

控制与决策

Control and Decision

通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

雷鸿博, 郭戈, 高原

引用本文:

雷鸿博, 郭戈, 高原. 通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 933–939.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone

控制与决策. 2021, 36(3): 705–710 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

基于模型依赖驻留时间的异步切换控制

Asynchronous switching control based on mode-dependent average dwell time

控制与决策. 2021, 36(3): 609–618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0645>

一种改进的紧格式无模型自适应控制方法

An improved compact form model free adaptive control method

控制与决策. 2021, 36(2): 436–442 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0635>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

雷鸿博¹, 郭戈^{1,2†}, 高原²

(1. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026;
2. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对自主巡航车队发生通信中断的情况, 提出一种由协作式自适应巡航控制(CACC)模式切换至自适应巡航控制(ACC)模式的方法. 当通信中断时, 将车辆按照通信能力分组优化处理, 并将通信中断车辆由CACC模式切换到ACC模式, 且保持原CACC模式下的时间间距不变; 为了保证车队安全, 结合避碰理论和拉格朗日中值定理, 提出一种基于最小安全距离的时间间距切换策略; 为了保证两次切换后混合巡航车队(车队中既有CACC车辆也有ACC车辆)的稳定性, 结合终值定理和频域分析法设计了混合巡航模式下的CACC-ACC控制器. 最后通过仿真与现有方法对比, 验证了所提出方法的有效性.

关键词: 协作式自适应巡航控制; 最小安全距离; 避碰; 时间间距; 切换

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0837

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 雷鸿博, 郭戈, 高原. 通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 933-939.

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

LEI Hong-bo¹, GUO Ge^{1,2†}, GAO Yuan²

(1. College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. College of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: This paper proposes a switching method for autonomous vehicles in a platoon to switch from cooperative adaptive cruise control(CACC) mode to adaptive cruise control(ACC) mode under communication interruption. A grouping optimization method for the platoon is established based on communication capabilities for vehicles subject to communication interruption. The cruise mode of vehicles subject to communication interruption is switched from CACC to ACC, but the time headway in CACC remains the same. Then, a time headway switching method based on minimum safe distance is proposed to ensure the safety of the platoon by combining the collision avoidance theory and Lagrangian median theorem. The mixed CACC-ACC controllers are designed to ensure the stability of the platoon (there are both CACC and ACC vehicles in it) after two switchings by combining the final value theorem and the frequency domain method. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed method by comparing with the existing methods.

Keywords: cooperative adaptive cruise control; minimum safe distance; collision avoidance; time headway; switching

0 引言

车联网环境下车-车通信技术能实现车与车之间信息交互, 促进智能交通的发展. 网联车辆可获得周围车辆的信息(位置、速度等), 缓解交通拥堵, 减少交通事故, 因此成为当前研究领域的热点^[1]. 当前车队巡航系统主要有两种运行模式, 即基于车载传感器的自适应巡航控制模式 ACC(adaptive cruise control) 和基于车-车通信的协作式自适应巡航控制

模式 CACC(cooperative adaptive cruise control). 在 ACC 模式下的每辆车仍可获得自身的速度、加速度、位置信息, 但一般只能通过传感器测量其与前车的相对距离和相对速度信息, 很难获得其他车辆的加速度信息^[2-3]. 相比于 ACC 模式, CACC 模式基于通信可获得更多车辆信息(如加速度等)来设计分布式控制器, 车辆能以更小的车间距行驶^[4-5], 从而提高道路吞吐量, 且其抗扰能力更强^[6], 因而备受关注^[7-11].

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-11-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573077, U1808205).

责任编辑: 魏秀琨.

†通讯作者. E-mail: geguo@yeah.net.

实际通信环境中,数据在传输时会出现丢包、延时、信道受限等现象,对车辆的协同控制有显著影响.文献[7]基于 $n\delta$ 稳定分析法,解决了通信网络丢包问题,提高了车队控制性能;文献[8]将通信随机丢包建模为独立的Bernoulli过程,建立网络访问控制优先级规则,解决了车队队列稳定问题;文献[9]设计基于Lyapunov-Krasovskii函数的 H_∞ 控制器,解决了通信网络存在延时情况下的异构车队稳定问题;文献[10]基于线性二次调节法设计最优控制器,解决了带有通信延时的网联车队稳定控制问题;文献[11]基于频域分析法,保证了在通信网络存在时变延时情况下车队仍能稳定运行;文献[12]基于分布式一致性协议和Lyapunov-Razumikhin理论,解决了通信网络存在时变延时情况下的异构车队稳定问题;文献[13]基于事件触发策略,解决了通信信道受限时的车队稳定问题;文献[14]建立二阶Markov链模型,采用分布式事件触发方法,解决了通信信道受限时的车队队列稳定问题;文献[15]基于一致性协议解决了通信信道受限时的车队稳定问题.

对于大规模车队系统,通信中断不可避免,而上述文献没有考虑通信中断下的车队控制问题.当前,就通信中断对车队巡航系统的影响研究较少,缺少好的解决方案.文献[16]研究通信中断对车队稳定性的影响,提出了将CACC模式切换至ACC模式的策略.但这种方法让通信中断车的后车与其前车直接通信,未给出混合巡航模式下系统稳定的控制器设计条件,造成切换时车间距变化幅度大,难以保证系统的安全性.文献[17]基于平均驻留时间方法,设计了CACC和ACC两种模式自适应切换策略,避免了控制器频繁切换.但该方法要求在特定时刻之后切换,在复杂路况环境下,切换时刻需要大量计算,对硬件设备要求较高.

相比于文献[16],本文优化了车队车辆通信中断后的分组模式,设计了混合巡航模式下保证车队稳定的CACC-ACC控制器.另外,本文采用车载传感器测量通信中断车辆与前车的车间距,相较于文献[17]中的时间信息,车间距信息的获取更为快速准确.当车辆发生通信中断时,将其切换成ACC模式,但不需要立刻切换原控制器中的时间间距,只有当车间距达到设定的最小安全距离时才切换时间间距.这样,通过两次切换,可减小整个车队在模式切换过程中的车间距偏差波动幅度.

本文主要贡献包括:1)对车辆通信中断后的分组模式进行优化,让通信中断车的后车通过传感器获得前车信息.结合避碰理论和拉格朗日中值定理,设

计ACC模式下时间间距切换时的最小安全距离,通过设计控制器,保证时间间距切换后前后车辆不发生碰撞.2)结合终值定理和频域分析法,设计混合巡航模式下CACC和ACC控制器,保证巡航模式和时间间距切换后整个车队系统的稳定性.两次切换减小了车队巡航模式切换时的车间距偏差波动幅度,提高了系统的安全性.

1 问题描述

1.1 系统建模

考虑由 $N+1$ 辆向右行驶的车所组成的车队,如图1所示. $p_i(t)$ 、 $v_i(t)$ 、 $a_i(t)$ 分别表示车辆 i ($i=0,1,\dots,N$)的实时位置、速度和加速度,这里 $i=0$ 表示领队车. $s_{di}(t)$ 表示第 i ($i \geq 1$)辆跟随车与其前车的理想车间距,根据固定时间间距策略^[1], $s_{di}(t)$ 定义为

$$s_{di}(t) = h_i v_i(t) + d, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

其中: $h_i > 0$ 为设定的时间间距; d 为正常数,保证慢速情况下的车间距.

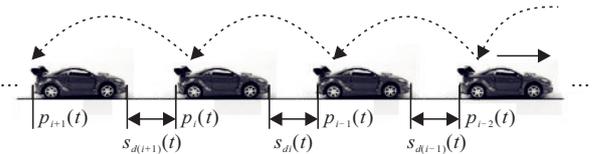


图1 基于车-车通信的车辆队列结构

每辆车的纵向动力学模型^[8]如下所示:

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = a_i(t), \\ \dot{a}_i(t) = -a_i(t)/\tau_i + u_i(t)/\tau_i. \end{cases} \quad (2)$$

其中: τ_i 为车辆的发动机时间常数, $u_i(t)$ 为第 i 辆车的控制输入.车长表示为 l ,定义连续两车的车间距为

$$s_i(t) = p_{i-1}(t) - p_i(t) - l. \quad (3)$$

定义车间距偏差为

$$\varepsilon_i(t) = s_i(t) - h_i v_i(t) - d. \quad (4)$$

为使车辆保持理想的车间距运行,需要设计控制器使车间距偏差收敛于零.为避免车间距偏差在车队中被不断放大,导致车辆速度产生大幅度波动,需要保证队列稳定性^[8],即队列间距误差传递函数在频域内应满足如下条件:

$$\begin{aligned} |H_i(j\omega)| &= \left| \frac{E_{i+1}(j\omega)}{E_i(j\omega)} \right| < 1, \\ \forall \omega > 0, \quad i &= 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $E_i(j\omega)$ 是 $\varepsilon_i(t)$ 在频域的表达形式.

在CACC模式下,自车可通过通信获取前车的位置、速度及加速度信息.定义如下CACC控制器:

$$u_i(t) = k_{pc} \varepsilon_i(t) + k_{vc} \Delta v_i(t) + k_{ac} \Delta a_i(t). \quad (6)$$

其中: k_{pc} 、 k_{vc} 、 k_{ac} 是控制器参数, $\Delta v_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t)$, $\Delta a_i(t) = a_{i-1}(t) - a_i(t)$. 在无通信中断的情况下, 控制器的设计如下面引理所示.

引理1^[8] 对于未发生通信中断的车辆, 采用式(6)中的CACC控制器, 若控制参数 k_{pc} 、 k_{vc} 、 k_{ac} 满足

$$\begin{aligned} k_{pc}h_c^2 + 2k_{vc}h_c &> 2, \\ \tau_i(k_{pc}h_c + k_{vc}) - k_{ac} &< 0.5, \\ (\tau_i - \tau_{i-1})(2k_{ac}h_c - \tau_i - \tau_{i-1}) &> 0, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 h_c 表示CACC模式下的时间间距, 则车间距偏差收敛于零, 且可保证队列稳定性.

运行在CACC模式下的车队, 当某辆车发生通信中断时, 上式引理中的控制器不能保证车队系统的稳定性. 一般的做法是将通信中断车辆立即由CACC模式切换到ACC模式, 但是考虑到ACC模式下设定的期望车间距比较大, 会减小道路上车的容量, 因此并不需要其立刻切换至ACC模式下的时间间距 h_a . 当其与前车的车间距达到临界值 δ 时, 再将时间间距 h_c 切换成 h_a , 以减小切换过程中车间距偏差波动幅度. 定义如下ACC控制器:

$$u_i(t) = k_{pa}\varepsilon_i(t) + k_{va}\Delta v_i(t), \quad (8)$$

其中 k_{pa} 、 k_{va} 是控制器参数. 控制器的设计如下面引理所示.

引理2^[8] 若ACC控制器控制参数 k_{pa} 、 k_{va} 满足

$$\begin{aligned} k_{pa}h_a^2 + 2k_{va}h_a &> 2, \\ k_{pa}h_a + k_{va} &< \frac{1}{2\tau_i}, \\ \tau_{i-1}^2 - \tau_i^2 + 2\tau_i k_{pa} - 2\tau_{i-1} k_{pa} &> 0, \end{aligned} \quad (9)$$

则车间距偏差收敛于零, 且可保证队列稳定性.

1.2 控制目标

本文的主要任务是设计ACC模式下时间间距 h_c 切换时的最小安全距离 δ , 以及混合巡航模式下CACC和ACC控制器, 使车辆发生通信中断时, 车辆进行模式切换和时间间距切换后仍能保证车间距偏差收敛于零和队列稳定性.

2 主要结论

本节设计时间间距 h_c 切换时的最小安全距离, 给出切换后保证前后车不发生碰撞的控制器设计条件, 进一步设计巡航模式和 h_c 切换后混合巡航模式下能保证队列稳定的CACC-ACC控制器.

2.1 通信中断下巡航控制器切换规则

为便于后文设计混合巡航模式下能保证队列稳定的控制器, 本节首先优化车辆通信中断后车队分组模式.

定义通信中断车辆 i 后面的第一辆通信正常的

车辆为 j ($i < j \leq N$), 车辆 i 前面的第一辆通信正常的车辆为 g ($0 \leq g < i$). 当车辆 i 通信中断时, 将其切换成ACC模式, 利用车载传感器来测量前车的状态信息, 此时时间间距 h_c 保持不变. 同时, 将车辆 j 切换成ACC/CACC并存模式, 即让其通过车载传感器测量前车的状态信息用于自身的ACC模式控制, 而自身的状态信息仍然通过通信传输给后续车辆进行CACC模式巡航. 这里, 文献[16]在为车辆 j 设计控制器时, 让其接收车辆 g 的状态信息, 而车辆 j 继续运行于CACC模式, 从而使车辆 j 和 g 的速度误差趋于零. 这种做法的问题在于忽略了 $j-1$ 是通信中断车辆, 其由CACC模式切换到ACC模式的过程中会发生明显的降速现象. 如果让车辆 j 忽略前车 $j-1$ 而直接与车辆 g 保持同速, 则很有可能导致车辆与其前车发生碰撞. 为避免上述问题发生, 本文根据控制模式将车队分为两组: 一组为无法接收前车信息的车辆运行于ACC模式, 另一组为可接收前车信息的车辆运行于CACC模式.

下面以前后车辆 g 和 $g+1$ 为例, 分析求解保证两者不发生碰撞的最小安全距离 δ_{g+1} . 不失一般性, 假设在 $t = t_1$ 时刻, 车辆 g 与车辆 $g+1$ 的距离达到 δ_{g+1} , 需要将时间间距由 h_c 切换为 h_a . 假设从 t_1 时刻起两车继续向前运行 Δt 秒, 车间距初次达到 $s_{g+1}(t_1 + \Delta t) = 0$ 且 $v_{g+1}(t_1 + \Delta t) = v_g(t_1 + \Delta t)$ (即两车初次间距为零时速度相等), 那么车辆 $g+1$ 与车辆 g 所走过的路程之差即为 δ_{g+1} . 因为 $g+1$ 是通信中断车辆, 无法获取前车 g 的加速度信息, 所以保守性地假设在时间段 $[t_1, t_1 + \Delta t]$ 内, 车辆 g 以最大减速度 $a_g^{-m} < 0$ 急刹车, 车辆 $g+1$ 以恒定的减速度 $a_{g+1}(t_1) < 0$ 匀减速运行. 在 $t_1 + \Delta t$ 时刻, 有

$$v_{g+1}(t_1) + a_{g+1}(t_1)\Delta t = v_g(t_1) + a_g^{-m}\Delta t.$$

可求得

$$\Delta t = \begin{cases} \frac{-\Delta v_g(t_1)}{a_g^{-m} - a_{g+1}(t_1)}, \\ v_{g+1}(t_1) > v_g(t_1), a_{g+1}(t_1) < a_g^{-m}; \\ \infty, v_{g+1}(t_1) \leq v_g(t_1). \end{cases} \quad (10)$$

此时, 临界距离计算式如下:

$$\begin{aligned} \delta_{g+1} &= p_{g+1}(t_1 + \Delta t) - p_{g+1}(t_1) - \\ & [p_g(t_1 + \Delta t) - p_g(t_1)] = \\ & v_{g+1}(t_1)\Delta t - \frac{1}{2}|a_{g+1}(t_1)|\Delta t^2 - \\ & v_g(t_1)\Delta t + \frac{1}{2}|a_g^{-m}|\Delta t^2 = \\ & (v_{g+1}(t_1) - v_g(t_1))\Delta t + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2}(|a_g^{-m}| - |a_{g+1}(t_1)|)\Delta t^2. \quad (11)$$

当 $v_{g+1}(t_1) > v_g(t_1)$ 且 $a_{g+1}(t_1) \geq a_g^{-m}$ 时, $\Delta t < 0$, 车辆 $g+1$ 和 g 会发生碰撞. 为避免碰撞, 根据文献[4], 本文将临界距离 δ_{g+1} 设置为时间间距 h_c 切换前, 即 CACC 模式下保证车队行驶安全所能允许的最小车间距, 有

$$\delta_{g+1} = 0.6v_{g+1}(t_1) + d. \quad (12)$$

这里, 0.6 为 CACC 模式下时间间距的最小值. 在该临界距离下切换 h_c , 以此来避免二者发生碰撞. 注意, 在两车距离达到 δ_{g+1} 之前, δ_{g+1} 是随两车相对速度实时变化的.

下面通过设计合适的控制器参数, 使得在 t_1 时刻车辆 $g+1$ 的控制器时间间距由 h_c 切换成 h_a 后, 其与前车 g 车间距恒大于零, 保证两者不发生碰撞.

定理 1 若控制器参数满足条件

$$\begin{aligned} k_{pc} + k_{vc} &\geq 0, \\ h_c k_{pc} + k_{pa} + k_{va} &\geq 0, \\ k_{pa} + k_{pa}h_a + k_{va} &\geq 0, \\ k_{ac} &\geq 0, \\ (d+l)(k_{pa} - k_{pc}) - k_{ac}c_1 - c_2 &\geq 0, \end{aligned} \quad (13)$$

则在 t_1 时刻车辆 $g+1$ 的控制器时间间距 h_c 切换后, 其与前车 g 车间距恒大于零. 其中: c_1 表示车队中所有车辆加速度绝对值 $|a_i(t)|$ 的上界, 为已知常数^[18], 即 $|a_i(t)| \leq c_1, i = 0, 1, \dots, N$; c_2 表示车队中所有车辆速度的上界, 同样为已知常数, 即 $v_i(t) \leq c_2, i = 0, 1, \dots, N$. 这里不同车型各自的 $|a_i(t)|$ 和 $v_i(t)$ 的最大值是不同的, 但 c_1 取值是相同的, c_2 也是相同的.

证明 $\forall t \geq t_1$, 定义函数

$$\begin{aligned} f(t) &= s_{g+1}(t) = \\ &\delta(t_1) + \left[\int_{t_1}^t (v_g(t_1) + \int_{t_1}^t a_g(t) dt) dt - \right. \\ &\left. \int_{t_1}^t (v_{g+1}(t_1) + \int_{t_1}^t a_{g+1}(t) dt) dt \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

对函数 $f(t)$ 求导并将式(1)代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) &= \dot{s}_{g+1}(t) = \\ &(k_{pc} + k_{vc})(p_{g-1}(t) - p_{g-1}(t_1)) + \\ &(k_{pc} + h_c k_{pc} + k_{vc} + k_{pa} + k_{va})(p_g(t) - p_g(t_1)) + \\ &(k_{pa}h_a + k_{va} + k_{pa})(p_{g+1}(t) - p_{g+1}(t_1)) + \\ &k_{ac}(v_g(t_1) - v_g(t) - v_{g-1}(t_1) + v_{g-1}(t)) + \\ &(v_g(t_1) - v_{g+1}(t_1))(t - t_1) + \\ &(k_{pa} - k_{pc})(d+l)(t - t_1). \end{aligned} \quad (15)$$

由拉格朗日中值定理, 存在 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4 \in (t_1, t)$, 使得下式成立:

$$p_{g-1}(t) - p_{g-1}(t_1) = v_{g-1}(\xi_1)(t - t_1),$$

$$\begin{aligned} p_g(t) - p_g(t_1) &= v_g(\xi_2)(t - t_1), \\ v_{g-1}(t) - v_{g-1}(t_1) &= a_{g-1}(\xi_3)(t - t_1), \\ v_g(t) - v_g(t_1) &= a_g(\xi_4)(t - t_1). \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)代入(15), 得

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) &= \dot{s}_{g+1}(t) = \\ &(t - t_1)[(k_{pc} + k_{vc})v_{g-1}(\xi_1) + k_{ac}a_{g-1}(\xi_3) + \\ &v_g(\xi_2)(k_{pc} + h_c k_{pc} + k_{vc} + k_{pa} + k_{va}) - \\ &k_{ac}a_g(\xi_4) + (d+l)(k_{pa} - k_{pc}) + \\ &v_g(t_1) - v_{g+1}(t_1)] + (k_{pa}h_a + k_{va} + \\ &k_{pa})(p_{g+1}(t) - p_{g+1}(t_1)). \end{aligned} \quad (17)$$

由于所有车辆加速度绝对值 $|a_i(t)| \leq c_1, i = 0, 1, \dots, N$, 所有车辆速度 $v_i(t) \leq c_2, i = 0, 1, \dots, N$, 则下式成立:

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) &\geq (t - t_1)[(k_{pc} + k_{vc})v_{g-1}(\xi_1) + \\ &v_g(\xi_2)(k_{pc} + h_c k_{pc} + k_{vc} + k_{pa} + k_{va}) - \\ &k_{ac}c_1 + (d+l)(k_{pa} - k_{pc}) - c_2] + \\ &(k_{pa}h_a + k_{va} + k_{pa})(p_{g+1}(t) - p_{g+1}(t_1)). \end{aligned} \quad (18)$$

将式(13)中控制器参数代入式(18), $\forall \xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4 \in (t_1, t)$, 有 $\dot{f}(t) \geq 0, \forall t \geq t_1$ 成立. 又因为 $f(t_1) > 0$, 所以 $s_{g+1}(t) > 0, \forall t \geq t_1$ 成立. 即, 在 t_1 时刻车辆 $g+1$ 时间间距 h_c 切换后, 其与前车 g 车间距恒大于零. \square

2.2 混合巡航模式下的系统稳定性

当通信中断车辆的控制器时间间距切换后, 原有的控制器(7)、(9)和(13)不一定能保证系统的稳定性. 本节将对 CACC 和 ACC 控制器重新设计, 以保证混合巡航模式下系统队列稳定性和车间距偏差收敛于零. 给出如下定理.

定理 2 若混合巡航模式下控制器参数满足式(7)、(9)、(13)和条件

$$\begin{aligned} 2\tau_{g+1}(k_{pa}h_a + k_{va}) + k_{ac}^2 &< 1, \\ (k_{pa}h_a + k_{va})^2 - 2k_{pa} + 2k_{pc}k_{ac} - k_{vc}^2 &> 0, \\ k_{pa}^2 &> k_{pc}^2, \\ \tau_g^2 - 2\tau_g k_{ac}h_c + k_{ac}^2 h_c^2 - \tau_{g+1}^2 &> 0, \\ k_{vc}^2 h_c^2 - k_{va}^2 h_a^2 - 2k_{vc}h_c + 2k_{va}h_a &> 0, \end{aligned} \quad (19)$$

则车队车间距偏差收敛于零, 同时可保证队列稳定性.

证明 将式(4)等式两边同时求导, 并取拉氏变换, 得

$$\begin{cases} sE_{g+1}(s) = [1 - (1 + h_a s)G_{g+1}(s)]V_g(s), \\ sE_g(s) = [1/G_g(s) - (1 + h_c s)]V_g(s). \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$G_g(s) = \frac{V_g(s)}{V_{g-1}(s)} = \frac{k_{ac}s^2 + k_{vc}s + k_{pc}}{\tau_g s^3 + (1 + k_{ac})s^2 + (k_{pc}h_c + k_{vc})s + k_{pc}}, \quad (21)$$

$$G_{g+1}(s) = \frac{V_{g+1}(s)}{V_g(s)} = \frac{k_{va}s + k_{pa}}{\tau_{g+1}s^3 + s^2 + (k_{pa}h_a + k_{va})s + k_{pa}}, \quad (22)$$

$V_g(s)$ 是 $v_g(t)$ 的拉氏变换. 将式(21)和(22)代入(20), 得

$$H_{g+1}(s) = \frac{E_{g+1}(s)}{E_g(s)} = \frac{G_g(s)[1 - (1 + h_a s)G_{g+1}(s)]}{1 - (1 + h_c s)G_g(s)} = \frac{k_{ac}s^2 + k_{vc}s + k_{pc}}{\tau_{g+1}s^3 + s^2 + (k_{pa}h_a + k_{va})s + k_{pa}} \times \frac{\tau_{g+1}s + 1 - k_{va}h_a}{(\tau_g - k_{ac}h_c)s + 1 - k_{vc}h_c}. \quad (23)$$

根据队列稳定性条件(5), 若对于任意 $\omega > 0$, 有

$$\begin{aligned} & \tau_{g+1}^2 \omega^6 + [1 - 2\tau_{g+1}(k_{pa}h_a + k_{va}) - \\ & k_{ac}^2] \omega^4 + [(k_{pa}h_a + k_{va})^2 - 2k_{pa} + \\ & 2k_{pc}k_{ac} - k_{vc}^2] \omega^2 + k_{pa}^2 - k_{pc}^2 > 0, \\ & (\tau_g^2 - 2\tau_g k_{ac}h_c + k_{ac}^2 h_c^2 - \tau_{g+1}^2) \omega^2 + k_{vc}^2 h_c^2 - \\ & k_{va}^2 h_a^2 - 2k_{vc}^{ac} h_c + 2k_{va}h_a > 0 \end{aligned} \quad (24)$$

成立, 则 $|H_{g+1}(j\omega)| < 1, \forall \omega > 0$, 即系统是队列稳定的. 将式(19)中的控制参数代入(24), 可得式(5)成立.

下面证明稳态时车间距偏差收敛于零. 由引理1和引理2, 分别有

$$\begin{aligned} H_{ic}(s) &= \frac{E_i(s)}{E_{i-1}(s)} = \frac{k_{ac}s^2 + k_{vc}s + k_{pc}}{\tau_i s^3 + (1 + k_{ac})s^2 + (k_{pc}h_c + k_{vc})s + k_{pc}} \times \\ & \frac{(\tau_i - k_{ac}h_c)s + 1 - k_{vc}h_c}{(\tau_{i-1} - k_{ac}h_c)s + 1 - k_{vc}h_c}, \\ H_{ia}(s) &= \frac{E_i(s)}{E_{i-1}(s)} = \frac{(\tau_i - k_{pa})s + 1 - k_{va}h_a}{\tau_i s^3 + s^2 + (k_{pa}h_a + k_{va})s + k_{pa}} \times \\ & \frac{k_{va}s + k_{pa}}{(\tau_{i-1} - k_{pa})s + 1 - k_{va}h_c}. \end{aligned}$$

定义 $\xi_0(t)$ 为在 t 时刻领队车的速度 $v_0(t)$ 与稳态速度的偏差^[8], 即

$$\xi_0(t) = v_0(t) - v_0. \quad (25)$$

由式(4)有

$$\ddot{\varepsilon}_1(t) = a_0(t) - a_1(t) - h_c \dot{a}_1(t). \quad (26)$$

将式(2)和(25)代入上式, 求得

$$\tau_1 h_c \ddot{\varepsilon}_1(t) =$$

$$\begin{aligned} & (\tau_1 h_c - k_{ac} h_c^2) \ddot{\xi}_0(t) + (\tau_1 - h_c - k_{ac} h_c) \dot{\varepsilon}_1(t) + \\ & (h_c - \tau_1 - k_{vc} h_c^2 + k_{ac} h_c) \dot{\xi}_0(t) + \\ & \left(1 - k_{vc} h_c + k_{ac} - h_c^2 k_{pc} - \frac{\tau_1}{h_c}\right) \dot{\varepsilon}_1(t). \end{aligned} \quad (27)$$

将上式两边同时取拉氏变换, 得到车间距偏差 $\varepsilon_1(s)$ 关于领队车速度偏差量 $\xi_0(s)$ 的关系式

$$\begin{aligned} H_2(s) &= \frac{E_1(s)}{\eta_0(s)}, \\ E_1(s) &= (\tau_1 h_c - h_c^2 k_{ac})s + h_c - \\ & \tau_1 - k_{vc} h_c^2 + k_{ac} h_c, \\ \eta_0(s) &= \tau_1 h_c s^2 + (h_c - \tau_1 + k_{ac} h_c)s + \\ & h_c^2 k_{pc} - 1 + \frac{\tau_1}{h_c} + k_{vc} h_c - k_{ac}, \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $E_1(s)$ 和 $\eta_0(s)$ 分别是 $\varepsilon_1(t)$ 和 $\xi_0(t)$ 的拉氏变换形式. 假设领队车能在有限的时间内达到稳定, 则有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_0(t) = 0. \quad (29)$$

根据拉氏变换终值定理有

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \eta_0(s) = 0. \quad (30)$$

求得车间距稳态误差为

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_i(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} s E_i(s) = \\ \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{E_i(s)}{E_{i-1}(s)} \frac{E_{i-1}(s)}{E_{i-2}(s)} \cdots \frac{E_1(s)}{\eta_0(s)} \eta_0(s) &= \\ \lim_{s \rightarrow 0} s H_{ia}^{i-g-1}(s) H_{g+1}(s) H_{ic}^{g-1}(s) H_2(s) \eta_0(s) &= 0, \end{aligned} \quad (31)$$

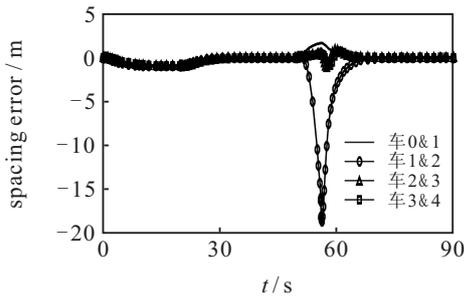
即车间距稳态误差收敛于零. 当控制器参数满足式(7)、(9)、(13)和(19)时, 通信中断车辆时间间距 h_c 切换成 h_a 后能保证车间距偏差收敛于零和系统的队列稳定性. \square

3 仿真对比

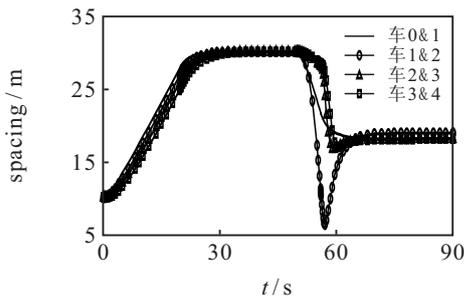
为验证本方法的有效性, 本节使用 Matlab/Simulink 软件, 选择5辆车组成的车队进行仿真. 车队中每辆车的车长为5 m, 根据加利福尼亚 PATH 实验室的研究成果^[4], h_a 设置范围为1.1 s~2.2 s, h_c 设置范围为0.6 s~1.1 s. 由文献[18], 考虑驾驶员舒适性和车辆加速减速性能, 实际行驶中 $|a_i(t)| \leq 8.5 \text{ m/s}^2$. 仿真各参数为 $l = 5, \tau_0 = 0.1, \tau_1 = 0.11, \tau_2 = 0.12, \tau_3 = 0.14, \tau_4 = 0.15, h_c = 1, h_a = 1.1, k_{pc} = 0.3, k_{vc} = 1.2, k_{ac} = 0.3, k_{pa} = 2, k_{va} = 0.8, d = 10, c_1 = 8.5, c_2 = 20$.

初始时车队中每辆车都运行在 CACC 模式下, 领头车从静止开始, 匀加速至 $v_0 = 20 \text{ m/s}$, 图2(a)显示每辆车最终都能以期望的车间距平稳运行. 在40 s~50 s时间段内, 领头车保持匀速运行, 车辆2的通信系统因故障而中断, 采用本文设计的切换规则, 将其从 CACC 模式切换至 ACC 模式, 但时间间距

不变,图3(a)显示每辆车都能以当前的速度匀速运行.在第50s时,头车开始减速;在第56s时,将通信中断车辆控制器的时间间距 h_c 切换到 h_a ,以避免与车辆1发生碰撞.由于 $h_c < h_a$,切换后其与前车的期望车间距变大,车辆1通信正常,其继续保持正常运行,此时车辆2及其跟随车辆在其各自控制器的控制下都先减速后加速运行,以使两车之间车间距偏差收敛于零.图2(a)显示车辆1和车辆2的车间距偏差相比于车队中其他车间距偏差较大,但最终都收敛于零.图3(b)显示所有车辆的运行轨迹未发生过交叉,整个车队未发生碰撞现象,能保持稳定安全的运行.

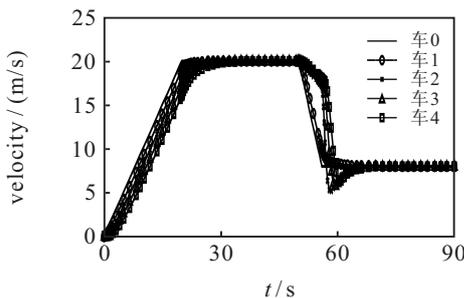


(a) 车间距偏差

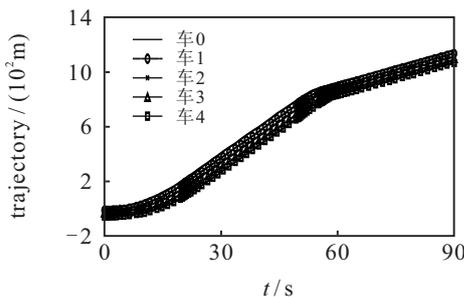


(b) 车间距

图2 车间距偏差和车间距(本文方法)



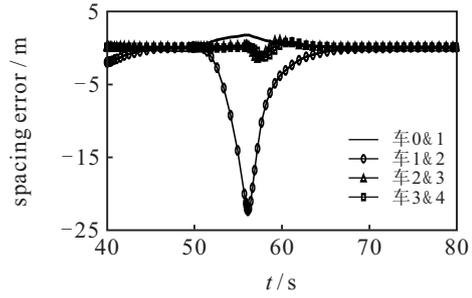
(a) 车辆速度



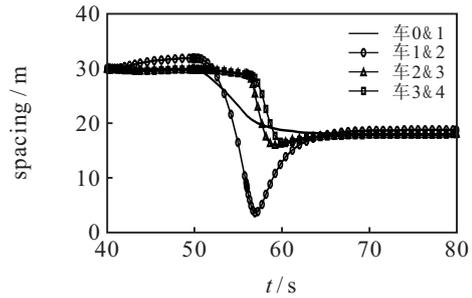
(b) 车辆轨迹

图3 车辆轨迹和速度(本文方法)

本文还通过仿真与现有方法中通信中断车辆巡航模式和车间距同时切换的方法做了对比分析,如图4和图5所示.领头车在40s~50s时间段内保持匀速运行,在第40s时车辆2发生通信中断,将其巡航模式和控制器时间间距同时切换.同理,由于 $h_c < h_a$,切换后其与前车的期望车间距变大.由于车辆1通信正常,其继续正常运行,由图5(a)可知,此时车辆2及其跟随车辆在其各自控制器的控制下都先减速后加速运行,以使两车之间车间距偏差收敛于零.在第50s时领头车先减速后匀速运行,整个车队最终能稳定运行.图4(a)显示车辆1和车辆2的车间距偏差相比于

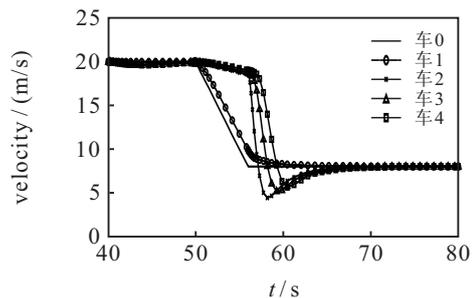


(a) 车间距偏差

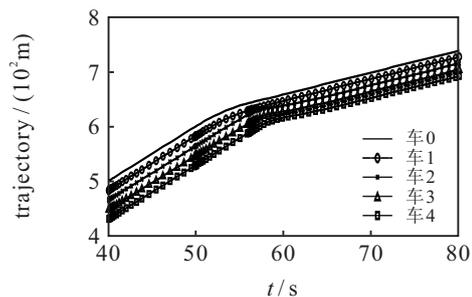


(b) 车间距

图4 车间距偏差和车间距(现有方法)



(a) 车辆速度



(b) 车辆轨迹

图5 车辆轨迹和速度(现有方法)

车队中其他车间距偏差较大,但最终都收敛于零.图2(a)和图4(a)显示本文提出的切换方法相较于现有方法,车间距偏差缩小21.7%,偏差波动幅度较小;图2(b)和图4(b)显示采用本文方法的车间距波动幅度缩小20%,车间距变化幅度较小,提高了系统的安全性.仿真结果验证了本文方法的有效性及其优越性.

4 结论

本文研究了通信中断下车队巡航模式切换稳定性问题,提出了由协作式自适应巡航(CACC)模式切换到自适应巡航(ACC)模式的方法.结合避碰理论和拉格朗日中值定理,设计了ACC模式下时间间距由 h_c 切换成 h_a 时的最小安全距离,并通过设计控制器,保证了切换后车队车辆不发生碰撞.然后,为保证两次切换后混合巡航车队稳定性,设计了混合巡航模式下的CACC-ACC控制器.仿真结果表明,本文提出的切换方法控制效果优于现有的研究方法,能较好地解决通信中断对网联车队的影响.

参考文献(References)

- [1] Wen S X, Guo G, Chen B, et al. Cooperative adaptive cruise control of vehicles using a resource-efficient communication mechanism[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4(1): 127-140.
- [2] Li S E, Guo Q Q, Xu S B, et al. Performance enhanced predictive control for adaptive cruise control system considering road elevation information[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(3): 150-160.
- [3] Bekiaris-Liberis N, Roncoli C, Papageorgiou M. Predictor-based adaptive cruise control design[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(10): 3181-3195.
- [4] Milanés V, Shladover S, Spring J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 296-305.
- [5] Dey K C, Yan L, Wang X, et al. A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC)[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 491-509.
- [6] Darbha S, Konduri S, Pagilla P R. Benefits of V2V communication for autonomous and connected vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(5): 1954-1963.
- [7] Qin W B, Gomez M M, Orosz G. Stability and frequency response under stochastic communication delays with applications to connected cruise control design[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(2): 388-403.
- [8] Guo G, Wen S X. Communication scheduling and control of a platoon of vehicles in VANETs[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(6): 1551-1563.
- [9] Xu L W, Zhuang W C, Yin G D, et al. Stable longitudinal control of heterogeneous vehicular platoon with disturbances and information delays[J]. IEEE Access, 2018, 6(4): 69794-69806.
- [10] Jin I G, Orosz G. Optimal control of connected vehicle systems with communication delay and driver reaction time[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(8): 2056-2070.
- [11] Zou C, Li H. Event-driven connected vehicular platoon control with mixed time-varying delay[J]. IEEE Access, 2019, 7: 111477-111486.
- [12] Di 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.
- [13] Dolk V S, Ploeg J, Heemels W P M H. Event-triggered control for string-stable vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(12): 3486-3500.
- [14] Li Z, Hu B, Li M, et al. String stability analysis for vehicle platooning under unreliable communication links with event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2152-2164.
- [15] Nguyen T, Wang L Y, Yin G, et al. Impact of communication erasure channels on control performance of connected and automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 29-43.
- [16] Wang P W, Wang Y P, Yu G Z, et al. An improved cooperative adaptive cruise control (CACC) algorithm considering invalid communication[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 468-474.
- [17] Harfouch Y A, Yuan S, Baldi S. An adaptive switched control approach to heterogeneous platooning with intervehicle communication losses[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, 5(3): 1434-1444.
- [18] Wang P W, Wang L, Li Y H, et al. Improved cooperative collision avoidance (CCA) model considering driver comfort[J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(6): 989-996.

作者简介

雷鸿博(1995—),男,博士生,从事智能交通系统车队控制的研究, E-mail: 1564112940@qq.com;

郭戈(1972—),男,教授,博士生导师,从事智能交通系统、目标探测与跟踪网络、海洋及环境监测系统等研究, E-mail: geguo@yeah.net;

高原(1972—),男,讲师,硕士,从事复杂系统优化与控制等研究, E-mail: 1204108642@qq.com.