

异构通信网联车系统鲁棒协同自适应巡航控制

宋秀兰[†], 丁 锋, 漏小鑫, 何德峰

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘 要: 考虑异构通信下的不确定网联车系统协同自适应巡航控制(CACC)问题,提出一种网联车系统鲁棒协同自适应巡航控制器设计方法.采用伯努利随机过程和具有可变输入延迟的跟踪模型描述具有参数不确定性和丢包及时延的异构通信网联车系统.为降低CACC控制器设计的复杂性,采用分散输出反馈控制结构和线性矩阵不等式技术,求解不确定异构通信网联车系统的CACC控制器.进一步,利用时滞系统方法和频域分析,建立保证闭环系统稳定和网联车辆系统弦稳定结果.最后通过一组四车辆三信道的网联车辆系统的仿真实验验证所提方法的有效性.

关键词: 网联车系统; 协同自适应巡航控制; 异构通信; 不确定性; 弦稳定性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Robust cooperative adaptive cruise control of connected vehicle systems with heterogonous communication

SONG Xiu-lan[†], DING Feng, LOU Xiao-xin, HE De-feng

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

Abstract: Considering the cooperative adaptive cruise control (CACC) problem of uncertain connected vehicle systems with heterogonous communication, this paper presents a design method of robust controllers for the connected vehicle system. The Bernoulli stochastic process and tracking model with varying input-delays are integrated to formulate the connected vehicle system with parameter uncertainty, losing packet and time delays. To reduce the design complexity of CACC controllers, the decentralized output feedback control structure and linear matrix inequality technology are used to compute the CACC controller of the uncertain connected vehicle systems with heterogonous communication. Moreover, the results on the stability of the closed-loop system and the string stability of the connected vehicle system are established by the methods of time-delay systems and frequency domain analysis. Finally, a connected vehicle system consisting of four cars with communicated by three channels is used to simulate and illustrate the effectiveness of the proposed algorithms.

Keywords: connected vehicle systems; cooperative adaptive cruise control; heterogonous communication; uncertainties; string stability

0 引 言

车辆自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)系统已广泛应用于商用汽车的辅助驾驶,可降低驾驶员的工作负荷,提高车辆的行驶安全性^[1-2].随着无线通信技术的快速发展,ACC系统可以利用DSRC、4G等无线通信实时共享车辆间的行驶信息,进而在复杂路况下也可实现多车协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC).相比于ACC系统,CACC系统能实现更小安全间距的队列行驶,从而可以有效提升道路通行效率、燃油经济性、乘

车舒适性以及行驶安全性^[3-6],因此已成为目前智能网联汽车控制研究的重要内容.

由于不同车辆的参数不同,且车辆会随行驶工况发生改变,同时由于车辆的快速移动特点,车联网的多种通信协议会产生不同的通信延时和丢包特征,这些都将会影响CACC的使用性能.因此,国内外相关学者对车辆CACC展开了多方面研究^[5-21].例如,文献[7-8]研究了通信延时对车队稳定性的影响;文献[9-11]考虑车队与通讯网络的量化、延时和丢包因素,采用保性能控制和 H_∞ 控制设计自主车队的协同巡

收稿日期: 2019-04-20; 修回日期: 2019-08-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803336); 浙江省自然科学基金项目(LR17F030004).

责任编辑: 陈虹.

[†]通讯作者. E-mail: songxl2008@zjut.edu.cn.

航控制器,实现了车队系统的稳定运行;文献[12]从网络化系统角度出发,研究了车辆队列系统的CACC稳定性问题;文献[13-14]考虑一类特殊的混杂车队系统,分析了车辆油门和制动踏板即车辆执行器的滞后时间对车辆CACC系统稳定性和弦稳定性(string stability)的影响;文献[15]考虑跟车工况安全、舒适、节能等性能指标,采用模型预测控制策略设计同构通信网联车系统的时滞反馈CACC策略.进一步,考虑异构车辆通信网络导致的延时差异化,文献[16]引入分布式一致策略设计同构车辆队列系统的CACC策略;文献[17]研究多型通信拓扑结构下车辆队列的内稳定性和鲁棒性,提出了计算独立于队列规模的控制器设计方法.由于实际车辆系统存在的动态不确定性,文献[18]采用自适应最优控制方法研究具有不确定动态的异质车辆CACC系统;文献[19]提出分布式控制策略,但没有考虑异构无线通信对CACC的影响.

弦稳定性能充分描述了CACC系统对安全间距误差、相对速度和/或加速度扰动沿车辆队列扩散的抑制能力^[12,21],近年来成为CACC研究的核心内容.现有研究表明,CACC系统的弦稳定性能受到车联网通信质量、车辆执行器滞后时间和动态特性等影响,目前的研究取得了丰富结果.然而,目前DSRC、4G等多种无线通信协议在车联网混合使用,各种通信网络的时延和丢包特性不同^[22].由于车辆高速移动,异构网络时延和丢包特性的差异使得车队巡航系统呈现复杂的时间参数时变或切换特性,导致比单通信协议更为复杂的无线网络诱导因素^[23-24].特别是车队网络异构特性和车辆不确定性共同作用,影响车队系统的稳定性和弦稳定性,增加了CACC设计难度.

本文综合考虑异构通信的网联车系统及其不确定动态和执行器的延迟,研究鲁棒协同自适应巡航控制策略.采用伯努利随机过程和具有可变输入延迟的跟踪模型来描述无线信道丢包和执行器引起的时变延迟.据此,提出基于线性矩阵不等式^[25]的系统化方法,设计具有保证弦稳定和零稳态间隔误差的车辆分散CACC控制器,并建立保证网联车系统弦稳定和零稳态间隔误差的充分性条件.最后通过4辆不同驾驶参数的汽车和3个不同无线信道传输连接的仿真实验,验证本文方法的有效性.

1 系统模型与问题描述

考虑由 $N+1$ 辆汽车组成的车辆纵向队列系统,如图1所示,其中最右端领头车($i=0$)提供车队参考

速度,其余为跟随车.各辆车通过异构无线网络共享其运动状态信息(如位置、速度和加速度等).

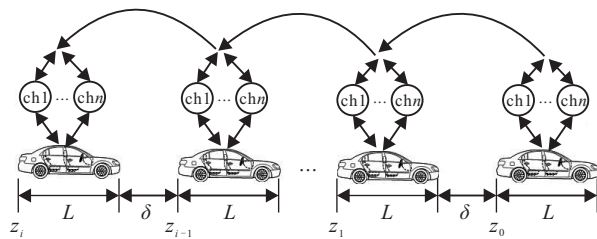


图1 异构网联车协同巡航系统

考虑车联网的多网融合设置,前一辆车将通过由 $n(1 < n < \infty)$ 个无线信道组成的异构无线网络定期将其运动状态信息传递其跟随车辆.令车辆的安全间距为 $\delta_d > 0$,第 i 辆车的长度、位置、速度和加速度分别为 $L_i > 0$, z_i , v_i 和 a_i , $i=0,1,\dots,N$,并假设各车辆油门和制动踏板单元具有良好的动态特性,则相邻车辆相对运动过程满足如下动力学模型^[9-10]:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t), \\ \ddot{\delta}_i(t) = a_{i-1}(t) - a_i(t), \\ \dot{a}_i(t) = -a_i(t)/\zeta_i + u_i(t - t_{i,a})/\zeta_i. \end{cases} \quad (1)$$

其中:变量 $\delta_i = z_{i-1} - z_i - L_i - \delta_d$ 是第 i 辆车的安全间距误差,控制输入 u_i 是车辆所需的加速度命令, $\zeta_i > 0$ 是车辆发动机惯性时间参数, $\tau_{i,a}$ 是车辆油门和制动踏板的滞后时间, $i=0,1,\dots,N$.

在车辆实际运行过程中,发动机惯性时间参数和踏板单元滞后时间通常会根据车辆的运行环境和状态发生变化^[10].本文采用如下不确定时变时滞方程描述车辆的加速度动态过程:

$$\begin{aligned} \dot{a}_i(t) = & \\ & - \left(\frac{1}{\zeta_i} + \frac{1}{\Delta\zeta_i} \right) a_i(t) + \left(\frac{1}{\zeta_i} + \frac{1}{\Delta\zeta_i} \right) u_i(t - t_{i,a}(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\Delta\zeta_i$ 是发动机时间常数中存在的 uncertainty, $\tau_{i,a}(t)$ 是车辆油门和制动踏板的时变时滞, $i=0,1,\dots,N$.显然,车辆踏板的时变时滞存在上界有限 $\tau_a^u > 0$.

选择状态向量 $x_i(t) = [\delta_i \quad \dot{\delta}_i \quad \ddot{\delta}_i]^T$,并考虑恒速参考速度,忽略前车加速度的影响,系统(1)和(2)可描述为三阶状态空间模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) = & (A_i + \Delta A_i)x_i(t) + (B_i + \\ & \Delta B_i)[u_i(t - t_{i,a}(t)) - d_i(t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1/\zeta_i \end{bmatrix}, \quad \Delta A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1/\Delta\zeta_i \end{bmatrix},$$

$$B_i = [0 \ 0 \ -1/\zeta_i]^T, \Delta B_i = [0 \ 0 \ -1/\Delta\zeta_i]^T,$$

d_i 是前车加速度 a_{i-1} .

由于车辆的高速移动和无线通信网络的异构特性,车辆状态信息通过异构无线网络传输给控制器的数据可能会发生丢失.假设车辆异构网络数据丢包遵循伯努利过程,令1表示接受到数据,0表示丢失数据,则丢包概率描述为

$$P\{\lambda_i(t) = 1\} = \bar{\lambda}_i, P\{\lambda_i(t) = 0\} = 1 - \bar{\lambda}_i. \quad (4)$$

其中 $0 < \bar{\lambda}_i \leq 1$ 表示数据包未丢失概率, $i = 0, 1, \dots, N$.当 $\lambda_i = 0$ 时,控制器无法收到前车的状态信息.进一步,由于高速移动车联网通信的间歇性连接^[13,23],通常存在 $0.1\text{s} \sim 0.4\text{s}$ 的网络时变延迟 τ_c ,而异构无线信道的时延和丢包率往往不同,所以定义系统(3)的输出变量

$$y_i(t) = \lambda_i^j(t)x_i(t - \tau_{i,c}^j(t)). \quad (5)$$

其中: $\tau_{i,c}^j \geq 0$ 是第 j 个信道的时变延迟,共享信息通过该信道传输到第 i 个车辆; λ_i^j 是第 i 辆车的第 j 个信道的数据传输状态.假设存在时延上限 $\tau_c^u > 0$ 限制各个信道的时间延迟,则结合式(3)和(5)可得巡航系统模型

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = (A_i + \Delta A_i)x_i(t) + (B_i + \Delta B_i)[u_i(t - t_{i,a}(t)) - d_i(t)], \\ y_i(t) = \lambda_i^j(t)x_i(t - \tau_{i,c}^j(t)). \end{cases} \quad (6)$$

其中: $i = 0, 1, \dots, N, j = 0, 1, \dots, n$.

针对异构网联车系统协同自适应巡航系统(6),本文目标是设计一输出反馈鲁棒协同自适应巡航控制器,保证不确定车辆队列系统在不可靠异构车联网环境下具有良好的车辆稳定性和队列稳定性等性能,确保智能网联汽车实现安全和平稳队列行驶.

注1 本文车辆稳定性是指巡航控制系统在李雅谱诺夫意义下的稳定性;车辆队列稳定性在车辆稳定性的基础上,采用弦稳定性描述^[10,13],即车辆安全间距误差传递函数 $G_i(s) = \Delta_i(s)/\Delta_{i-1}(s)$ 对于所有 $i = 0, 1, \dots, N$ 和任意 $w \geq 0$ 满足 $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$.其中: $\Delta_i(s) = L(\delta_i(t))$, L 表示相关信号的拉普拉斯运算,复数变量 $s \in C, \|\cdot\|$ 表示复数的模.本文CACC的协同目标是建立不确定车辆队列系统的弦稳定性结果.

2 鲁棒协同自适应巡航控制

考虑异构网联车协同自适应巡航系统(6)的输出方程,可得

$$x_i(t) = (\lambda_i^j)^{-1}(t)y_i(t + \tau_{i,c}^j(t)). \quad (7)$$

将其代入到系统(6)的状态方程,可得

$$\begin{aligned} \dot{y}_i(t) = & (\hat{A}_i + \Delta \hat{A}_i)y_i(t) + \lambda_i^j(\hat{B}_i + \Delta \hat{B}_i)u_i(t - \\ & \tau_{i,a}(t) - \tau_{i,c}^j(t)) - \lambda_i^j(\hat{B}_i + \Delta \hat{B}_i)d(t - \tau_{i,c}^j(t)). \end{aligned} \quad (8)$$

从而可将具有车辆执行器和网络传输时延的CACC系统(6)等价于具有可变输入时延动态模型.

令 $\tau_i = \tau_{i,a} + \tau_{i,c}^j$,则时延上界为 $\tau^u = \tau_a^u + \tau_c^u$.为表述清楚,忽略前车加速度项 d_i ,即采用下式设计CACC控制器:

$$\dot{y}_i(t) = (\hat{A}_i + \Delta \hat{A}_i)y_i(t) + \lambda_i^j(\hat{B}_i + \Delta \hat{B}_i)u_i(t - \tau_i(t)), \quad (9)$$

则集成式(9)得到CACC整体系统

$$\dot{y}(t) = (\tilde{A} + \Delta \tilde{A})y(t) + \tilde{\lambda}(\tilde{B} + \Delta \tilde{B})u(t - \tau(t)). \quad (10)$$

其中: $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T, u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N]^T, \tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_N]^T, \tilde{A} = \text{diag}\{\hat{A}_1, \hat{A}_2, \dots, \hat{A}_N\}, B = \text{diag}\{\hat{B}_1, \hat{B}_2, \dots, \hat{B}_N\}, \lambda = \text{diag}\{\lambda_1^j, \lambda_2^j, \dots, \lambda_N^j\}$.考虑 $\Delta\zeta_i$ 的有界性,假设其满足 $[\Delta \tilde{A} \ \Delta \tilde{B}] = DF(t)[E_1 \ E_2]$ 以及 $F(t)^T F(t) \leq I$.其中

$$D = \text{diag}\left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right\};$$

$$E_1 = \text{diag}\left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 \end{bmatrix} \right\},$$

$$E_2 = \text{diag}\left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.06 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.06 \end{bmatrix} \right\};$$

$F(t) = f_i(t)I, f_i(t)$ 是满足 $0 \leq f_i(t) \leq 1$ 的连续函数,且 $|\Delta\zeta_i| = f_i(t)$.

对第 i 辆车定义输出反馈CACC控制律

$$u_i(t) = [k_{i,1} \ k_{i,2} \ k_{i,3}]y_i = k_i y_i(t), \quad (11)$$

其中 $k_i = [k_{i,1} \ k_{i,2} \ k_{i,3}]$ 是第 i 辆车CACC的控制增益.显然,第 i 辆车的CACC控制器(11)仅与前一车辆的行驶信息相关,因此控制器(11)本质上是一种分散控制策略,降低了车辆协同自适应巡航控制器设计的难度.

定理1 考虑第 i 辆车巡航系统(9),给定实数 γ_i, ρ_i 和足够小的 $g_i > 0, i = 1, 2, \dots, N$.若存在实矩阵 $\bar{P}_i > 0, \bar{R}_i > 0$ 和 S_i 满足如下LMIs:

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} & 0 & g_i D_i & \Sigma_{16} \\ * & -2\rho_i^{-1}\bar{P}_i & \Sigma_{23} & \tau^u \bar{R}_i & \Sigma_{25} & \Sigma_{26} \\ * & * & -\tau^u \bar{R}_i & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\tau^u \bar{R}_i & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -g_i I & 0 \\ * & * & * & * & * & -g_i I \end{bmatrix} < 0. \quad (12)$$

其中

$$\Sigma_{11} = \hat{A}_i \bar{P}_i + \bar{P}_i \hat{A}_i^T - \gamma_i \rho_i^{-1} (\lambda_i \hat{B}_i S_i + S_i^T \lambda_i^T \hat{B}_i^T),$$

$$\Sigma_{12} = \bar{P}_i + \rho_i^{-1} \lambda_i \hat{B}_i S_i,$$

$$\Sigma_{13} = \tau^u (\bar{P}_i \hat{A}_i^T - \gamma_i \rho_i^{-1} S_i^T \lambda_i^T \hat{B}_i^T),$$

$$\Sigma_{16} = \bar{P}_i E_{i1}^T - \gamma_i \rho_i^{-1} S_i^T E_{i2}^T,$$

$$\Sigma_{23} = \tau^u \rho_i^{-1} S_i^T \lambda_i^T \hat{B}_i^T,$$

$$\Sigma_{25} = g_i \tau^u D_i,$$

$$\Sigma_{26} = \rho_i^{-1} S_i^T E_{i2}^T,$$

“*”表示对应位置的对称矩阵块以及矩阵。则CACC控制器的增益 $k_i = S_i \bar{P}_i^{-1}$, 且闭环系统(9)和(11)渐近稳定。

证明 考虑闭环系统(9)和(11),由文献[25]的定理7.1可知,对于给定的实数 γ_i 和 ρ_i ,如果存在具有适当维数的实矩阵 $\bar{P}_i > 0$, $\bar{R}_i > 0$, S_i 和充分小实数 $g_i > 0$,使得矩阵不等式

$$\Psi + HF(t)E + E^T F(t)^T H^T < 0 \quad (13)$$

成立,则闭环系统(9)和(11)对所有满足 $[\Delta \tilde{A} \quad \Delta \tilde{B}] = DF(t)[E_1 \quad E_2]$ 的不确定性及时滞 $\tau_i(t)$ 渐近稳定。其中

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \psi_{13} & 0 \\ * & -2\rho_i^{-1}\bar{P} & \tau^u \rho_i^{-1} S_i^T \lambda_i^T \hat{B}_i^T & \tau^u \bar{R}_i \\ * & * & -\tau^u \bar{R}_i & 0 \\ * & * & * & -\tau^u \bar{R}_i \end{bmatrix},$$

$$\psi_{11} = P_i \hat{A}_i + \hat{A}_i^T P_i - \gamma_i \rho_i^{-1} (\lambda_i \hat{B}_i S_i + S_i^T \lambda_i^T \hat{B}_i^T),$$

$$\psi_{12} = \bar{P}_i + \rho_i^{-1} \lambda_i \hat{B}_i S_i,$$

$$\psi_{13} = \tau^u (\bar{P}_i \hat{A}_i^T - \gamma_i \rho_i^{-1} S_i^T \lambda_i^T \hat{B}_i^T),$$

$$H = [D_i^T \quad \tau^u D_i^T \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$E = [a \quad \rho_i^{-1} E_{i2} k_i \quad 0 \quad 0],$$

$$a = E_{i1} P_i - \gamma_i \rho_i^{-1} E_{i2} S_i,$$

控制器为 $u_i = S_i \bar{P}_i^{-1} y_i$ 。进一步,利用文献[25]的引理2.2可知,不等式(13)等价于存在 $g_i > 0$ 使得以下矩阵不等式成立:

$$\Psi + g_i H H^T + g_i E^T E < 0. \quad (14)$$

则对不等式(14)应用Schur补引理,得

$$\begin{bmatrix} \Psi & g_i H & E^T \\ * & -g_i I & 0 \\ * & * & -g_i I \end{bmatrix} < 0. \quad (15)$$

即定理1成立。□

由定理1可知,若线性矩阵不等式(12)可行,则分散协同自适应巡航控制律(11)能够在车辆存在动态不确定情况以及执行器和异构信道传输引起的不同延迟情况下,仍然保持预期的安全车间距驱动各自车辆跟随前车行驶。

另一方面,为了保证相邻车辆的动态车间距误差随车辆队列的增大而增大,需要建立车辆队列系统的弦稳定性(string stability)。为此,令 L 表示相关信号的拉普拉斯运算,即 $\Delta_i(s) = L(\delta_i(t))$ 。其中:复数变量 $s \in C$,安全间隔误差信号 δ_i 用于评估车辆队列系统的弦稳定性。对于任意 $i = 1, 2, \dots, N$,车辆安全间隔误差传递函数定义为 $G_i(s) = \frac{\Delta_i(s)}{\Delta_{i-1}(s)}$ 。如果 $G_i(s)$ 对于所有 $i = 1, 2, \dots, N$ 和任意 $\omega \geq 0$ 满足 $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$,则车辆队列系统具有弦稳定性结果^[10,13],其中 $\|\cdot\|$ 表示复数的模。

定理2 考虑车辆巡航闭环系统(9)和(11),若不等式组

$$\varphi_i^2 - 2\lambda_i \varphi_i k_{i,3} \tau \geq 0, \quad (16)$$

$$\varphi_{i-1}^2 ((\lambda_i k_{i,3} + 1)^2 - 2\lambda_i (\varphi_i k_{i,2} + \varphi_i \tau - k_{i,2} \tau)) + \varphi_i^2 (1 - \lambda_{i-1}^2 k_{i-1,3}) - 2\lambda_i \varphi_i k_{i,3} \tau \geq 0, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_i \varphi_{i-1}^2 (\lambda_i k_{i,2}^2 - 2\lambda_i k_{i,1} k_{i,3} - 2k_{i,1}) + \\ & \lambda_{i-1}^2 \varphi_i^2 (2k_{i-1,1} k_{i-1,3} - k_{i-1,2}^2) + \\ & 2\lambda_i \varphi_i (k_{i,1} \tau - k_{i,2}) + (\lambda_i k_{i,3} + 1)^2 - \\ & 2\lambda_i k_{i,2} \tau - \lambda_{i-1}^2 k_{i-1,3}^2 \geq 1, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\lambda_i^2 \varphi_{i-1}^2 k_{i,1}^2 - \lambda_{i-1}^2 \varphi_i^2 k_{i-1,1}^2 + \lambda_i^2 (k_{i,2}^2 - 2k_{i,1} k_{i,3}) - \lambda_{i-1}^2 (k_{i-1,2}^2 - 2k_{i-1,1} k_{i-1,3}) - 2\lambda_i k_{i,1} \geq 0, \quad (19)$$

$$\lambda_i^2 k_{i,1}^2 - \lambda_{i-1}^2 k_{i-1,1}^2 \geq 0, \quad (20)$$

对于所有 $i = 1, 2, \dots, N$ 和任意 $\omega \geq 0$ 成立,其中 $\varphi_i = \frac{s_i \Delta_{s_i}}{s_i + \Delta_{s_i}}$ 和 $\varphi_{i-1} = \frac{s_{i-1} \Delta_{s_{i-1}}}{s_{i-1} + \Delta_{s_{i-1}}}$,则传递函数 $G_i(s)$ 满足 $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$,即车辆队列系统是弦稳定的。

证明 考虑纵向加速度模型(2)的拉普拉斯变换,可得

$$a_i(s) = e^{-\tau_i s} u_i(s) / (1 + \varphi_i s), \quad (21)$$

其中 $\varphi_i = \frac{s_i \Delta_{s_i}}{s_i + \Delta_{s_i}}$ 。注意到 $\ddot{\delta}_i = a_{i-1} - a_i$,可得

$$\delta_i(s) = \frac{K_{i-1}(s) \lambda_{i-1} \delta_{i-1} e^{-\tau_{i-1} s}}{(1 + \varphi_{i-1} s)^2} - \frac{K_i(s) \lambda_i \delta_i e^{-\tau_i s}}{(1 + \varphi_i s)^2}.$$

其中

$$K_i(s) = k_{i,1} + k_{i,2}s + k_{i,3}s^2,$$

$$K_{i-1}(s) = k_{i-1,1} + k_{i-1,2}s + k_{i-1,3}s^2.$$

则传递函数 $G_i(s)$ 为

$$G_i(s) = \delta_i(s)/\delta_{i-1}(s) = \frac{(1 + \varphi_i s)K_{i-1}(s)\lambda_{i-1}e^{-\tau_{i-1}s}}{(1 + \varphi_{i-1}s)(K_i(s)\lambda_i e^{-\tau_i s} + s + \varphi_i s^3)}. \quad (22)$$

利用欧拉公式 $e^{j\tau\omega} = \cos(\tau\omega) + j\sin(\tau\omega)$, 并将 $s = j\omega$ 代入式 (22), 得

$$G_i(j\omega) = e_i(j\omega)/f_i(j\omega). \quad (23)$$

其中

$$e_i(j\omega) = \lambda_{i-1}(k_{i-1,1} - (\varphi_i k_{i-1,2} + k_{i-1,3})\omega^2) + j\lambda_{i-1}(\varphi_i k_{i-1,1}\omega + k_{i-1,2}\omega - \varphi_i k_{i-1,3}\omega^3),$$

$$f_i(j\omega) = (\lambda_i k_{i,1} - \lambda_i k_{i,3}\omega^2 - \omega^2 \cos(\tau\omega) + \omega^3 \varphi_i \sin(\tau\omega) - \varphi_{i-1} \lambda_i k_{i,2}\omega^2 + \omega^4 \varphi_{i-1} \varphi_i \cos(\tau\omega) + \omega^3 \varphi_{i-1} \sin(\tau\omega)) + j(\lambda_i k_{i,2}\omega - \omega^3 \varphi_i \cos(\tau\omega) - \omega^2 \sin(\tau\omega) + \varphi_{i-1} \lambda_i k_{i,1}\omega - \varphi_{i-1} \lambda_i k_{i,3}\omega^3 - \omega^3 \varphi_{i-1} \cos(\tau\omega) + \omega^4 \varphi_i \varphi_{i-1}).$$

对式 (23) 取模运算, 并记

$$\|G_i(j\omega)\| = \sqrt{\alpha/(\alpha + \beta)}. \quad (24)$$

其中

$$\alpha = \lambda_{i-1}^2((k_{i-1,1} - (\varphi_i k_{i-1,2} + k_{i-1,3})\omega^2)^2 + (\varphi_i k_{i-1,1}\omega + k_{i-1,2}\omega - \varphi_i k_{i-1,3}\omega^3)^2),$$

$$\beta = \varphi_{i-1}^2 \varphi_i^2 \omega^8 - 2\lambda_i \varphi_{i-1}^2 \varphi_i k_{i,3} \omega^7 \sin(\tau\omega) + (\varphi_{i-1}^2 + \varphi_i^2 + 2\lambda_i \varphi_{i-1}^2 k_{i,3} \cos(\tau\omega) + \lambda_i^2 \varphi_{i-1}^2 k_{i,3}^2 - 2\lambda_i \varphi_{i-1}^2 \varphi_i k_{i,2} \cos(\tau\omega) - \lambda_{i-1}^2 \varphi_{i-1}^2 k_{i-1,3}^2) \omega^6 + (-2\lambda_i \varphi_i k_{i,3} \sin(\tau\omega) - 2\lambda_i \varphi_{i-1}^2 k_{i,2} \sin(\tau\omega) + 2\lambda_i k_{i,1} \varphi_{i-1}^2 \varphi_i \sin(\tau\omega)) \omega^5 + (2\lambda_i k_{i,3} \cos(\tau\omega) - 2\lambda_i k_{i,1} \varphi_{i-1}^2 \cos(\tau\omega) + 1 + \lambda_i^2 k_{i,3}^2 - \lambda_{i-1}^2 k_{i-1,3}^2 - 2\lambda_i \varphi_i k_{i,2} \cos(\tau\omega) - \lambda_{i-1}^2 \varphi_{i-1}^2 k_{i-1,2}^2 + \lambda_i^2 \varphi_{i-1}^2 k_{i,2}^2 + 2\lambda_{i-1}^2 \varphi_{i-1}^2 k_{i-1,1} k_{i-1,3} - 2\lambda_i^2 \varphi_{i-1}^2 k_{i,1} k_{i,3}) \omega^4 + (2\lambda_i k_{i,1} \varphi_i \sin(\tau\omega) - 2\lambda_i k_{i,2} \sin(\tau\omega)) \omega^3 + (\lambda_i^2 k_{i,1}^2 \varphi_{i-1}^2 - \lambda_{i-1}^2 k_{i-1,2}^2 - \lambda_{i-1}^2 k_{i-1,1}^2 \varphi_i^2 + \lambda_i^2 k_{i,2}^2 - 2\lambda_i k_{i,1} \cos(\tau\omega) + 2\varphi_{i-1}^2 k_{i-1,1} k_{i-1,3} - 2\lambda_i^2 k_{i,1} k_{i,3}) \omega^2 + \lambda_i^2 k_{i,1}^2 - \lambda_{i-1}^2 k_{i-1,1}^2.$$

显然 $\alpha > 0$, 故为使不等式 $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$ 对于任意

$\omega \geq 0$ 成立, 只需要满足 $\beta > 0$.

考虑不等式 $\sin(\tau\omega) \leq \tau\omega \leq 1$ 和 $\cos(\tau\omega) \leq 1$ 对任意 $\omega > 0$ 成立, 将不等式条件 (16) 代入到 β , 并检验可得, 对于任意 $\omega > 0$ 满足 $\beta > 0$. 因此, 对于任意 $\omega \geq 0$ 和所有 $i = 1, 2, \dots, N$, 不等式 $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$ 成立. \square

3 仿真验证与分析

考虑由 4 辆车通过 3 个不同无线信道组成车辆队列系统, 即 $N = 4, n = 3$. 其中: $\zeta_0 = 0.3\text{ s}, \zeta_1 = 0.25\text{ s}, \zeta_2 = 0.2\text{ s}, \zeta_3 = 0.2\text{ s}$; 各车的长度相同, $L_i = 4\text{ m}$; 信道正确接收概率分别为 $\lambda^1 = 0.73, \lambda^2 = 0.78$ 和 $\lambda^3 = 0.8$; 执行器时延上限为 $\tau_a^u = 0.65\text{ s}$. 假设车辆状态信息通过无线信道传输, 信道延时上限为 $\tau_c^u = 0.4\text{ s}$, 则车队系统总时延上限为 $\tau^u = 1.05\text{ s}$. 令 $\gamma_i = -0.257, \rho_i = 0.5, g_i = 0.5, i = 1, 2, 3$, 运行 Matlab R2014a 求解 LMI 组 (12), 得到各跟随车辆 CACC 控制器 (11) 的增益

$$k_1 = -[0.0980 \quad 0.7099 \quad 0.1807],$$

$$k_2 = -[0.0939 \quad 0.6846 \quad 0.1409],$$

$$k_3 = -[0.1035 \quad 0.7369 \quad 0.1237].$$

在仿真中, 车辆队列系统的变时延由满足约束 τ^u 的随机信号产生, 而发动机时间常数 $\Delta\zeta_i$ 满足 0 到 1 随机分布的不确定性, 车辆安全间距 $\delta_d = 2\text{ m}$. 进一步, 仿真场景初始化所有车辆为停止状态, 第 1、第 2 和第 3 辆车的初始间距误差分别为 10 m、9 m 和 8 m. 运行本文提出的 CACC 控制器, 结果如图 2~图 5 所示. 其中: 图 2 表示实际安全间距误差曲线, 图 3~图 5 分别显示相邻车辆之间的相对速度、相对加速度和控制输入曲线. 在图 2~图 4 中, 实线、虚线和点线分别表示第 1 对、第 2 对和第 3 对车辆的仿真结果, 图 5 中的实线、虚线和点线分别表示第 1 辆、第 2 辆和第 3 辆跟随车的仿真结果.

分析图 2~图 5 可知, 在车辆执行器和传输的不同时延情况下, 所有车辆的轨迹都能迅速收敛, 同时对于不同通信信道在传输过程中产生丢包的情况, 控制器能够有效保证所有车辆稳定行驶且不发生碰撞,

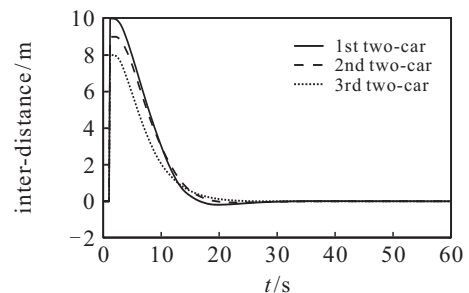


图 2 车辆安全间距误差

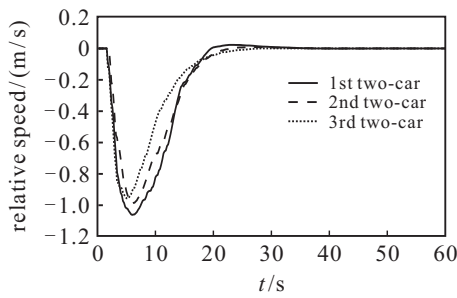


图3 车辆相对速度

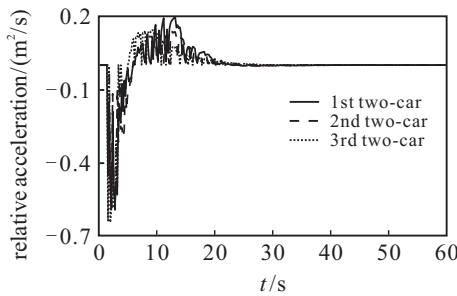


图4 车辆相对加速度

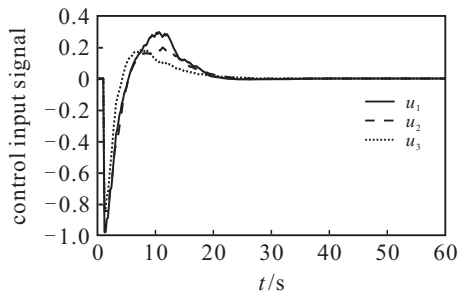


图5 车辆控制输入

即每辆车都能够跟踪其前车,并保持安全车间距和确保所有车辆速度的一致性.这些结果验证了本文方法的有效性.

进一步验证所提出CACC控制器驱动的车辆队列系统的弦稳定性,仿真结果如图6所示.分析图6可知,对于任意频率 $\omega > 0$,车辆队列闭环系统的 $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$ 严格成立,这意味着本文所提出的鲁棒CACC方法能够抑制来自前方车辆的车辆安全间距误差和速度波动带来的影响,即满足车辆队列系统的弦稳定性要求.这种特性有利于改善车辆的驾驶性能,并能保证道路的畅通^[3-4].这些结果进一步验证了本文所提方法的良好性能.

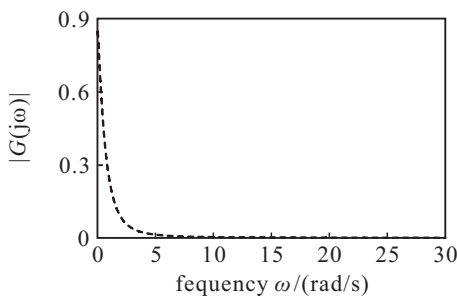


图6 车辆队列系统的频率响应(任意 $\omega > 0$)

下面进一步分析通信信道的丢包概率对车辆队列系统弦稳定性的影响.为此,进一步降低各通信信道正确接收概率至 $\lambda^1 = 0.3, \lambda^2 = 0.1$ 和 $\lambda^3 = 0.4$.此时车辆队列系统将无法保持正常稳定行驶,仿真结果如图7和图8所示.同时,对于低频率 $\omega > 0$,车辆队列闭环系统的 $\|G_i(j\omega)\| \leq 1$ 不再满足,因此车辆队列系统将失去弦稳定而可能引发车辆追尾安全事故.

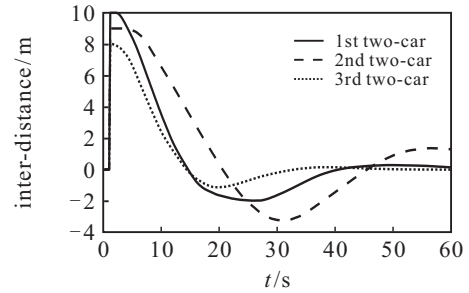


图7 低接收率下车辆安全间距误差

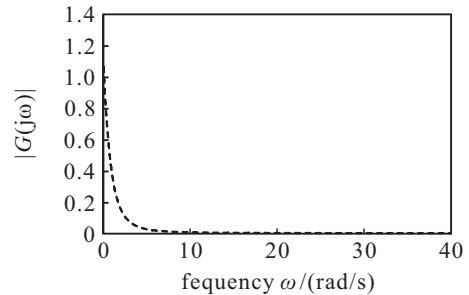


图8 低接收率下车辆队列系统的频率响应(任意 $\omega > 0$)

4 结论

本文针对具有参数不确定性和丢包、时延的异构通信网联车系统,提出了一种鲁棒协同自适应巡航控制器设计方法.采用伯努利过程和具有可变输入延迟的跟踪模型来描述无线信道丢包和执行器引起的综合时变时延.利用线性矩阵不等式技术,求解不确定异构通信网联车系统的CACC控制器,并建立保证闭环系统稳定和车辆队列系统弦稳定的充分条件.仿真结果验证了该方法的有效性.此外,车队中车辆数量的增加将大量消耗车联网的通信资源,对此,作为本文后续研究之一,将设计基于量化技术^[26-27]的网联车系统CACC策略.

参考文献(References)

- [1] Vahidi A, Eskandarian A. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4(3): 143-153.
- [2] Zhao D B, Wang B. Data-based vehicle adaptive cruise control: A review[C]. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conferences. Xi'an: IEEE, 2013: 7840-7845.
- [3] 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, 2015, 17(2): 1-19.
- [4] Jia D, Lu K, Wang J, et al. A survey on platoon based vehicular cyber-physical systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 263-284.
- [5] 闫茂德, 宋家成, 杨盼盼, 等. 基于信息一致性的自主车辆变车距队列控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(12): 2296-2300.
(Yan M D, Song J C, Yang P P, et al. Consensus based platoon for autonomous vehicles with time varying inter-vehicle distance[J]. Control and Decision, 2017, 32(12): 2296-2300.)
- [6] Al-Jhayish 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.
- [7] Liu X H, Goldsmith A, Mahal S S, et al. Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons[C]. IEEE Proceedings on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2001: 625-630.
- [8] Seiler P, Sengupta R. Analysis of communication losses in vehicle control problems[C]. Proceedings of the American Control Conference. New York: IEEE, 2001: 1491-1496.
- [9] 岳伟, 郭戈. 通讯网络影响下自主车队的控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(7): 1041-1048.
(Yue W, Guo G. Control of autonomous platoon under networked communication effect[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(7): 1041-1048.)
- [10] Guo G, Yue W. Sampled-data cooperative adaptive cruise control of vehicles with sensor failures[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15: 2404-2418.
- [11] Song X L, Lou X X, Meng L M. Time-delay feedback CACC of connected vehicles by heterogeneous channel transmission[J]. Measurement and Control, 2019, DOI: 10.1177/0020294019837997.
- [12] Oncu 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: 1527-1537.
- [13] Orosz G. Connected cruise control: Modelling, delay effects, and nonlinear behaviour[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(8): 1147-1176.
- [14] Ge Ji, Orosz G. Dynamics of connected vehicle systems with delayed acceleration feedback[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 46: 46-64.
- [15] Yu S, Wu S, Zhao Y, et al. Delayed feedback MPC algorithm of vehicle platoons subject to constraints on measurement range and driving behaviors[J]. Asian Journal of Control, 2018, 20(12): 1-11.
- [16] 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.
- [17] 秦晓辉. 多型通信拓扑下车辆队列分布式控制中的稳定性问题[D]. 北京: 清华大学机械工程学院, 2016: 12-13.
(Qin X H. Stability analysis of distributed control in vehicular platoons under generic communication topologies[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, 2016: 12-13.)
- [18] Zhu Y, Zhao D, Zhong Z. Adaptive optimal control of heterogeneous CACC system with uncertain dynamics[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(4): 1772-1779.
- [19] Verginis C K, Bechlioulis C P, Dimarogonas D V, et al. Robust distributed control protocols for large vehicular platoons with prescribed transient and steady-state performance[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(1): 299-304.
- [20] He D, Qiu T, Luo R. Fuel efficiency-oriented platooning control of connected nonlinear vehicles: A distributed economic MPC approach [J]. Asian Journal of Control, 2019, DOI: 10.1002/asjc.2049.
- [21] Kianfar R, Falcone P, Fredriksson J. A control matching model predictive control approach to string stable vehicle platooning[J]. Control Engineering Practice, 2015, 45: 163-173.
- [22] Besselink B, Johansson K H. String stability and a delay-based spacing policy for vehicle platoons subject to disturbances[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(9): 4376-4391.
- [23] Zhu H D, Ge W C. Heterogeneous network fusion mechanism in vehicle networks[J]. Communications Technology, 2017, 50(8): 1691-1695.
- [24] Lee E, Gerla M, Pau G, et al. Internet of vehicles: From intelligent grid to autonomous cars and vehicular fogs[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12(9): 1-14.
- [25] 吴敏, 何勇. 时滞系统鲁棒控制——自由权矩阵方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 105-126.
(Wu M, He Y. Robust control for time-delay systems — Free weight matrix method[M]. Beijing: Science Press, 2008: 105-126.)
- [26] Zou Y, Lam J, Niu Y, et al. Constrained predictive control synthesis for quantized systems with Markovian data loss[J]. Automatica, 2015, 55: 217-225.
- [27] Wang Z, Wang L, Liu S, et al. Encoding-decoding-based control and filtering of networked systems: Insights, developments and opportunities[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(1): 3-18.

作者简介

宋秀兰(1982—), 女, 讲师, 博士, 从事智能网联车辆协同控制理论与方法的研究, E-mail: songxl2008@zjut.edu.cn;

丁锋(1995—), 男, 硕士生, 从事网联车辆协同巡航控制的研究, E-mail: 945528960@qq.com;

漏小鑫(1994—), 男, 硕士生, 从事网联车辆协同巡航控制的研究, E-mail: 790470307@qq.com;

何德峰(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能系统预测控制、网联车队安全与控制等研究, E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn.