

考虑驾驶员反应延时的自主车队最优巡航控制^①

韩存武^② 杨 婧 李梦奇 刘 蕾 吴力普

(北方工业大学现场总线及自动化北京市重点实验室 北京 100144)

摘 要 针对传统的自主车队巡航控制方法只考虑通信延时而没有考虑驾驶员反应延时的问題,重新建立了自主车队巡航控制系统的数学模型,在建模过程中既考虑了通信延时,也考虑了驾驶员反应延时,得到了含有不同的状态延时和输入延时的非均匀自主车队巡航控制系统的状态空间数学模型;然后通过离散化,并通过定义增广状态向量,得到不含延时的离散时间状态空间模型,从而将含有延时的最优控制问题转变为不含延时的最优控制问题。在此基础上,应用最优控制理论,通过求解线性矩阵黎卡提方程,得到了最优巡航控制律。计算机仿真结果表明,本文提出的最优巡航控制律具有良好的控制性能。

关键词 智能交通控制,自主车队,巡航控制,最优控制

0 引 言

随着汽车的迅速普及,人们的工作和生活得到了很大的便利,但同时也引发了交通拥堵、交通事故和环境污染等一系列问题。智能交通控制是克服这些问题的一个有效手段。作为智能交通控制中的一项关键技术,车辆巡航控制可以根据车联网中接收到的其它车辆的位置和速度信号来实时地调整车辆的状态,从而改善车辆行驶的安全性和驾乘的舒适性以及提高交通系统的潜力,因此,近年来得到了人们广泛的关注,并提出了许多有效的巡航控制方法,这些方法包括:自适应巡航控制^[1-5],最优巡航控制^[6,7],预测巡航控制^[8-10],多目标巡航控制^[11-13],以及数据驱动巡航控制^[14]等。然而,这些巡航控制方法大都没有考虑系统中存在的延时问题。

延时是巡航控制系统中需要克服的一个重要问题,它将使系统性能恶化甚至不稳定^[15]。为此,文献[16-18]研究了通信延时对车队巡航系统的影响,文献[19]研究了由于无线通信网络的引入而产生

的延时、丢包及量化问題对巡航控制系统的影响。然而,所有这些研究都只考虑了通信延时,而没有考虑由于驾驶员反应延时而产生的影响。

本文研究了非均匀自主车队的巡航控制问题,主要创新点在于:

(1) 已有的巡航控制方法大都只考虑了由于通信网络的引入而产生的延时,而没有考虑驾驶员反应延时而产生的结果。本文从控制理论出发,重新建立了非均匀自主车队巡航控制系统的数学模型,在建模过程中既考虑了通信延时,也考虑了驾驶员反应延时,得到了含有不同的状态延时和输入延时的非均匀自主车队巡航控制系统的状态空间数学模型。

(2) 已有的巡航控制方法都是针对连续时间系统的。由于实际控制系统中大都采用数字计算机进行控制,而计算机控制是针对离散时间系统的,因此,本文通过离散化,并通过定义增广状态向量,得到不含延时的离散时间状态空间模型,从而将含有延时的最优控制问题转变为不含延时的最优控制问题。在此基础上,应用最优控制理论,得到了最优巡

① 国家自然科学基金(61573024,61203230)和北京市自然科学基金(4142014,4154068)资助项目。

② 男,1961年生,博士,教授;研究方向:车联网,无线通信网络,计算机网络等;E-mail: cwihan@ncut.edu.cn
(收稿日期:2017-12-13)

航控制律。由于是针对离散时间系统的,所以更便于进行计算机控制。

1 系统模型与问题描述

考虑图 1 所示的非均匀自主车队。

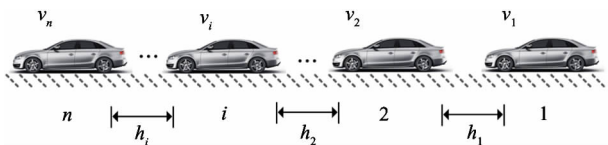


图 1 非均匀自主车队示意图

其中,车队中包含 n 辆非均匀(非固定车距)的人工驾驶车辆,这些车辆之间通过车联网进行通信,后车通过车联网获得前面车辆的位置和速度信息,并根据这些信息控制自己的加速度,以使车辆之间的距离控制在期望的安全范围内。

车队中第 i 辆车的状态可用下式表示^[9]

$$\begin{aligned}\dot{h}_i(t) &= v_{i+1}(t) - v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) &= \alpha_i(f_i(h_i(t - \tau_i)) - v_i(t - \tau_i)) \\ &\quad + \beta_i \dot{h}_i(t - \tau_i) \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t - \lambda)\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $h_i(t)$ 表示第 i 辆车和第 $i+1$ 辆车之间的距离(两辆车前后保险杠之间的距离), $v_i(t)$ 是第 i 辆车的速度, τ_i 是第 i 辆车的延时(包括无线车车通信产生的延时以及驾驶员反应产生的延时), α_i 和 β_i 表示驾驶员调整车辆速度的参数, λ 是由于驾驶员反应而产生的延时, $f_i(\cdot)$ 是用来保证车距处于安全范围 (h_s, h_g) 内所采用的如下非线性策略^[14]

$$f_i(h_i) = \begin{cases} 0 & h_i \leq h_s \\ \frac{v_m}{2} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{h_i - h_s}{h_g - h_s}\right) \right) & h_s < h_i < h_g \\ v_m & h_i > h_g \end{cases}\quad (2)$$

其中 h_s 和 h_g 表示所允许的最小和最大车距, v_m 表示最大车速。

由于车联网的引入,车辆之间通过无线网络进行通信,可实时地获得车辆的位置和速度信息,从而可方便地进行巡航控制。另一方面,由于无线通信

网络的引入,车辆在通过无线网络进行通信时必然会产生通信延时,这种延时将导致所获得的车辆位置和速度信息产生滞后,从而影响巡航控制的效果,甚至使系统不稳定。因此,很多学者研究了这种通信延时的影响。

到目前为止,几乎所有的车辆巡航控制研究都没有考虑由于驾驶员反应而产生的延时,即令式(1)中的 $\lambda = 0$ 。事实上,车辆在驾驶过程中,驾驶员的反应延时将直接关系到巡航控制系统的性能,必须加以考虑。因此,本文研究了 $\lambda \neq 0$ 的情况。

令 $\dot{h}_i(t) = 0$ 和 $\dot{v}_i(t) = 0$, 我们可以得到系统的平衡点为 $h_i(t) = h^*$ 和 $v_i(t) = v^*$ 。在平衡点附近对式(1)进行线性化处理,得到

$$\begin{aligned}\Delta \dot{h}_i(t) &= \Delta v_{i+1}(t) - \Delta v_i(t) \\ \Delta \dot{v}_i(t) &= \alpha_i(N^* \Delta h_i(t - \tau_i) - \Delta v_i(t - \tau_i)) \\ &\quad + \beta_i(\Delta v_{i+1}(t - \tau_i) - \Delta v_i(t - \tau_i))\end{aligned}\quad (3)$$

其中, $\Delta h_i(t) = h_i(t) - h^*$, $\Delta v_i(t) = v_i(t) - v^*$, $N^* = d(f_i(h_i))/dt|_{h_i(t)=h^*}$

令

$$x_i(t) = \begin{bmatrix} N^* \Delta h_i(t) - \Delta v_i(t) \\ \Delta v_{i+1}(t) - \Delta v_i(t) \end{bmatrix}$$

$$w_n(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \dot{v}_n(t) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \quad \cdots \quad x_n(t)]^T$$

$$\mathbf{w}(t) = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad w_n(t)]^T$$

则

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_s \mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_{ds} \mathbf{x}(t - \tau) + \mathbf{B}_s \mathbf{u}(t - \lambda) + \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (4)$$

其中 $\mathbf{x}(t)$ 是系统的状态, $\mathbf{u}(t)$ 是系统的控制输入, $\mathbf{y}(t)$ 是系统的输出, $\mathbf{w}(t)$ 是系统的干扰, $\mathbf{A}_s = \mathbf{I}_n \otimes \mathbf{A}_{1s}$, $\otimes$ 是矩阵的克罗内克积,且

$$\mathbf{A}_{ds} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{A}_{3s} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{2s} & \mathbf{A}_{3s} & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \mathbf{A}_{2s} & \mathbf{A}_{3s} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{A}_{2s} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{1s} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{1s} &= \begin{bmatrix} 0 & N^* \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{2s} = - \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \alpha & \beta \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{3s} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \alpha & \beta \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{1s} = - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= [\mathbf{C}_1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0], \mathbf{C}_1 = [1 \quad 1]. \end{aligned}$$

对式(4)进行离散化^[20],采样周期为 kT_s , 可得离散时间状态空间模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k-\tau) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k-\lambda) + \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \tag{5}$$

其中 $\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_s T_s}$, $\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}_d T_s}$, $\mathbf{B} = \int_0^k e^{\mathbf{A}_s T_s} \mathbf{B}_s dt$ 。

本文的目的是对自主车队巡航控制系统式(5)设计一个最优状态反馈控制器,使系统稳定,并使系统输出跟踪参考输入 $r(k)$ 。

2 最优巡航控制算法

为了使系统输出跟踪参考输入,取下列的目标函数并求出最优控制律使其达到最小。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\mathbf{e}^T(k) \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}(k) + \Delta \mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q}_2 \Delta \mathbf{x}(k) + \Delta \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}(k) \right] \tag{6}$$

其中

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{r}(k-1) - \mathbf{y}(k-1) \tag{7}$$

$$\Delta \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1) \tag{8}$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1) \tag{9}$$

$\mathbf{Q}_1, \mathbf{R}$ 分别为正定加权阵, $\mathbf{Q}_2$ 为非负定加权阵。引入 $\Delta \mathbf{x}(k)$ 和 $\Delta \mathbf{u}(k)$ 的目的是为了引入积分作用消除系统的稳态误差。

由以上方程,可得

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_d \Delta \mathbf{x}(k-\tau) \\ &\quad + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}(k-\lambda) + \mathbf{D} \Delta \boldsymbol{\omega}(k) \end{aligned} \tag{10}$$

$$\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{e}(k) - \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(k)$$

可以看出,只在第一个式子中含有时延,因此定义增广状态向量 $\mathbf{Z}(k)$ 为

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{e}(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k-1) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{x}(k-\tau) \\ \Delta \mathbf{u}(k-1) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}(k-\lambda) \end{bmatrix} \tag{11}$$

则式(5)可写成:

$$\mathbf{Z}(k+1) = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{Z}(k) + \bar{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{u}(k) + \bar{\mathbf{D}} \Delta \boldsymbol{\omega}(k) + \bar{\mathbf{E}} \Delta \mathbf{r}(k) \tag{12}$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{A}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_e & -\mathbf{C} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A} & 0 & \cdots & \mathbf{A}_d & 0 & \cdots & \mathbf{B} \\ 0 & \mathbf{I}_\tau & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_\tau & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \mathbf{I}_\lambda \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \mathbf{I}_\lambda & 0 \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{B}} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \mathbf{I}_\lambda \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{D} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_e \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由此,式(12)中不再出现延时项了,因此可将含有延时的最优控制问题式(6)转变为不含延时的最优控制问题,即在上式约束下使

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{Z}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{Z}(k) + \Delta \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}(k)] \tag{13}$$

达到最小,其中

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[\mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_1, 0, \cdots, 0] \tag{14}$$

由线性系统理论^[21]知,最优跟踪控制律为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u}(k) &= -\mathbf{K}_1 \Delta \mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}(k) - \mathbf{K}_1 \Delta \mathbf{x}(k-\tau) \\ &\quad - \mathbf{K}_2 \Delta \mathbf{u}(k-\lambda) \end{aligned} \tag{15}$$

其中 $K = [K_1 \quad K_2] = [R + \bar{B}^T P \bar{B}]^{-1} \bar{B}^T P \bar{A}$, P 为下列线性矩阵黎卡提 (Riccati) 方程的解:

$$P = \bar{A}^T P \bar{A} - \bar{A}^T P \bar{B} [R + \bar{B}^T P \bar{B}]^{-1} \bar{B}^T P \bar{A} + Q \tag{16}$$

3 仿真结果

为了验证所提出的最优巡航控制算法的有效性,对所提算法进行了计算机仿真。考虑由 5 辆车组成的自主车队(见图 1 所示),其中车队的领头车(即第 5 辆车)以 15m/s 的恒定速度行驶,其它 4 辆车的速度通过巡航控制进行实时调节以保证车距和车速分别达到期望值 20m 和 15m/s。仿真参数如下表所示。

表 1 仿真参数

参数	取值
期望车距 h^*	20m
期望车速 v^*	15m/s
最小车距 h_s	5m
最大车距 h_g	35m
最大车速 v_m	30m/s
车距增益 α	0.15
速度增益 β	0.25
状态延时 τ	$\tau = 4s$
控制延时 λ	$\lambda = 2s$

图 2 和图 3 分别给出了采用本文算法时车距和车速的响应曲线。从图中可以看出,大约经过 9s 后,车距和车速就可达到期望值。即大约经过 9s 后,车辆均可以以 15 m/s 的期望速度并保持 20m 的期望车距行驶,保证了车辆行驶的安全性和高效性。仿真结果表明,本文提出的最优巡航控制算法具有很好的控制性能。

作为比较,图 4 和图 5 分别给出了相同条件下采用文献[6]所提出的算法时车距和车速的响应曲线。从图中可以看出,当考虑驾驶员反应延时 $\lambda = 2s$ 时,无论超调量还是稳态误差,本文所提出的算法都优于文献[6]所提出的算法。

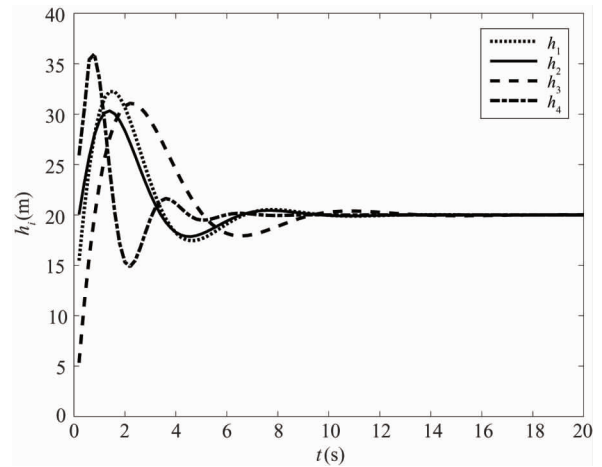


图 2 采用本文控制器时车距的响应曲线

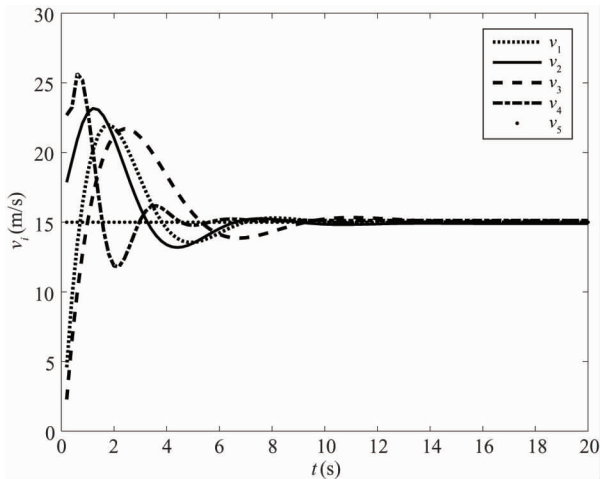


图 3 采用本文控制器时车速响应曲线

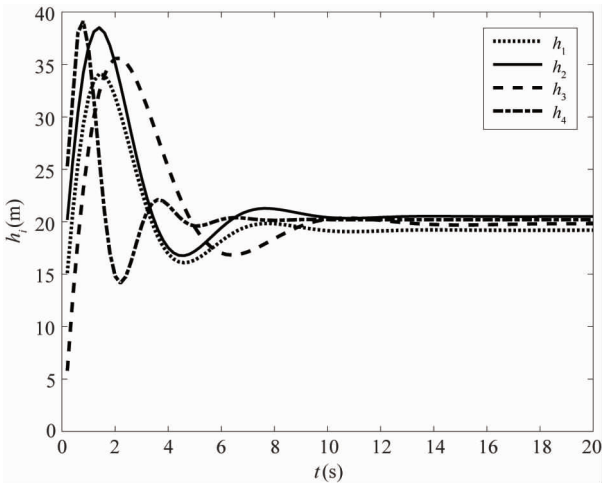


图 4 采用文献[6]控制器时车距的响应曲线

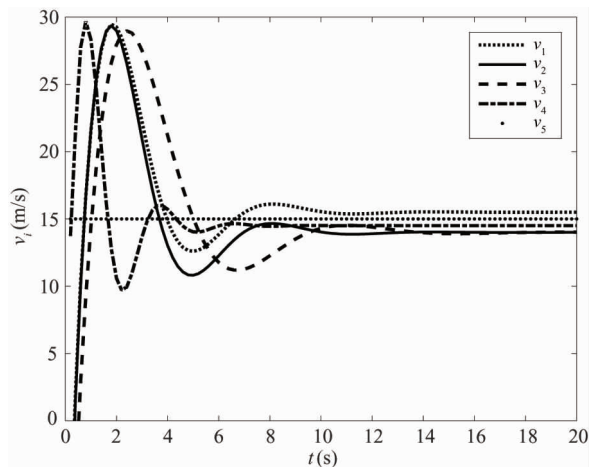


图 5 采用文献[6]控制器时车速的响应曲线

4 结 论

本文首先建立了非均匀自主车队巡航控制系统的数学模型,在建模过程中既考虑了通信延时,也考虑了驾驶员反应延时,得到了含有不同的状态延时 τ 和输入延时 λ 的非均匀自主车队巡航控制系统的离散时间状态空间数学模型。在此基础上,应用最优控制理论,提出了最优巡航控制算法,通过求解矩阵黎卡提代数方程,得到最优巡航控制律。仿真结果表明,所提出的最优控制算法具有很好的控制性能。

参考文献

[1] Li K, Ioannou P. Modeling of traffic flow of automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5(2): 99-113

[2] Davis L C. Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow[J]. *Physics Review E*, 2004, 69(6): 66-110

[3] van Arem B, van Driel C, Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(4): 429-436

[4] Milanés V, Shladover S E, Spring J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(1): 296-305

[5] 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

[6] Ge J I, Orosz G. Optimal control of connected vehicle systems[C]. In: *Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control*, Los Angeles, USA, 2014. 4107-4112

[7] Ge J I, Orosz G. Optimal control of connected vehicle systems with communication delay and driver reaction time[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(8): 2056-2070

[8] Tak S, Kim S, Yeo H. A study on the traffic predictive cruise control strategy with downstream traffic information[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(7): 1932-1943

[9] Dunbar W B, Caveney D S. Distributed receding horizon control of vehicle platoons: Stability and string stability[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(3): 620-633

[10] Stanger T, del Re L. A model predictive cooperative adaptive cruise control approach[C]. In: *Proceedings of American Control Conference*, Washington DC, USA, 2013. 1374-1379

[11] Li S, Li K, Rajamani R, et al. Multi-objective coordinated control for advanced adaptive cruise control system[C]. In: *Proceedings of the Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, Shanghai, China, 2009. 3539-3544

[12] Li S, Li K, Rajamani, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2011, 19(3): 556-566

[13] Chen T, Luo Y, Li K. Multi-objective adaptive cruise control based on nonlinear model predictive algorithm[C]. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, Beijing, China, 2011. 274-279

[14] Gao W, Jiang Z, Ozbay K. Data-driven adaptive optimal control of connected vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(5): 1122-1133

[15] Orosz G. Connected cruise control: modeling, delay effects, and nonlinear behavior[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(8): 1147-1176

- [16] Zhang L, Orosz G. Nonlinear dynamics of connected vehicle systems with communication delays[C]. In: Proceedings of American Control Conference, Chicago, USA, 2015. 2759-2764
- [17] Qin W B, Gomez M M, Grosz G. Stability and frequency response under stochastic communication delays with applications to connected cruise control design[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(2): 388-403
- [18] Zhang L, Orosz G. Motif-based design for connected vehicle systems in presence of heterogeneous connectivity structures and time delays[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(6): 1638-1651
- [19] 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
- [20] Astrom K J, Wittenmark B. Computer Controlled Systems: Theory and Design[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003
- [21] 郑大钟. 线性系统理论[M](第二版). 北京:清华大学出版社,2010

Optimal cruise control of autonomous platoon with driver reaction time delay

Han Cunwu, Yang Jing, Li Mengqi, Liu Lei, Wu Lipu
(Beijing Key Laboratory of Fieldbus Technology and Automation,
North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract

Time delay is a serious problem in cruise control of human driven autonomous platoon. Traditional cruise control methods only consider the communication time delay, but do not consider the human driver reaction time delay. Cruise control of autonomous platoon with communication time delay and driver reaction time delay is investigated. Firstly, a new state space mathematical model of heterogeneous human driven autonomous platoon is established, which includes not only the communication time delay but also the human driver reaction time delay as well as different state delay and input delay. Then, by discretizing the system and defining an augmented state vector, the discrete-time state space model is obtained, and the optimal problem with time delay is transformed into the related optimal problem with no time delay. An optimal cruise control algorithm is presented by using optimal control theory, and the optimal cruise control law is derived by solving a matrix Riccati algebraic equation. Finally, simulation results show that the proposed optimal cruise control algorithm has good control performance.

Key words: intelligent transportation control, autonomous platoon, cruise control, optimal control