq - \sum_{i=1}^N (1 + \bar{s}_{mi}^2) \bar{s}_{mi}^2 - \sum_{i=1}^N \omega_1^2 k_i^2 (1 + \bar{v}_{mi}^2)^6 \bar{v}_{mi}^2 \quad (33)$$

由文献[20]中 LaSalle—Yoshizawa 定理可知, 式(33)表明 $\bar{s}_{mi}(t), \bar{v}_{mi}(t), i = 1, \dots, N$ 会渐近收敛到零点, 并且动态增益 $k_i(t), i = 1, \dots, N$ 是有界的. 由式(10)和式(13)可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\bar{s}_i(t), \bar{v}_i(t)]^T = 0$.

2.2 队列中车辆的驶离或汇入分析

本小节将讨论在一般有向信息流拓扑结构下, 队列中发生车辆驶离或汇入的情形对于队列系统的影响. 图 2 和图 3 分别描绘了内部车辆驶离和外部车辆汇入队列.



图 2 内部车辆驶离队列

Fig.2 Internal vehicle splits platoon

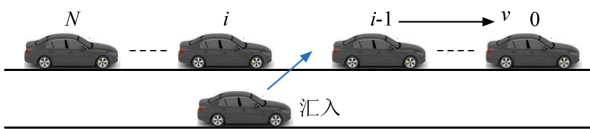


图 3 外部车辆汇入队列

Fig.3 External vehicle joins in platoon

在实际的自动化公路系统中, 队列中的任意车辆应该被允许随时驶离队列, 例如当车辆自身发生故障或者需要改变行驶路线. 同样的, 周围车道上的其他车辆也应该被允许随时汇入队列跟随行驶. 这两种驾驶操作对于实际交通环境下的车辆队列具有重要意义. 我们在研究队列控制时应该充分考虑这类情形, 在确保安全的前提下有效的继续调整新的队列以期望间距稳定行驶.

现有的分布式控制器, 如文献[10-11], 在设计上是依赖于队列的全局信息, 如队列的规模和信息流拓扑 Laplacian 矩阵. 当队列中出现车辆驶离或者汇入时, 产生的最直接影响是改变了车辆间信息流拓扑结构以及剩余车辆的期望相对位置. 导致每个跟随车辆需要重新设计分布式控制器. 这种临时

在线调整控制器结构必然会造成队列波动, 占用大量系统资源(包括软件和硬件), 并且效率较低.

面对这类队列突发情况, 采用分布式自适应控制器可以很好地保证系统的鲁棒性能. 因为即使队列结构发生改变, 通过动态增益可以自适应补偿系统结构变化, 从而实现在原控制器的基础上快速准确的调整车辆行驶状态, 并维持新的队列结构.

在满足已有的假设条件下, 要确保新的队列以期望间距行驶, 需要添加如下假设.

假设 2.1 当内部车辆驶离或者外部车辆汇入队列后, 新的队列系统有向信息流拓扑仍满足包含一个以领航车辆作为根节点的有向生成树.

下面, 给出如下定理.

定理 2.2 对于队列系统(1), 当出现车辆驶离或者汇入时, 在假设 1.1、假设 1.2 和假设 2.1 的条件下, 分布式自适应控制器(14)依然能够维持新的队列以期望间距稳定行驶.

证明 首先, 虽然车辆驶离或者汇入改变了队列系统的信息流拓扑结构, 但是仍然满足假设 1.1. 这表明跟随车辆可以采用其与邻居车辆的局部相对状态信息作为反馈实现全局队列行驶目标.

其次, 对于新的队列系统, 不需要重新设计控制器, 原分布式自适应控制器(14)同样能够保证其结构稳定. 证明过程和定理 2.1 类似, 此处不再赘述.

值得注意的是, 当队列发生车辆驶离或者汇入时, 从安全的角度考虑需要将变动信息传递给其他车辆, 预留足够大的前后车间距. 此外, 在变道过程中, 不可避免地会出现行驶方向改变, 即涉及车辆的横向控制. 本文研究的重点是车辆队列纵向控制, 有关横向控制的内容可参考文献[21].

3 数值仿真

本节将通过数值仿真验证提出的控制器设计策略的有效性. 考虑一个车辆队列系统, 其中包含一个领航车辆和四个跟随车辆. 在 0~40 s 时间段, 车辆间信息流拓扑结构如图 4 所示. 在第 40 s 时刻, 外部有车辆汇入队列, 新加入的车辆编号记为 5. 40~80 s 时间段车辆间信息流拓扑结构如图 5 所示. 在第 80 s 时刻, 内部车辆 2 驶离队列. 80~120 s 时间段车辆间信息流拓扑结构如图 6 所示. 易知, 上述信息流拓扑结构都满足假设 1.1 的条件.

仿真中, 将期望相邻车辆间距设为 $d_0 = 10\text{m}$,

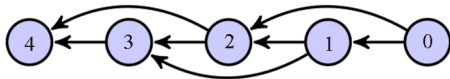


图 4 0~40 s 车辆间信息流拓扑结构示意图
Fig.4 Information flow topology during 0~40 s

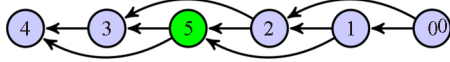


图 5 40~80 s 车辆间信息流拓扑结构示意图
Fig.5 Information flow topology during 40~80 s

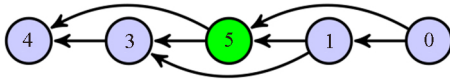


图 6 80~120 s 车辆间信息流拓扑结构示意图
Fig.6 Information flow topology during 80~120 s

领航车辆的行驶速度设为 $v_0 = 10\text{m/s}$. 选取系统参数 $m = 1000, C_A = 0.005, \eta = r = 0.3, g = 10$ 和 $f = 0$.

001. 可以得到领航车辆的控制输入 $u_0 = \frac{C_A r}{\eta} v_0^2 +$

$\frac{mgfr}{\eta} = 10.5$. 假设 1.2 也得到满足. 所有跟随车辆的

控制输入 u_i 由定理 2.1 中式 (14) 给出, 其中 $c = 100, h = 10.5, k_i(0) = 1, i = 1, \dots, 4, k_5(40) = 1$. 领航车辆的初始状态为 $(s_0, v_0) = (0, 10)$, 四个跟随车辆的初始状态分别为 $(s_1, v_1) = (-15, 0), (s_2, v_2) = (-30, 0), (s_3, v_3) = (-45, 0), (s_4, v_4) = (-60, 0)$, 车辆 5 汇入队列时的状态为 $(s_5, v_5) = (375, 8)$.

仿真结果如下图所示, 其中图 7 是跟随车辆间距误差的变化响应曲线, 图 8 是跟随车辆速度误差的变化响应曲线, 图 9 是动态增益 k_i 的变化响应曲线. 从仿真结果中可以看出, 在定理 2.1 所设计的分布式自适应控制器作用下, 可以实现车辆队列控制目标. 即使发生车辆驶离和汇入队列的情形, 原控制器依然能够维持新的队列以期望间距稳定行驶.

4 结论

本文研究了在一般有向信息流拓扑结构下的非线性车辆队列系统分布式自适应控制. 考虑了车辆纵向动力学中不确定参数的界是未知的, 设计了不依赖于任何全局队列信息的分布式自适应控制器. 当队列中发生车辆驶离或汇入情形时, 在满足相应的假设条件下, 所设计的控制器依然能够维持新的队列系统以期望间距稳定行驶. 在后续的工作中, 将进一步研究车辆的横向控制以及车辆之间的通信

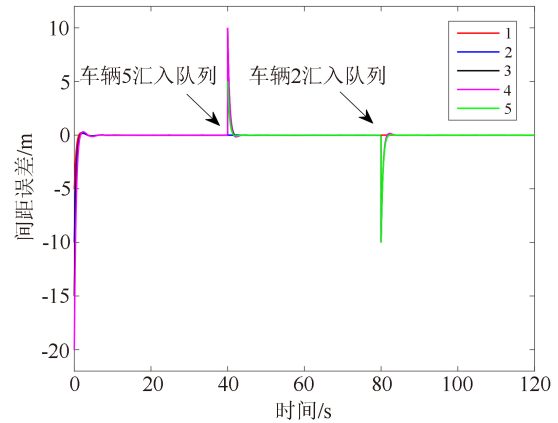


图 7 间距误差响应曲线

Fig.7 Profiles of spacing errors

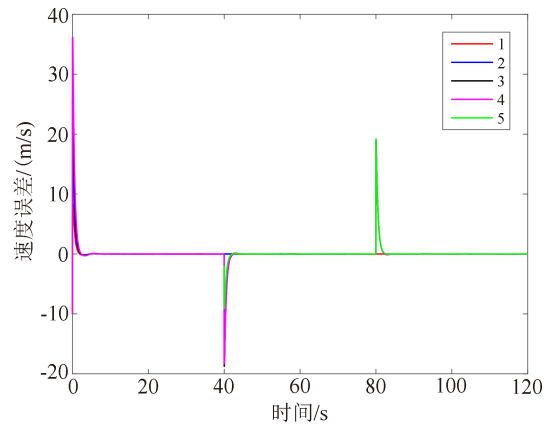


图 8 速度误差响应曲线

Fig.8 Profiles of velocity errors

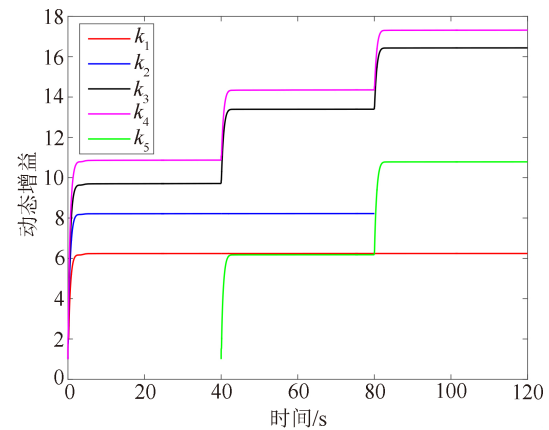


图 9 动态增益 k_i 响应曲线

Fig.9 Profiles of dynamic gains

时延等问题.

参考文献 (References)

[1] ZHANG J, WANG F Y, WANG K, et al. Data driven intelligent transportation systems: A survey[J]. IEEE

- Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1624-1639.
- [2] 岳伟, 郭戈. 自主车队的非线性建模与控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 996-1000.
YUE Wei, GUO Ge. Nonlinear modelling and control of autonomous platoon [J]. Control and Decision, 2009, 24(7): 996-1000.
- [3] C AVENEY D. Cooperative vehicular safety applications[J]. IEEE Control Systems, 2010, 30(4): 38-53.
- [4] STANKOVIC SS, STANOJEVIC M J, SILJAK D D. Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(5): 816-832.
- [5] SEILER P, PANT A, HEDRICK K. Disturbance propagation in vehicle strings[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(10): 1835-1842.
- [6] HAO H, BAROOAH P. Stability and robustness of large platoons of vehicles with double-integrator models and nearest neighbor interaction [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2013, 23(18): 2097-2122.
- [7] KWON J W, CHWA D. Adaptive bidirectional platoon control using a coupled sliding mode control method [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2040-2048.
- [8] PLOEG J, SERRARENS A F A, HEIJENK G J. Connect & ; and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(3): 207-213.
- [9] ZHENG Y, LI S E, LI K, et al. Platooning of connected vehicles with undirected topologies: Robustness analysis and distributed H-infinity controller synthesis [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- [10] BERNARDO M, SALVI A, SANTINI S. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 102-112.
- [11] ZHENG Y, LI S E, WANG J, et al. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(1): 14-26.
- [12] SWAROOP D, HEDRICK J K, CHIEN CC, et al. A of spacing and headway control laws for automatically controlled vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23(1): 597-625.
- [13] SWAROOP D, HEDRICK J K. Constant spacing strategies for platooning in automated highway systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1999, 121(3): 462-470.
- [14] BERMAN A, PLEMMONS R J. Nonnegative Matrices in the Mathematical Sciences [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [15] HONG Y, HU J, GAO L. Tracking control for multiagent consensus with an active leader and variable topology[J]. Automatica, 2006, 42(7): 1177-1182.
- [16] SU Y, HUANG J. Cooperative output regulation of linear multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(4): 1062-1066.
- [17] W ANG X, XU D, JI H. Robust almost output consensus in networks of nonlinear agents with external disturbances[J]. Automatica, 2016, 70: 303-311.
- [18] W ANG C, WANG X, JI H. Leader-following consensus for a class of second-order nonlinear multi-agent systems[J]. Systems & Control Letters, 2016, 89: 61-65.
- [19] HUANG J. Nonlinear Output Regulation: Theory and Applications[M]. Philadelphia: SIAM, 2004.
- [20] K RSTIC M, KANELLAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V. Nonlinear and Adaptive Control Design[M]. New York: Wiley, 1995.
- [21] R AJAMANI R, TAN H S, LAW B K, et al. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(4): 695-708.