

# DoS 攻击下网联车队安全协同自适应 预测巡航控制

宋秀兰, 柴伟豪, 何德峰, 应颂翔

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 针对受约束网联车队受到加速度拒绝服务(DoS)攻击的情况, 提出一种新的安全协同自适应预测巡航控制算法。首先, 结合运动学特征设计加速度估计器以缓解 DoS 攻击对巡航控制器的影响, 再设计特定的综合轨迹信号以灵活表示网联车队的各种交通工况。其次, 采用滚动时域优化原理和分布式模型预测控制(MPC)框架, 提出满足安全约束的车辆队列安全协同自适应预测巡航控制策略。在此基础上, 采用线性矩阵不等式方法, 给出在安全约束和加速度 DoS 攻击下的队列稳定性和弦稳定性的充分条件。最后, 通过典型交通场景仿真验证本文算法的有效性。

**关键词:** 控制科学与工程; 协同自适应巡航控制; 模型预测控制; 安全控制; 拒绝服务攻击

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3406-11

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230063

## Security-oriented cooperative adaptive predictive cruise control for connected and automated vehicular platoons under DoS attacks

SONG Xiu-lan, CHAI Wei-hao, HE De-feng, YING Song-xiang

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

**Abstract:** A new security-oriented cooperative adaptive predictive cruise control (CAPCC) algorithm is presented for connected and automated vehicle (CAV) platoons subject to constraints and Denial of Service (DoS) attacks of predecessors' acceleration. Firstly, using the kinematic characteristics, the acceleration estimator is designed to alleviate the effect of DoS attacks on cruise controllers. Then the synthetical trajectory signals are designed to flexibly represent various traffic situations of CAV platoons. Secondly, by adopting the receding horizon optimization principle, the secure CAPCC scheme of the vehicle platoon with satisfactions of the safety constraints is formulated in the framework of distributed model predictive control. Moreover, some sufficient conditions in the form of linear matrix inequalities are obtained to ensure stability and string stability of the platoon in the presence of safety constraints and the acceleration DoS attacks. Finally, some simulation experiments in representative traffic scenarios verify the effectiveness of the presented algorithm.

**收稿日期:** 2023-01-20.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(62273307); 浙江省公益性技术应用研究项目(LGF22F030013).

**作者简介:** 宋秀兰(1982-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 网联车队安全控制. E-mail: songxl2008@zjut.edu.cn

**Key words:** control science and engineering; collaborative adaptive cruise control; model predictive control; security control; denial of service attack

## 0 引言

随着车辆保有量的持续快速增加,道路交通堵塞、环境污染和交通事故问题日益严峻<sup>[1]</sup>,车辆协同自适应巡航控制(CACC)被认为是解决这些交通问题的有效技术手段。CACC借助车联网技术和车载传感器,调节一队车辆的速度和加速度,使多车形成稳定队列并保持较短的安全车间距<sup>[2-5]</sup>,从而提高道路通行能力,降低燃油消耗近30%<sup>[6]</sup>。CACC系统使用DSRC/IEEE 802.11p协议<sup>[7]</sup>或C-V2X/5G技术<sup>[8]</sup>交换车辆队列的行驶数据(如加速度),因此,是一个集计算、通信、控制和车辆于一体的典型信息物理融合系统。

CACC系统的无线网络开放而脆弱,在车队行驶过程中不可避免地会暴露在恶意网络攻击之下,其中,DoS攻击是一种常见且极具破坏力的网络攻击,会严重威胁网联车队的行驶安全性<sup>[9,10]</sup>。DoS攻击通过堵塞网络信道或攻击路由协议限制车辆间的信息交互,破坏CACC控制律的计算,危害网联车队的安全性和稳定性,如交通堵塞、队列不稳定和潜在的碰撞。相关文献从系统角度分析DoS攻击对网联车辆队列的影响,如文献[11]全面分析网联车中存在的网络攻击类型,并模拟这些网络攻击对网联车的危害;文献[12]采用SUMO和OMNET++仿真平台对CACC中的DoS攻击进行建模,并验证DoS攻击对网联车队的影响;文献[13]研究了队列命令受到DoS攻击期间的网联车队行为,分析了攻击者位置对车队弦稳定性的影响。

为了提高车队应对DoS攻击的能力,近年来一些文献从检测角度开展网联车队DoS攻击检测研究,如文献[14]利用滑模自适应估计器检测特定DoS攻击的发生,从而提高DoS攻击下车队的安全性;针对滑模观测器在攻击检测方面的不足,文献[15]设计了高增益观测器检测网联车DoS攻击,文献[16]结合车辆运动学规律和带有滑动块的广义单样本多个离群检测方法,设计了网联车实时异常检测策略;文献[17]结合卷积神经网络与带 $\chi^2$ 检测器的卡尔曼滤波器,提出了一种能检测和识别网联车异常行为的方法。

相比于网联车DoS攻击检测研究,车辆队列在DoS攻击下的网联车安全CACC研究相对较少,如文献[18]针对通信受损提出了一种CACC与ACC切换的网联车安全协同自适应巡航控制策略。虽然回退至ACC可以保证车辆安全,但会牺牲CACC在提高网联车弦稳定性和减少车间距方面的优势。近期,文献[19]为了削弱DoS攻击的影响,使用之前的加速度数据代替受到DoS攻击干扰的加速度数据计算CACC,但该方法对于持续性的DoS攻击难以有效果。

考虑受安全约束和加速度数据DoS攻击的网联车队协同控制问题,本文提出一种新的安全协同自适应预测巡航控制(CAPCC)方法。基于运动学规律,设计了前车加速度估计器估计前车传输的加速度数据,以缓解DoS攻击对车队的影响。再根据网联车行驶信息设计了综合轨迹信号,灵活描述网联车队的各种行驶情况。进一步采用滚动时域原理,在线求解网联车在安全约束和DoS攻击下的安全CAPCC问题。在此基础上,利用线性矩阵不等式得到网联车队在加速度DoS攻击下的稳定性和弦稳定性的充分条件。最后,以典型交通场景的仿真对比结果说明了该方法的有效性。

## 1 问题描述

考虑多辆网联车直线行驶交通场景,其中参考车辆记为0,领导车辆记为1,后面 $N-1$ 辆跟车依次记为2至 $N$ ,如图1所示。队列中参考车辆是领导车辆的加速度命令生成器,领导车辆可以准确获取参考加速度 $a_0(t)$ ,且无DoS攻击。进一步,跟随车辆通过车载传感器(如激光和雷达)精确获得车间距离和相对速度,通过无线网络接收前车加速度。但由于无线网络的脆弱性,网联车存在网络攻击的风险。通常,网络数据传输可能存在丢包或诱导时延等网络特性<sup>[20,21]</sup>,但本文聚

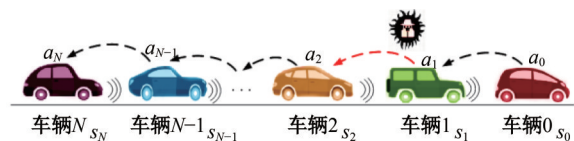


图1 车辆CACC队列示意图

Fig. 1 A schematic of a vehicle CACC platoon

焦 DoS 攻击下的网联车安全协同自适应巡航控制,故假设车联网具有良好的网络特性。

### 1.1 车辆队列纵向动力学模型

考虑车辆  $i$  的纵向动力学离散时间模型:

$$\begin{cases} s_i(k+1) = s_i(k) + T_s v_i(k) \\ v_i(k+1) = v_i(k) + T_s a_i(k) \\ a_i(k+1) = (1 - T_s/\tau_i) a_i(k) + T_s/\tau_i u_i(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $s_i(k)$ 、 $v_i(k)$ 、 $a_i(k)$  和  $u_i(k)$  分别为采样时间  $k \geq 0$  时车辆的位置、速度、加速度和控制输入;  $\tau_i$  为车辆内部动力学常数;  $T_s > 0$  为采样周期。

该模型的连续时间模型在 CACC 研究中被广泛采用<sup>[22-24]</sup>。选择车辆  $i$  的状态向量为  $x_i = [d_i, \Delta v_i, a_i]^T$ , 其中相邻车辆的车间距  $d_i$  和相对速度  $\Delta v_i$  定义为

$$\begin{cases} d_i(k) = s_i(k) - s_{i-1}(k) \\ \Delta v_i(k) = v_i(k) - v_{i-1}(k) \end{cases} \quad (2)$$

则式(1)相对应的状态空间模型为

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_{u,i} u_i(k) + B_{a,i} a_{i-1}(k) \quad (3)$$

其中

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 - T_s/\tau_i \end{bmatrix}, \quad B_{u,i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_s/\tau_i \end{bmatrix}, \quad B_{a,i} = \begin{bmatrix} 0 \\ -T_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

单向前车跟随(PF)通信拓扑的通信距离短、时延低、可靠性高,而且由于较少的车间通信,其频带资源占用少。特别是,队列中的车辆只接收其前车的加速度信息,PF 通信拓扑可以防止攻击者攻击某辆车时整个车队受到冲击。因此,本文采用 PF 通信拓扑将加速度信息发送给相邻的跟随车辆。

### 1.2 DoS 攻击模型

DoS 攻击旨在阻塞信道以阻止车辆之间的信息交换,从技术角度来看,攻击者可以通过发射干扰信号实施 DoS 攻击,实现信道的拥塞,进而破坏加速度信号的无线通信。通常,DoS 攻击对车队的破坏强度与攻击的持续时间成正相关性。根据无线电传播损耗模型<sup>[25]</sup>,攻击信号的发射功率  $P_x^i$  与接收功率  $P_x^r$ ,以及加速度信号的发射功率  $P_a^i$  与接收功率  $P_a^r$  之间的关系如(4)所示:

$$P_x^r = l_x^{-\alpha} \cdot P_x^i, \quad P_a^r = l_a^{-\alpha} \cdot P_a^i \quad (4)$$

式中:  $l_x^{-\alpha}$  和  $l_a^{-\alpha}$  分别为攻击信号和加速度信号的传播路径长度;  $\alpha > 0$  为无线电环境的衰减参数。

定义车辆接收的加速度信号的信噪比 ( $SINR_a$ ) 为:

$$SINR_a = P_x^r / P_{total} \quad (5)$$

$$P_{total} = P_x^r + P_a^r + P_N \quad (6)$$

式中:  $P_N$  为噪声功率;  $P_{total}$  为攻击信号、加速度信号和噪声的总功率。

低  $SINR_a$  会导致加速度信息较高的误码率,可被认为是信道阻塞的。因此,使用阈值  $SINR_{th}$  来划分 DoS 信号和有效信号。

$$\varpi = \begin{cases} 1 & SINR_a \geq SINR_{th} \\ 0 & SINR_a < SINR_{th} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\varpi$  为表示攻击是否发生的指示变量。

令  $a_{i-1}(k)$  为前车的真实加速度,则在 DoS 攻击下从前车接收到的数据  $\bar{a}_{i-1}(k)$  建模为<sup>[26]</sup>

$$\bar{a}_{i-1}(k) = \varpi_{i-1}(k) a_{i-1}(k) \quad (8)$$

式中:  $\varpi_{i-1}$  为第  $i-1$  辆车的加速度是否被 DoS 攻击,即如果  $\varpi_{i-1}(k) = 1$ , 则  $k$  时刻传输的加速度没有受到干扰,即该数据被正确共享;反之,  $\varpi_{i-1}(k) = 0$  表示  $k$  时刻传输的加速度数据被攻击者阻塞。

实际中由于物理限制,如有限能量,攻击者不能持续地发动成功的攻击。因此,假设 DoS 攻击是周期性的中断无线通信链路,降低  $SINR_a$ , 导致车辆在一段时间内无法接收到所需的信息。周期性 DoS 攻击模型可以描述为

$$\varpi_{i-1}(k) = \begin{cases} 0, & k \in R_n^1 \\ 1, & k \in R_n^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$R_n^1 = \{k \in N | n T/T_s < k < (n+1) T/T_s\}$$

$$R_n^2 = \{k \in N | n T/T_s + k_{on} < k < (n+1) T/T_s\}$$

式中:  $T$  为 DoS 攻击的周期;  $n$  为第  $n^{\text{th}}$  个周期,  $\{0 \leq k_{on} \leq T/T_s\}$  为一个周期内存在 DoS 攻击的时间;  $R_n^1$  和  $R_n^2$  分别为存在 DoS 攻击和不存在 DoS 攻击的时间集合。

## 2 安全 CACC 控制器设计

### 2.1 加速度估计器

考虑车辆  $i$  的运动学特性

$$\begin{cases} s_i(k) - s_i(k-1) = v_i(k-1) T_s + 0.5 a_i(k-1) T_s^2 \\ s_{i-1}(k) - s_{i-1}(k-1) = v_{i-1}(k-1) T_s + 0.5 \hat{a}_{i-1}(k-1) T_s^2 \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)中两式相减后可得:

$$\hat{a}_{i-1}(k-1) = a_i(k-1) + \frac{\Delta v_i(k-1)}{T_s} - \frac{2(d_i(k) - d_i(k-1))}{T_s^2} \quad (11)$$

通过该加速度估计器,可得前车前一时刻的加速度信息。综上,持续 DoS 攻击下前车加速度估计为:

$$\tilde{a}_{i-1}(k) = \begin{cases} a_{i-1}(k), \varpi_{i-1}(k) = 1 \\ \hat{a}_{i-1}(k-1), \varpi_{i-1}(k) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\tilde{a}_{i-1}(k)$ 为车辆*i*最终采用的前车加速度数据。

## 2.2 综合轨迹信号

CACC 目标是将车辆间的相对速度和相对加速度调整为零,同时在满足安全约束下保持较小的理想车间距。故考虑车辆*i*的系统模型(3),定义如下综合轨迹信号作为车辆的辅助输出:

$$y_i(k) = w_1 d_i(k) + w_2 \Delta v_i(k) + w_3 a_i(k) = C x_i(k) \quad (13)$$

式中:行向量  $C = [w_1, w_2, w_3]$ ,且  $w_i \geq 0$ 。

理想综合轨迹信号是理想车间距  $d_{i,des}$ 、理想相对速度  $\Delta v_{i,des}$  和加速度  $\tilde{a}_{i-1}(k)$  的加权函数,从而 CACC 的目标是调整每辆网联车的辅助输出以跟踪所需的理想综合轨迹信号。

采用恒定车头时距策略<sup>[27,28]</sup>作为车辆*i*的理想间距:

$$d_{i,des}(k) = r_i + h_i v_i(k) \quad (14)$$

式中: $r_i > 0$ 为安全距离; $h_i$ 为车辆的车头时距常数。

显然,车辆*i*的理想相对速度  $\Delta v_{i,des}$  应该等于零。此外,由于 DoS 攻击影响,车辆*i*可能无法从前车接收到加速度信息,因此,使用式(12)来表示车辆的理想加速度是合理的。

综上,定义车辆*i*的理想综合轨迹信号  $r_i(k)$  为:

$$r_i(k) = w_1 d_{i,des}(k) + w_2 \Delta v_{i,des}(k) + w_3 \tilde{a}_{i-1}(k) \quad (15)$$

综合轨迹信号可以灵活表示网联车队的各种行驶情况,如当  $d_i < d_{i,des}$ 、 $v_i > v_{i-1}$  和  $a_i > \tilde{a}_{i-1}$ , 则间距、相对速度和加速度的误差分别满足  $d_i - d_{i,des} < 0$ 、 $\Delta v_i - \Delta v_{i,des} > 0$  和  $a_i - \tilde{a}_{i-1} > 0$ 。此时,车间距、相对速度和加速度的综合轨迹跟踪误差很小,CACC 控制器只需做小调整。同样,当  $d_i > d_{i,des}$ 、 $v_i > v_{i-1}$  和  $a_i > \tilde{a}_{i-1}$ , 则间距、相对速

度和加速度的误差均为正。显然,这种情况是危险的,相应的综合轨迹跟踪误差较大,CACC 控制器需要进行较大的调整。

## 2.3 安全 CAPCC 算法

考虑车辆*i*模型(3),定义跟踪误差为:

$$e_i(k) = r_i(k) - y_i(k) \quad (16)$$

为了消除该误差,有必要在 CACC 系统中引入积分控制作用。对此,定义增广状态向量  $\tilde{x}_i(k) = [e_i(k), x_i(k)^T - x_i(k-1)^T]^T$ 。则由模型(3)可得增广 CACC 系统:

$$\tilde{x}_i(k+1) = \bar{A}_i \tilde{x}_i(k) + \bar{B}_{u,i} \tilde{u}_i(k) + \bar{B}_{w,i} \tilde{w}_i(k) \quad (17)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i(k) &= u_i(k) - u_i(k-1), \\ \tilde{w}_i(k) &= \begin{bmatrix} r_i(k) - r_i(k-1) \\ \tilde{a}_{i-1}(k) - \tilde{a}_{i-1}(k-1) \end{bmatrix}; \\ \bar{A}_i &= \begin{bmatrix} I & -C \\ 0 & A_i \end{bmatrix}, \bar{B}_{u,i} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{u,i} \end{bmatrix}, \bar{B}_{w,i} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & B_{w,i} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

再定义车辆*i*的 CACC 状态反馈控制律

$$\tilde{u}_i(jk) = F_i(k) \tilde{x}_i(jk) \quad (18)$$

式中:增益矩阵  $F_i(k)$  将在后面以滚动时域优化的形式计算。

将式(18)代入式(17),得到车辆*i*的闭环 CACC 系统:

$$\tilde{x}_i(k+1) = (\bar{A}_i + \bar{B}_{u,i} F_i(k)) \tilde{x}_i(k) + \bar{B}_{w,i} \tilde{w}_i(k) \quad (19)$$

令  $\cdot(jk)$  为闭环 CACC 系统(19)在  $k$  时刻对  $k+j$  时刻的预测值。定义车辆*i*在  $k$  时刻的代价函数

$$J_{\infty,i}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} z_i(jk)^T z_i(jk) \quad (20)$$

式中:代价测量输出  $z_i = C_{\infty} \tilde{x}_i + D_{\infty} \tilde{u}_i$ , 对角矩阵  $C_{\infty} = \text{diag}\{w_4, 0, 0, 0\}$ , 列向量  $D_{\infty} = [0, 0, 0, w_5]^T$ ,  $w_4 > 0$  和  $w_5 > 0$  为跟踪误差和控制量变化的权重。

进一步,闭环 CACC 系统(19)从  $z_i$  到  $\tilde{w}_i$  的传递函数为

$$T_{z_i \tilde{w}_i}(s) = (C_{\infty} + D_{\infty} F_i(k)) [sI - (\bar{A}_i + \bar{B}_{u,i} F_i(k))]^{-1} \bar{B}_{w,i}$$

设  $\tilde{x}_i(k)$  为时刻  $k \geq 0$  时的增广状态,则车辆*i*的安全 CAPCC 问题表述为:

$$\min_{F_i(k)} J_{\infty,i}(k) \quad (21a)$$

$$\text{s.t.} \quad \|T_{z_i \tilde{w}_i}(s)\|_{\infty}^2 < \delta \quad (21b)$$

$$\| \tilde{u}_i(0|k) + \bar{u}_i \|^2 \leq \hat{u}^2, \quad \bar{u}_i = \sum_{l=0}^{k-1} \tilde{u}_i(l) \quad (21c)$$

$$\tilde{u}_i(j|k) = F_i(k) \tilde{x}_i(j|k), \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (21d)$$

$$\tilde{x}_i(0|k) = \tilde{x}_i(k) \quad (21e)$$

其中,性能约束  $\delta > 0$ ,控制约束  $\hat{u} > 0$ ,以及

$$\| T_{z_i \tilde{w}_i}(s) \|_{\infty} = \max_{0 \leq \omega \leq 2\pi} \| T_{z_i \tilde{w}_i}(e^{j\omega}) \| \quad (22)$$

如果优化问题(21)可行,则求解(21)可得  $k$  时刻的 CACC 控制量(18)及最优解  $F_i^*(k)$ 。将 CACC 控制量应用到系统(17),并在  $k+1$  时测量状态,然后重复整个计算操作。但优化问题(21)很难直接计算矩阵  $F_i(k)$ ,一种可行方法是该问题转化为线性矩阵不等式形式的半正定规划问题。

考虑闭环系统(19),定义一个带有正定矩阵  $P_i > 0$  的二次函数  $V(\tilde{x}_i(k)) = \tilde{x}_i(k)^T P_i \tilde{x}_i(k)$ 。令  $A_{cl,i} = \bar{A}_i + \bar{B}_{u,i} F_i(k)$ ,可得:

$$V(\tilde{x}_i(j+1|k)) - V(\tilde{x}_i(j|k)) = \tilde{X}_i^T(j|k) \tilde{A}_i \tilde{X}_i(j|k) \quad (23)$$

其中

$$\tilde{X}_i = \begin{bmatrix} \tilde{x}_i \\ \tilde{w}_i \end{bmatrix}, \quad \tilde{A}_i = \begin{bmatrix} A_{cl,i}^T P_i A_{cl,i} - P_i & * \\ \bar{B}_{w,i}^T P_i A_{cl,i} & \bar{B}_{w,i}^T P_i \bar{B}_{w,i} \end{bmatrix}$$

由于  $J_{\infty,i}(k)$  有限,则  $\tilde{x}_i(\infty|k) = 0$ ,进一步可得  $V(\tilde{x}_i(\infty|k)) = 0$ 。

将式(23)从  $j=0$  到  $j=\infty$  求和,可得:

$$-V(\tilde{x}_i(k)) = \sum_{j=0}^{\infty} \tilde{X}_i^T(j|k) \tilde{A}_i \tilde{X}_i(j|k) \quad (24)$$

由于  $C_{\infty} D_{\infty} = 0$ ,代价函数(20)可以转化为:

$$J_{\infty,i}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} z_i(j|k)^T z_i(j|k) = \sum_{j=0}^{\infty} \tilde{X}_i(j|k)^T \tilde{B}_i \tilde{X}_i(j|k) + \delta \sum_{j=0}^{\infty} \tilde{w}_i(j|k)^T \tilde{w}_i(j|k) \quad (25)$$

式中:  $\tilde{B}_i = \text{diag}\{C_{\infty}^T C_{\infty} + F_i(k)^T D_{\infty}^T D_{\infty} F_i(k), -\delta\}$ 。

将式(24)代入式(25)可得:

$$J_{\infty,i}(k) = V(\tilde{x}_i(k)) + \delta \sum_{j=0}^{\infty} \tilde{w}_i(j|k)^T \tilde{w}_i(j|k) + \sum_{j=0}^{\infty} \tilde{X}_i(j|k)^T \mathbf{A}_i \tilde{X}_i(j|k) \quad (26)$$

式中:  $\mathbf{A}_i = \tilde{A}_i + \tilde{B}_i$ ,利用有界实引理<sup>[29-31]</sup>可得,但  $\mathbf{A}_i \leq 0$  成立,当且仅当式(21b)成立。因此:

$$J_{\infty,i}(k) \leq V(\tilde{x}_i(k)) + \delta \sum_{j=0}^{\infty} \tilde{w}_i(j|k)^T \tilde{w}_i(j|k) \quad (27)$$

由于刹车和节气门的物理限制,则:

$$\sum_{j=0}^{\infty} \tilde{w}_i(j|k)^T \tilde{w}_i(j|k) \leq \tilde{w}_i^2 \quad (28)$$

式中:  $\tilde{w} < \infty$ 。

令  $V(\tilde{x}_i(k)) \leq \gamma_i$ ,则可得:

$$J_{\infty,i}(k) \leq \gamma_i + \delta \tilde{w}_i^2 \quad (29)$$

则问题(21a)(21b)和(21d)改写为:

$$\min_{F_i(k), P_i} \gamma_i \quad (30a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{A}_i \leq 0, \quad \tilde{x}_i(k)^T P_i \tilde{x}_i(k) \leq \gamma_i \quad (30b)$$

引理 1<sup>[31]</sup> 考虑车辆  $i$  的闭环 CACC 系统(19),如果存在适当的矩阵  $Q_i = Q_i^T > 0$  和  $Y_i$ ,使得如下线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} -Q_i & * & * & * & * \\ 0 & -\gamma_i \delta I & * & * & * \\ \bar{A}_i Q_i + \bar{B}_{u,i} Y_i & \gamma_i \bar{B}_{w,i} & -Q_i & * & * \\ C_{\infty} Q_i & 0 & 0 & -\gamma_i I & * \\ D_{\infty} Y_i & 0 & 0 & 0 & -\gamma_i I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ \tilde{x}_i(k) & Q_i \end{bmatrix} \geq 0 \quad (32)$$

成立,其中  $Y_i = F_i(k) Q_i, i=1, 2, \dots, N$ ,则不等式(30b)成立。

引理 2<sup>[31]</sup> 考虑车辆  $i$  的闭环 CACC 系统(19),如果以下不等式对于  $i=1, 2, \dots, N$  成立

$$\begin{bmatrix} \hat{u}^2 - \bar{u}_i^2(1-\beta) & * \\ Y_i^T \bar{u}_i \tilde{x}_i(0|k) & Q_i \end{bmatrix} \geq 0 \quad (33)$$

则输入约束(21c)成立,其中松弛因子  $0 \leq \beta \leq 1$ 。

结合引理 1 和引理 2 中的结论,问题(21)可以重新表述为:

$$\begin{cases} \min_{Y_i, Q_i} \gamma_i \\ \text{s.t. (31), (32), (33)} \\ \tilde{x}_i(0|k) = \tilde{x}_i(k) \end{cases} \quad (34)$$

优化问题(34)是一个半正定规划问题,目前已有的一些数值算法可以有效地解决这一问题,如内点法<sup>[32]</sup>。本文使用 MATLAB 的 LMI 工具箱来解决这个优化问题。一旦计算出问题(34)的最优解,安全 CAPCC 反馈控制律(18)可以由  $F_i(k) = Y_i(k) Q_i^{-1}(k)$  确定。

定理 1 考虑车辆  $i$  的闭环 CACC 系统(19),如果在初始时间  $k=0$  时,问题(34)存在解  $(Y_i(k), Q_i$

( $k$ ),则由  $F_i(k) = Y_i(k)Q_i^{-1}(k)$  确定的安全预测 CACC 反馈控制律(18)渐近稳定该系统。

证明 由文献[31]可知,优化问题(34)初始可行,则在  $k \geq 0$  时具有最优解  $(Y_i(k), Q_i(k))$ 。因为解  $(Y_i(k), Q_i(k))$  满足优化问题(34)的约束条件,不等式  $A_i \leq 0$  在  $k$  处成立,则有

$$A_{cl,i}^T P_i A_{cl,i} - P_i + C_\infty^T C_\infty + F_i(k)^T D_\infty^T D_\infty F_i(k) \leq 0 \quad (35)$$

将  $A_{cl,i} = \bar{A}_i + \bar{B}_{u,i} F_i(k)$  代入式(35)可得:

$$\tilde{x}_i(jk)^T \left\{ \left[ \bar{A}_i + \bar{B}_{u,i} F_i(k) \right]^T P_i \left[ \bar{A}_i + \bar{B}_{u,i} F_i(k) \right] - P_i + F_i(k)^T D_\infty^T D_\infty F_i(k) + C_\infty^T C_\infty \right\} \tilde{x}_i(jk) \leq 0 \quad (36)$$

进一步计算可得:

$$\begin{aligned} & \tilde{x}_i(j+1|k)^T P_i \tilde{x}_i(j+1|k) - \tilde{x}_i(jk)^T P_i \tilde{x}_i(jk) \\ & \leq - \left[ \tilde{x}_i(jk)^T C_\infty^T C_\infty \tilde{x}_i(jk) + \tilde{u}_i(jk)^T D_\infty^T D_\infty \tilde{u}_i(jk) \right] \leq 0 \end{aligned} \quad (37)$$

由文献[31]可知,优化问题(34)在  $k$  时刻的最优解也是  $k+1$  时刻的可行解。因此,利用最优性原理,由式(37)得出:

$$\begin{aligned} & V_i(\tilde{x}_i(k+1)) - V_i(\tilde{x}_i(k)) \leq \\ & (\tilde{x}_i(1|k)^T P_i \tilde{x}_i(1|k) - V_i(\tilde{x}_i(k))) = \\ & (\tilde{x}_i(1|k)^T P_i \tilde{x}_i(1|k) - \tilde{x}_i(k)^T P_i \tilde{x}_i(k)) \leq 0 \end{aligned} \quad (38)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理,具有反馈控制律(18)的闭环 CACC 系统(19)是渐近稳定的。

下面给出安全 CAPCC 算法的实现过程。

算法 1 网联车队安全 CAPCC 算法

步骤 1 初始化  $\bar{A}_i, \bar{B}_{u,i}, C_\infty, D_\infty, \bar{B}_{w,i}$  和每辆车的状态和控制量;令  $k=0$ 。

步骤 2 在  $k$  时刻,车辆  $i$  测量自身状态  $x_i(k)$  以及接收前车  $i-1$  的加速度  $a_{i-1}(k)$ 。

步骤 3 车辆  $i$  使用式(12)对  $a_{i-1}(k)$  进行修正,计算增广状态向量  $\tilde{x}_i(k)$  的误差  $e_i(k)$ 。

步骤 4 车辆  $i$  通过求解优化问题(34)计算  $Y_i$  和  $Q_i$ ,然后确定反馈增益矩阵  $F_i(k)$  和  $\tilde{u}_i(k)$ 。

步骤 5 计算控制量  $u_i(k)$  并将其应用于系统(3);令  $k=k+1$ ,返回步骤 2。

### 3 弦稳定性分析

在领导车变速过程中实际车距与期望车距之间会出现间距误差。弦稳定性用于表征整个车队的稳定性,即间距误差沿着网联车队向尾部衰减<sup>[33]</sup>。

定义 1<sup>[34]</sup> 对于任意  $i=1,2,\dots,N$ ,当满足如

下不等式时,

$$\left| \Psi_i(j\omega) \right| = \left| A_i(j\omega) / A_{i-1}(j\omega) \right| \leq 1, \quad \forall \omega \geq 0 \quad (39)$$

网联车队具有弦稳定性,其中  $A_i(j\omega)$  是加速度  $a_i$  的拉普拉斯变换。

对  $\tilde{u}_i(k)$  和  $\tilde{x}_i(k)$  求  $Z$  变换,可以得到

$$Z(\tilde{u}_i(k)) = F_i(k) Z(\tilde{x}_i(k)) \quad (40)$$

设增益  $F_i = [F_{i,1}, F_{i,2}, F_{i,3}, F_{i,4}]$ ,可以得到闭环 CACC 系统(19)弦稳定性的结论。

定理 2 在定理 1 的条件下,当下列不等式组对任意  $i=1,2,\dots,N$  成立时,闭环 CACC 系统(19)具有弦稳定性。

$$\tau_i \Theta_{i,7}^k + \Theta_{i,5}^k \Theta_{i,8}^k - \Theta_{i,1}^k \Theta_{i,4}^k \leq 0 \quad (41a)$$

$$\begin{aligned} & \tau_i \Theta_{i,5}^k - 3\tau_i \Theta_{i,7}^k + \Theta_{i,5}^k \Theta_{i,6}^k - 3\Theta_{i,5}^k \Theta_{i,8}^k + \Theta_{i,6}^k \Theta_{i,7}^k + \\ & \Theta_{i,7}^k \Theta_{i,8}^k - \Theta_{i,1}^k \Theta_{i,2}^k + 3\Theta_{i,1}^k \Theta_{i,4}^k - \Theta_{i,2}^k \Theta_{i,3}^k - \Theta_{i,3}^k \Theta_{i,4}^k \leq 0 \end{aligned} \quad (41b)$$

$$\tau_i \Theta_{i,8}^k \geq 0 \quad (41c)$$

$$\begin{aligned} & \tau_i \Theta_{i,6}^k - 4\tau_i \Theta_{i,8}^k + \Theta_{i,5}^k \Theta_{i,7}^k + \Theta_{i,6}^k \Theta_{i,8}^k - \Theta_{i,1}^k \Theta_{i,3}^k - \\ & \Theta_{i,2}^k \Theta_{i,4}^k \geq 0 \end{aligned} \quad (41d)$$

$$\begin{aligned} & (\tau_i + \Theta_{i,5}^k + \Theta_{i,6}^k + \Theta_{i,7}^k + \Theta_{i,8}^k)^2 - (\Theta_{i,1}^k + \Theta_{i,2}^k + \\ & \Theta_{i,3}^k + \Theta_{i,4}^k)^2 - 4\tau_i \Theta_{i,6}^k - 4\Theta_{i,5}^k \Theta_{i,7}^k - 4\Theta_{i,6}^k \Theta_{i,8}^k + \\ & 4\Theta_{i,1}^k \Theta_{i,3}^k + 4\Theta_{i,2}^k \Theta_{i,4}^k \geq 0 \end{aligned} \quad (41e)$$

其中:

$$\Theta_{i,1}^k = F_{i,1}^k \omega_3 T_s$$

$$\Theta_{i,2}^k = F_{i,1}^k \omega_2 T_s^2 - F_{i,3}^k T_s^2 - 2F_{i,1}^k \omega_3 T_s$$

$$\begin{aligned} \Theta_{i,3}^k &= F_{i,1}^k \omega_1 T_s^3 - F_{i,1}^k \omega_2 T_s^2 - F_{i,2}^k T_s^3 + 2F_{i,3}^k T_s^2 + \\ & F_{i,1}^k \omega_3 T_s \end{aligned}$$

$$\Theta_{i,4}^k = F_{i,2}^k T_s^3 - F_{i,3}^k T_s^2$$

$$\Theta_{i,5}^k = -4\tau_i + T_s + F_{i,1}^k \omega_3 T_s - F_{i,4}^k T_s$$

$$\begin{aligned} \Theta_{i,6}^k &= 6\tau_i - 3T_s - F_{i,1}^k \omega_1 h_i T_s^2 + F_{i,1}^k \omega_2 T_s^2 - \\ & 2F_{i,1}^k \omega_3 T_s - F_{i,3}^k T_s^2 + 3F_{i,4}^k T_s, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Theta_{i,7}^k &= -4\tau_i + 3T_s + F_{i,1}^k \omega_1 h_i T_s^2 + F_{i,1}^k \omega_1 T_s^3 - \\ & F_{i,1}^k \omega_2 T_s^2 + F_{i,1}^k \omega_3 T_s - F_{i,2}^k T_s^3 + \\ & 2F_{i,3}^k T_s^2 - 3F_{i,4}^k T_s, \end{aligned}$$

$$\Theta_{i,8}^k = \tau_i - T_s + F_{i,2}^k T_s^3 - F_{i,3}^k T_s^2 + F_{i,4}^k T_s,$$

证明 对式(1)求  $Z$  变换,可得:

$$\frac{zS_i(z) - S_i(z)}{T_s} = V_i(z) \quad (42a)$$

$$\frac{zV_i(z) - V_i(z)}{T_s} = A_i(z) \quad (42b)$$

$$\frac{zA_i(z) - A_i(z)}{T_s} = -\frac{1}{\tau_i} A_i(z) + \frac{1}{\tau_i} U_i(z) \quad (42c)$$

式中:  $S_i$ 、 $V_i$ 和 $A_i$ 分别为变量 $s_i$ 、 $v_i$ 和 $a_i$ 的Z变换。

将式(12)(13)(15)代入式(16)可得:

$$e_i(k+1)=[w_1(r_{\text{safe}}+v_i(k+1)h_i)+w_3a_{i-1}(k+1)]-[w_1(s_i(k+1)-s_{i-1}(k+1))+w_2(v_i(k+1)-v_{i-1}(k+1))+w_3a_i(k+1)] \quad (43)$$

对式(43)求Z变换,可得:

$$Z(e_i(k+1))=\left(\frac{w_1h_i z T_s}{z-1}-\frac{w_1 z T_s^2}{(z-1)^2}-\frac{w_2 z T_s}{z-1}-w_3 z\right)A_i(z)+\left(\frac{w_1 z T_s^2}{(z-1)^2}+\frac{w_2 z T_s}{z-1}+w_3 z\right)A_{i-1}(z) \quad (44)$$

把式(42)代入 $\tilde{x}_i(k+1)$ 的Z变换,可以得到:

$$Z(\tilde{x}_i(k+1))=\begin{bmatrix} Z(e_i(k+1)) \\ \frac{T_s^2}{z-1}A_i(z)-\frac{T_s^2}{z-1}A_{i-1}(z) \\ T_s A_i(z)-T_s A_{i-1}(z) \\ (z-1)A_i(z) \end{bmatrix} \quad (45)$$

结合(42c),对 $\tilde{u}_i(k)=F_i(k)\tilde{x}_i(k)$ 求Z变换,可得:

$$\Psi_i(z)=\frac{A_i(z)}{A_{i-1}(z)}=\frac{\Theta_{i,1}^k z^3 + \Theta_{i,2}^k z^2 + \Theta_{i,3}^k z + \Theta_{i,4}^k}{\tau_i z^4 + \Theta_{i,5}^k z^3 + \Theta_{i,6}^k z^2 + \Theta_{i,7}^k z + \Theta_{i,8}^k} \quad (46)$$

将 $z=e^{j\omega}$ 代入 $\Psi_i(z)$ 并使用欧拉公式,可得:

$$|\Psi_i(j\omega)|=\sqrt{\vartheta(\omega)/(\vartheta(\omega)+\eta(\omega))} \quad (47)$$

其中

$$\begin{aligned} \vartheta(\omega) &= (\Theta_{i,1}^k \cos^3 \omega - 3\Theta_{i,1}^k \sin^2 \omega \cos \omega + \Theta_{i,2}^k \cos^2 \omega - \Theta_{i,2}^k \sin^2 \omega + \Theta_{i,3}^k \cos \omega + \Theta_{i,4}^k)^2 + \\ & (3\Theta_{i,1}^k \sin \omega \cos^2 \omega - \Theta_{i,1}^k \sin^3 \omega + 2\Theta_{i,2}^k \sin \omega \cos \omega + \Theta_{i,3}^k \sin \omega)^2 \\ \eta(\omega) &= (16\tau_i \Theta_{i,8}^k) \cos^4 \omega + \\ & (8\tau_i \Theta_{i,7}^k + 8\Theta_{i,5}^k \Theta_{i,8}^k - 8\Theta_{i,1}^k \Theta_{i,4}^k) \cos^3 \omega + \\ & (4\tau_i \Theta_{i,6}^k - 16\tau_i \Theta_{i,8}^k + 4\Theta_{i,5}^k \Theta_{i,7}^k + 4\Theta_{i,6}^k \Theta_{i,8}^k - 4\Theta_{i,1}^k \Theta_{i,3}^k - 4\Theta_{i,2}^k \Theta_{i,4}^k) \cos^2 \omega + \\ & (2\tau_i \Theta_{i,5}^k - 6\tau_i \Theta_{i,7}^k + 2\Theta_{i,5}^k \Theta_{i,6}^k - 6\Theta_{i,5}^k \Theta_{i,8}^k + 2\Theta_{i,6}^k \Theta_{i,7}^k + 2\Theta_{i,7}^k \Theta_{i,8}^k - 2\Theta_{i,1}^k \Theta_{i,2}^k - 2\Theta_{i,3}^k \Theta_{i,4}^k + 6\Theta_{i,1}^k \Theta_{i,4}^k - 2\Theta_{i,2}^k \Theta_{i,3}^k) \cos \omega + \\ & \tau_i^2 + \Theta_{i,5}^k{}^2 + \Theta_{i,6}^k{}^2 + \Theta_{i,7}^k{}^2 + \Theta_{i,8}^k{}^2 - 2\tau_i \Theta_{i,6}^k + 2\tau_i \Theta_{i,8}^k - 2\Theta_{i,5}^k \Theta_{i,7}^k - 2\Theta_{i,6}^k \Theta_{i,8}^k - \Theta_{i,1}^k{}^2 - \Theta_{i,2}^k{}^2 - \Theta_{i,3}^k{}^2 - \Theta_{i,4}^k{}^2 + 2\Theta_{i,1}^k \Theta_{i,3}^k + 2\Theta_{i,2}^k \Theta_{i,4}^k \end{aligned}$$

显然,  $\vartheta(\omega) \geq 0$ , 则将式(41)代入 $\eta(\omega)$ 可以

检验 $\eta(\omega) \geq 0$ 。因此,由定义1可知,网联车队具有弦稳定性。

注意,定理2的条件是网联车队弦稳定性的充分条件,即CACCC反馈控制律即使不满足这些充分条件,也可能实现网联车队弦稳定性。

## 4 仿真和性能分析

### 4.1 实验设置

考虑由一辆虚拟参考车辆( $i=0$ )、一辆领导车辆( $i=1$ )和三辆跟随车辆( $i=2,3,4$ )组成的车辆队列,如图2所示。设置车辆 $i$ 的动态参数 $\tau_i$ 为: $\tau_0=0.1$  s, $\tau_1=0.1$  s, $\tau_2=0.11$  s, $\tau_3=0.12$  s和 $\tau_4=0.15$  s;初始位置 $s_i(0)$ 为: $s_0(0)=80$  m, $s_1(0)=60$  m, $s_2(0)=40$  m, $s_3(0)=20$  m和 $s_4(0)=0$  m;控制器的权重分别为 $w_1=0.4$ , $w_2=0.3$ , $w_3=0.4$ , $w_4=0.1$ 和 $w_5=0.1$ ,其他仿真参数如表1所示。仿真时间持续60 s,参考车辆加速度为:

$$a_0(k)=\begin{cases} 0.5 \cos(0.01k\pi - \pi) + 0.5, & k \in [0, 200) \\ 0.5 \cos(0.01k\pi) - 0.5, & k \in [200, 400) \\ 0, & k \in [400, 600) \end{cases} \quad (48)$$

为验证本文所提的安全CAPCC算法,在5~50 s内对车辆1施加周期 $T=5$ 的周期性DoS攻击。在MATLAB环境下,利用MATLAB R2017b的LMI工具箱解决仿真中涉及的优化问题(34)。

表1 参数设置

Table 1 Settings parameters

参数	值
初始速度 $v_i(0)$ ( $i=0,1,2,3,4$ )/(m·s <sup>-1</sup> )	15
初始加速度 $a_i(0)$ ( $i=0,1,2,3,4$ )/(m·s <sup>-2</sup> )	0
车头时距 $h_i$ ( $i=1,2,3,4$ )/s	1.0
采样间隔 $T_s$ /s	0.1
DoS攻击周期 $T$ /s	5.0
控制约束 $\hat{u}$ /(m·s <sup>-2</sup> )	5
性能约束 $\delta$ /m	5
安全距离 $r_i$ ( $i=1,2,3,4$ )	2.0
松弛因子 $\beta$	0.6

### 4.2 DoS攻击下网联车队的仿真实验

当无线网络不存在DoS攻击时,即式(7)中的 $\varpi_1(k)$ 始终为1时,车辆1的加速度数据 $a_1(k)$ 可以正常传输给车辆2。当无线网络存在DoS攻击时,即式(7)中的 $\varpi_1(k)$ 为0时,车

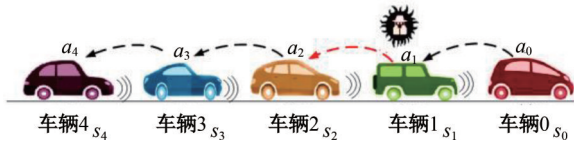


图 2 DoS攻击下的车辆队列

Fig. 2 Car platoon suffered from DoS attacks

辆 1 传输给车辆 2 的加速度  $a_1(k)$  被阻塞。假设攻击者发起式(9)描述的周期性 DoS 攻击,车辆 2 接收到的加速度为:

$$\tilde{a}_1(k) = \varpi_1(k) a_1(k) \quad (49)$$

式中:当  $k \in R_n^1, R_n^1 = \{k \in N | 50n < k < 50n + k_{on}\}, n = 1, 2, \dots, 9$  时  $\varpi_1(k) = 0$ ; 否则  $\varpi_1(k) = 1$ 。

图 3 为车辆 1 的真实加速度数据,图 4 为存在周期性 DoS 攻击时车辆 2 所接收到的前车加速度数据,图 5 为车辆 2 采用加速度估计器补偿的前车加速度数据。可以看出,利用加速度估计器可以很好地补偿被 DoS 攻击阻塞的前车加速度数据。

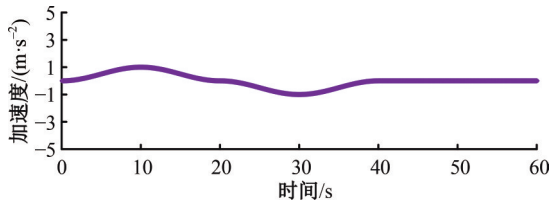


图 3 真实加速度

Fig. 3 Real acceleration

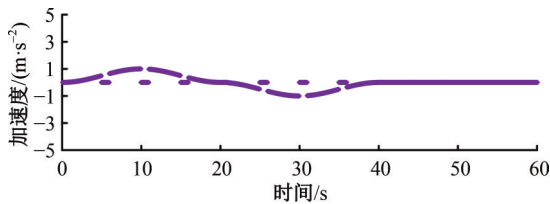


图 4 DoS攻击后的加速度

Fig. 4 Acceleration after DoS attacks

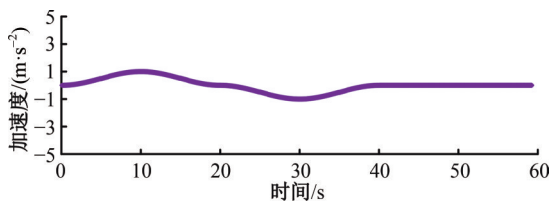
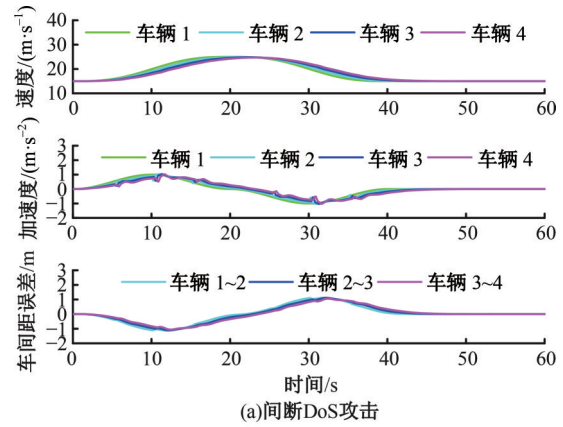


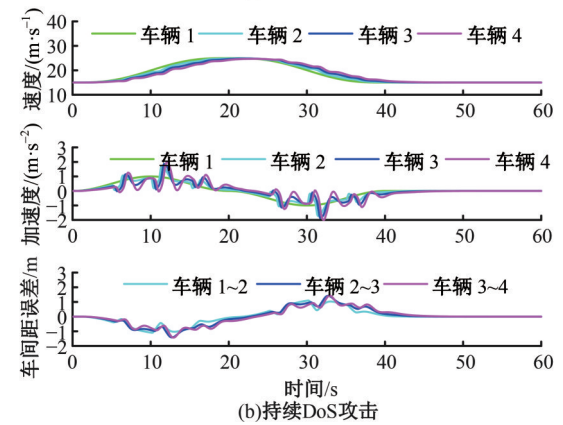
图 5 补偿后的加速度

Fig. 5 Acceleration after compensation

图 6(a) 和 (b) 分别为存在间断 DoS 攻击 ( $k_{on}=1$ ) 和持续 DoS 攻击 ( $k_{on}=10$ ) 时,应用传统 MPC-CACC 算法获得的 5 车队列车辆速度、加速度和间距误差仿真结果。可以看出,相比于间断



(a)间断DoS攻击



(b)持续DoS攻击

图 6 DoS攻击下的车辆速度、加速度和车间距曲线

Fig. 6 Time evolutions of cars with DoS attacks

DoS 攻击,持续性 DoS 攻击对车辆队列的加速度和间距误差有更大的影响。当车辆 1 遭受持续 DoS 攻击时,车辆 2~4 的加速度和间距误差存在明显的波动,且车辆 4 的波动大于车辆 2 和车辆 3。

为了更好地体现 DoS 攻击下本文所提安全 CACC 算法(安全 MPC-CACC)的性能,将本文算法与文献[19]所提的算法(安全 PID-CACC)在持续性 DoS 攻击下进行对比。图 7(a)和(b)分别为采用安全 MPC-CACC 和安全 PID-CACC 的 5 车队列仿真。对比图 6(b)可以看出,两种安全 CACC 算法都可以有效抑制 DoS 攻击,但是本文所提算法更胜一筹。应用安全 PID-CACC 算法的车辆的加速度曲线和间距误差波动比较明显,表示车辆存在急变速情况,而应用本文所提安全 MPC-CACC 算法的车辆则更加平稳。

为了更好地评价弦稳定性,采用定量判据<sup>[19]</sup>进一步验证网联车队弦稳定性。图 8 中圆圈表示传统 MPC-CACC 算法,星号表示本文所提的安

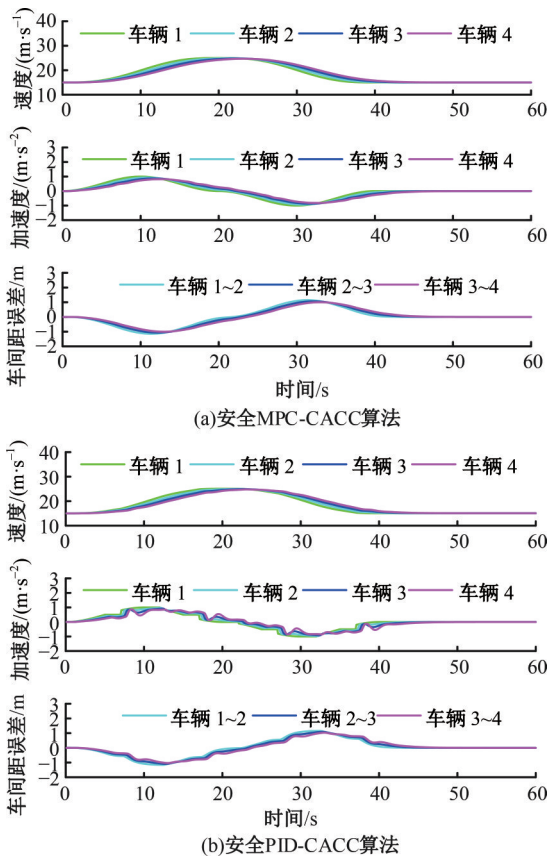


图 7 安全 CACC 算法下的车辆速度、加速度和车车间距曲线

Fig. 7 Time evolutions of cars under security CACC algorithm

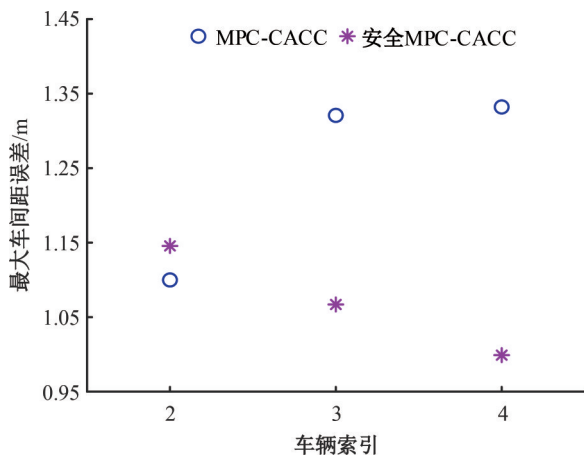


图 8 DoS 攻击下弦稳定性分析

Fig. 8 String stability analysis under DoS attacks

全 MPC-CACC 算法。可以看出,在 DoS 攻击下应用传统 MPC-CACC 算法的网联车队的间距误差是沿着车辆队列向尾部增大的,即不满足弦稳定性要求;而应用本文所提安全 MPC-CACC 的网联车队的间距误差沿着车辆队列向尾部衰减,即满足弦稳定性要求。

### 5 结束语

针对加速度 DoS 攻击下的网联车队,本文提出了一种新的安全 CAPCC 方法,主要思路是:①利用运动学特性设计了加速度估计器,补偿被阻塞的前车加速度,再设计综合轨迹信号以灵活描述网联车队的行驶情况,进而结合加速度估计器和综合轨迹信号设计了网联车安全 CAPCC 算法;②以线性矩阵不等式的形式,建立了在安全约束和加速度 DoS 攻击下的网联车队稳定性和弦稳定性结果,并在典型交通场景下仿真验证了本文所提算法的优越性。

现实网络攻击不仅有 DoS 攻击,还有欺骗攻击、重放攻击等其他类型的复杂攻击,而网联车的无线通信可能会存在一定的网络延时。后续研究将进一步考虑复杂攻击类型以及通信延迟。

### 参考文献:

[1] 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.

[2] 林亨,方华建,吴冬雁. 基于动态安全距离的 CACC 车辆混合交通流模型[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(6): 36-42.

Lin Heng, Fang Hua-jian, Wu Dong-yan. CACC vehicle mixed traffic flow model based on dynamic safety distance[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(6): 36-42.

[3] Ghasemi A, Kazemi R, Azadi S. Stable decentralized control of a platoon of vehicles with heterogeneous information feedback[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2013, 62(9): 4299-4308.

[4] Firooznia A, Ploeg J, Wouw N, et al. Co-design of controller and communication topology for vehicular platooning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(10): 2728-2739.

[5] 田彬,姚柯,王孜健,等. 基于模型预测控制的 CACC 系统通信延时补偿方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 361-381.

Tian Bin, Yao Ke, Wang Zi-jian, et al. Communication delay compensation method of CACC platooning system based on model predictive control[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22 (4): 361-381.

- [6] Zabat M, Stabile N, Farascari S, et al. The aerodynamic performance of platoons: a final report[R]. Lafayette: Path Research Report, 1995.
- [7] Kenney J B. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the united states[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1162-1182.
- [8] Wang D, Sattiraju R, Qiu A, et al. Effect of retransmissions on the performance of C-V2X communication for 5G[C]// 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall), Victoria, Canada, 2020: 1-7.
- [9] Öncü S, Ploeg J, 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.
- [10] Hu S L, Yue D, Han Q L, et al. Observer-based event-triggered control for networked linear systems subject to denial-of-service attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(5): 1952-1964.
- [11] Malik S, Sun W. Analysis and simulation of cyber attacks against connected and autonomous vehicles[C]// 2020 International Conference on Connected and Autonomous Driving (MetroCAD), Detroit, USA, 2020: 62-70.
- [12] Singh P K, Tabjul G S, Imran M, et al. Impact of security attacks on cooperative driving use case: CACC platooning[C]// TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea (South), 2018: 138-143.
- [13] Alipour F A, Dabaghchian M, Zeng K. Impact of jamming attacks on vehicular cooperative adaptive cruise control systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2020, 69(11): 12679-12693.
- [14] Biron Z A, Dey S, Pisu P. Real-time detection and estimation of denial of service attack in connected vehicle systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(12): 3893-3902.
- [15] Zhang X F, Du H P, Wei J M, et al. High gain observer design for DOS attack detection in CACC platoon[C]// 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, 2020: 254-259.
- [16] Alotibi F, Abdelhakim M. Anomaly detection for cooperative adaptive cruise control in autonomous vehicles using statistical learning and kinematic model [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(6): 3468-3478.
- [17] Wyk F, Wang Y, Khojandi A, et al. Real-time sensor anomaly detection and identification in automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(3): 1264-1276.
- [18] Arfouch 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.
- [19] Mousavinejad E, Yang F, Han Q, et al. Distributed cyber attacks detection and recovery mechanism for vehicle platooning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(9): 3821-3834.
- [20] Ge X H, Yang F W, Han Q L. Distributed networked control systems: a brief overview[J]. *Information Sciences*, 2017, 380: 117-131.
- [21] Segata M, Bloessl B, Joerer S, et al. Toward communication strategies for platooning: simulative and experimental evaluation[J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2015, 64(12): 5411-5423.
- [22] Liu X, Goldsmith A, Mahal S, et al. Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons [C]// 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems, Oakland, USA, 2001: 625-630.
- [23] Ploeg J, Scheepers B T, Nunen E, et al. Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control[C]// 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, USA, 2011: 260-265.
- [24] Naus G J, Vugts R P, Ploeg J, et al. String-stable CACC design and experimental validation: a frequency-domain approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2010, 59(9): 4268-4279.
- [25] Benslimane A, Huong N. Jamming attack model and detection method for beacons under multichannel operation in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2017, 66(7): 6475-6488.
- [26] Dutta R G, Hu Y, Yu F, et al. Design and analysis of secure distributed estimator for vehicular platooning in adversarial environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(4): 3418-3429.
- [27] Liu Y, Pan C, Gao H, et al. Cooperative spacing control for interconnected vehicle systems with input delays[J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2017, 66(12): 10692-10704.
- [28] Bernardo M, Falcone P, Salvi A, et al. Design, analysis, and experimental validation of a distributed

- protocol for platooning in the presence of time-varying heterogeneous delays[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(2): 413-427.
- [29] Dumitrescu B. Bounded real lemma for FIR MIMO systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(7): 496-499.
- [30] He Y, Wu M, She J H. Improved bounded-real-lemma representation and  $H_\infty$  control of systems with polytopic uncertainties[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs, 2005, 52(7): 380-383.
- [31] Feng L, Wang J, Poh E, et al. Multi-objective robust model predictive control: trajectory tracking problem through LMI formulation[C]// American Control Conference, New York, USA, 2007: 5589-5594.
- [32] Boyd S, Vandenberghe L. Convex Optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [33] Luo J, He D F, Zhu W, et al. Multiobjective platooning of connected and automated vehicles using distributed economic model predictive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 19121-19135.
- [34] Zhu Y H, He H B, Zhao D B. LMI-based synthesis of string-stable controller for cooperative adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(11): 4516-4525.