

外部干扰和随机 DoS 攻击下的网联车安全 H_∞ 队列控制

宋秀兰¹ 李洋洋¹ 何德峰¹

摘要 针对网联车队列系统易受到干扰和拒绝服务 (Denial of service, DoS) 攻击问题, 提出一种外部干扰和随机 DoS 攻击作用下的网联车安全 H_∞ 队列控制方法. 首先, 采用马尔科夫随机过程, 将网联车随机 DoS 攻击特性建模为一个随机通信拓扑切换模型, 据此设计网联车安全队列控制协议. 然后, 采用线性矩阵不等式 (Linear matrix inequality, LMI) 技术计算安全队列控制器参数, 并应用 Lyapunov-Krasovskii 稳定性理论, 建立在外扰和随机 DoS 攻击下队列系统稳定性充分条件. 在此基础上, 分析得到该队列闭环系统的弦稳定性充分条件. 最后, 通过 7 辆车组成的队列系统对比仿真实验, 验证该方法的优越性.

关键词 网联自主车辆, 队列控制, 安全控制, 随机 DoS 攻击, 稳定性

引用格式 宋秀兰, 李洋洋, 何德峰. 外部干扰和随机 DoS 攻击下的网联车安全 H_∞ 队列控制. 自动化学报, 2024, 50(2): 348-355

DOI 10.16383/j.aas.c230327

Secure H_∞ Platooning Control for Connected Vehicles Subject to External Disturbance and Random DoS Attacks

SONG Xiu-Lan¹ LI Yang-Yang¹ HE De-Feng¹

Abstract In response to the vulnerability of connected vehicle platoon systems to disturbances and denial of service (DoS) attacks, a secure H_∞ platooning control approach is proposed for connected vehicles subject to external disturbances and random DoS attacks. Utilizing Markov random processes, the characteristics of random DoS attacks on connected vehicles are modeled as a stochastic communication topology switching model, based on which a protocol for secure platooning control is designed. Next, the parameters of the secure queue controller are computed using linear matrix inequality (LMI) techniques, and the Lyapunov-Krasovskii stability theory is applied to establish sufficient conditions for stability of the platoon system under the external disturbances and random DoS attacks. On this basis, the sufficient conditions for the string stability of the closed-loop system of the platoon are obtained. Finally, the superiority of the results presented in this paper is verified through comparative simulation experiments on a platoon system composed of seven vehicles.

Key words Connected automated vehicles, platooning control, secure control, random DoS attacks, stability

Citation Song Xiu-Lan, Li Yang-Yang, He De-Feng. Secure H_∞ platooning control for connected vehicles subject to external disturbance and random DoS attacks. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(2): 348-355

近年来, 由于在提高道路安全性和通行效率等方面的优势, 网联自主车辆得到了学术界和工业界的广泛关注^[1]. 通过车-车 (Vehicle to vehicle, V2V) 或车-基础设施无线网络交换和共享数据, 并综合利用车载传感、先进计算和智能控制技术实现网联自主车辆协同队列驾驶. 然而, 开放的无线网络信

息传输和车辆高速移动特性使得网联自主车辆队列控制系统容易遭受恶意网络攻击, 如数据窃密、篡改和中断等^[2], 给用户隐私、财产和安全带来极大威胁.

攻击者通过在介质访问控制层, 中断数据包传输或通过注入恶意软件破坏网络组件, 以一种隐秘和不可预测的方式攻击网络系统^[3]. 目前, 网联车潜在的攻击类型包括欺骗攻击、重放攻击和拒绝服务 (Denial of service, DoS) 攻击^[4], 其中 DoS 攻击是最常见的恶意网络攻击, 其攻击特性是干扰车联网络的射频或用大量请求阻止 V2V 网络接入, 以阻止车辆之间的信息交互, 进而破坏车辆间的数据传输和队列控制系统. 对此, 相关学者探索 DoS 攻击的网联车安全队列控制方法, 并取得了一些尝试性成果. 如文献 [5] 将 DoS 攻击建模为连续数据包丢

收稿日期 2023-06-02 录用日期 2023-11-09

Manuscript received June 2, 2023; accepted November 9, 2023

国家自然科学基金 (62273307), 浙江省公益性技术应用研究项目 (LGF22F030013) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62273307) and Project of Zhejiang Province Public Welfare Technology Application Research (LGF22F030013)

本文责任编辑 曹向辉

Recommended by Associate Editor CAO Xiang-Hui

1. 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023

1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023

失, 设计基于线性矩阵不等式 (Linear matrix inequality, LMI) 的网联车 DoS 攻击弹性控制器; 文献 [6] 将 DoS 攻击结合不均匀采样建模为一个时滞系统, 再基于 Lyapunov 稳定性理论、Jensen 不等式方法和拓扑矩阵解耦技术, 建立了队列稳定跟踪的充分条件. 目前, 大部分文献将网联车 DoS 攻击建模为网络化时延或丢包系统^[5-7], 但网联车在无 DoS 攻击下, 通信过程会存在时延和丢包现象, 所以这些模型无法有效表征 DoS 攻击对网联车队列系统的影响.

近期有学者采用图论表示通信拓扑, 进而将 DoS 攻击建模成拓扑切换的形式, 如文献 [8-9] 将网联车受到的 DoS 攻击建模为拓扑切换模型, 并引入恢复机制提出弹性控制协议设计, 保证了网联车队列系统在 DoS 攻击下的内部稳定性. 在实际中, 大多数 DoS 攻击会充分利用随机发生的网络负载、网络拥塞和网络传输效率发起攻击^[10-11], 即 DoS 攻击发生具有很强的随机性, 会严重恶化现有网联车队列系统的稳定性和控制性能. 但据笔者所知, 目前 DoS 攻击下的网联车安全队列控制方法还未充分考虑 DoS 攻击的频率及强度的随机性的特性.

除随机 DoS 攻击外, 外部干扰也是网联车队列系统中不可忽视的重要因素. 为了抑制外部干扰对网联车队列系统的不利影响, Ploeg 等^[12] 采用 H_∞ 控制方法, 建立干扰下的车辆队列 L_2 弦稳定性; 文献 [13] 提出一种显式处理外部扰动的车辆队列 min-max 预测控制方法. 值得注意的是, 目前车辆队列弦稳定性的结果大多考虑前导车的外部扰动; 然而, 由于地面摩擦、阵风和滚转阻力等不确定性影响, 跟随车辆也会受到外部干扰, 有必要研究前导车和跟随车同时受外部干扰下的网联车安全队列控制问题.

针对各辆网联车都可能同时受到随机 DoS 攻击和外部干扰影响的场景, 本文提出一种新的网联车安全 H_∞ 队列控制方法. 首先, 将随机 DoS 攻击导致的信道拥塞建模为服从马尔科夫随机过程的通信拓扑切换模型. 然后, 再设计拓扑恢复机制, 使得在攻击停留时间内将瘫痪通信拓扑恢复为正常通信拓扑. 接着, 采用 H_∞ 控制方法抑制网联车的外部干扰影响, 设计具有稳定性保证的网联车安全 H_∞ 队列控制器. 在此基础上, 建立在随机 DoS 攻击和外部干扰作用下的网联车队列系统的弦稳定性充分条件. 最后, 考虑变速典型交通场景, 通过仿真比较 DoS 攻击下的网联车安全队列控制方法, 验证本文方法的优越性.

1 系统描述

考虑 $N + 1$ 辆网联车在快速路同一车道纵向行

驶, 如图 1 所示, 头车编号为 0, 跟随车辆编号依次为 1, 2, \dots , N . 假设每辆车安装了车载雷达以测量本车与前车之间的距离、内置全球定位系统传感器测量车辆纵向位置信息和无线收发模块用于 V2V 通信以及发动机控制单元用于计算驱动转矩. 当 DoS 攻击发生时, 一些车间通信信道被阻塞, 导致车辆间无法正常传输车辆信息 (即位置 p_i 、速度 v_i 和加速度 a_i), 则车联网接入选择机制将改变车间通信拓扑结构, 尽可能恢复车辆间信息传输. 考虑车联网 DoS 攻击发生的随机性, 本文将车辆队列受到攻击后的拓扑切换建模为马尔科夫跳变过程.

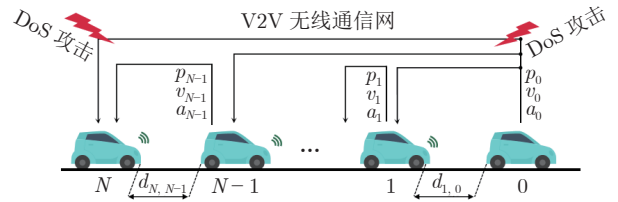


图 1 DoS 攻击下的网联车队列示意图

Fig. 1 A schematic of a connected vehicle platoon subject to DoS attacks

1.1 车辆纵向动力学模型

考虑队列中车辆 i 的纵向动力学方程^[14-15]:

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = a_i(t) \\ \dot{a}_i(t) = f_i(v_i(t), a_i(t)) + w_i(t) + \frac{\varsigma_i(t)}{\tau_i m_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_i 为车辆的重量, τ_i 为车辆的惯性时间常数, $w_i(t) \in L_2[0, \infty)$ 是外部干扰, $\varsigma_i(t)$ 是车辆的发动机输入, 方程 f_i 为:

$$f_i(v_i, a_i) = -\frac{1}{\tau_i} \left(a_i + \frac{\xi Y_i F_{di} v_i^2}{2m_i} + \frac{F_{mi}}{m_i} \right) - \frac{\xi Y_i F_{di} v_i a_i}{m_i}$$

式中, ξ 、 Y_i 、 F_{di} 和 F_{mi} 分别为空气密度、车辆 i 的横截面积、阻力系数和机械阻力. 为了线性化式 (1) 中的加速度变化方程, 令:

$$\varsigma_i = u_i m_i + \frac{1}{2} \xi Y_i F_{di} v_i^2 + F_{mi} + \tau_i \xi Y_i F_{di} v_i a_i \quad (2)$$

式中, u_i 为控制输入. 将式 (2) 代入式 (1), 可得:

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = a_i(t) \\ \dot{a}_i(t) = -\frac{a_i(t)}{\tau_i} + \frac{u_i(t)}{\tau_i} + w_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

令车辆的状态向量 $x_i(t) = [p_i(t), v_i(t), a_i(t)]^T$, 则由式 (3) 可得车辆状态空间方程为:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t) + Cw_i(t) \quad (4)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_i} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_i} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

1.2 车辆间通信拓扑

为描述网联车之间的信息传输,采用有向图 $G_N = (V_N, E_N, \Pi)$ 描述车辆间的通信拓扑结构,其中 $V_N = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示 N 辆跟随车的集合,有向边 $E_N \subseteq V_N \times V_N$ 是跟随车与其他车辆的可能连接情况集合, $\Pi = [a_{ij}]$ 为邻接矩阵. 若跟随车 i 可以接收来自车辆 j 的信息,则 $a_{ij} = 1$; 反之, $a_{ij} = 0$. 定义车辆 i 的邻居集合为 $N_i = \{j \in V_N | a_{ij} = 1\}$, 图 G_N 的度矩阵 $\Delta = \text{diag}\{d_1, \dots, d_N\}$, 其中 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$. G_N 的拉普拉斯矩阵定义为 $L = \Delta - \Pi$. 另外,令头车矩阵 $H_N = \text{diag}\{h_1, \dots, h_N\}$, 若跟随车 i 可以接收来自头车的信息,则 $h_i = 1$; 反之, $h_i = 0$. 假设 \bar{G}_N 是包含 N 辆跟随车与 1 辆头车的有向图,则对应的拉普拉斯矩阵为 $\bar{L} = L + H$.

1.3 DoS 攻击模型

针对网联车受到随机发生的 DoS 攻击,本文采用马尔科夫随机通信拓扑切换的形式描述该 DoS 攻击. 考虑有向图 $\bar{G}_{\sigma(t)} \in \{\bar{G}_1, \bar{G}_2, \dots, \bar{G}_q\}$, 其中 $\sigma(t)$ 是在有限集 $S = \{1, 2, \dots, q\}$ 中的连续时间马尔科夫过程,其跃迁率定义为:

$$P\{\sigma(t + \Delta t) = s | \sigma(t) = r\} = \begin{cases} \pi_{rs}\Delta t + O(\Delta t), & r \neq s \\ 1 + \pi_{rr}\Delta t + O(\Delta t), & r = s \end{cases}$$

式中, $r, s \in S$, $\Delta t > 0$, $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} O(\Delta t)/\Delta t = 0$, π_{rs} 为从拓扑 r 到拓扑 s 的转换速率,满足当 $r \neq s$ 时, $\pi_{rs} \geq 0$; 当 $r = s$ 时, $\pi_{rr} = -\sum_{s=1, s \neq r}^q \pi_{rs}$. 注意,当 $r = s$ 时,表示在当前时间段通信拓扑未发生跳变,即车辆没有受到 DoS 攻击;而当 $r \neq s$ 时,表示在时刻 $t + \Delta t$ 通信拓扑从 r 切换成 s ,即队列中有车辆受到 DoS 攻击^[16].

车辆队列受随机 DoS 攻击过程如图 2 所示. 假设车辆先以 \bar{G}_1 正常拓扑情况行驶,在某一时刻,队列车辆受 DoS 攻击后,网联车队列拓扑随机切换成相应通信链路受阻情况,这个过程服从马尔科夫随机过程.

1.4 问题描述

在车辆队列中,每辆跟随车 i 都期望跟踪头车

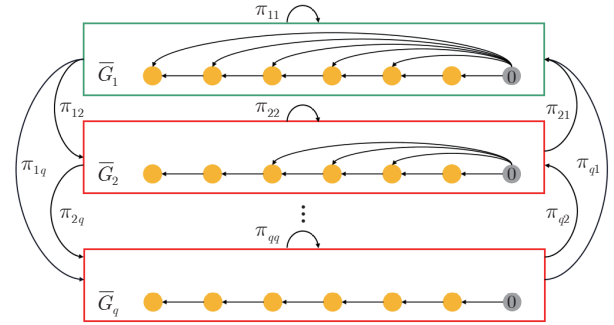


图 2 DoS 攻击造成的拓扑切换示意图

Fig. 2 A schematic of topologies switching suffered from DoS attacks

的速度 $v_0(t)$, 同时与前一辆车保持理想的安全距离 $d_{i,i-1}$, 其数学描述为:

$$\begin{cases} p_i(t) \rightarrow p_{i-1}(t) - d_{i,i-1} \\ v_i(t) \rightarrow v_0(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $d_{i,i-1}$ 为车辆 i 与前车的理想间距, 本文使用车头时距安全策略^[17]:

$$d_{i,i-1} = d_{des} + lv_i \quad (6)$$

式中, d_{des} 为静止理想车间距; l 为车头时距, 即当前车与前车经过同一地点的时间差.

考虑到异质车辆队列跟踪过程中存在外部干扰 $w_i(t)$, 车辆跟随性能和队列弦稳定性可能会受影响. 进一步, 随机 DoS 攻击导致车辆间通信链路拥塞, 通信拓扑发生随机切换, 车辆跟随性能及安全性会受到威胁. 因此, 本文目标是设计一种安全 H_∞ 队列控制方法, 保证网联车在同时存在外部干扰和随机 DoS 攻击时, 车辆队列仍然能保持理想的间距安全和稳定行驶.

2 安全 H_∞ 队列控制

2.1 队列控制器设计

为满足车辆跟踪目标 (5), 设计控制输入为^[18-19]:

$$u_i(t) = cK \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\sigma(t)} \{x_j(t) - x_i(t) - D_{ij}\} + cKh_i^{\sigma(t)} \{x_0(t) - x_i(t) - D_{i0}\} \quad (7)$$

式中, $D_{ij} = [d_{ij}, 0, 0]^T$ 中的 d_{ij} 是车 i 与车 j 之间的理想车距; c 是耦合系数; $K = [k_p, k_v, k_a]^T$ 是待计算的反馈控制增益; $a_{ij}^{\sigma(t)}$ 和 $h_i^{\sigma(t)}$ 分别是时变邻接矩阵和头车矩阵的元素, 由 t 时刻的通信拓扑决定.

考虑车辆状态空间方程式 (4), 定义跟随车与

头车之间的状态误差为:

$$e_i(t) = x_0(t) - x_i(t) - D_{i0} \quad (8)$$

式中, $x_0(t) = [p_0(t), v_0(t), a_0(t)]^T$. 将式 (7) 和式 (8) 代入式 (4), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) = & A e_i(t) - cBK \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\sigma(t)} \{e_i(t) - e_j(t)\} - \\ & cBK h_i^{\sigma(t)} e_i(t) - C w_i(t) \end{aligned} \quad (9)$$

定义车辆队列误差 $e(t) = [e_1^T(t), \dots, e_N^T(t)]^T$, 对应扰动 $w(t) = [w_1^T(t), \dots, w_N^T(t)]^T$, 则车辆队列闭环系统为:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & (I_N \otimes A - c\bar{L}_{\sigma(t)} \otimes BK)e(t) + \\ & (I_N \otimes C)w(t) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, I_N 为 N 阶单位矩阵, $\bar{L}_{\sigma(t)} = L_{\sigma(t)} + H_{\sigma(t)}$ 为时变通信拓扑矩阵. 进一步定义系统输出:

$$y(t) = (I_N \otimes M)e(t) \quad (11)$$

式中, $M = [1, 0, 0]$. 在零初始条件下, 对于 $\forall w(t) \in L_2[0, \infty)$, 车辆队列系统输出 $y(t)$ 满足如下 H_∞ 控制性能:

$$\int_0^\infty \|y(t)\|_2^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^\infty \|w(t)\|_2^2 dt \quad (12)$$

式中, 参数 $\gamma > 0$ 表示扰动抑制水平.

2.2 队列内部稳定性分析

在马尔科夫随机 DoS 攻击和扰动同时存在情况下, 考虑车辆队列闭环系统 (10) 和跟踪目标 (5), 应用 Lyapunov-Krasovskii 稳定性理论^[20-21] 建立 LMI 满足内部稳定性的充分条件.

定理 1. 考虑车辆队列闭环系统和给定扰动抑制水平 $\gamma > 0$, 如果存在适当的正定矩阵 $P_r \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, 满足如下 LMI:

$$\begin{bmatrix} \Theta_r & P_r \sum_r & P_r M^T & C \\ * & -\sum_r & 0 & 0 \\ * & * & -I_{3 \times 3} & 0 \\ * & * & * & -\gamma^2 I_{3 \times 3} \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

式中, 参数 $\Theta_r = P_r A^T + A P_r - c\bar{\lambda} B B^T$, $\sum_r = \sum_{s=1}^q \pi_{rs} P_r^{-1}$, 其中 π_{rs} 为通信拓扑转换率, 则该闭环系统渐近稳定, 即跟随车与头车渐近同步.

证明. 根据 Lyapunov-Krasovskii 稳定性理论, 取如下函数:

$$V_r(t) = \mathbf{E} [e^T(t)(I_N \otimes P_r^{-1})e(t)\mathbf{1}_{\sigma(t)=r}] \quad (14)$$

式中, $P_r \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为正定矩阵, $r = \sigma(t) \in S$ 表示当前

通信网络状态, 共有 q 个状态. 对式 (14) 求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r(t) = & \dot{e}^T(t)(I_N \otimes P_r^{-1})e(t) + \\ & e^T(t)(I_N \otimes P_r^{-1})\dot{e}(t) + \\ & \sum_{s=1}^q \pi_{rs} e^T(t)(I_N \otimes P_s^{-1})e(t) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, π_{rs} 对应的转移矩阵为:

$$\pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \cdots & \pi_{1q} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \cdots & \pi_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{q1} & \pi_{q2} & \cdots & \pi_{qq} \end{bmatrix} \quad (16)$$

将式 (10) 代入式 (15), 整理可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r(t) = & e^T(t)[I_N \otimes (A^T P_r^{-1} + P_r^{-1} A) - \\ & c\bar{L}_r^T \otimes (BK_r)^T P_r^{-1} - c\bar{L}_r \otimes P_r^{-1} BK_r]e(t) + \\ & w^T(t)(I_N \otimes C^T P_r^{-1})e(t) + \\ & e^T(t)(I_N \otimes P_r^{-1} C)w(t) + \\ & \sum_{s=1}^q \pi_{rs} e^T(t)(I_N \otimes P_s^{-1})e(t) \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $K_r = B^T P_r^{-1}$, 将其代入式 (17), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r(t) = & e^T(t)[I_N \otimes (A^T P_r^{-1} + P_r^{-1} A) - \\ & c(\bar{L}_r^T + \bar{L}_r) \otimes P_r^{-1} B B^T P_r^{-1}]e(t) + \\ & w^T(t)(I_N \otimes C^T P_r^{-1})e(t) + \\ & e^T(t)(I_N \otimes P_r^{-1} C)w(t) + \\ & e^T(t) \sum_{s=1}^q \pi_{rs} (I_N \otimes P_s^{-1})e(t) \end{aligned} \quad (18)$$

令 $\bar{\lambda} = \min_{i=1, \dots, q} \lambda_i(\bar{L}_i^T + \bar{L}_i)$, 则根据 H_∞ 控制条件, 有如下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r(t) + & y^T(t)y(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) \leq \\ & e^T(t)[I_N \otimes (A^T P_r^{-1} + P_r^{-1} A + M^T M) - \\ & c\bar{\lambda} I_N \otimes P_r^{-1} B B^T P_r^{-1} + \sum_{s=1}^q \pi_{rs} (I_N \otimes P_s^{-1})]e(t) + \\ & w^T(t)(I_N \otimes C^T P_r^{-1})e(t) + \\ & e^T(t)(I_N \otimes P_r^{-1} C)w(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) \end{aligned} \quad (19)$$

定义向量 $\vartheta(t) = [e^T(t), w^T(t)]^T$, 则式 (19) 可简

化为:

$$\dot{V}(t) + \|y(t)\| - \gamma^2 \|w(t)\| \leq \vartheta^T(t) \Lambda \vartheta(t) \quad (20)$$

式中, 矩阵 $\Lambda \in \mathbf{R}^{6N \times 6N}$ 为:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Gamma & I_N \otimes P_r^{-1} C \\ * & -\gamma^2 I_N \otimes I_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = I_N \otimes (A^T P_r^{-1} + P_r^{-1} A + M^T M) -$$

$$c \bar{\lambda} I_N \otimes P_r^{-1} B B^T P_r^{-1} + \sum_{s=1}^q \pi_{rs} (I_N \otimes P_s^{-1})$$

根据 Lyapunov-Krasovskii 稳定性理论, 当且仅当 $\Lambda < 0$ 时, 车辆队列闭环系统渐近稳定. 显然, 要使上述条件成立, 则需要如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \hat{\Gamma} & P^{-1} C \\ C^T P^{-1} & -\gamma^2 I_{3 \times 3} \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

式中

$$\hat{\Gamma} = A^T P_r^{-1} + P_r^{-1} A + M^T M - c \bar{\lambda} P_r^{-1} B B^T P_r^{-1} + \sum_{s=1}^q \pi_{rs} P_s^{-1}$$

值得注意的是, 式 (21) 是非线性不等式, 对此需进行线性化, 在不等式两边分别左乘和右乘对角矩阵 $\text{diag}\{P_r, I_{3 \times 3}\}$ 和 $\text{diag}\{P_r^T, I_{3 \times 3}\}$, 再应用 Schur 补定理转换, 得到不等式 (13). \square

根据随机 DoS 攻击和外部干扰对车辆队列的影响, 在分析队列内部稳定性过程中, 应用马尔科夫拓扑转换率, 可以推导出满足 LMI 的稳定性充分条件. 若 LMI 有可行解, 则可求得对应控制器增益矩阵 K 和耦合系数 c .

2.3 队列弦稳定性分析

第 2.2 节得到了队列受随机 DoS 攻击和干扰时保持车辆内部稳定性的控制器, 进一步, 还需要分析车辆队列的弦稳定性. 弦稳定意味着队列上游车辆的误差不会在车辆队列下游被放大. 本文以车辆与前车的间距误差作为衡量指标, 即对于任意频率 $\omega > 0$, 车辆队列满足 $\|H(j\omega)\| \leq 1$, 其中 $H(s) = e_{p,r}(s)/e_{p,r-1}(s)$, $e_{p,r}(s)$ 为 $e_{p,r}(t)$ 的拉普拉斯变换, 且 $e_{p,r}(t) = p_{r-1}(t) - p_r(t) - d_{i,i-1}$.

考虑车辆纵向动态方程式 (3), 有:

$$\ddot{e}_{p,r}(t) = \dot{a}_{r-1}(t) - \dot{a}_r(t) \quad (22)$$

同时对式 (22) 两边取拉普拉斯变换, 可得传递函数 $H(s) = e_{p,r}(s)/e_{p,r-1}(s)$. 根据车辆受 DoS 攻击情况, 分别考虑以下 3 种不同情况下的传递函数.

1) 情况 1. 车辆 r 与其前车 $r-1$ 均未受到攻击, 可以接收到头车及前车的车辆信息 s . 此时有:

$$H_1(s) = \frac{e_{p,r}(s)}{e_{p,r-1}(s)} = \frac{k_p + k_v s + k_a s^2}{2k_p + 2k_v s + (2k_a + \frac{1}{c}) s^2 + \frac{\tau_i}{c} s^3} \quad (23)$$

令 $s = j\omega$, 可得:

$$\|H_1(j\omega)\| = \left\| \frac{k_p + k_v \omega j - k_a \omega^2}{2k_p + 2k_v \omega j - (2k_a + \frac{1}{c}) \omega^2 - \frac{\tau_i}{c} \omega^3 j} \right\| = \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}} \quad (24)$$

式中

$$\alpha_1 = (k_p - k_a \omega^2)^2 + (k_v \omega)^2$$

$$\beta_1 = 3k_p^2 + (3k_v^2 - 6k_p k_a - 4k_p) \omega^2 +$$

$$\left(3k_a^2 + \frac{4}{c} k_a - 4k_v \frac{\tau_i}{c} + \frac{1}{c^2} \right) \omega^4 + \frac{\tau_i^2}{c^2} \omega^6$$

2) 情况 2. 车辆 r 与前车 $r-1$ 均受到攻击, 都无法接收到头车信息, 但可以接收前车信息. 此时传递函数为:

$$H_2(s) = \frac{k_p + k_v s + k_a s^2}{k_p + k_v s + (k_a + \frac{1}{c}) s^2 + \frac{\tau_i}{c} s^3} \quad (25)$$

同上, 代入 $s = j\omega$, 可得:

$$\alpha_2 = (k_p - k_a \omega^2)^2 + (k_v \omega)^2$$

$$\beta_2 = (k_v^2 - 2k_p) \omega^2 + \left(\frac{2}{c} k_a - 2k_v \frac{\tau_i}{c} + \frac{1}{c^2} \right) \omega^4 + \frac{\tau_i^2}{c^2} \omega^6$$

3) 情况 3. 车辆 r 受到攻击, 但前车未受攻击. 此时传递函数为:

$$H_3(s) = \frac{k_p + k_v s + k_a s^2 + (s + s^2) \sum_{j=1}^{r-1} e_{p,j}(s)}{k_p + k_v s + (k_a + \frac{1}{c}) s^2 + \frac{\tau_i}{c} s^3} \quad (26)$$

实际上, 式 (26) 可看作是式 (25) 的特例. 将 $H_3(s)$ 分子中的项 $s \sum_{j=1}^{r-1} e_{p,j}(s)$ 改写为如下形式:

$$s \sum_{j=1}^{r-1} e_{p,j}(s) = \frac{s H_1(s) e_{r-1}(s) - s e_1(s)}{H_1(s) - 1} \quad (27)$$

式中, $H_1(s) = e_j(s)/e_{j-1}(s)$. 并且, 由终值定理可知, $\lim_{s \rightarrow 0} s H_1(s) e_{r-1}(s) = 0$, $\lim_{s \rightarrow 0} s \sum_{j=1}^{r-1} e_{p,j}(s) = 0$. 故式 (26) 等价于式 (25).

如本节所述, 需要满足队列弦稳定性要求 $\|H(j\omega)\| \leq 1$, 则要求 $\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$, 即:

$$\begin{cases} 3k_v^2 - 6k_p k_a - 4k_p > 0 \\ 3k_a^2 + \frac{4}{c}k_a - 4k_v \frac{\tau_i}{c} + \frac{1}{c^2} > 0 \\ k_v^2 - 2k_p > 0 \\ \frac{2}{c}k_a - 2k_v \frac{\tau_i}{c} + \frac{1}{c^2} > 0 \end{cases} \quad (28)$$

至此, 在外部干扰和随机 DoS 攻击下的车辆队列弦稳定性分析完毕.

3 仿真验证与分析

本节使用 Matlab 2016a 设计仿真实验, 考虑在马尔科夫随机 DoS 攻击和外部干扰同时存在情况下, 验证本文安全队列控制器的有效性; 并通过对比文献 [6] 和文献 [9] 的控制方法, 进一步验证本文方法针对随机 DoS 攻击的优越性.

根据实际队列行驶场景, 仿真时长为 80 s, 车辆行驶最大距离不超过 1.2 km. 队列由 7 辆不同车组成, 其中包括 1 辆头车和 6 辆跟随车, 头车初始位置 $p_0(0) = 0$ m, 初速度 $v_0(0) = 10$ m/s, 跟随车辆初始状态分别为 $x_i(0) = [-15i, 10, 0]^T$. 为验证队列跟踪性能, 预先设定头车运动状态为:

$$v_0(t) = \begin{cases} 10 \text{ m/s}, & 0 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s} \\ (0.5t + 5) \text{ m/s}, & 10 \text{ s} \leq t < 20 \text{ s} \\ (2t - 25) \text{ m/s}, & 20 \text{ s} \leq t < 25 \text{ s} \\ 25 \text{ m/s}, & 25 \text{ s} \leq t < 35 \text{ s} \\ (-t + 60) \text{ m/s}, & 35 \text{ s} \leq t < 50 \text{ s} \\ 10 \text{ m/s}, & 50 \text{ s} \leq t \leq 80 \text{ s} \end{cases} \quad (29)$$

时距与车辆的相关仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

Table 1 The parameters of simulation

参数	数值	参数	数值
d_{des} (m)	5.00	k_p	1.7391
l (s)	1.00	k_v	3.3422
τ_i (s)	0.54	k_a	2.8996
γ	1.50	c	1.5200

车辆队列常见的 4 种类型通信拓扑如图 3 所示, 其中拓扑 \bar{G}_1 为正常未受攻击拓扑, \bar{G}_2 、 \bar{G}_3 、 \bar{G}_4 分别表示不同 DoS 攻击强度所造成的通信拓扑, 且每种通信拓扑到达稳态时的分布设为 $\pi = [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4] = [0.8250, 0.0875, 0.0500, 0.0375]$. 在仿真时间 80 s 内, 对车辆队列共进行 5 次攻击, 攻击总时长为 14 s, 具体攻击时间和攻击频率如图 4 所示, 其中红色部分表示受到 DoS 攻击持续时间段. 进一步, 仿真中外部扰动为 $w(t) = 0.5 \sin(2\pi t)$, 采

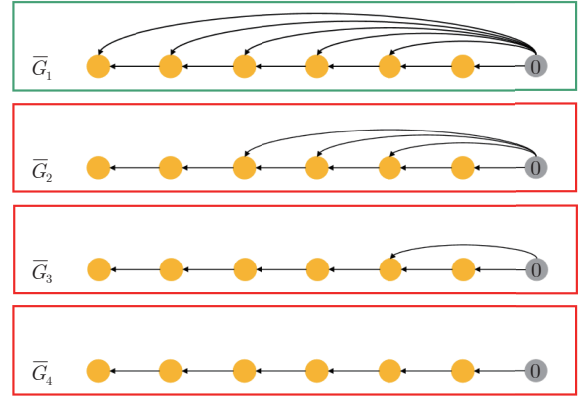


图 3 4 种常见的通信拓扑示意图

Fig.3 Four common communication topology diagrams

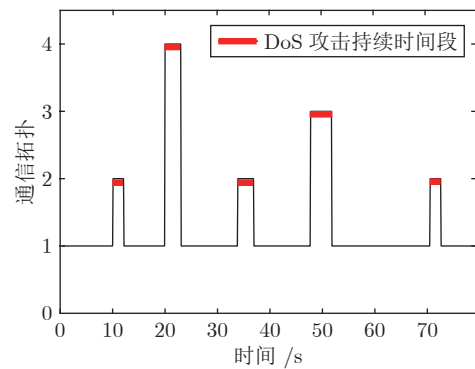


图 4 DoS 攻击过程

Fig.4 Process of DoS attacks

用 LMI 工具箱求解式 (13), 计算满足内部稳定性的控制器增益 K 和耦合系数 c 如表 1 所示.

图 5 给出 3 种安全队列控制器作用下的各辆车速度仿真结果, 其中图 5(a)、图 5(b) 和图 5(c) 分别对应本文方法设计的控制器、文献 [6] 设计的控制器和文献 [9] 设计的控制器. 由图 5 可以看出, 在 3 种安全控制器作用下的车辆队列整体保持一定的跟踪性能, 但相比于其他 2 种控制器, 本文控制器作用下各辆车速度一致性程度较高. 在外部干扰和随机 DoS 攻击下, 文献 [6] 控制器驱动下的跟随车速度与头车速度发生了较大偏移, 说明车辆队列的跟踪性能变差; 文献 [9] 控制器驱动下的速度曲线有多处波动, 各车辆速度不稳定, 即车辆队列的跟踪性能变差.

图 6 给出 3 种安全队列控制器作用下的车间距误差仿真结果, 其中图 6(a)、图 6(b) 和图 6(c) 分别对应本文方法设计的控制器、文献 [6] 设计的控制器和文献 [9] 设计的控制器. 由图 6 可以看出, 本文方法和文献 [6] 控制器能实现队列中各辆车的位置间距误差收敛到零的控制目标, 但本文方法得到的

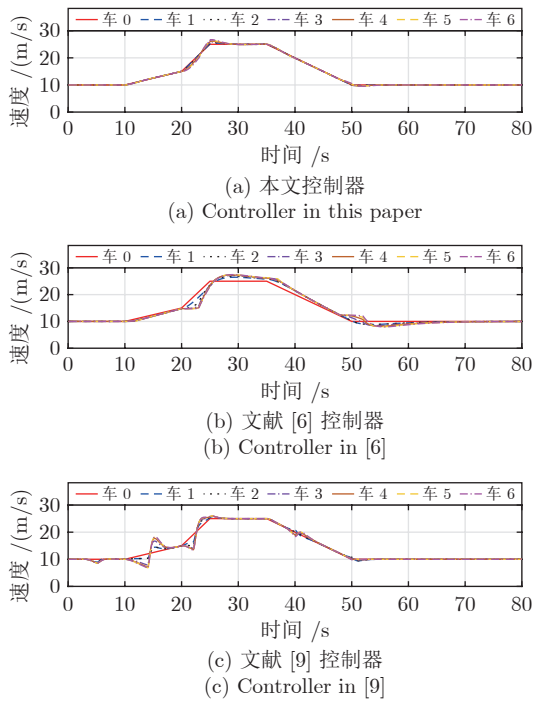


图 5 车辆速度曲线

Fig. 5 Velocity profiles of vehicles

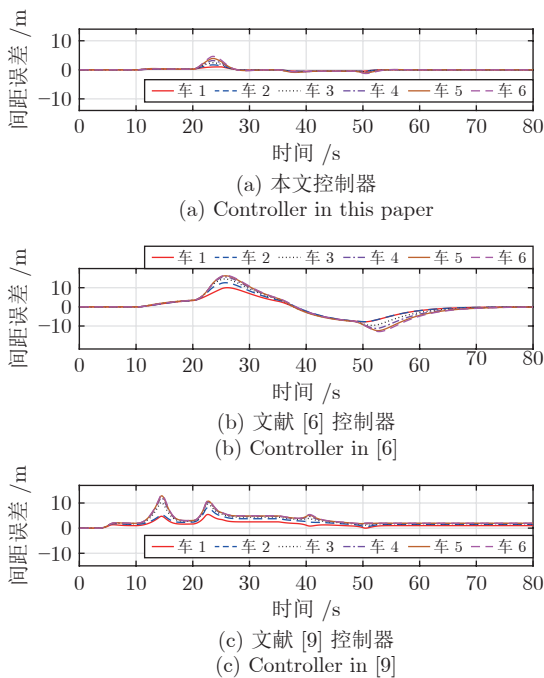


图 6 车辆间距误差曲线

Fig. 6 Spacing error profiles of vehicles

间距误差峰值为 4.6 m, 文献 [6] 控制器得到的间距误差峰值达到 16.4 m, 无法达到缩小间距误差的控制效果; 而在文献 [9] 控制器驱动下, 每辆车间距误差最终收敛不一致且无法收敛到零, 同时间距误差峰值达到 13.2 m. 此外, 由图 6 进一步可知, 3 种安

全队列控制器均能实现网联车队列在遭受外部干扰和随机 DoS 攻击下的队列弦稳定性. 该实验结果表明, 本文控制器驱动下的网联车队列能保持良好的安全性, 并且由于车间距误差更小, 使得道路容纳车辆的密度可以更大, 从而提高了道路的通行效率和容量.

为进一步验证本文控制器对随机 DoS 攻击的弹性, 在理想车间距、初始状态、通信拓扑类型和外部干扰相同的情况下, 增加 DoS 攻击频率 (即修改马尔科夫拓扑转换率), 观察队列稳定性情况. 令 $\Theta_r(t)$ 为 $[0, t]$ 间隔内拓扑 \bar{G}_r 出现的总时间, 则 $\theta_r(t) = \Theta_r(t)/t$, 其中 $\theta_r(t)$ 为拓扑 \bar{G}_r 的拓扑率, 对比实验结果如表 2 所示. 表 2 中, “√”代表稳定, “×”代表不稳定. 由表 2 可以看出, 随着攻击时间的增加, 文献 [6] 方法控制的车辆队列最先失去稳定性, 然后是文献 [9]. 当 DoS 攻击时长达到 26 s 时, 本文方法控制的车辆队列才失去稳定性. 对比表 2 中实验 2 和实验 3 可知, 随着不断增加 DoS 攻击发生的频率, 文献 [9] 方法控制的车辆队列会最先产生不稳定; 当 DoS 攻击时长和攻击发生的频率增加到一定程度时, 本文方法控制的车辆队列也将失去稳定性, 即对 DoS 攻击强度存在弹性上界.

表 2 不同强度的 DoS 攻击实验
Table 2 Experiments of DoS attacks with different intensities

组别	攻击总时长 (s)	未受攻击拓扑率 θ_1 (%)	本文方法	文献 [6] 方法	文献 [9] 方法
实验 1	14	82.5	√	√	√
实验 2	18	77.5	√	×	√
实验 3	22	72.5	√	×	×
实验 4	26	67.5	×	×	×

4 结束语

针对车辆外部干扰和随机 DoS 攻击下的安全队列控制问题, 本文给出一种基于 H_∞ 的网联车安全队列控制方法. 首先, 将车辆随机 DoS 攻击建模为马尔科夫通信拓扑切换随机过程. 然后, 考虑车辆外部干扰, 采用 LMI 方法计算控制器增益和耦合系数. 在此基础上, 得到车辆队列闭环系统的稳定性和队列弦稳定性充分性条件. 最后, 对比仿真结果验证了本文方法在抑制外部干扰和随机 DoS 攻击产生的影响方面具有优越性. 后续将进一步研究通信时延和车辆启动或刹车过程产生的控制时延对网联车安全队列性能的影响.

References

- 1 Zhu Yong-Xin, Li Yong-Fu, Zhu Hao, Yu Shu-You. Observer-

- based longitudinal control for connected and automated vehicles platoon subject to communication delay. *Acta Automatica Sinica*, 2023, **49**(8): 1785–1798
(朱永薪, 李永福, 朱浩, 于树友. 通信延时环境下基于观测器的智能网联车辆队列分层协同纵向控制. 自动化学报, 2023, **49**(8): 1785–1798)
- 2 Chen Fu-Yuan, Dong Zhen-Jiang, Dong Jian-Kuo, Xu Min-Jie. A review of security protection technology for internet of vehicles. *Telecommunications Science*, 2023, **39**(3): 1–15
(陈逢媛, 董振江, 董建阔, 徐敏杰. 车联网安全防护技术综述. 电信科学, 2023, **39**(3): 1–15)
- 3 Yang Fei-Sheng, Wang Jing, Pan Quan, Kang Pei-Pei. Resilient event-triggered control of grid cyber-physical systems against cyber attack. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(1): 110–119
(杨飞生, 汪璟, 潘泉, 康沛沛. 网络攻击下信息物理融合电力系统的弹性事件触发控制. 自动化学报, 2019, **45**(1): 110–119)
- 4 Petit J, Shladover S E. Potential cyber attacks on automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(2): 546–556
- 5 Xiao S Y, Ge X H, Han Q L, Zhang Y J. Secure distributed adaptive platooning control of automated vehicles over vehicular Ad-Hoc networks under denial-of-service attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(11): 12003–12015
- 6 Zhang D, Shen Y P, Zhou S Q, Dong X W, Yu L. Distributed secure platoon control of connected vehicles subject to DoS attack: Theory and application. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, **51**(11): 7269–7278
- 7 Chen J C, Zhang H, Yin G D. Distributed dynamic event-triggered secure model predictive control of vehicle platoon against DoS attacks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, **72**(3): 2863–2877
- 8 Zhao H, Li W D, Li Z C. Resilient event-triggered control for vehicular networked systems under Markovian jump DoS jamming attacks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, **72**(4): 4182–4195
- 9 Zhao Y, Liu Z C, Wong W S. Resilient platoon control of vehicular cyber physical systems under DoS attacks and multiple disturbances. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, **23**(8): 10945–10956
- 10 Liu Y H. Secure control of networked switched systems with random DoS attacks via event-triggered approach. In: Proceedings of the 40th Chinese Control Conference. Shanghai, China: 2021. 1399–1404
- 11 Sun Y G, Wang L. Consensus of multi-agent systems in directed networks with nonuniform time-varying delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(7): 1607–1613
- 12 Ploeg J P, Shukla D, Wouw N, Nijmeijer H. Controller synthesis for string stability of vehicle platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(2): 854–865
- 13 Zhou J S, Tian D X, Sheng Z G, Duan X T, Qu G X, Zhao D Z, et al. Robust min-max model predictive vehicle platooning with causal disturbance feedback. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, **23**(9): 15878–15897
- 14 Liu Y G, Gao H L, Xu B G, Liu G Y, Cheng H. Autonomous coordinated control of a platoon of vehicles with multiple disturbances. *IET Control Theory and Applications*, 2014, **8**(18): 2325–2335
- 15 Kwon J W, Chwa D. Adaptive bidirectional platoon control using a coupled sliding mode control method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(5): 2040–2048
- 16 Wang P W, Deng H, Zhang J, Wang L, Zhang M F, Li Y F. Model predictive control for connected vehicle platoon under switching communication topology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, **23**(7): 7817–7830
- 17 Huang C, Coskun S, Wang J, Mei P, Shi Q. Robust H_∞ dynamic output-feedback control for CACC with ROSSs subject to RODAs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, **71**(1): 137–147
- 18 Ge X H, Han Q L, Wu Q, Zhang X M. Resilient and safe platooning control of connected automated vehicles against intermittent denial-of-service attacks. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, **10**(5): 1234–1251
- 19 Petrillo A, Pescapé A, Santini S. A secure adaptive control for cooperative driving of autonomous connected vehicles in the presence of heterogeneous communication delays and cyber attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, **51**(3): 1134–1149
- 20 Li Z Y, Zhou B, Lam J. Lyapunov-Krasovskii functionals for predictor feedback control of linear systems with multiple input delays. In: Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Nanjing, China: 2014. 6136–6141
- 21 Wen S X, Guo G. Sampled-data control for connected vehicles with Markovian switching topologies and communication delay. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, **21**(7): 2930–2942



宋秀兰 浙江工业大学信息工程学院副教授. 主要研究方向为多媒体无线通信, 网联车辆安全队列控制. 本文通信作者.

E-mail: songxl2008@zjut.edu.cn

(**SONG Xiu-Lan** Associate professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. Her research interest covers multi-media wireless communication and secure platooning control for connected vehicles. Corresponding author of this paper.)



李洋阳 浙江工业大学信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为车辆安全队列控制.

E-mail: seanlee1122@163.com

(**LI Yang-Yang** Master student at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His main research interest is secure platooning control for vehicles.)



何德峰 浙江工业大学信息工程学院教授. 主要研究方向为智能预测控制, 多智能体分布式估计与协同控制和安全控制理论.

E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn

(**HE De-Feng** Professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers intelligent predictive control, multi-agent distributed estimation and collaborative control, and security control theory.)