

# 控制与决策

Control and Decision

## 联合通信资源分配的网联车协同自适应巡航 时滞反馈控制

宋秀兰, 陈雨, 陈新, 魏定杰, 何德峰

引用本文:

宋秀兰, 陈雨, 陈新, 魏定杰, 何德峰. 联合通信资源分配的网联车协同自适应巡航 时滞反馈控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2888–2896.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0214>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption  
控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### 通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption  
控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### 基于强化学习的多目标车辆跟随决策算法

Multi-objective vehicle following decision algorithm based on reinforcement learning  
控制与决策. 2021, 36(10): 2497–2503 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0426>

#### 自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems  
控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

#### 事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 $H_\infty$ 故障检测

Event-triggered  $H_\infty$  fault detection for networked control systems with distributed delays  
控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

# 联合通信资源分配的网联车协同自适应巡航 时滞反馈控制

宋秀兰<sup>†</sup>, 陈雨, 陈新, 魏定杰, 何德峰

(浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 考虑网联车辆队列在路段通信资源受限下的协同自适应巡航控制(CACC)问题, 提出一种联合通信资源分配的网联车辆协同自适应巡航时滞反馈控制方法. 首先, 在头车-前车跟随的通信拓扑结构下, 通过网联车辆队列中各车辆间的通信链路数量、该路段可使用的通信资源和当前时刻车辆间的间距误差建立二分图, 根据车辆间的间距误差来调度有限的通信资源, 将通信资源合理分配给有较大间距误差的跟随车辆; 其次, 利用非对称 PD 控制协议和网联车辆队列时滞纵向模型, 应用线性矩阵不等式技术计算网联车 CACC 控制器, 进一步得到车辆队列弦稳定性的充分条件; 最后, 通过 Matlab/CarSim 联合仿真验证该方法的有效性.

**关键词:** 网联自动车辆; 协同自适应巡航控制; 时滞; 通信资源分配; 弦稳定

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0214

**引用格式:** 宋秀兰, 陈雨, 陈新, 等. 联合通信资源分配的网联车协同自适应巡航时滞反馈控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2888-2896.

## Joint communication resource allocation and cooperative adaptive cruise delay-feedback control of connected vehicles

SONG Xiu-lan<sup>†</sup>, CHEN Yu, CHEN Xin, WEI Ding-jie, HE De-feng

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** This paper studies the problem of cooperative adaptive cruise control (CACC) of a network connected vehicle queue under the restriction of road communication resources, a time-delay feedback control method of network connected vehicle cooperative adaptive cruise with joint communication resource allocation is proposed. Firstly, under the head vehicle front vehicle following communication topology, a bipartite graph is established through the number of communication links of each vehicle in the vehicle queue, the available communication resources of this section and the spacing error between vehicles at the current time. The limited communication resources are scheduled according to the spacing error between vehicles, and the communication resources are reasonably allocated to the following vehicles with large spacing error. Then, using the asymmetric PD control protocol and the longitudinal model of fleet delay, the linear matrix inequality technology is used to calculate the CACC controller of network connected vehicles, and the sufficient conditions for the string stability of the vehicle queue are further obtained. Finally, the effectiveness of this method is verified by the Matlab/CarSim joint simulation.

**Keywords:** connected and automated vehicles; cooperative adaptive cruise control; time-delay; communication resource allocation; string stability

## 0 引言

近年来, 网联自动车辆(CAV)的协同自适应巡航控制(CACC)因其在提高安全性和通行效率的同时能够减少城市交通拥堵和污染而备受关注<sup>[1]</sup>. 常见的 CACC 方案包括头车跟随(LF)、前车头车跟随(PLF)、前车跟随(PF)和双向(BD)跟随等. 网联车通过车载

传感器测量前车距离和自身状态信息, 同时使用车辆对万物(V2X)网络传输加速度信息<sup>[2]</sup>, 其中 PLF 的头车通过较大传输功率向整个车辆队列广播自身加速度信息, 而跟随车辆使用较小功率将数据传输给相邻后车; 另外, LF 和 PLF 通信拓扑形成的车辆队列, 头车不仅可以完成车对车(V2V)数据的交互, 还可以获

收稿日期: 2022-02-03; 录用日期: 2022-05-17.

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究项目(LGF22F030013); 国家自然科学基金项目(61803336).

责任编辑: 郭戈.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: songxl2008@zjut.edu.cn.

取就近基站的数据,从而减小跟随车辆使用额外的通信资源,向基站发起请求<sup>[3]</sup>.从控制系统的角度来看,CACC的目标是形成一个CAV队列并采用最佳间隔策略<sup>[4]</sup>跟随行驶.目前已经提出了许多CACC策略来实现车辆队列的安全稳定行驶<sup>[5-8]</sup>.

无线V2X网络是CACC系统的重要研究内容之一,因为它可以传输比车载传感器更丰富的车辆信息,如视距外的速度和加速度等<sup>[9]</sup>.良好服务质量(QoS)的网络能增强网联车间的耦合并提高车辆队列的行驶安全性<sup>[10]</sup>.随着通信技术的发展,LTE-V2V已被广泛应用于CAV中<sup>[11]</sup>,在LTE-V2V中车辆用户可以直接使用蜂窝用户的无线资源进行通信<sup>[12]</sup>,从而有效提高通信距离,减小通信延时<sup>[13]</sup>.因此,已经涌现出大量针对LTE-V2V网络下CACC策略的研究成果<sup>[14-15]</sup>.虽然这些研究可以较好地保证CACC系统通信数据的传输,但很少有考虑到通信资源受限的情况.

由于通信网络的信道资源是有限的<sup>[16]</sup>,大量用户在人员密集的路段对通信带宽的占用和通信基站在较为偏远的路段的覆盖率低等情况,都将导致无线通信性能下降,出现高延时、高丢包和无法传输等通信资源受限情况<sup>[17-18]</sup>.为了减少通信资源受限而导致CACC车辆出现安全问题,文献[19]提出了一种通过二分图(bipartite graph, BG)合理分配当前时刻的通信资源的方法,其中BG可以通过对顶集和连接边关系的分析,预测用户倾向,并计算出每个项目对应于不同用户的资源值;文献[20]提出了一种分布式V2X网络相关感知资源分配机制,从而显著提高了通信资源受限下车辆的无线通信性能;文献[21]则采用人工智能技术,通过强化学习方法进行车联网的动态资源分配,从而大大提高了通信资源的利用率.这些研究虽然针对通信资源提出了很好的分配方案,但是,很少有联合通信资源分配在网联车控制领域的应用研究.同时由于CACC系统中各CAV之间的数据流是耦合的,各车所受到的干扰将沿着车辆队列逐渐放大<sup>[22]</sup>.弦稳定可以保证头车和前车所受到的干扰沿着队列衰减,以确保相邻车辆间距误差趋于零<sup>[23]</sup>,避免碰撞的发生.而通信受限下,延时和数据无法交互可能会出现间距误差增大而导致弦不稳定的情况<sup>[24]</sup>,因此,有必要对通信受限下CACC系统的弦稳定性进行研究<sup>[25]</sup>.

根据上述问题,本文综合考虑无线网联环境下带宽受限和用户大量信道占用问题,根据通信资源、车间通信链路和车辆间距误差,采用二分图设计通信资

源分配方法,进一步结合该方法,基于线性矩阵不等式(LMI)设计一种通信资源受限下CACC控制器,并建立保证网联车系统弦稳定性的充分条件.通过7车巡航队列验证本文方法的有效性,并通过对比实验结果表明所设计的控制器在代表性交通场景和通信资源受限情况下的优势.

## 1 问题描述

### 1.1 队列模型建立

考虑由  $N + 1$  辆车组成的网联车辆纵向队列系统,如图1所示.其中定义第1辆车为头车,后续的网联车为跟随车辆.头车通过LTE-V2V网络与就近的基站进行交互,获取该路段可通信资源占用情况等信息;其次,头车可以通过无线通信的方式将自己的加速度信息广播给所有跟随车辆,并且还可以根据该路段的网络情况、车辆队列的规模和车辆的状态等信息来合理分配通信资源.因此,广播的数据中包含跟随车辆之间的通信链路是否开启的信息,从而有效减小车辆对通信的依赖.跟随车通过安装在车辆前保险杠上的车载传感器测量与前车的距离和速度信息;其次,当跟随车辆分配到通信资源时,其将通过通信模块传输本车的加速度信息.另外,除头车外的跟随1车只能接收到来自头车的加速度信息.

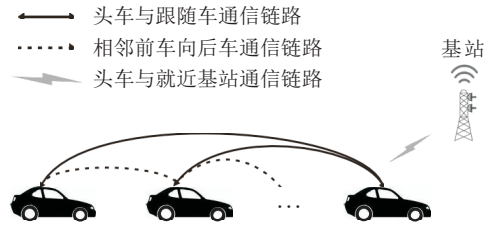


图 1 CACC 车辆队列示意

在CACC车辆队列中,  $L_i$  为第  $i$  辆车的长度,  $p_i(t)$  表示第  $i$  车在  $t$  时刻的位置,同理,  $v_i(t)$  和  $a_i(t)$  分别表示其在  $t$  时刻的速度和加速度,  $i = 0, 1, \dots, N$ , 且  $i = 0$  表示头车. 定义第  $i$  辆跟随车辆的间距误差

$$e_i(t) = \delta_i(t) - \delta_{r,i}(t). \quad (1)$$

其中:  $\delta_i(t) = p_{i-1}(t) - p_i(t) - L_i$  表示第  $i$  车与其前车的实际间距;车辆之间采用恒定车头时距的安全策略,所以  $\delta_{r,i}(t) = r_i + T_i v_i(t)$  为系统的期望间距,  $r_i$  表示车辆静止时的车间距,  $T_i$  表示车头时距. 本文基于LF和PLF通信拓扑结构,即跟随车辆存在通信时为PLF拓扑,当没有分配到通信资源时为LF拓扑.为简化推导,引入头车加速度信息,定义第  $i$  车的状态误差向量  $x_i(t) = [e_i(t) \quad \Delta v_i(t) \quad a_i(t) \quad \Delta a_{0,i}(t)]^T$ . 其中:  $\Delta v_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t)$  表示第  $i$  车与前车的相对速度,  $\Delta a_{0,i}(t) = a_0(t) - a_i(t)$  表示第  $i$  车与头车的相

对加速度. 从而得到车辆间距误差的状态方程

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + C_i x_{i-1}(t). \quad (2)$$

其中

$$B_i = [0 \ 0 \ 1/\tau_i \ -1/\tau_i]^T, \\ A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -T_i & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\tau_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_i \end{bmatrix}, \quad C_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$u_i(t)$  是期望加速度的外部输入, 运动学模型为  $\tau_i \dot{a}_i(t) = -a_i(t) + u_i(t)$ ,  $\tau_i$  是车辆发动机动力的时间常数. 定义加速度传递函数  $G_i(s) = a_{i-1}(s)/a_i(s)$ , 其中  $a_i(s)$  表示加速度  $a_i(t)$  的拉普拉斯变化.

**定义1** (弦稳定)<sup>[26]</sup> 考虑式(2)所描述车辆队列, 如果存在  $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$ , 对于任意的  $\omega \geq 0$  都成立, 则系统满足弦稳定条件.

## 1.2 通信资源分配

CACC 车辆队列各车之间采用 LTE-V2V 网络传输车辆状态信息, 按照标准中的规定, 10 个 1 ms 的子帧构成一个 LTE 帧, 而车辆传输的状态数据的大小在 50~500 个字节之间变化, 在常见的 LTE 部署中带宽为 10 MHz<sup>[27]</sup>, 因此, 一个 LTE 子帧足以让车辆传输其状态数据. 这里将可以传输车辆数据的通信资源定义为  $U$  子帧.

根据式(2)中车辆状态, 定义如下反馈控制器:

$$u_i(t) = k_{i,1}e_i(t) + k_{i,2}\Delta v_i(t) + k_{i,3}a_i(t) + k_{i,4}\Delta a_{0,i}(t) + k_{i,5}a_{i-1}(t). \quad (3)$$

其中:  $k_{i,1} \sim k_{i,5}$  为协议增益,  $a_{i-1}(t)$  为第  $i-1$  车的加速度.

由于通信资源可能无法满足各车辆间进行实时的数据传输, 为了减小对通信资源的依赖, 并保证 CACC 车辆安全行驶, 本文将根据车辆间的间距误差来调度通信资源. 因此, 调度倾向于将通信资源分配给有较大间距误差的跟随车辆. 根据车辆间的通信链路数量、上一时刻间距误差大小和通信资源即  $U$  子帧的数量定义 BG, 通过 BG 的权值最大匹配 (maximum weight matching, MWM) 方法来得到最优的通信资源分配方式.

**定义2** 给定一个有两个不相交顶点集  $(A, B)$  的二分图  $G = (V, E)$  和权重函数  $\omega: E \rightarrow R$ , 找到最大权重的匹配, 其中匹配  $M$  的权重由  $\omega(M) = \sum_{e \in M} \omega(e)$  获得<sup>[28]</sup>.

构造二分图  $G = (V, E)$ , 形式如图2所示. 其

中:  $V$  顶点集由子集  $(A, B)$  组成,  $A$  是由通信资源  $U$  子帧组成, 即

$$A = \{U_k | k = 1, \dots, K-1\}, \quad (4)$$

$U_k$  表示第  $k$  个  $U$  子帧.  $B$  由通信链路组成, 即

$$B = \{\text{link}_i | i = 2, \dots, N\}, \quad (5)$$

其中  $\text{link}_i$  表示第  $i$  车与前车存在通信的通信链路. 另外, 头车将恒占用一个  $U$  子帧, 因此, 不讨论头车与跟随1车的通信链路, 并且通信变化不影响传感器采集数据. 由于通信资源存在受限的情况,  $N \geq K$ . 其次  $E$  表示图  $G$  中的权重集, 即

$$E = \{\text{edge}_{k,i} | k = 1, \dots, K-1, i = 2, \dots, N\}, \quad (6)$$

其中  $\text{edge}_{k,i}$  表示第  $k$  个子帧被第  $i$  条通信链路占用的权重大小, 且权重的取值只与车辆的上一时刻间距误差有关, 即

$$\omega(\text{edge}_{k,i}) = f(e_i(t-1)). \quad (7)$$

$f(\cdot)$  表示权值函数,  $e_i(t-1)$  表示第  $i$  车与前车上一时刻的车间距误差. 为了得到最合理的通信资源分配方法, 根据 MWM 法, 得到如下表达式:

$$W = \arg \max_W \left\{ \sum_{i=2}^N f(e_i(t-1)) \times w_{i-1}(t) \right\}. \quad (8)$$

其中:  $i = 2, \dots, N$ ;  $w_{i-1}(t)$  为通信链路标志, 表示相邻车辆间是否存在通信,  $w_{i-1}(t) \in \{0, 1\}$ , 当存在通信时  $w_{i-1}(t) = 1$ , 不存在时  $w_{i-1}(t) = 0$ ;  $W$  表示当前时刻所有车辆最优的通信链路打开的集合, 即

$$W = \{w_1(t) \ w_2(t) \ \dots \ w_{N-1}(t)\}. \quad (9)$$

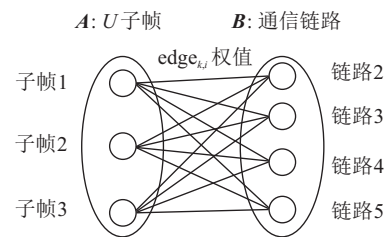


图2 加权BG示例, 其中  $K = 4, N = 5$

## 2 车辆队列时滞反馈控制

根据式(3)和通信链路集合(9), 可以将反馈控制器改写为

$$u_i(t) = K_{i,1}x_i(t) + K_{i,2}Y_i x_{i-1}(t - \varsigma_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (10)$$

其中:  $\varsigma_i$  表示资源分配过程中可能存在的延时, 定义其存在上界, 即  $0 < \varsigma_i \leq \varsigma_{\max}$ ; 增益矩阵  $K_{i,1} = [k_{i,1}, k_{i,2}, k_{i,3}, k_{i,4}]$ ,  $K_{i,2} = k_{i,5}$ , 同时定义  $w_0(t) = 1$  恒成立;  $Y_i = [0 \ 0 \ w_{i-1}(t) \ 0]$ , 并定义  $\mathbf{0}_{1 \times 4} = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$ .

为了得到稳定 CACC 系统, 将控制器 (10) 代入系统 (2) 中, 可以得到 CACC 车辆队列闭环系统

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i K_{i,1} x_i(t) + C_i x_{i-1}(t) + B_i K_{i,2} Y_i x_{i-1}(t - s_i). \quad (11)$$

定义  $x(t) = [x_1(t)^T \ x_2(t)^T \ \dots \ x_N(t)^T]^T$ , 进一步化简得到集中式的闭环 CACC 系统

$$\dot{x}(t) = A_K x(t) + B_K x(t - \Theta). \quad (12)$$

其中

$$A_K = A + BK_1, \quad B_K = \bar{B}K_2Y, \quad \Theta \leq \varsigma_{\max},$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ C_2 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & C_N & A_N \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ B_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & B_N & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \text{diag}\{B_1, \dots, B_N\},$$

$$Y = \text{diag}\{Y_2, \dots, Y_N, 0_{1 \times 4}\},$$

$$K_1 = \text{diag}\{K_{1,1}, \dots, K_{N,1}\},$$

$$K_2 = \text{diag}\{K_{2,2}, \dots, K_{N,2}, 0\}.$$

定义延时上界  $h = \varsigma_{\max}$ , 从而给出如下定理.

**定理 1** 对于给定的  $\lambda$  和  $\rho$ , 如果存在对角矩阵  $\bar{P} > 0, \bar{R} > 0$  和合适维度的矩阵  $V_i (i = 1, 2)$ , 使如下的 LMI 成立:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} & 0 \\ * & -2\rho^{-1}\bar{P} & h\rho^{-1}V_2^T\bar{B}^T & h\bar{R} \\ * & * & -h\bar{R} & 0 \\ * & * & * & -h\bar{R} \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

则闭环系统 (12) 渐近稳定, 且 CACC 控制器增益矩阵为  $K_1 = V_1\bar{P}^{-1}$  和  $K_2 = V_2\bar{P}^{-1}Y^{-1}$ . 式 (13) 中:  $\Sigma_{11} = A\bar{P} + \bar{P}A^T + BV_1 + V_1^TB^T - \lambda\rho^{-1}(\bar{B}V_2 + V_2^T\bar{B}^T), \Sigma_{12} = \rho^{-1}\bar{B}V_2 + \bar{P} + \lambda\rho^{-1}\bar{P}, \Sigma_{13} = h(\bar{P}A^T + V_1^TB - \lambda\rho^{-1}V_2^T\bar{B}^T)$ .

**证明** 考虑如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \int_{-h}^0 \int_{t+\delta}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)dsd\delta. \quad (14)$$

沿式 (12) 的轨线对  $V(t)$  求导并简化, 得到

$$\dot{V}(t) = x^T(t)(PA_K + A_K^TP)x(t) + h\dot{x}^T(t)R\dot{x}(t) - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)ds + 2x^T(t)PB_Kx(t - \Theta). \quad (15)$$

利用牛顿-莱布尼茨公式引入合适维度的自由矩阵  $M_1$  和  $M_2$ , 具体公式如下:

$$\phi = x(t) - x(t - \Theta) - \int_{t-\Theta}^t \dot{x}(s)ds = 0,$$

$$[x^T(t)M_1^T + x^T(t - \Theta)M_2^T]\phi = 0. \quad (16)$$

另外, 考虑任意合适维度的矩阵  $Z = [Z_{ij}]$ , 其中  $Z_{ij} > 0 (i = 1, 2; i \leq j \leq 2)$ , 有

$$h\eta_1^T(t)Z\eta_1(t) - \int_{t-\Theta}^t \eta_1^T(t)Z\eta_1(t)dt \geq 0, \quad (17)$$

其中  $\eta_1(t) = [x(t)^T \ x(t - \Theta)^T]^T$ . 将式 (16) 和 (17) 代入 (15), 得到

$$\dot{V}(t, x_t) \leq \eta_1^T(t)\{H + h\Gamma_1^TR\Gamma_1\}\eta_1(t) - \int_{t-\Theta}^t \eta_2^T(t)\Psi\eta_2(t)dt. \quad (18)$$

其中

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & PB_K - M_1^T + M_2 + hZ_{12} \\ * & -M_2^T - M_2 + hZ_{22} \end{bmatrix},$$

$$H_{11} = PA_K + A_K^TP + M_1^T + M_1 + hZ_{11},$$

$$\Gamma_1 = [A_K \ B_K], \quad \eta_2(t, s) = [\eta_1^T(t) \ \dot{x}^T(s)]^T,$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & M_1^T \\ * & Z_{22} & M_2^T \\ * & * & R \end{bmatrix}.$$

如果下述不等式成立:

$$H + h\Gamma_1^TR\Gamma_1 < 0, \quad \Psi \geq 0, \quad (19)$$

则不等式 (18) 成立. 因此, 根据 Lyapunov-Krasovskii 稳定性定理, 闭环系统 (12) 是渐近稳定的. 使用不等式 (18) 和 Schur 补引理<sup>[29]</sup>, 得到

$$\Xi := \begin{bmatrix} \bar{H} & PB_K - M_1^T + M_2 & h\Gamma_1^T & -h\Gamma_2^T \\ * & -M_2^T - M_2 & -hR^{-1} & 0 \\ * & * & * & -hR \\ * & * & * & * \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

其中  $\bar{H} = H - hZ$ . 如果 LMI (20) 成立, 则闭环系统 (12) 是渐近稳定的. 但由于非线性项  $PA_K$  等, 通过线性化, 定义

$$W = \begin{bmatrix} P & 0 \\ M_1 & M_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A_K & B_K \\ I & -I \end{bmatrix}. \quad (21)$$

令  $M_1 = \lambda P$  和  $M_2 = \rho P$ , 其中  $\rho \neq 0$ , 且  $W$  可逆. 定义对角矩阵  $T = \text{diag}\{W^{-1}, I, R^{-1}\}$ , 计算  $\Delta = T^T\Xi T$ , 得到

$$\Delta = \begin{bmatrix} \bar{H}_{11} & W^{-T}h\Gamma_1^T & h\Pi_1^T \\ * & -hR^{-1} & 0 \\ * & * & -hR^{-1} \end{bmatrix} < 0. \quad (22)$$

其中

$$\bar{H}_{11} = \bar{A}W^{-1} + W^{-T}\bar{A}^T, \quad \Pi_1 = [0 \ R^{-1}]. \quad (23)$$

$$\text{令 } \bar{P} = P^{-1}, \bar{R} = R^{-1}, V_1 = K_1P^{-1} \text{ 和 } V_2 =$$

$K_2YP^{-1}$ . 通过上述推导可知  $\Delta < 0$ , 这意味着不等式  $\Xi < 0$  成立. 因此, 如果式(13)成立, 则闭环 CACC 系统(12)是渐近稳定的.  $\square$

### 3 队列系统弦稳定分析

上一节得到了通信资源受限情况下的闭环 CACC 系统的控制律, 为了体现车辆队列的安全性, 需要分析该车辆队列系统的弦稳定性. 队列弦稳定性意味着上游车辆的误差将沿着车辆队列递减. 本节将第  $i$  车和第  $i-1$  车加速度变化作为衡量车辆队列弦稳定的指标<sup>[30-31]</sup>, 即对于任意频率  $w > 0$ , 存在  $\|G_i(jw)\| \leq 1$ . 其中:  $G_i(s) = a_i(s)/a_{i-1}(s)$ ,  $a_i(s)$  和  $a_{i-1}(s)$  是  $a_i(t)$  和  $a_{i-1}(t)$  的拉普拉斯变换. 因此, 本节在闭环系统稳定的条件下, 给出保证车队弦稳定的充分性条件.

考虑车辆队列系统(12), 定义

$$\begin{aligned} Q_i(s) &= k_{i,1} + k_{i,2}s + k_{i,4}s^2, \\ W_i(s) &= \tau_i s^3 + (1 - k_{i,3} + k_{i,4})s^2 + \\ &\quad (k_{i,1}T_i + k_{i,2})s + k_{i,1}, \end{aligned} \quad (24)$$

则有如下车辆队列弦稳定性结果.

**定理 2** 考虑车辆队列闭环系统(12), 如果 CACC 控制器参数满足如下不等式:

$$\tau_i^2 + k_{i,4}k_{i,5}\zeta_i^2 \geq 0, \quad (25a)$$

$$(1 - k_{i,3} + k_{i,4})^2 - 2(k_{i,1}T_i + k_{i,2})\tau_i - k_{i,5}^2 - k_{i,4}^2 - 2k_{i,4}k_{i,5} - k_{i,1}k_{i,5}\zeta_i^2 - 2k_{i,2}k_{i,5}\zeta_i \geq 0, \quad (25b)$$

$$(k_{i,1}T_i + k_{i,2})^2 - 2k_{i,1}(1 - k_{i,3} + k_{i,4}) - k_{i,2}^2 + 2k_{i,1}k_{i,4} + 2k_{i,1}k_{i,5} \geq 0, \quad (25c)$$

$$(1 - k_{i,3} + k_{i,4})^2 - 2(k_{i,1}T_i + k_{i,2})\tau_i - k_{i,4}^2 \geq 0, \quad (26a)$$

$$(k_{i,1}T_i + k_{i,2})^2 - 2k_{i,1}(1 - k_{i,3} + k_{i,4}) - k_{i,4}^2 + 2k_{i,1}k_{i,4} \geq 0, \quad (26b)$$

则 CACC 车辆队列系统是弦稳定的.

**证明** 由定理 1 可知闭环系统中的车辆是稳定的, 然后对  $e_i(t)$  和  $\Delta v_i$  进行拉普拉斯变换, 得到

$$\begin{aligned} s^2 e_i(s) &= a_{i-1}(s) - a_i(s) - sT_i a_i(s), \\ s\Delta v_i(s) &= a_{i-1}(s) - a_i(s). \end{aligned} \quad (27)$$

将式(27)代入控制器(10)并做拉普拉斯变换, 可得

$$G_i(s) = \frac{Q_i(s) + s^2 k_{i,5} e^{-\zeta_i s}}{W_i(s)}. \quad (28)$$

由于车辆之间的通信链路存在开放和关闭的状态, 下面分两部分讨论.

第 1 部分: 第  $i$  车和第  $i-1$  车的通信链路打开时,

根据欧拉公式可得

$$\|G_i(jw)\| = \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}}. \quad (29)$$

其中

$$\begin{aligned} s &= jw, \\ \alpha &= [k_{i,1} - w^2 k_{i,4} - w^2 k_{i,5} \cos(w\zeta_i)]^2 + \\ &\quad [w^2 k_{i,5} \sin(w\zeta_i) + w k_{i,2}]^2, \\ \beta &= w^6 \tau_i^2 + [(1 - k_{i,3} - k_{i,4})^2 - 2(k_{i,1}T_i + k_{i,2})\tau_i - \\ &\quad k_{i,5}^2 - k_{i,4}^2 - 2k_{i,4}k_{i,5} \cos(w\zeta_i)]w^4 - \\ &\quad 2k_{i,2}k_{i,5} \sin(w\zeta_i)w^3 + [(k_{i,1}T_i + k_{i,2})^2 - \\ &\quad 2k_{i,1}(1 - k_{i,3} + k_{i,4}) - k_{i,2}^2 + 2k_{i,1}k_{i,4} + \\ &\quad 2k_{i,1}k_{i,5} \cos(w\zeta_i)]w^2. \end{aligned}$$

可以发现对于任意的  $w > 0$ , 有  $\alpha(w) > 0$  成立, 因此, 如果使  $\|G_i(jw)\| \leq 1$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 成立, 则  $\beta(w) > 0$ . 根据泰勒展开式

$$\sin(\zeta_i w) \approx \zeta_i w, \quad \cos(\zeta_i w) \approx 1 - (\zeta_i w)^2/2!, \quad (30)$$

可以得到

$$\begin{aligned} &(\tau_i^2 + k_{i,4}k_{i,5}\zeta_i^2)w^4 + [(1 - k_{i,3} + k_{i,4})^2 - \\ &2(k_{i,1}T_i + k_{i,2})\tau_i - k_{i,5}^2 - k_{i,4}^2 - 2k_{i,4}k_{i,5} - \\ &k_{i,1}k_{i,5}\zeta_i^2 - 2k_{i,2}k_{i,5}\zeta_i]w^2 + [(k_{i,1}T_i + k_{i,2})^2 - \\ &2k_{i,1}(1 - k_{i,3} + k_{i,4}) - k_{i,2}^2 + 2k_{i,1}k_{i,4} + \\ &2k_{i,1}k_{i,5}] \geq 0. \end{aligned} \quad (31)$$

如果不等式(25)满足, 则不等式(31)成立, 即车辆队列内存在通信的汽车满足弦稳定性条件.

第 2 部分: 第  $i$  车和第  $i-1$  车的通信链路关闭时, 可以得到加速度传递函数为

$$G_i(s) = Q_i(s)/W_i(s). \quad (32)$$

因此, 通过与第 1 部分相似的推导, 最终可以得到

$$\begin{aligned} &\tau_i^2 w^4 + [(1 - k_i^3 + k_i^4)^2 - 2(k_i^1 T_i + k_i^2)\tau_i - \\ &(k_i^4)^2]w^2 + [(k_i^1 T_i + k_i^2)^2 - 2k_i^1(1 - k_i^3 + k_i^4) - \\ &k_{i,2}^2 + 2k_i^1 k_i^4] \geq 0. \end{aligned} \quad (33)$$

所以如果队列系统(12)满足不等式条件(26), 则可知加速度传递函数(32)对于任意的  $w \geq 0$  都满足  $\|G_i(jw)\| \leq 1$ .

综上, 由通信部分和非通信部分推导可得, 若不等式(25)和不等式(26)满足, 则队列系统在通信资源受限情况下是弦稳定的.  $\square$

### 4 仿真实验与分析

为了验证所设计的 CACC 控制器在通信受限情况下对车辆队列的控制效果, 考虑由 7 车组成的网联

车队列. 分别考虑两组仿真实验: 实验1验证本控制器在通信资源受限下变速队列控制效果, 实验2仿真对比不同通信资源下的控制效果. 在实验研究中, 选取第*i*辆车仿真参数如下: 车长 $L_i = 2\text{ m}$ , 动力学常数 $\tau_i = 0.2\text{ s}$ , 车头时距 $T_i = 1.05\text{ s}$ , 采样时间 $T_s = 0.2\text{ s}$ , 初始理想间距 $\delta_i(0) = 8\text{ m}$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), 选取时延上限 $h_i = 1.1\text{ s}$ . 其次, 在仿真过程中, 选择 $\lambda = -0.35$ 和 $\rho = 0.08$ . 根据本文算法计算CACC控制器的增益, 如表1所示.

表1 各车的CACC增益

车辆	$k_{i,1}$	$k_{i,2}$	$-k_{i,3}$	$k_{i,4} \times 10^3$
1	0.269	0.820	0.367	0.202
2	0.309	0.963	0.310	0.189
3	0.317	0.953	0.265	0.177
4	0.324	0.936	0.238	0.160
5	0.333	0.917	0.220	0.135
6	0.318	0.750	0.121	0.111

4.1 通信资源受限下车辆变速控制

针对车辆在通信资源受限的情况, 开展本文所设计控制器的有效性验证.

定义某路段有7辆CAV组成的队列, 并按一定速度变化纵向行驶. 其中*i* = 0表示头车, 车辆队列如图3所示. 其中: 图3(a)表示单通信资源的情况, 即只存在头车的通信; 图3(b)表示存在4个通信资源, 即通信受限情况; 图3(c)表示通信资源充足的情况.

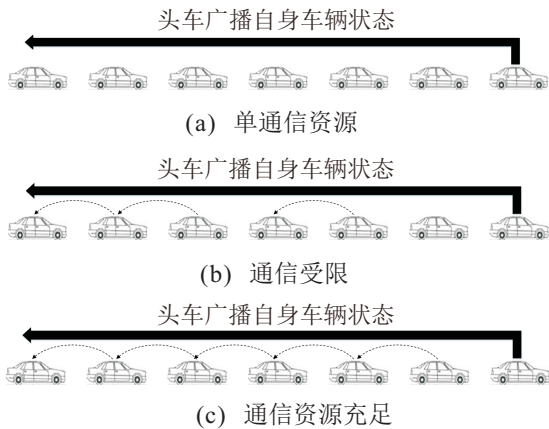
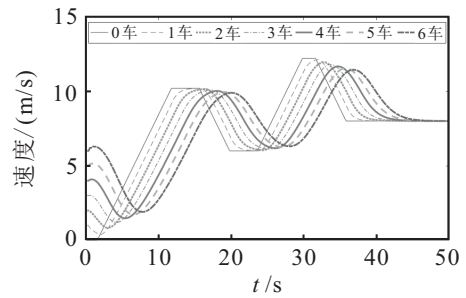


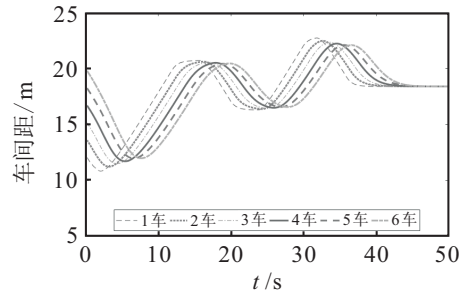
图3 CACC车辆队列示意

图4表示本文所设计通信受限情况下CACC控制下的车辆队列速度、间距和间距误差的变化, 即在图3(b)场景下. 从图4(a)中看出, 在通信受限的情况下各车辆的速度都能快速地跟随上头车和前车的变化; 结合图4(b)和图4(c)可以发现, 车辆在各个时刻都能保持在当前速度下的理想安全间距行驶.

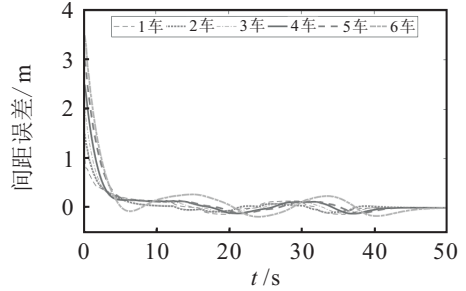
图5为车辆队列的加速度和控制输入曲线, 由于求取的控制输入为理想加速度, 控制输入的变化与各车的加速度曲线相近. 从图5中可以看出, 各车能较



(a) 车辆速度曲线



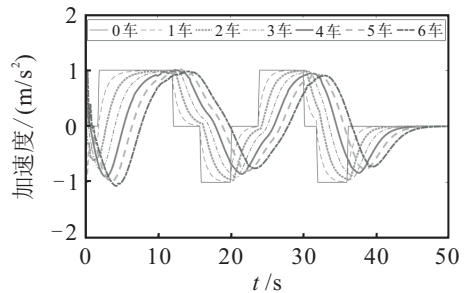
(b) 车间距曲线



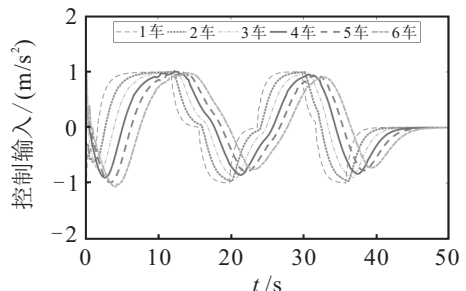
(c) 车辆间距误差曲线

图4 车辆队列速度、间距和间距误差的变化情况

好地跟随上前车的加速度变化, 从而验证了所设计的控制器可以在有限通信的情况下保证车辆队列稳定行驶.



(a) 车辆加速度曲线



(b) 车辆控制输入曲线

图5 车辆队列加速度和控制输入曲线

图6显示了所有跟随车辆的加速度传递函数频率响应,可以看出,对于任何 $w \geq 0$ ,  $G_i(jw)$ 的范数都小于1. 因此,进一步表明了所设计的CACC控制器控

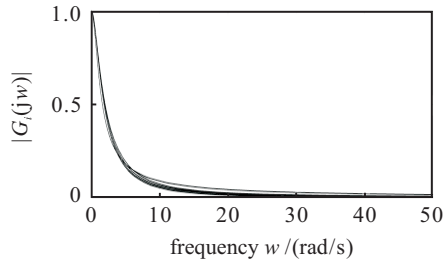


图6 车辆队列的 $G_i(jw)$ 频率响应

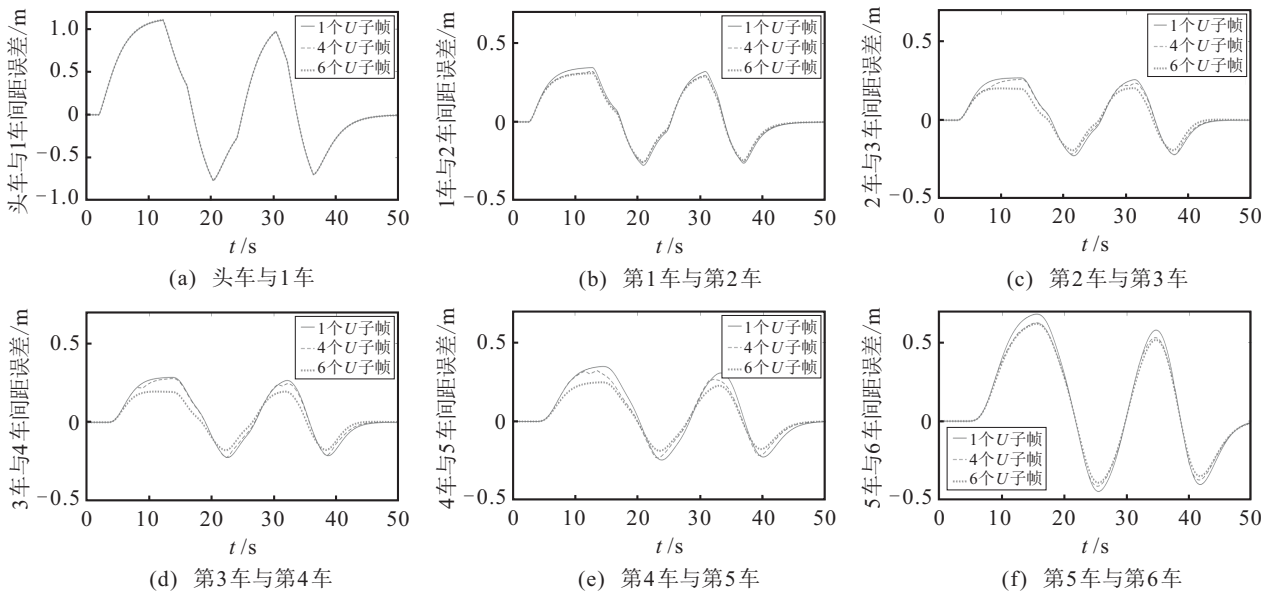


图7 车辆间距误差变化曲线

根据图7,通过本文所设计的控制器控制的车辆队列的间距误差最终都可以收敛到0. 从图7(b)和图7(f)中可以观察到,因为第1、第2车,第5、第6车之间的间距误差更大,所以分配到的通信资源概率更大,因此在通信资源受限的情况下,其控制效果更接近通信资源充足的情况. 其次,从图7(c)~图7(e)可以看出,虽然第2、第3车,第3、第4车,第4、第5车之间的间距误差较小,但是根据本文的控制方法,车辆间的间距误差还是得到了一定的改善. 由于头车恒定占有一个 $U$ 子帧,头车将保持对1车状态信息的传输,从图7(a)也可以看出1车的间距误差在不同的通信资源情况下是相同的.

通过上述对比仿真可以表明,本文所设计的通信资源受限下的CACC控制器能够根据车辆间距误差大小的变化很好地分配当前时刻的通信资源,从而有效减少车辆之间的间距误差. 在保证车辆稳定的同时,大大提高了车辆在通信资源匮乏环境下行驶的安全性.

制的车辆队列在通信资源受限下是弦稳定的.

## 4.2 不同通信资源下的对比仿真

为了进一步表明所设计控制器的优越性,通过不同通信资源下的车辆的间距误差变化来验证. 为了较好地展示不同通信资源情况下间距误差随时间的变化情况,定义各车辆初始的间距误差 $e_i(0) = 0$ ,并定义速度变化与4.1节相同.

第1到第6车之间的车辆间距误差变化分别如图7(a)~图7(f)所示. 其中:实线表示图3(a)队列,虚线表示图3(b)队列,点线表示图3(c)队列.

## 5 CarSim仿真实验

为进一步验证所设计控制器的有效性,通过CarSim2016软件设计一个车辆队列仿真实验如图8所示. 值得注意的是,CarSim软件3D模型显示的上限是6辆车,所以本实验进行6车仿真. 该软件可以更好地模拟出车辆在实际路况上的行驶情况. 本实验中设计了6辆相同结构的汽车,通过所设计的通信受限下CACC控制器进行控制,头车的速度和加速度以及其他仿真参数与4.1节相同.



图8 CarSim仿真中的6车队列

图9~图13分别表示6辆车的位置、速度、加速度、车间距和车间距误差随时间的变化. 从图9的位

置曲线可以看到车辆之间不会发生碰撞. 从图10的速度曲线可以看出车辆速度起伏较大, 这是由于通信受限和实际车辆需要更多反应时间导致的, 但最终还是可以跟随上前车的速度变化. 图11中加速度曲线出现震荡现象, 这是由于CarSim软件仿真更接近实车场景, 存在车辆档位、油门、刹车变化等情况, 但总体是符合控制器的控制目标的. 图12和图13中车辆间距曲线和间距误差曲线展示车辆能够保持在当前速度下的安全间距行驶. 因此, 在存在通信受限的情况下, 使用本文所设计的CACC控制器的车辆队列在接近真实的车辆驾驶环境下同样能保证车辆队列的安全行驶, 进一步验证了所设计控制算法的有效性.

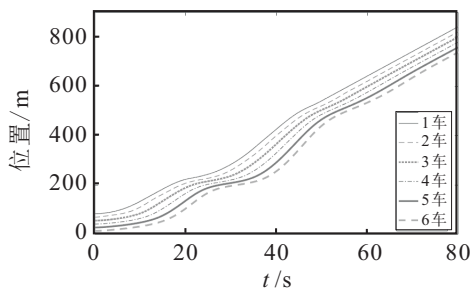


图9 车辆位置变化曲线

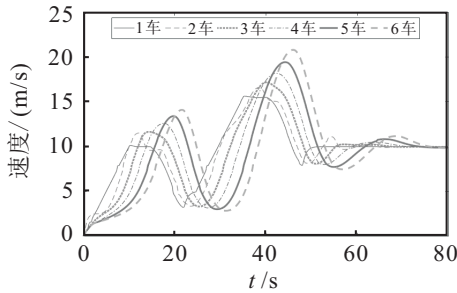


图10 车辆速度变化曲线

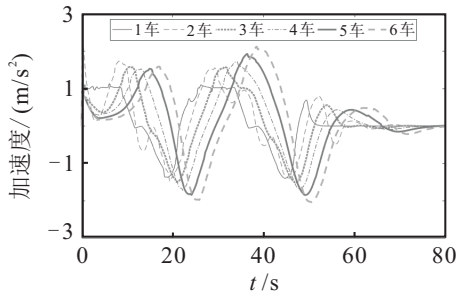


图11 车辆加速度变化曲线

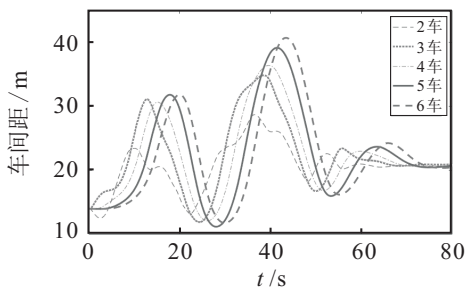


图12 车辆间距变化曲线

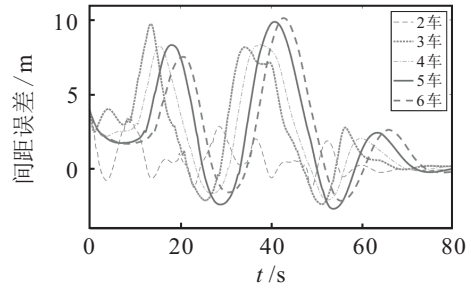


图13 车辆间距误差变化曲线

## 6 结论

本文针对路段通信资源受限情况下的网联车系统, 提出了一种联合通信资源分配的协同自适应巡航控制算法, 在减少车辆对通信依赖的同时, 保证了车辆行驶的安全性. 算法根据行驶路段通信资源、车辆间的通信链路数量和车辆的间距误差大小建立合适的二分图, 用于车辆合理分配有限的通信资源. 在此基础上, 基于线性矩阵不等式技术, 获得网联车系统CACC的控制增益, 并建立了保证闭环系统稳定和车辆队列系统弦稳定的充分条件. 最后, 通过Matlab和CarSim仿真实验的结果验证了本文方法的有效性. 由于实际车辆通信过程中还会遇到网络攻击和通信完全失效等情况, 关于补偿通信约束对CACC系统的影响还有待研究.

### 参考文献(References)

- [1] Chehardoli H, Ghasemi A, Najafi A. Centralized and decentralized distributed control of longitudinal vehicular platoons with non-uniform communication topology[J]. Asian Journal of Control, 2019, 21(6): 2691-2699.
- [2] Wen S X, Guo G. Control of leader-following vehicle platoons with varied communication range[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 5(2): 240-250.
- [3] Jia D Y, Lu K J, Wang J P, et al. A survey on platoon-based vehicular cyber-physical systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 263-284.
- [4] Liu H, Lu X Y, Shladover S E. Traffic signal control by leveraging cooperative adaptive cruise control (CACC) vehicle platooning capabilities[J]. Transportation Research — Part C: Emerging Technologies, 2019, 104: 390-407.
- [5] Zhu Y H, Zhao D B, Zhong Z G. Adaptive optimal control of heterogeneous CACC system with uncertain dynamics[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(4): 1772-1779.
- [6] Moradi-Pari E, Mahjoub H N, Kazemi H, et al. Utilizing model-based communication and control for cooperative automated vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(1): 38-51.

- [7] 宋秀兰, 丁锋, 漏小鑫, 等. 异构通信网联车系统鲁棒协同自适应巡航控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2407-2413.  
(Song X L, Ding F, Lou X X, et al. Robust cooperative adaptive cruise control of connected vehicle systems with heterogonous communication[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2407-2413.)
- [8] Song X L, Ding F, Xiao F, et al. Data-driven optimal cooperative adaptive cruise control of heterogeneous vehicle platoons with unknown dynamics[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(9): 1-12.
- [9] Ploeg J, Shukla D P, van de Wouw N, et al. Controller synthesis for string stability of vehicle platoons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 854-865.
- [10] Ploeg J, Semsar-Kazerooni E, Lijster G, et al. Graceful degradation of cooperative adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 488-497.
- [11] Chen S Z, Hu J L, Shi Y, et al. LTE-V: A TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 997-1005.
- [12] Peng H X, Li D Z, Ye Q, et al. Resource allocation for cellular-based inter-vehicle communications in autonomous multiplatoons[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 11249-11263.
- [13] Araniti G, Campolo C, Condoluci M, et al. LTE for vehicular networking: A survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5): 148-157.
- [14] Wen S X, Guo G. Communication topology assignment and control co-design for vehicle platoons in LTE-V2V network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(12): 12462-12476.
- [15] Hong C H, Shan H G, Song M Y, et al. A joint design of platoon communication and control based on LTE-V2V[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15893-15907.
- [16] Pereñíguez F, Lozano J S, Fernández P J, et al. Vehicular ad hoc networks: Standards, solutions and research[M]. Berlin: Springer Publishing Company, 2015: 1-544.
- [17] Wang R Y, Wu J X, Yan J J. Resource allocation for D2D-enabled communications in vehicle platooning[J]. IEEE Access, 2018, 6: 50526-50537.
- [18] Fn A, Vm B. Mixing V2V- and non-V2V-equipped vehicles in car following[J]. Transportation Research — Part C: Emerging Technologies, 2019, 108: 167-181.
- [19] Mei J, Zheng K, Zhao L, et al. Joint radio resource allocation and control for vehicle platooning in LTE-V2V network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12218-12230.
- [20] Bischoff D, Schiegg F A, Schuller D, et al. Prioritizing relevant information: Decentralized V2X resource allocation for cooperative driving[J]. IEEE Access, 2021, 9: 135630-135656.
- [21] Liang H B, Zhang X H, Hong X T, et al. Reinforcement learning enabled dynamic resource allocation in the Internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(7): 4957-4967.
- [22] Al-Jharyyish A M H, Schmidt K W. Feedforward strategies for cooperative adaptive cruise control in heterogeneous vehicle strings[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(1): 113-122.
- [23] Öncü S, Ploeg J, van de Wouw N, et al. Cooperative adaptive cruise control: Network-aware analysis of string stability[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(4): 1527-1537.
- [24] Xiao L Y, Gao F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1184-1194.
- [25] Naus G J L, Vugts R P A, Ploeg J, et al. String-stable CACC design and experimental validation: A frequency-domain approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9): 4268-4279.
- [26] 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.
- [27] Zheng K, Zhang L, Xiang W, et al. Heterogeneous vehicular networks[M]. Berlin: Springer Publishing Company, 2016: 1-81.
- [28] Zheng K, Liu F, Zheng Q, et al. A graph-based cooperative scheduling scheme for vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1450-1458.
- [29] Yaz E E. Linear matrix inequalities in system and control theory[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(12): 2473-2474.
- [30] Song X L, Wei D J, Chen Y, et al. Bidirectional asymmetric delay feedback for cooperative adaptive cruise control of vehicle platoons with unreliable communication[J]. Asian Journal of Control, 2022, 24(6): 3066-3079.
- [31] Kayacan E. Multiobjective  $H_\infty$  control for string stability of cooperative adaptive cruise control systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(1): 52-61.

## 作者简介

宋秀兰(1982—), 女, 副教授, 博士, 从事智能网联车辆协同控制理论与方法、智慧交通、通信网络安全等研究, E-mail: songxl2008@zjut.edu.cn;

陈雨(1997—), 男, 硕士生, 从事网联车辆协同自适应巡航控制的研究, E-mail: 252613769@qq.com;

陈新(2002—), 男, 本科生, 从事网联车辆协同自适应巡航控制的研究, E-mail: 1491896601@qq.com;

魏定杰(1997—), 男, 硕士生, 从事网联车辆协同自适应巡航控制的研究, E-mail: 861275585@qq.com;

何德峰(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能系统预测控制理论与应用等研究, E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn.