

控制与决策

Control and Decision

动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制

孙棣华, 刘忠诚, 赵敏, 赵杭, 刘卫宁, 程森林

引用本文:

孙棣华, 刘忠诚, 赵敏, 赵杭, 刘卫宁, 程森林. 动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 729–737.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1275>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于车路云一体化的混合交通系统优化控制综述](#)

A survey of optimal control for mixed traffic system with vehicle–road–cloud integration
控制与决策. 2023, 38(3): 577–594 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1757>

[基于信息物理系统的多分拣移动机器人调度策略](#)

Multi–sorting mobile robot scheduling strategy based on cyber–physical system
控制与决策. 2023, 38(1): 281–288 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1343>

[考虑时延的智能网联汽车混合交通流稳定性分析](#)

Stability of mixed traffic flow with intelligent connected vehicles considering time delay
控制与决策. 2022, 37(6): 1505–1512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1834>

[区分交通流模式的混合服务路口信号控制策略](#)

Signal control strategies of mixed service intersections to discriminate traffic flow patterns
控制与决策. 2021, 36(6): 1509–1515 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1520>

[基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型](#)

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone
控制与决策. 2021, 36(3): 705–710 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制

孙棣华^{1,2†}, 刘忠诚^{1,2}, 赵敏^{1,2}, 赵杭^{1,2}, 刘卫宁^{2,3}, 程森林^{1,2}

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室, 重庆 400030; 3. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400030)

摘要: 随着自动驾驶技术的发展,传统人驾车与自动驾驶车将在一段时间内共存,形成一类新型混合交通.网联自动车的出现为车辆协同行驶提供了新的控制手段,传统的混合交通效率优化控制方法更多地立足于宏观流量的控制或小群体的局部优化,CAV对交通优化作用的潜能还有待开发.鉴于此,首先给出混合交通的信息物理描述,揭示混合交通物理拓扑的动态性;然后提出一种动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制方法,该方法通过调节网联自动车的行驶状态,间接影响、诱导和控制交通中存在的传统人驾车,从而优化整个交通系统.基于Matlab的仿真实验验证了所提出方法的有效性,而基于SUMO的仿真实验表明所提出的牵制控制方法在更真实的场景下依然适用.

关键词: 混合交通; 信息物理系统; 牵制控制; 切换控制; 有向图; 动态拓扑

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1275

引用格式: 孙棣华,刘忠诚,赵敏,等. 动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 729-737.

CPS-based mixed traffic pinning control considering dynamic physical topology

SUN Di-hua^{1,2†}, LIU Zhong-cheng^{1,2}, ZHAO Min^{1,2}, ZHAO Hang^{1,2}, LIU Wei-ning^{2,3}, CHENG Sen-lin^{1,2}

(1. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Key Laboratory of Dependable Service Computing in Cyber Physical Society of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: With the development of autonomous driving technology, human driving vehicles and automated driving vehicles will coexist for a period of time, forming a new type of mixed transportation. Connected and automated vehicles (CAVs) could bring new control methods for coordinated driving of vehicles. Mixed traffic efficiency optimization control methods are more based on macro-flow control or local optimization of small groups. The potential of CAVs for traffic optimization has yet to be developed. Therefore, first, the cyber physical description of mixed traffic is given, and the dynamics of the physical topology of mixed traffic is revealed. Then, a CPS-based mixed traffic pinning control method considering dynamic physical topology from the perspective of cyber-physical is given. This method adjusts the motion state of the CAV to indirectly influence, induce and control the human driving vehicles in traffic, thereby optimizing the entire transportation system. The simulation experiment based on Matlab verifies the effectiveness of the proposed method, and the simulation experiment based on SUMO shows that the proposed pinning control method is applicable in more realistic scenarios.

Keywords: mixed traffic; cyber-physical system; pinning control; switching control; directed graph; dynamic topology

0 引言

交通的全面智能化和自动化不可能一蹴而就,在未来一段时间内,传统人驾车(human driving vehicle, HV)和自动驾驶车(automated driving vehicle, AV)将在一段时间内共存,形成一类新型混合交通.

与仅由HV或AV组成的同质交通相比,混合交通具有一些独特的特征^[1-2],在同质交通中获得的结果可能不适用于混合交通,有必要对混合交通的优化与控制进行针对性研究.

当前,学者对混合交通的研究已经取得了一定的

收稿日期: 2021-07-21; 录用日期: 2021-12-09.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600600).

责任编辑: 郭戈.

†通讯作者. E-mail: d3sun@163.com.

成果^[3-5]. 然而,已有的对混合交通优化控制的研究多侧重于宏观层面^[6-8]. 与通常的AV控制策略不同,混合交通中CAV的控制策略设计需要考虑CAV的混入对交通的影响,以及通信对CAV的影响等. 这一方面的研究侧重于通过设计CAV的驾驶策略,以提升道路的整体性能,包括考虑串稳定性的CAV控制策略^[9]、考虑通信延迟和动力学不确定性的CAV鲁棒控制策略^[10]等.

混合交通条件下,CAV的出现为车辆协同行驶提供了新的控制手段. 然而交通系统并不是一个静态的系统,要让CAV在交通中充分发挥作用,交通系统的动态性应被适当考虑.

鉴于此,本文从信息物理的视角提出一种动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制方法. 该方法通过调节CAV的运动状态,间接影响、诱导、控制交通中存在的HV,从而优化整个交通系统. 从信息物理视角切入,给出混合交通的信息物理描述,并揭示混合交通物理拓扑的动态性. 在此基础上给出动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制策略,并理论分析物理拓扑的切换对系统的影响. 最后通过数值实验验证所提出方法的有效性.

1 混合交通的信息物理描述

1.1 信息物理视角下的混合交通

根据信息物理白皮书,CPS可以按照层次划分为单元级、系统级和SoS级^[11]. 在交通系统中,每一辆车都可以看作是一个单元级T-CPS,作为T-CPS的最小子系统存在. 某段道路或某个路口可以看作是一个动态的系统级T-CPS,组成它的子系统在不断变化(即车辆进入/离开道路),且这些子系统之间交互十分频繁. 交通系统整体由这些系统级CPS耦合而成,可以看作是SoS级T-CPS.

与其他CPS不同,在混合交通中,存在大量无法完全控制的子系统,即HV. 牵制控制思想的引入提供了一种新的方法:通过调整系统级T-CPS完全可控的子系统(CAV),从而间接影响其他无法直接控制的子系统(HV),进而实现系统级T-CPS层面的优化.

车辆在行驶时会利用周围车辆的信息进行决策,通信技术的发展使车辆之间的通信和交互愈加频繁,而交通系统的信息物理特性也愈发明显. 信息物理视角下的混合交通如图1所示.

将车辆视为物理空间和信息空间中的节点,第*i*辆车对第*j*辆车的影响看作从第*i*个节点到第*j*个节点的有向边,这条边的权重表示影响程度. 当分开考虑信息空间和物理空间时,交通中的车辆可以

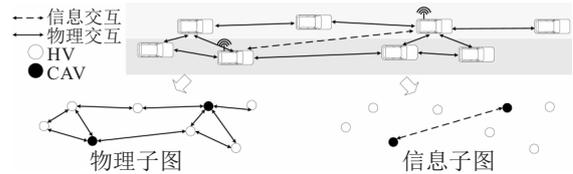


图1 信息物理视角下的混合交通

用具有双重拓扑结构的加权有向图进行描述: $\mathcal{G} = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}^p, \mathcal{E}^c, \mathcal{P}, \mathcal{C}\}$. 其中: $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 为节点集; $\mathcal{E}^p, \mathcal{E}^c \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 为边集, $(i, j) \in \mathcal{E}^p$ 为物理空间中从节点*i*到节点*j*存在的有向边, $(i, j) \in \mathcal{E}^c$ 为信息空间中存在从节点*i*到节点*j*的有向边, 当 $(i, j) \in \mathcal{E}^p$ 时称节点*i*为节点*j*的物理邻居, 当 $(i, j) \in \mathcal{E}^c$ 时称节点*i*为节点*j*的信息邻居; $\mathcal{P} = (p_{ij})_{N \times N}$ 为 $\mathcal{G}(p_{ij} \in [0, +\infty))$ 的物理邻接矩阵, $p_{ij} = 0$ 表示在物理空间中节点*j*对节点*i*没有影响; $\mathcal{C} = (c_{ij})_{N \times N}$ 为 $\mathcal{G}(c_{ij} \in [0, +\infty))$ 的信息邻接矩阵, $c_{ij} = 0$ 表示在信息空间中节点*j*对节点*i*没有影响; 通常不考虑自循环, 令 $p_{ii} = c_{ii} = 0$.

1.2 交通网络的动态物理拓扑

前文提到的交通网络并不是一个静态的网络,道路中车辆的数量会增加或者减少,这会导致网络中节点数量的变化; 车辆可能会进行变道、减速、加速等行为,这会导致网络拓扑结构产生变化,在实际交通中,即使不考虑车辆的增减,图的拓扑结构也可能发生变化,这些变化并不是随时间的变化而连续变化的. 原有拓扑会保持一段时间,然后在某个时间点随着车辆加速/减速/变道等行为的完成而出现跳变. 并且,当通信正常时,车辆的行为只会导致物理空间的拓扑跳变,而网络空间的拓扑保持不变. 因此, \mathcal{E}^p 随时间切换, 而 \mathcal{E}^c 保持不变. 在随后的部分中,将系统的物理拓扑视为随时间切换,而信息拓扑视为时不变.

2 动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制策略

假设混合交通中有*N*辆车. 当*N*确定时,车辆网络可能的物理拓扑总数即可确定,因此可以将车辆网络看作有限子系统的切换系统. 记系统个数为 \mathcal{N} , 拓扑切换时刻的集合为 $T_s = \{t_0, t_1, \dots, t_k, \dots\}$, 其中

$$0 \triangleq t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots \quad (1)$$

第*i*辆车的运动学模型为

$$\dot{s}_i(t) = v_i(t), \quad \dot{v}_i(t) = a_i(t). \quad (2)$$

其中: $s_i(t) = [x_i(t) - x_i^0, y_i(t) - y_i^0]^T$ 为第*i*辆车的位置状态, x_i^0 为第*i*辆车与虚拟头车的纵向期望

虚拟间距, y_0^i 为第 i 辆车与虚拟头车的横向期望虚拟间距, $v_i = [v_i^x, v_i^y]^T$ 为第 i 辆车的速度状态, $a_i = [a_i^x, a_i^y]^T$ 为第 i 辆车的加速度状态, x 为纵向, y 为横向. 需要说明的是, 这里的纵向横向是相对于道路方向而言的, 与道路方向平行称为纵向, 与道路方向垂直称为横向. 令 $x_i(t) = [s_i(t), v_i(t), a_i(t)]^T$. 当 $t \in [t_k, t_{k+1}), k \in N$ 时, 有

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + f(t, x_i(t)) + \\ &\left[\sum_{j=1}^N p_{ij}^{(k)} \Gamma^p (x_j(t - \tau_i^p) - x_i(t - \mu_i)) \right] + \\ &u_i(t - \tau_i^c). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $f(t, x_i(t))$ 为第 i 辆车的状态对其自身的影响, Γ^p 为物理子图的内耦合矩阵, τ_i^p 为物理子图的耦合时延, μ_i 为牵制输入时延, 且有

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & -\frac{1}{T} I_{2 \times 2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

T_i 为第 i 辆车的机械惯性系数. 本文中, 为简化假设, 令

$$\begin{aligned} \tau_i^p &= \tau_j^p \triangleq \tau^p, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}; \\ \tau_i^c &= \tau_j^c \triangleq \tau^c, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}; \\ T_i &= T_j \triangleq T, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}. \end{aligned} \quad (5)$$

令 x_0 为虚拟头车, 它始终保持在同一车道内匀速直线运动, 其运动学模型为

$$\dot{x}_0(t) = Ax_0(t) + f(t, x_0(t)). \quad (6)$$

2.1 CAV 控制策略

令 \mathcal{V}_{pin} 为CAV的指标集, $t \in [t_k, t_{k+1}), i \in \mathcal{V}$. 牵制控制输入可以表述为

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \sum_{j=1}^N c_{ij} \Gamma^c (x_j(t - \tau_i^c) - x_i(t - \tau_i^c)) + \\ &g_i(x_0(t - \tau_i^c) - x_i(t - \tau_i^c)), \quad i \in \mathcal{V}_{\text{pin}}. \end{aligned} \quad (7)$$

其中: Γ^c 为信息子图的内耦合矩阵, g_i 为对期望状态的敏感系数矩阵, 且有

$$c_{ij} = \begin{cases} \text{待定常数}, & i \in \mathcal{V}_{\text{pin}}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

定义 $e_i = x_i - x_0$, 令 $F_i(t, x_i(t), x_0(t)) = f(t, x_i(t)) - f(t, x_0(t))$, 有

$$\begin{aligned} e(t) &= [e_1^T(t), e_2^T(t), \dots, e_N^T(t)]^T, \\ F(t, x(t), x_0(t)) &= \\ [F_1^T(t, x_1(t), x_0(t)), F_2^T(t, x_2(t), x_0(t)), \dots, \end{aligned}$$

$$F_N(t, x_N^T(t), x_0(t))]^T. \quad (9)$$

结合式(9), 有

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= Ae(t) + F(t, x(t), x_0(t)) + \\ &(\tilde{T}^p - \tilde{T}^p)e(t - \tau^p) + \\ &(\tilde{T}^c - \tilde{T}^c - G)e(t - \tau^c). \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \text{diag}\{A, A, \dots, A\}, \\ \tilde{T}^p &= \mathcal{P}^{(k)} \otimes \Gamma^p, \quad \tilde{T}^c = \mathcal{C} \otimes \Gamma^c, \\ \tilde{T}^p &= \text{diag}\left\{ \sum_{j=1}^N p_{1j}^{(k)} \Gamma^p, \sum_{j=1}^N p_{2j}^{(k)} \Gamma^p, \dots, \sum_{j=1}^N p_{Nj}^{(k)} \Gamma^p \right\}, \\ \tilde{T}^c &= \text{diag}\left\{ \sum_{j=1}^N c_{1j} \Gamma^c, \sum_{j=1}^N c_{2j} \Gamma^c, \dots, \sum_{j=1}^N c_{Nj} \Gamma^c \right\}, \\ G &= \text{diag}\{g_1, g_2, \dots, g_N\}, \end{aligned} \quad (11)$$

维度满足矩阵乘法的限制, \otimes 为Kronecker积.

车辆的加速度、速度均受到车辆本身性能的限制, 而车辆的位置受到道路本身的限制, 因此作出如下假设是必要且合理的.

假设1 令

$$\begin{aligned} \Omega &= (x_{\min}, x_{\max}) \times (y_{\min}, y_{\max}) \times (v_{\min}^x, v_{\max}^x) \times \\ &(v_{\min}^y, v_{\max}^y) \times (a_{\min}^x, a_{\max}^x) \times (a_{\min}^y, a_{\max}^y), \end{aligned} \quad (12)$$

对于 $\forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$, 当 $x_i(t), x_j(t) \in \Omega$ 时, 函数 $f(t, \cdot)$ 满足

$$\begin{aligned} (f(t, x_i) - f(t, x_j) - U_1(x_i - x_j))^T & \\ (f(t, x_i) - f(t, x_j) - U_2(x_i - x_j)) &\leq 0. \end{aligned} \quad (13)$$

其中 U_1 和 U_2 为具有合适维度的常对称矩阵.

假设2 $\exists m, \max |p_{ij}^{(k)}| < m, \max |c_{ij}| < m$.

引理1 ^[12] 对于任意正定矩阵 Z , 标量 $\tau_2 > \tau_1 \geq 0, \alpha \neq 0$, 矢量函数 $x: [t - \tau_2, t - \tau_1] \rightarrow \mathbf{R}^n$, 如下不等式成立:

$$\begin{aligned} \frac{e^{\alpha\tau_2} - e^{\alpha\tau_1}}{\alpha} \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} e^{\alpha(s-t)} x^T(s) Z x(s) ds \geq \\ \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} x^T(s) ds Z \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} x(s) ds. \end{aligned} \quad (14)$$

定理1 当车辆状态向量在 Ω 内时, 在上述假设下, 给定 τ^p, τ^c , 当系统处于第 k 个子系统中时, Lyapunov-Krasovskii 函数定义如下:

$$\begin{aligned} V^{(k)}(t) &= V_1^{(k)}(t) + V_2^{(k)}(t) + V_3^{(k)}(t) + \\ &V_4^{(k)}(t) + V_5^{(k)}(t). \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} V_1^{(k)}(t) &= e^T(t) P^{(k)} e(t), \\ V_2^{(k)}(t) &= \int_{t-\tau^p}^t e^{\alpha^{(k)}(s-t)} e^T(s) Q^{(pk)} e(s) ds, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_3^{(k)}(t) &= \int_{-\tau^p}^0 \int_{t+\theta}^t e^{\alpha^{(k)}(s-t)} \dot{e}^T(s) R^{(pk)} \dot{e}(s) ds d\theta, \\ V_4^{(k)}(t) &= \int_{t-\tau^c}^t e^{\alpha^{(k)}(s-t)} e^T(s) Q^{(ck)} e(s) ds, \\ V_5^{(k)}(t) &= \int_{-\tau^c}^0 \int_{t+\theta}^t e^{\alpha^{(k)}(s-t)} \dot{e}^T(s) R^{(ck)} \dot{e}(s) ds d\theta. \end{aligned} \tag{16}$$

对于给定的常数 $\alpha^{(k)}$,若存在正定阵 $P^{(k)}$ 、 $Q^{(pk)}$ 、 $Q^{(ck)}$ 、 $R^{(pk)}$ 、 $R^{(ck)}$ 、 $X_1^{(k)}$ 、 $X_2^{(k)}$ 、 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$,使得

$$\Phi^{(k)} = \begin{bmatrix} \Phi_{11}^{(k)} & \Phi_{12}^{(k)} & \Phi_{13}^{(k)} & \Phi_{14}^{(k)} & \Phi_{15}^{(k)} \\ * & \Phi_{22}^{(k)} & \Phi_{23}^{(k)} & \Phi_{24}^{(k)} & \Phi_{25}^{(k)} \\ * & * & \Phi_{33}^{(k)} & \Phi_{34}^{(k)} & \Phi_{35}^{(k)} \\ * & * & * & \Phi_{44}^{(k)} & \Phi_{45}^{(k)} \\ * & * & * & * & \Phi_{55}^{(k)} \end{bmatrix} < 0 \tag{17}$$

成立,其中

$$\begin{aligned} \Phi_{11}^{(k)} &= \alpha^{(k)} P^{(k)} + Q^{(pk)} + Q^{(ck)} - \frac{\alpha^{(k)}}{e^{\alpha^{(k)}\tau^p} - 1} R^{(pk)} - \\ &\quad \frac{\alpha^{(k)}}{e^{\alpha^{(k)}\tau^c} - 1} R^{(ck)} - \bar{U}_1 + X_1^{(k)} A + A^T X_1^{(k)}, \\ \Phi_{12}^{(k)} &= \frac{\alpha^{(k)}}{e^{\alpha^{(k)}\tau^p} - 1} R^{(pk)} + \frac{1}{2} (X_1^{(k)} (\bar{I}^p - \tilde{I}^p) + \\ &\quad (\bar{I}^p - \tilde{I}^p)^T X_1^{(k)}), \\ \Phi_{13}^{(k)} &= \frac{\alpha^{(k)}}{e^{\alpha^{(k)}\tau^c} - 1} R^{(ck)} + \frac{1}{2} (X_1^{(k)} (\bar{I}^c - \tilde{I}^c - G) + \\ &\quad (\bar{I}^c - \tilde{I}^c - G)^T X_1^{(k)}), \\ \Phi_{14}^{(k)} &= X_1^{(k)} - \bar{U}_2, \\ \Phi_{15}^{(k)} &= P^{(k)} - X_1^{(k)} + \frac{1}{2} (X_2^{(k)} A + A^T X_2^{(k)}), \\ \Phi_{22}^{(k)} &= -e^{-\alpha^{(k)}\tau^p} Q^{(pk)} - \frac{\alpha^{(k)}}{e^{\alpha^{(k)}\tau^p} - 1} R^{(pk)}, \tag{18} \\ \Phi_{25}^{(k)} &= \frac{1}{2} ((\bar{I}^p - \tilde{I}^p)^T X_2^{(k)} + X_2^{(k)} (\bar{I}^p - \tilde{I}^p)), \\ \Phi_{33}^{(k)} &= -e^{-\alpha^{(k)}\tau^c} Q^{(ck)} - \frac{\alpha^{(k)}}{e^{\alpha^{(k)}\tau^c} - 1} R^{(ck)}, \\ \Phi_{35}^{(k)} &= \\ &\quad \frac{1}{2} ((\bar{I}^c - \tilde{I}^c - G)^T X_2^{(k)} + X_2^{(k)} (\bar{I}^c - \tilde{I}^c - G)), \\ \Phi_{44}^{(k)} &= -I_{6N \times 6N}, \Phi_{45}^{(k)} = X_2^{(k)}, \\ \Phi_{55}^{(k)} &= \tau^p R^{(pk)} + \tau^c R^{(ck)} + \mu R^{(\mu k)} - 2X_2^k, \\ \bar{U}_1 &= \frac{(I_{N \times N} \otimes U_1)(I_{N \times N} \otimes U_2)}{2} + \\ &\quad \frac{(I_{N \times N} \otimes U_2)(I_{N \times N} \otimes U_1)}{2}, \\ \bar{U}_2 &= -\frac{(I_{N \times N} \otimes U_1) + (I_{N \times N} \otimes U_2)}{2}, \end{aligned}$$

其他分块矩阵均为维度满足要求的零矩阵, $t \in [t_k, t_{k+1})$. 则如下不等式成立:

$$V^{(k)}(t) \leq e^{-\alpha^{(k)}(t-t_k)} V_k(t_k). \tag{19}$$

证明 对 $V_3^{(k)}(t)$ 求 t 的导数,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3^{(k)}(t) &= \tau^p \dot{e}^T(t) R^{(pk)} \dot{e}(t) - \\ &\quad \int_{t-\tau^p}^t e^{\alpha^{(k)}(s-t)} \dot{e}^T(s) R^{(pk)} \dot{e}(s) ds - \\ &\quad \alpha^{(k)} V_3^{(k)}(t). \end{aligned} \tag{20}$$

根据引理1可知

$$\begin{aligned} - \int_{t-\tau^p}^t e^{\alpha^{(k)}(s-t)} \dot{e}^T(s) R^{(pk)} \dot{e}(s) ds \leq \\ (e^T(t) - e^T(t - \tau^p)) R^{(pk)} (e(t) - e(t - \tau^p)) \times \\ \frac{\alpha^{(k)}}{1 - e^{\alpha^{(k)}\tau^p}}, \end{aligned} \tag{21}$$

从而有

$$\begin{aligned} \dot{V}_3^{(k)}(t) \leq \\ \tau^p \dot{e}^T(t) R^{(pk)} \dot{e}(t) - \alpha^{(k)} V_3^{(k)}(t) + \\ (e^T(t) - e^T(t - \tau^p)) R^{(pk)} (e(t) - e(t - \tau^p)) \times \\ \frac{\alpha^{(k)}}{1 - e^{\alpha^{(k)}\tau^p}}. \end{aligned} \tag{22}$$

对于 $\dot{V}_5^{(k)}(t)$,也有类似结论成立. 此外,对于给定的矩阵 $X_1^{(k)}$ 、 $X_2^{(k)}$,如下等式成立:

$$\begin{aligned} 2(e^T(t) X_1^{(k)} + \dot{e}^T(t) X_2^{(k)}) (-\dot{e}(t) + Ae(t) + \\ (\bar{I}^p - \tilde{I}^p)e(t - \tau^p) + F(t, x(t), x_0(t)) + \\ (\bar{I}^c - \tilde{I}^c - G)e(t - \tau^c)) = 0. \end{aligned} \tag{23}$$

进而,从假设1可知

$$\begin{bmatrix} e(t) \\ F(t, x(t), x_0(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{U}_1 & \bar{U}_2 \\ * & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(t) \\ F(t, x(t), x_0(t)) \end{bmatrix} \leq 0. \tag{24}$$

记

$$\begin{aligned} e(t - \tau^p) = e_p(t), e(t - \tau^c) = e_c(t), \\ \zeta(t) = [e^T(t), e_p^T(t), e_c^T(t), F^T(t, x(t), x_0(t)), \dot{e}^T(t)]^T. \end{aligned} \tag{25}$$

分别对 $V_1^{(k)}(t)$ 、 $V_2^{(k)}(t)$ 和 $V_4^{(k)}(t)$ 求导数,结合上述等式和不等式,可知

$$0 > \zeta^T(t) \Phi^{(k)} \zeta(t) \geq \dot{V}^{(k)} + \alpha^{(k)} V^{(k)}, \tag{26}$$

从而有

$$V^{(k)}(t) \leq e^{-\alpha^{(k)}(t-t_k)} V_k(t_k). \tag{27}$$

定理1得证. \square

注1 式(19)给出了系统发散速度的上界. 然而,在实际应用定理1时,计算复杂度为 $O(N^3)$,其中 N 为交通中的车辆总数. 由于交通中通常同时存在大量车辆,在实际应用中,通过求解线性矩阵不等式确定 u_i 是不现实的. 为提高效率,牵制节点控制策略必须被预先确定.

2.2 拓扑切换影响分析

为分析系统整体的稳定性,首先给出如下定义^[13].

定义1 称分段常函数 $\sigma(t) : [0, \infty) \rightarrow \mathcal{N}$ 为切换信号,它指定在每个时间段内激活哪个子系统,其中 $\sigma(t)$ 在每一点均右连续.若存在 $k \geq 1, b > 0$,使得系统(10)的解满足如下条件,则称其在切换信号 $\sigma(t)$ 下指数稳定,有

$$\|e(t)\|^2 \leq ke^{-b(t-t_0)}\|e(t_0)\|_{c_1}^2, \forall t \geq t_0, \quad (28)$$

其中

$$\|e(t_0)\|_{c_1}^2 = \sup_{-\tau^p - \tau^c \leq \theta \leq t_0} \{\|e(t+\theta)\|, \|\dot{e}(t+\theta)\|\}. \quad (29)$$

用 \mathcal{N}^- 表示所有稳定子系统的下标集, \mathcal{N}^+ 表示所有不稳定子系统的下标集.对于给定的切换信号 $\sigma(t)$ 和 $t_0 < t$,令 $T^-(t_0, t)$ 表示时间 (t_0, t) 内系统处于稳定子系统的总时间, $T^+(t_0, t)$ 表示时间 (t_0, t) 内系统处于不稳定子系统的总时间, N^+ 表示时间 (t_0, t) 内从不稳定子系统切换到稳定子系统的总次数, N^- 表示时间 (t_0, t) 内从稳定子系统切换到不稳定子系统的总次数.为方便起见,给出以下假设.

假设3 常数 $\alpha^{(k)}$ 满足

$$\alpha^{(k)} = \begin{cases} \alpha_1, & k \in \mathcal{N}^-; \\ -\alpha_2, & k \in \mathcal{N}^+. \end{cases} \quad (30)$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2 > 0$.

假设4 $\mathcal{N}^+ \geq \mathcal{N}^-$.

定理2 对于给定的正常数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \tau^p$ 和 τ^c ,如果存在定理1中给出的正定阵,使得定理1和如下线性矩阵不等式成立:

$$P^{(k)} \leq \beta_1 P, Q^{(ik)} \leq \beta_1 Q, R^{(ik)} \leq \beta_1 R. \quad (31)$$

其中: $i \in \{p, c\}, j \in \{1, 2\}$, P, Q, R 为给定的正定阵, $\beta_1 \geq 1$.则式(10)在任意满足如下条件的切换信号下均指数稳定:

$$T^-(t_0, t) \geq \frac{\alpha_2 + \alpha^*}{\alpha_1 - \alpha^*} T^+(t_0, t), \quad (32)$$

$$N^+ \leq \frac{\alpha}{\ln(\beta_1 \beta_2)} (t - t_0). \quad (33)$$

其中: $\beta_2 > \beta_1$ 为一待正常数, $0 < \alpha < \alpha^* < \alpha_1$.

定理2证明类似文献[14],此略.

注2 式(32)表明,为了保证系统指数稳定,系统处于不稳定子系统的的时间有下界;而式(33)表明,为了保证系统指数稳定,系统可以在子系统之间切换,切换次数存在上界.这与实际交通情况是一致的:为了保持交通畅通,不能在不稳定状态下持续太长时间,且其中的车辆不能过于频繁地急加速、急减速和变道.

3 仿真实验

3.1 实验设置

在式(7)中,令

$$g_i = \text{diag}\{0, 0, 0, 0, c_1/T, 0\}. \quad (34)$$

$$\Gamma^p = \Gamma^c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_3/T & 0 & c_2/T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_3/T & 0 & c_2/T & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

$$\begin{cases} c_{ij} = \left(\frac{s_*}{\|s_i - s_j\|}\right)^2, \\ \text{第}i\text{辆车和第}j\text{辆车为CAV,且}\|s_i - s_j\| \geq s_*; \\ c_{ij} = 0, \text{otherwise.} \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} p_{ij}^{(k)} = 1, & i \neq j, \|s_i - s_j\| \leq s_*; \\ p_{ij}^{(k)} = 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (37)$$

$\|\cdot\|$ 为欧几里得距离, $\text{lanc}_i(t)$ 为第 i 辆车在时刻 t 所处的车道,且有

$$f(t, x_i(t)) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2/T & 0 & k_1/T & 0 & 0 \end{bmatrix} x_i(t). \quad (38)$$

对于HV,应用智能驾驶员模型(IDM)^[15]描述其纵向运动,有

$$\ddot{x}_i = a \left(1 - \left(\frac{v^x(t)}{v_f^x}\right)^\theta - \left(\frac{h^*(v^x(t), \Delta v^x(t))}{(t)}\right)^2 \right), \quad (39)$$

其中

$$h^*(v^x(t), \Delta v^x(t)) = h_0 + v^x(t)T + \frac{v^x(t)\Delta v^x(t)}{2\sqrt{ab}}. \quad (40)$$

IDM模型可通过在平衡点附近应用一阶泰勒展开式进行线性化^[16],整理后,式(39)最终可写成(3)的形式.

参考文献[5, 17],相关参数取值及物理意义如表1和表2所示.

令 δ 表示渗透率(即CAV在所有车辆中的占比).除了平均速度外,参考已有文献^[18]提出指标 J_i^a 如下:

$$J_i^a(t_i^e, t_i^l) = \frac{1}{t_i^l - t_i^e} \|a_i(t)\|_2 = \frac{1}{t_i^l - t_i^e} \sqrt{\int_{t_i^e}^{t_i^l} a_i^2(t) dt}. \quad (41)$$

其中: N 为车辆总数, t_i^e 为第 i 辆车进入主道的时间, t_i^l 为第 i 辆车离开主道的时间. 由于加速度的变化总是用来表示舒适度, 且变化越小驾驶过程越舒适, 用 J_i^a 表示交通中第 i 辆车的舒适度, J_i^a 的值越大车辆在这段路中的舒适性越差.

表1 CAV 参数取值

参数	取值	物理意义
k_1	1.1	对纵向速度的敏感度
k_2	0.3	对与道路中线偏离的敏感度
c_1	0.12	对自身速度的敏感度
c_2	40/64	对速度差的敏感度
c_3	12/64	对车间距的敏感度
s^*	2.5	对相邻车道车辆的考虑范围

表2 HV 参数取值

参数	值	物理意义
a	1	最大加速度
b	2	期望减速度
v_f^y	120	自由流纵向速度
T	1.5	安全时间间隔
θ	4	加速度指数
h_0	2	静止安全间距
k_1	1	—
k_2	0.25	—
s^*	2.8	—

3.2 混入CAV的影响

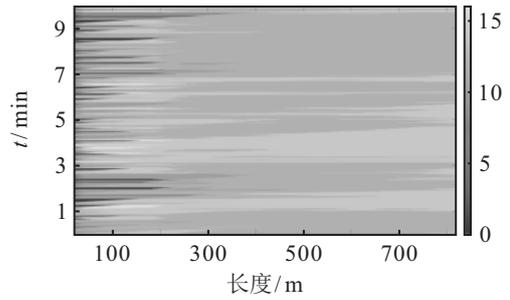
3.2.1 渗透率的影响

在带匝道的3车道场景下进行仿真实验. 主干道3条车道的限速均为60 km/h. 匝道限速为40 km/h. 车辆宽度为1.5 m, 车辆长度为3.8 m. $l_1 = 150$ m, $l_3 = 500$ m, 车道宽度为3.5 m, $l_2 = 160$ m, 模拟时间步长为0.05 s.

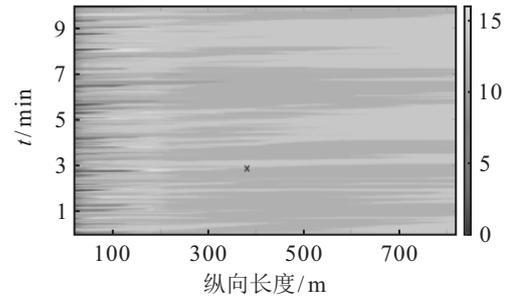
本节实验仅考虑必须的换道行为. 令 $\tau^p = T = 0.1$ s, $\tau^c = 0.05$ s. 每秒分别在主路起点和匝道起点判断是否生成车辆. 在主干道生成车辆的概率为 $P_{main} = 0.6$, 匝道为 $P_{on} = 0.2$. 主要道路上生成的车辆将随机进入1 ~ 3车道之一. P_{CAV} 是在主干道上产生CAV的概率 ($P_{CAV} < \delta$), CAV随机分布在道路上. 车道3的平均速度(速度单位为m/s)随位置和时间变化的热力图如图2所示.

由图2可见, 车道3的平均速度下降明显, 且这种负面影响会向后扩散, 导致车道3的 l_1 段速度也降低. 另一方面, P_{CAV} 对平均速度的影响并不明显. 此外, 随着 P_{CAV} 的增加, 平均速度略微增加(即低速区域的面积略微减小). 可见, 随着渗透率的提高, 交通效率可以相应提高.

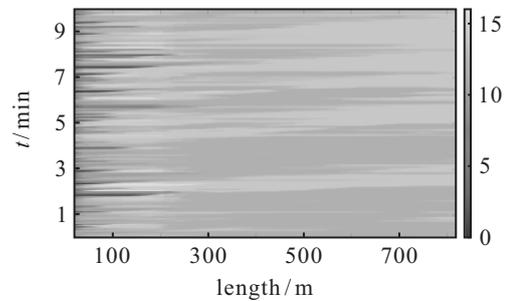
下面分析舒适度与 P_{CAV} 的关系. 上述实验重复50次后, 平均 J^a 随 P_{CAV} 变化的曲线如图3所示.



(a) $P_{CAV} = 0$



(b) $P_{CAV} = 0.2$



(c) $P_{CAV} = 0.4$

图2 车道3不同渗透率下速度热力图

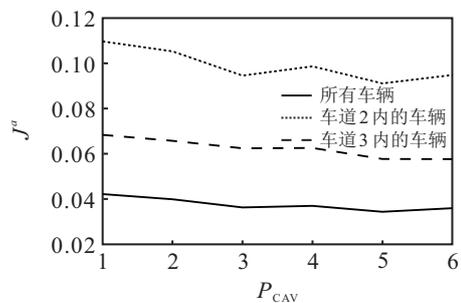


图3 平均 J^a 随 P_{CAV} 变化曲线

由图3可见, 随着 P_{CAV} 的增加, 平均 J^a 有下降趋势. 同时可以推断出, 由于车辆进入主干道对匝道的的影响, l_2 路段车辆的舒适度明显低于平均水平. 然而, 当 P_{CAV} 从0.4增加到0.5时, 平均 J^a 也随之增加. 这可能是因为交通中的CAV频繁调整自己的行为以达到影响其他HV的目的, 从而导致这种现象的发生.

3.2.2 时延的影响

由前文讨论可以看出, 如果不考虑换道, 车道1和车道2的车辆基本不会受到匝道车辆的影响. 在本小节中, 令 $P_{CAV} = 0.3$, 其他条件不变, 在带匝道的单车道场景下进行仿真实验.

在3车道场景中, $P_{\text{main}} = 0.6$, 车辆在随机车道上生成. 当只有单车道时, 为了保证车流密度相似, 令 $P_{\text{main}} = P_{\text{on}} = 0.2$. 由于平均速度变化不大, 仅考虑平均 J^a . 平均 J^a 随 τ_c 和 τ_p 的变化如表3和表4所示.

表3 所有车辆平均 J^a

τ_c	τ_p		
	0.1	0.2	0.3
0.1	0.0643	0.0645	0.0663
0.2	0.0641	0.0648	0.0671
0.3	0.0593	0.0652	0.0677

表4 l_2 段内车辆平均 J^a

τ_c	τ_p		
	0.1	0.2	0.3
0.1	0.1120	0.1137	0.1205
0.2	0.1131	0.1159	0.1217
0.3	0.1168	0.1228	0.1328

由表3和表4可见, 平均 J^a 与 τ_p 正相关, l_2 段内平均 J^a 与 τ_p 和 τ_c 正相关, 表明 τ_p 和 τ_c 的增加对流量有不容忽视的负面影响.

3.3 拓扑切换的影响

如前所述, 拓扑切换通常由车辆的急加速、急减速或变道引起, 当拓扑切换在合理范围内频繁发生时, 期望交通中的CAV可以起到抑制干扰的作用. 本小节令其他条件不变, 在不带匝道的3车道场景下进行仿真实验. 令 $\tau^p = T = \tau^c = 0.1 \text{ s}$, $P_{\text{main}} = 1$, 且有

$$c_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{s_*}{\|s_i - s_j\|} \right)^2, & \text{第 } i \text{ 辆车和第 } j \text{ 辆车为 CAV,} \\ \text{lane}_i(t) = \text{lane}_j(t), \|s_i - s_j\| \geq s_*; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (42)$$

每组实验重复50次, 并对相关指标取平均值. 在式(42)中, 一辆CAV使用来自交通中其他CAV的信息, 然而当拓扑结构频繁变化时, 利用来自不同车道的CAV的信息可能会起到反作用.

3.3.1 换道

令 P_c 为换道HV在HV中的占比, HV进入道路后最多只会变道一次, 目标是随机相邻车道. 假设CAV不会换道, 由于平均速度变化不大, 本部分仅考虑平均 J^a , 相关指标如表5和表6所示. 可以看出, 当没有匝道时, 正常换道对平均速度的影响较小; 当 $P_c \geq 0.2$ 时, J^a 的值与 P_c 呈正相关, 与 P_{CAV} 呈负相关.

3.3.2 减速

令 P_d 为减速HV在HV中的占比, HV进入道路后最多只减速一次. 当一辆HV减速时会以 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

表5 应用式(36)的平均 J^a (换道)

		P_{CAV}				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P_c	0.1	0.0259	0.0260	0.0263	0.0247	0.0236
	0.2	0.0302	0.0296	0.0274	0.0276	0.0267
	0.3	0.0362	0.0332	0.0321	0.0301	0.0292
	0.4	0.0428	0.0398	0.0356	0.0343	0.0303
	0.5	0.0468	0.0419	0.0394	0.0370	0.0349

表6 应用式(42)的平均 J^a (换道)

		P_{CAV}				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P_c	0.1	0.0730	0.0750	0.0868	0.0764	0.0772
	0.2	0.0791	0.0793	0.0773	0.0834	0.0785
	0.3	0.0814	0.0885	0.0822	0.0864	0.0846
	0.4	0.0772	0.0866	0.0845	0.0855	0.0851
	0.5	0.0849	0.0916	0.0934	0.0917	0.0861

表7 应用式(36)的平均 J^a (减速)

		P_{CAV}				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P_d	0.1	0.0556	0.0529	0.0506	0.0496	0.0497
	0.2	0.0582	0.0520	0.0520	0.0499	0.0487
	0.3	0.0572	0.0533	0.0515	0.0510	0.0511
	0.4	0.0589	0.0579	0.0524	0.0500	0.0520
	0.5	0.0589	0.0562	0.0561	0.0538	0.0534

表8 应用式(42)的平均 J^a (减速)

		P_{CAV}				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P_d	0.1	0.0578	0.0610	0.0651	0.0721	0.0772
	0.2	0.0571	0.0598	0.0672	0.0710	0.0762
	0.3	0.0614	0.0617	0.0698	0.0713	0.0774
	0.4	0.0636	0.0659	0.0662	0.0747	0.0789
	0.5	0.0639	0.0659	0.0688	0.0763	0.0777

匀速减速3s, 然后正常行驶. 每一秒都会在随机车道的道路起点生成一辆车. 假设CAV不会减速, 由于平均速度变化不大, 本部分仅考虑平均 J^a , 相关指标如表7和表8所示.

由表7可见, 当 $P_{\text{CAV}} \leq 0.4$ 时, J^a 的值与 P_d 呈正相关, 与 P_{CAV} 负相关. 比较表7和表5可推断, 车辆的制动行为对交通的负面影响比变道行为更明显, 这与经验是一致的: 车辆变道导致追尾的原因, 通常是目标车道后方的车辆可能会因前方突然来车而急刹, 进而导致后车反应不及而追尾.

另外, 通过对比表7和表4还可以推断, 匝道内的车辆进入主干道将对交通产生负面影响, 其速度通常低于主干道上车辆的速度, 因此主干道上的车辆可能会减速, 从而影响交通. 当应用式(42)时, 同一车道的CAV几乎会在同一时刻减速, 导致其他HV进行不必要的减速. 但是在应用式(36)时, 少数CAV的减速信息会被其他CAV信息“稀释”, 使得远离减速HV的

CAV不会快速减速.

减小 J^a 的意义在于,通过减少HV的非必要加减速行为(尤其是非必要减速行为),提高交通整体通行效率以及优化驾驶员的驾驶体验.在混合交通中,可以通过对交通中CAV进行提前调控,避免前方扰动向后传递时放大,进而导致整体交通效率降低.本节的仿真实验表明了提前减速的有效性.

3.4 基于SUMO的仿真实验

之前基于Matlab的仿真实验条件过于简化,导致部分场景与实际交通场景相差较大.例如第3.2.2节中,一辆车与前车的碰撞只会使这辆车的速度变为零,而不会对交通产生任何其他影响.为了更好地表明本文所提出方法的适用性,基于常用的开源交通仿真软件SUMO开展相关实验.

第3.3节基于Matlab的仿真实验表明,车辆的急刹对交通影响更大.在实际交通中,如果在交通瓶颈区域,车辆的刹车行为会更频繁地发生.考虑到车道减少是典型的交通瓶颈区域,将仿真场景设定在总长约4800m的道路上,且在4000m处道路由3车道变为单车道.仿真时间设定为1800s,道路限速和车辆初始速度均为80km/h.在本节中,CAV和HV均应用SUMO内置的换道算法^[19],车流量设定为2000veh/h.

当交通中的车辆全为HV时,流量、速度与时间的关系如图4所示.

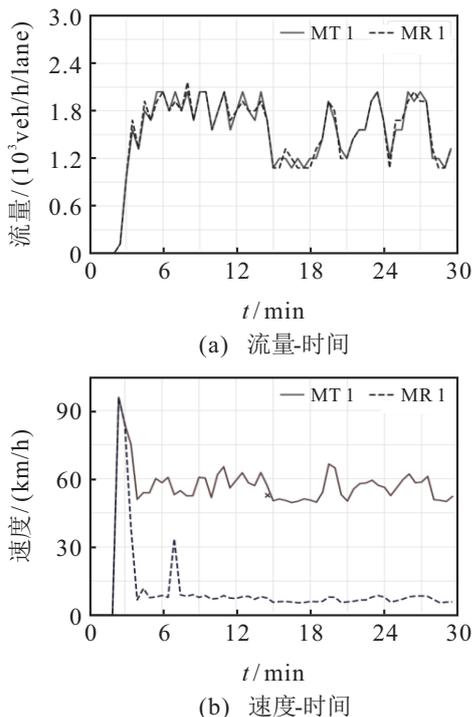


图4 $P_{CAV} = 0$ 时流量、速度与时间的关系

从图4(a)可以看出,MT1段和MR1段流量大致相同.从图4(b)可以看出,车道的减少对交通效率的负面影响极大.车辆在MR1段的平均速度甚至在5km/h附近波动,且在MT1段的平均速度远低于车辆初始速度.

接下来的实验中在MR2段和MR3段应用牵制控制算法,令CAV在MR3段的期望速度为80km/h,且考虑MR3段和MR2段内所有CAV的运动状态;CAV在MR2段的期望速度为40km/h,且考虑MR2段内所有CAV的运动状态.这样,牵制控制分为两个部分:MR3段为过渡路段,MR2段为限速路段.其余参数取值如表1和表2所示.当渗透率为0.5时,流量、速度与时间的关系如图5所示.

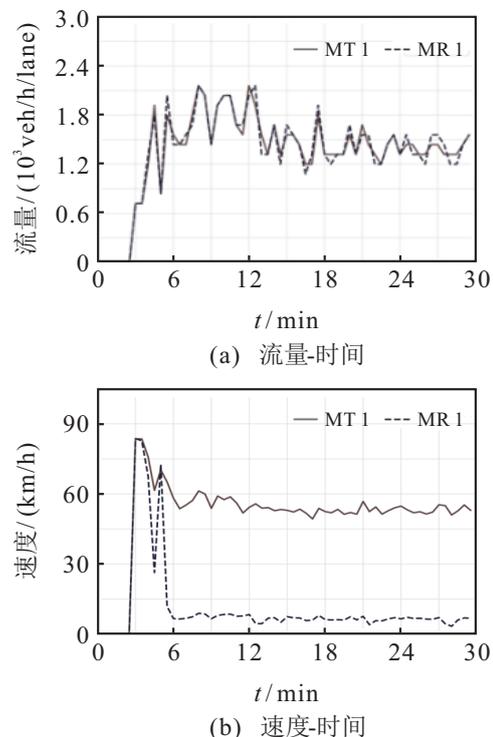


图5 $P_{CAV} = 0.5$ 时流量、速度与时间的关系

在通过车辆数量相似的前提下,相比图4(a),图5(a)的车流量波动更小,且由图4(b)可知,当交通为HV组成的同质交通时,MR1段在约4min处平均速度降到最低;由图5(b)可知,当渗透率为0.5时,MR1段在约6min处平均速度降到最低.在平均速度下降前,约4.5min处有一个调节过程.可见,所提出的牵制控制方法在更贴近真实的场景下依然适用.

4 结论

本文提出一种全新的动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制.首先讨论了信息物理视角下的混合交通,并分析了导致车辆网络物理拓扑变化的因素;然后提出了一种适用于混合交通的CAV牵制控制策略,以应对动态物理拓扑对交通的影响.数值仿真结果表明,所提出的控制策略是有效的.此外,不

同场景下的仿真结果表明,频繁的拓扑切换会对交通产生负面影响,此时应用不恰当的CAV控制策略甚至会使交通状况恶化.所提出方法给混合交通的优化和控制带来了新的思路,在未来的研究中,将会进一步深化牵制控制理论,并在更多应用场景中探索混合交通牵制控制的可行性.

参考文献(References)

- [1] 秦严严, 王昊, 王炜, 等. 混有CACC车辆和ACC车辆的异质交通流基本图模型[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 127-136.
(Qin Y Y, Wang H, Wang W, et al. Fundamental diagram model of heterogeneous traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles and adaptive cruise control vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 127-136.)
- [2] Zheng N N, Liu Z Y, Ren P J, et al. Hybrid-augmented intelligence: Collaboration and cognition[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(2): 153-179.
- [3] Liu H, Kan X, Shladover S E, et al. Impact of cooperative adaptive cruise control on multilane freeway merge capacity[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2018: 1-13.
- [4] Liu H, Kan X D, Shladover S E, et al. Modeling impacts of cooperative adaptive cruise control on mixed traffic flow in multi-lane freeway facilities[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 261-279.
- [5] Lee S, Jeong E, Oh M, et al. Driving aggressiveness management policy to enhance the performance of mixed traffic conditions in automated driving environments[J]. Transportation Research—Part A: Policy and Practice, 2019, 121: 136-146.
- [6] Panichpapiboon S, Pattara-atikom W. Connectivity requirements for self-organizing traffic information systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3333-3340.
- [7] Yang H, Jin W L. A control theoretic formulation of green driving strategies based on inter-vehicle communications[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2014, 41: 48-60.
- [8] Knorr F, Baselt D, Schreckenberg M, et al. Reducing traffic jams via VANETs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(8): 3490-3498.
- [9] Li F J, Wang Y. Cooperative adaptive cruise control for string stable mixed traffic: Benchmark and human-centered design[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(12): 3473-3485.
- [10] Ge J I, Orosz G. Dynamics of connected vehicle systems with delayed acceleration feedback[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2014, 46: 46-64.
- [11] 郭楠, 贾超. 《信息物理系统白皮书(2017)》解读(上)[J]. 信息技术与标准化, 2017(4): 36-40.
(Guo N, Jia C. Interpretation of “cyber-physical systems whitepaper(2017)” (part one)[J]. Information Technology & Standardization, 2017(4): 36-40.)
- [12] Li Y, Sun D H, Zhao M, et al. Switched cooperative driving model towards human vehicle copiloting situation: A cyberphysical perspective[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018: 6873472.
- [13] Liu D Y, Zhong S M, Huang Y Q. Stability and l2-gain analysis for switched neutral systems[C]. International Conference on Apperceiving Computing & Intelligence Analysis. Piscataway: IEEE, 2009: 10458346.
- [14] Liu Z C, Sun D H, Zhao M, et al. CPS-based human-vehicle co-pilot switching strategy under different information flow topologies[J]. IEEE Access, 2020, 8: 125943-125952.
- [15] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1805-1824.
- [16] Chen C Y, Wang J W, Xu Q, Wang J Q, Li K Q. Mixed platoon control of automated and human-driven vehicles at a signalized intersection: Dynamical analysis and optimal control[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2021: 127.
- [17] Delpiano R, Herrera J C, Laval J, et al. A two-dimensional car-following model for two-dimensional traffic flow problems[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 504-516.
- [18] Kazemi H, Mahjoub H N, Tahmasbi-Sarvestani A, et al. A learning-based stochastic MPC design for cooperative adaptive cruise control to handle interfering vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3(3): 266-275.
- [19] Erdmann J. SUMO's lane-changing model[C]. Modeling Mobility with Open Data. Berlin: Springer, 2015: 105-123.

作者简介

孙棣华(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能交通系统、交通信息工程与控制等研究, E-mail: d3sun@163.com;

刘忠诚(1992—), 男, 博士生, 从事智能交通系统的研究, E-mail: liuzhongchengcqu@163.com;

赵敏(1980—), 女, 副教授, 博士, 从事智能交通系统等研究, E-mail: zhaomin@cqu.edu.cn;

赵杭(1993—), 男, 博士生, 从事智能交通系统的研究, E-mail: zhaohang128112@163.com;

刘卫宁(1962—), 女, 教授, 博士, 从事分布式计算与服务、智能交通系统等研究, E-mail: lwn@cqu.edu.cn;

程森林(1968—), 男, 副教授, 博士, 从事检测技术与自动化系统、车路感知与智能驾驶等研究, E-mail: csl@cqu.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)