

文章编号: 2095-2163(2021)02-0119-05

中图分类号: TP29

文献标志码: A

# 基于时域变结构的自主车队通信拓扑控制

颜 坤, 马家庆

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 伴随着智能控制技术的深入研究和汽车的不断发展, 为了解决汽车安全以及能源损耗等问题, 本文设计了一种与队列数量不关联的控制器方法来实现自主车队控制。文章首先进行动力学车辆的系统建模, 然后介绍时变通信拓扑结构下车队队列的控制器设计, 最后在 Matlab 中仿真验证, 证明了系统的稳定性和控制器方法的可行性, 所以该方法适用于工程应用中。

**关键词:** 智能车队; 拓扑结构; 车辆队列; 稳定性

## Autonomous fleet control considering time-varying communication topology

YAN Kun, MA Jiaqing

(The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**【Abstract】** With the in-depth research of intelligent control technology and the continuous development of automobiles, in order to solve the problems of automobile safety and energy loss, this paper designs a controller method that is not related to the number of queues to realize autonomous fleet control. The article first carries on the system modeling of the dynamic vehicle, then introduces the controller design of the vehicle queue under the time-varying communication topology, finally verifies the simulation in Matlab, which proves the stability of the system and the feasibility of the controller method. The method is suitable for engineering applications.

**【Key words】** smart fleet; topology; vehicle queue; stability

## 0 引言

随着智能控制技术和汽车的发展, 高级驾驶辅助系统(ADAS)也随即产生。ADAS 通过结合车辆外部环境和车辆自身情况来提高驾驶的安全性和控制队列行驶。ADAS 进行队列控制通过车辆协同合作技术, 增加了交通流通量和安全性, 让人们乘坐更方便舒服, 该技术让车辆间的间距变短, 使车辆速度几乎保持一致, 这样既实现安全驾驶, 又增大了交通流量。

车辆队列系统使用无线通信技术连接成员汽车, 通过信息的时效性共享, 车辆对环境的更快适应使得队列控制的行车时间减少并且能达到更准确的控制期望。文献[1]中, 国内外在车辆队列协同发展领域, 欧洲、美国、日本等国家都做了大量的项目研究, 集中在队列控制领域得出了许多突出的成果。文献[2]中, 美国学者先后开展了许多研究项目, 如 PATH 对车辆队列的纵向跟驰进行了较为深入的研究, 其主要目的是提高交通的流通量以及安全性。文献[3]将车队跟驰系统和普通系统进行了具体比

较。文献[4]中, 日本学者在车辆队列领域的研究上也建树颇丰, 其中广受瞩目的研究成果是 Energy ITS 项目。该项目旨在利用智能交通系统技术来弥补驾驶员的驾驶技术生疏的弊端。文献[5]中, 介绍欧洲各个国家学者之间相互学习和合作, 车辆队列控制合作研究的主要起点是安全、节能和环保, 代表项目 SCANIA 由瑞典汽车公司主导, 希望通过车辆队列控制跟随技术降低卡车燃料的消耗。由前述研究得出的结论方法, 本文主要通过建立一种车辆队列控制方法来实现车队自主控制, 以达到车队安全跟随并减少能源损耗等目的。

## 1 车队控制系统设计与建模

根据文献[6]中设计的包含四元素队列模型, 现将车辆队列系统归纳为由 4 部分组成的高维动力学系统: 节点动力学、队列几何拓扑、通信拓扑、分布式控制器。本文的研究重点在于自主车辆队列系统的模型建立后对车队跟驰稳定性和控制器的分析与仿真验证。

车辆节点的动态响应确定队列的动态响应, 以

**作者简介:** 颜 坤(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 控制理论与控制工程、电机控制; 马家庆(1981-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 交流电机控制、智能数据控制。

**通讯作者:** 马家庆 Email: 357287962@qq.com

收稿日期: 2020-11-16

避免传统的车辆模型非线性因素给稳定性分析带来不必要的麻烦,本文通过建立线性车辆模型,将其用作队列的节点动力学模型,并将车辆模型建为有向图,通过拉普拉斯阵来反映车队中的信息传递关系,这样便建立了车辆队列线性模型。

本文仅考虑车辆队列的纵向动力学,并探讨在纵向跟随下将影响车队内稳定性的非线性因素。通过总结,无论在加速或者减速的行车情况下,期望需要的加速度与车辆队列实际的加速度响应可以用一阶惯性延迟模型来叙述清楚。选取输入量用期望的加速度,状态量使用车辆的位置,所以车辆队列模型的状态方程可以列出为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \quad (1)$$

其中,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} p \\ v \\ a \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k \end{bmatrix}.$$

由反馈线性化技术搭建车辆队列纵向的整体控制系统结构如图1所示。图1中,  $P_k$ 、 $v_k$  和  $a_k$  分别为与自车存在通信连接的邻车纵向位置、速度和加速度,  $p$ 、 $v$  和  $a$  分别为自车的纵向位置、速度和加速度,  $d_{i,i-1}$  为队列第  $i$  辆跟驰成员车与其紧邻前车间的期望跟驰间距。

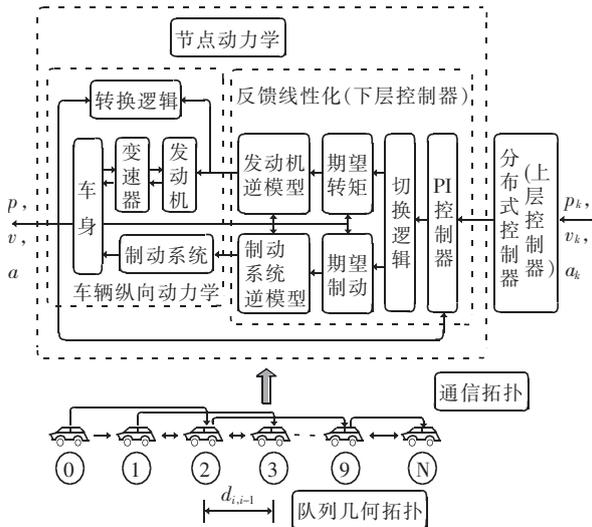


图1 车辆队列系统结构

Fig. 1 Overall control system structure of vehicle queue

通信拓扑在车辆队列系统将独立的车辆节点彼此连接形成整体,单个节点能保留其动态特性,也能通过耦合作用将影响整个队列的行为。不同的通信拓扑在队列总体性能中具有不同的效果,一些经常使用的通信拓扑结构,如:BPf、TBPF、PF等。车辆队列模型的通信拓扑结构通常建模成有向图的形式

名为图论模型,其结构特点则通过拉普拉斯阵描述,分布式控制器的设计使用静态线性状态反馈的形式。

车辆队列的稳定性同时受控制器增益  $k$  和通信拓扑的影响,单个车辆节点通过通信拓扑的连接也会影响队列整体安全性。通过车辆节点模型和分布式控制器的论述与假设,可以得出本文所研究的考虑时变通信拓扑结构下的自主车队控制队列方程表示为:

$$\dot{\tilde{\mathbf{X}}} = [\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{A} - \mathbf{H}_{\sigma(t)} \otimes (\mathbf{B}\mathbf{K})] \tilde{\mathbf{X}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_{\sigma(t)} = \mathbf{L}_{\sigma(t)} + \mathbf{R}_{\sigma(t)}, \quad (3)$$

其中,  $\otimes$  为 Kronecker 积;  $\mathbf{I}_N$  为规模为  $N$  的单位阵;  $\mathbf{L}_{\sigma(t)}$  为时变的拉普拉斯阵;  $\mathbf{R}_{\sigma(t)}$  为时变的牵引矩阵。而  $\sigma(\tau)$  作为时变信号决定了上式矩阵在任意时刻的具体构型,说明通信拓扑结构的时变特性。

假设时间区间  $[t_i, t_j)$  ( $0 \leq i < j$ ) 中通信拓扑切换的次数为  $N_{\sigma}(t_i, t_j)$ , 则平均驻留时间  $\pi$  定义为:

$$N_{\sigma}(t_i, t_j) \leq \frac{t_j - t_i}{\pi}. \quad (4)$$

这里是将时间区域换分为有限连续但不重叠的时间子区间,时变通信拓扑结构下的车辆队列动力学模型需满足上文平均驻留时间。

## 2 时变通信拓扑下控制器设计

考虑时变通信拓扑结构下的自主控制队列方程,是在以下假设中得出的:车辆队列在全部路程中,通信拓扑始终在一个确定的集合中变换,令  $g(t) \in \hat{g}_{\sigma}$ ,  $\hat{g}_{\sigma}$  作为固定的通信拓扑集合,包含有限元素,将其中的各个元素按照序号依次排列,可以得出  $\hat{g}_{\sigma} = \bigcup_{i=1}^{N_c} g_i$ 。

选取车辆队列序号属于一个正整数集合  $N$ , 并令  $\sigma: (0, +\infty) \rightarrow N$  作为正整数中取值的离散函数,要求  $1 \leq \sigma(t) \leq N_c$  且  $\sigma(t) \in N^+$ ,  $\sigma(\tau)$  作为时变信号决定了矩阵在任意时刻的具体构型,说明通信拓扑结构的时变特性。

为方便将时间轴分成连续时间子集合,此时需用到如下公式:

$$t = \bigcup_{k=1, k \in N}^{+\infty} (t_{k-1}, t_k) \quad t \in (0, +\infty), \quad (5)$$

其中,定义  $0 < t_k - t_{k-1} \leq T_{up}$ ,  $t_0 = 0$ , 接下来进一步使  $(t_{k-1}, t_k)$  时间区间分成有限但不重叠的时间范围,为了让每一个时间范围内的通信拓扑不发生切换,则可将其写为:

$$(t_{k-1}, t_k) = \bigcup_{l=1, l \in N}^{m_k} (t_{k-1}^{l-1}, t_k^l), \quad (6)$$

其中,  $t_k^1 - t_{k-1}^{l-1} \geq T_{low} > 0$ ,  $m_k > 0$ ,  $t_k^0 = t_{k-1}$ ,  $t_k^{m_k} = t_k$ 。这就是时变通信拓扑下联合生成树的含义。在特定的时间区间  $(t_{k-1}, t_k)$  内, 令  $\bar{g}_k$  是由集合组成的联合拓扑图。所以如果  $\bar{g}_k$  具有有向生成树, 则说明在时间  $(t_{k-1}, t_k)$  范围内  $g_\sigma$  具有联合生成树。

经过上文的论述与假设, 本文所研究的考虑时变通信拓扑结构下自主车队控制的控制器设计为: 一般通信拓扑下的匀质车辆队列控制方程为式(2), 当通信拓扑图中都包含有向生成树,  $\sigma(\tau)$  为通信拓扑任意变化信号, 假设  $P > 0$  为线性矩阵不等式(7)的解, 并且车辆平均停留的时间需满足式(8), 所以镇定控制器的可行解可以如式(9)所示:

$$P A^T - u B B^T < 0, \quad (7)$$

$$\pi > \frac{\ln \varepsilon}{\eta}, \quad (8)$$

$$K = \frac{1}{2} B^T P^{-1}. \quad (9)$$

因为通信拓扑图结合中的每一个元素都包含有向生成树, 而线性矩阵不等式始终存在对称正定解  $P_H > 0$ 。验证得出函数在任意时间里都是衰减的, 结合平均驻留时间  $\pi$  的定义也可以清晰地得出跟驰误差是按照指数衰减到零, 所以系统内稳定。

考虑时变通信车队稳定性时, 必须约束时变通信的平均驻留时间不能过小, 太多通信切换将影响函数衰减, 降低系统稳定性。其实对于一般时变的线性系统, 无论考虑多么周全, 即使系统状态稳定, 还是可能产生系统切换信号, 所以必须保证通信拓扑下的子系统都是稳定的, 并要求平均驻留时间足够长。

### 3 车辆模型稳定性仿真分析

本文中仿真通过使用线性车辆模型来验证上文推导的理论的正确性, 用 PF 通信拓扑结构为例进行数值仿真, 验证稳定性。车辆队列基本参数见表 1。

表 1 车辆队列基本参数

Tab. 1 Basic parameters of vehicle queue

参数名称	队列规模 / 辆	车辆长度 / m	期望车距 / m	时间常数 / s
数值	5	4.5	20	0.6

其中, 车辆队列的头车也包含在队列规模中, 时间常数即为车辆模型中的参数  $\tau$ 。在零初始条件下

的仿真中, 把一个阶跃输入加在队列头车上, 让头车的运行轨迹按照式(10)计算得出:

$$v_0 = \begin{cases} 20, & t \leq 5s; \\ 20 + 2t, & 5s < t \leq 10s; \\ 30, & 10s < t. \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $v_0$  单位为 m/s, 但是在非零初始条件下的仿真中, 队列其他车辆的跟驰误差在  $(-10 \text{ m}, +10 \text{ m})$  范围中随机变动。

仿真涉及到的通信拓扑见表 2。表 2 中包含了 PF、BPF、TPSF 的通信拓扑, 表格第二列标明了通信拓扑是否具有复特征值, 第三列标出了特征值的最小正实部, 第四列则给出各个通信拓扑阵的不同特征值的个数。

表 2 通信拓扑属性

Tab. 2 Communication topology attributes

拓扑名称	复特征值	最小正实部	不同特征值个数
PF	否	1	1
BPF	否	0.02	10
TBSF	是	0.47	10

根据上文控制器增益的公式得到:

$$K_{PF} = \frac{1}{2} B^T P^{-1} = [0.22 \quad 1.27 \quad 1.33]. \quad (11)$$

同样的方法在其他通信拓扑下的镇定控制器求解上也适用, 所以求解出来 TPSF、BPF 通信拓扑下的控制器增益为  $[0.27 \quad 1.89 \quad 1.96]$  和  $[0.66 \quad 1.86 \quad 1.13]$ , 再结合上式(10)数值进行仿真。通过仿真配置进行数值仿真, 零初始条件下的仿真结果如图 2 所示。

通过分析以上仿真结果可以得出, 本文设计的车辆队列内稳定性和镇定控制器求解的方法都是可行的, 即使含有复特征值也是一样。上文说明了提出的控制器求解方法计算量是与队列规模无关的, 只需要求解的线性矩阵不等式维数是与车辆模型相同便可以得到控制器增益。所以分别仿真 PF、TPSF 等通信拓扑, 仿真的结果也与上文一致, 都符合内稳定约束。限于篇幅, 这里将不再赘述。

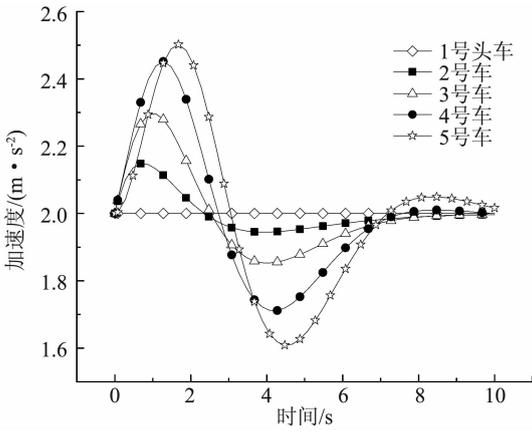
下面给出车辆队列在时变通信拓扑结构下的仿真分析, 旨在通过数值验证上文时变通信拓扑结构的研究方法, 仿真的模型、方法、分析都与上文类似。在此通过 2 种通信拓扑结构切换来进行讨论。

场景: 通信拓扑在 PF 与 LPF 之间切换。研究中选取控制器的参数见表 3。表 3 中, 还列出了与平均驻留时间相关的参数, 通过计算得出 2 个场景的平均驻留时间为不小于 1.08 s 和 6.37 s。

表3 仿真配置

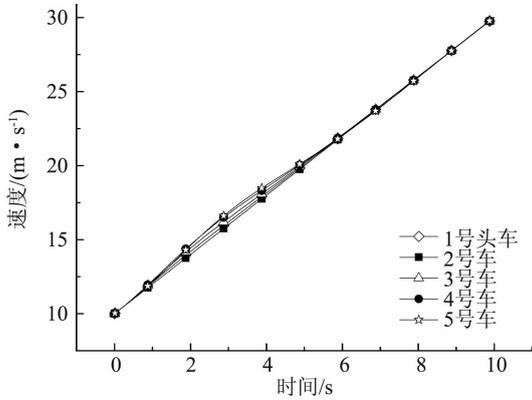
Tab. 3 Simulation configuration

参数名称	场景
控制器增益系数	[0.22 1.27 1.33]
$\eta$	0.29
$\varepsilon$	1.37
平均驻留时间	$\pi > 1.08$ s



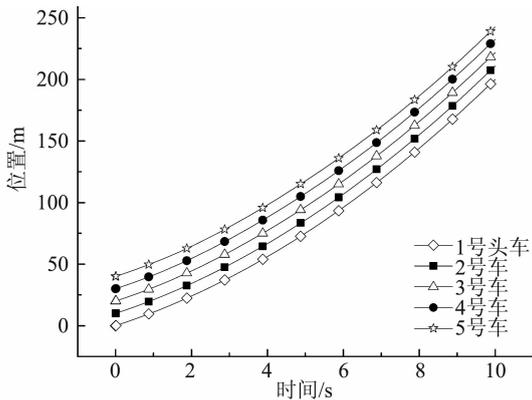
(a) PF 下车辆队列加速度误差

(a) Acceleration error of vehicles in the queue under PF



(b) PF 下车辆队列速度误差

(b) Speed error of vehicles in the queue under PF



(c) PF 下队列车辆相对位置

(c) Relative position of vehicles in the queue under PF

图2 PF 下队列车辆运动情况

Fig.2 The movement of vehicles in the queue under PF

时变下车队跟驰误差的仿真结果则如图3所示。从图3中可以清晰看出在保证平均驻留时间时,误差能随时间变化降至零,所以时变通信拓扑下系统能保证稳定性,而且分析可以得出定理中约定的最小平均驻留时间是很保守的,证明模型的稳定性能够得到有效保证。

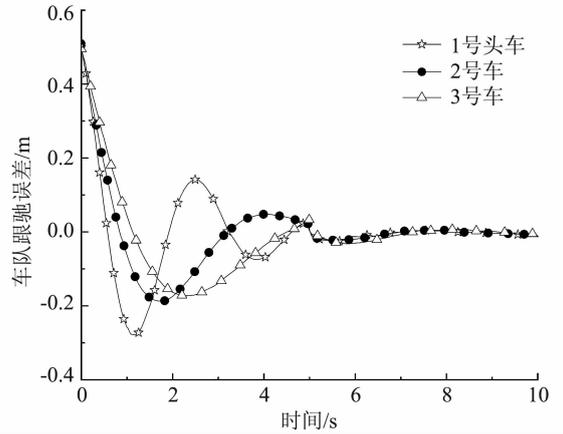


图3 时变下车队跟驰误差

Fig. 3 Car-following error of team under time-varying conditions

### 4 结束语

本文在时变通信拓扑结构的自主车队控制下考虑车辆队列的内稳定性影响,搭建了基于四元素架构的高维车辆队列状态方程,提出约束系统内稳定性的条件,同时证明了要保证内稳定性需要时变通信拓扑条件约束,设计出了一种控制器求解与车辆队列数量无关的设计方案,并通过理论和仿真验证分析证明了文中提出结论的可行性,同时该方法也能在工程应用中适用。

### 参考文献

- [1] BERGENHEM C, HUANG Q, BENMIMOUN A, et al. Challenges of platooning on public motorways [C]//17<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Transport Systems. Busan, South Korea: Elsevier, 2010; 1-12.
- [2] SHLADOVER S E, DESOER C A, HEDRICK J K, et al. Automated vehicle control developments in the PATH program [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(1): 114-130.
- [3] HEDRICK J K, UCHANSKI M, XU Q. Enhanced AHS safety through the integration of vehicle control and communication[R]. UC Berkeley: Institute of Transportation Studies, 2001.
- [4] TSUGAWA S, KATO S, AOKI K. An automated truck platoon for energy saving [C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011; 4109-4114.