

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202207262023121998

文章编号:1674-599X(2023)06-0123-11

引用格式:谢庆元,吴其育,余亦彧.不同交通管理策略下异质交通流稳定性分析[J].交通科学与工程,2023,39(6):123-133.

Citation: XIE Qingyuan, WU Qiyu, YU yiyu. Stability analysis of heterogeneous traffic flow under different traffic management strategies [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 123-133.

不同交通管理策略下异质交通流稳定性分析

谢庆元^{1,2}, 吴其育¹, 余亦彧¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 比亚迪汽车工业有限公司, 湖南 长沙 410021)

摘 要:为研究智能网联车辆(CAV)对交通流稳定性的影响机理,对CAV车辆与人工车辆(HMV)构成的异质交通流,先建立车道管理策略下的交通流分配模型,提出车队管理策略下的车辆编队规模计算方法;再基于CAV与HMV车辆的跟驰模型,运用李雅普诺夫理论,搭建交通流稳定性分析框架;最后,构建异质交通流稳定性判别式,对比分析在不同管理策略下异质交通流稳定性的演变机理。研究表明:在随机混行条件下,当车辆速度大于23.12 m/s或CAV车辆的渗透率高于92%时,异质交通流处于恒稳定的状态;在车道管理策略条件下,当CAV车辆的渗透率低于60%时,异质交通流趋于稳定,随着CAV车辆渗透率的增大,通用车道稳定性开始逐级变差;当车辆采取编队控制算法且CAV车辆渗透率大于19%时,异质交通流处于稳定状态。CAV车辆在道路中随机混行,会对交通流的稳定性造成不良影响,而通过车道管理和编队控制,交通流的稳定性得到了明显改善。该研究可为智能网联汽车的安全管控及相关交通规划提供理论指导与借鉴。

关键词:异质交通流;智能网联汽车;渗透率;稳定性;数值仿真

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Stability analysis of heterogeneous traffic flow under different traffic management strategies

XIE Qingyuan^{1,2}, WU Qiyu¹, YU yiyu¹

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,

Changsha 410114, China;

2. BYD Auto Industry Co., Ltd., Changsha 410021, China)

Abstract: The evolution of heterogeneous traffic flow stability is needed to be analyzed under different traffic management strategies. In this paper, the lane management strategy and platoon management strategy were proposed for the heterogeneous traffic flow composed of Connected and Automated Vehicles (CAV) and Human Manual Vehicles (HMV). The traffic flow assignment model for the lane management strategy and the calculation method of platoon size for the platoon management strategy were constructed, respectively. Moreover, the Lyapunov Theory was used to develop a framework for the analysis of the traffic flow stability based on the follow-car model of CAV and HMV. A criterion of the heterogeneous traffic flow stability was then proposed to compare the evolution mechanism for different management strategies. The results showed that the heterogeneous traffic flow could be

收稿日期:2022-07-26

基金项目:长沙理工大学实践创新与创业能力提升计划(SJCX202110)

作者简介:谢庆元(1998—),男,长沙理工大学硕士研究生。E-mail:15973752135@163.com

stable, when the speed was higher than 23.12m/s or the CAV permeability was higher than 92%. The heterogeneous traffic flow could remain stable, when the permeability was lower than 60% under the lane management strategy, and the stability of the general lane deteriorates gradually with the increase of the permeability. With the vehicle platoon control algorithm, the heterogeneous traffic flow could be in a stable state with the permeability higher than 19%. This research indicates that CAV random mixing on the road is prone to greatly deteriorating the stability of traffic flow but it can be significantly improved enforcing the lane management and formation control. Among them, the stability domain of the fleet management strategy is optimal, and that of the lane management strategy is better than that of the no agglomeration strategy.

Key words: heterogeneous traffic flows; connected and automated vehicles; market penetration rate; stability; numerical simulation

智能网联车辆 (connected and automated vehicles, CAV) 在减少交通事故、提高道路通行能力、节能环保等方面具有巨大的潜力^[1-5], 但其对交通流的影响机理尚不清楚, 尤其在大规模混行条件下, 其对交通流稳定性的影响有待深入研究。异质交通流指的是 CAV 车辆与人工车辆 (human manual vehicles, HMV) 混行的交通流, 其与传统交通流在特性上存在较大差异。因此, 有必要探索在不同 CAV 车辆渗透率下异质交通流的稳定性, 分析在不同交通管理策略下的异质交通流演变机理, 为不同 CAV 车辆规模背景下的交通管理与控制策略提供理论基础。

在异质交通流特性研究领域, 大多数研究主要聚焦在异质交通流对交通系统稳定性与安全性影响, 其研究主要从数学建模和模拟仿真两方面展开。在数值分析方面, WARD 等^[6]应用传统车辆跟驰模型, 推导了在同质交通流下不同车辆长度的混合交通流稳定性的解析解。在此基础上, TALEBPOUR 等^[7]推导了人工驾驶车辆与自动驾驶车辆的混合交通流稳定性的解析解。MOHAJERPOOR 等^[8]针对不同车辆混合场景, 提出了 4 种不同车道的管理策略, 并对每种策略建立了微观仿真试验, 分析不同管理策略在不同 CAV 车辆渗透率下的适用条件。李霞等^[9]等对搭载不同通信技术的网联车辆与传统人工车辆构成的复杂混合交通流进行了稳定性研究, 并通过数值仿真试验进行了验证。秦严严等^[10]针对 CAV 车辆紧跟 HMV 车辆行驶的常见场景, 提出了考虑多前车信息反馈的 CAV 车辆优化跟驰模型, 并依据该模型设计了仿真试验, 验证了优化后的 CAV 车辆跟驰模型能有效提

升混合交通流稳定性。CHEN 等^[11]针对 CAV 车辆与 HMV 车辆的混合交通流, 综合考虑 CAV 车辆与 HMV 车辆的比例、车头间距分布、车辆行驶特性等因素, 提出了通行能力解析模型。GHIAZI 等^[12-13]基于马尔可夫链, 提出了一种考虑不同车辆类型与车间时距的高速公路混合交通流容量解析模型, 并以此构建了车道管理模型, 探究了最佳 CAV 车辆车道部署方案及车道最大容量的关键参数。常鑫等^[14]从概率的角度出发, 构建了混有协同自适应巡航控制 (cooperative adaptive cruise control, CACC) 车队的混合交通流基本图, 其研究结果表明: CACC 车队规模对混合交通流道路通行能力的影响与 CACC 车辆渗透率密切相关。这些研究均以网联车辆为对象, 忽略了人工车辆驾驶员和车辆特征对跟车间距的影响。王祺等^[15]在自适应控制巡航 (adaptive cruise control, ACC) 车辆与 CACC 车辆跟驰模型的基础上, 考虑了安全间距参数对混合交通流的影响, 提出了符合 CAV 车辆跟驰特性的车辆跟驰模型, 并进一步分析了在不同 ACC 与 CACC 车辆比例下的混合交通流的基本图模型。任胜利等^[16]在全速度差 (full velocity difference, FVD) 跟驰模型中的车头间距中引入了动态参数, 以此来表征不同类型车辆在跟车间距上的差异性, 在满足安全车头间距的基础上, 提出了一种可变车头间距的车辆跟驰模型。

在模拟仿真方面, 为尽可能符合实际情况, 一些学者利用仿真平台, 解析异质交通流在不同 CAV 车辆渗透率场景下的特性。秦严严等^[17-18]在美国加州大学伯克利分校的 PATH (partners for advanced transit and highways) 实验室, 分别采用经过实车测

试验证的协同自适应巡航控制模型和智能驾驶员模型作为智能车辆和人工车辆的跟驰模型,构建了异质交通流稳定性的解析框架,并研究了其稳定性与基本图模型。梁军等^[19]设计了基于多智能体系统的CAV车辆集聚控制模型,并提出车队级集聚和车道级集聚的两种策略及相关集聚控制算法。郭丽苹等^[20]提出了高速公路分道动态控制的算法,并基于Vissim数值软件对其进行了仿真。QIN等^[21-22]分别针对高速公路上匝道、瓶颈路段设计了微观仿真试验,其试验结果表明:CACC车队能够显著地提升高速公路合流区瓶颈路段的通行效率与车流稳定性。BUJANOVIC等^[23-25]对车队级集聚策略进行了研究,发现车队规模的增大可以提高通行能力与交通流稳定性。LIORIS等^[26-27]对城市道路信控交叉口进行了讨论,研究了智能网联车队对交叉口通行效率的影响。在考虑时间延误对交通流稳定性的影响方面,WANG等^[28]提出了一种通过使用补偿传感器和执行器延迟来提高ACC车辆稳定性的超前控制策略。蒋阳升等^[29]引入多指标安全评价体系,全面地分析了异质交通流的安全性,弥补了单一安全指标评估的不足。

从国内外研究现状可以看出,在CAV车辆异质交通流特性研究领域,众多研究者都从数值分析与仿真试验两个层面研究了不同CAV车辆渗透率条件下的异质交通流稳定性演化机理,但对不同交通管理策略下的异质交通流特性及其适用性分析的研究鲜见。因此,本研究拟提出3种不同CAV车辆管理策略,建立在不同车道管理策略下的交通流分配模型及在该车队管理策略下的车辆编队规模计算方法;再构建在不同CAV车辆渗透率条件下的异质交通流稳定性框架;最后,通过模型之间的对比,对不同CAV车辆管理策略进行优劣分析,得到异质交通流稳态对应的CAV车辆渗透率条件。该研究可为智能网联汽车的安全管控及相关交通规划提供参考。

1 同质流稳定性解析

1.1 人工驾驶车辆跟驰模型

FVD模型^[30]考虑了速度差和车间距,并通过实车数据对模型参数进行标定,该模型被广泛应用于

HMV车辆跟驰模型研究,其表达式为

$$\dot{v} = \kappa(V(h) - v) + \frac{\lambda}{h - L} \Delta v \quad (1)$$

式中: \dot{v} 为跟驰车辆加速度;

κ 、 λ 为模型敏感系数, $\kappa=0.629$ 、 $\lambda=4.1$;

v 为跟驰车辆速度;

h 为跟驰车辆与前车的车头间距;

L 为跟驰车辆长度,取5.0 m;

Δv 为跟驰车辆与前车的速度差。

$V(h)$ 为优化速度函数,其表达式为

$$V(h) = v_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha}{v_0} (h - L - s_0) \right) \right] \quad (2)$$

式中: v_0 为自由流速度,取为33.0 m/s;

α 为敏感系数,取为1.26;

s_0 为最小安全停车间距,取为2.46 m。

1.2 CAV跟驰模型

CAV车辆是具备网联通信、自动驾驶功能的车辆。当某CAV车辆的前车亦为CAV车辆时,该车可通过实时获取的前车信息来调整自身的运行状态,达到实时自动驾驶的目的。而当某CAV车辆的前车为HMV车辆时,由于HMV车辆没有装载网联设备,CAV车辆不能与其通信,因而会发生退化现象^[31]。美国加州大学伯克利分校的PATH实验室,基于实测数据提出了协同自适应巡航控制模型^[32](cooperative adaptive cruise control, CACC)和自适应巡航控制模型^[33](adaptive cruise control, ACC),这两个模型均可以较好地反映CAV车辆分别跟驰CAV车辆与HMV车辆时的跟驰特性。

CACC跟驰模型:

$$\begin{cases} \dot{v} = v_p + k_p e + k_d \dot{e} \\ \dot{e} = h - s_0 - L - t_c v \end{cases} \quad (3)$$

式中: v 为CACC当前时刻速度;

v_p 为CACC上一控制时刻的速度;

k_p 和 k_d 为控制系数, $k_p=0.45$ 、 $k_d=0.25$;

e 为车头间距与期望车头间距的误差;

\dot{e} 为 e 对时间的导数;

t_c 为CACC车辆期望保持的恒定车间时距,取为0.6 s。

对式(3)中的速度求导,可得

$$\dot{v} = \frac{k_p(h - L - s_0) - k_p t_c v + k_d \Delta v}{k_d t_c + \Delta t} \quad (4)$$

式中: Δt 为速度更新时间间隔,取为0.01 s。

ACC 车辆跟驰模型:

$$\dot{v} = k_1(h - L - s_0 - t_A v) + k_2 \Delta v \quad (5)$$

式中: k_1, k_2 均为控制系数, $k_1=0.23, k_2=0.07$;

t_A 为 ACC 车辆期望保持的恒定车间时距, 取为 1.1 s。

1.3 模型稳定性分析

根据文献[6], 同质交通流非稳定状态的一般判别条件为

$$F = \frac{1}{2} (f_v)^2 - f_v f_{\Delta v} - f_h < 0 \quad (6)$$

式中: $f_v, f_{\Delta v}, f_h$ 分别为跟驰模型关于车辆速度、速度差、车头间距的导数。其表达式分别为

$$\begin{cases} f_v = \frac{\partial f(v, \Delta v, h)}{\partial v} (v^*, 0, h^*) \\ f_{\Delta v} = \frac{\partial f(v, \Delta v, h)}{\partial \Delta v} (v^*, 0, h^*) \\ f_h = \frac{\partial f(v, \Delta v, h)}{\partial h} (v^*, 0, h^*) \end{cases} \quad (7)$$

式中: v^* 为交通流稳态下速度;

h^* 为交通流稳态车头时距。

对 FVD、CACC、ACC 三种跟驰模型进行模型稳定性分析, 分别将式(1)、(4)、(5)代入式(7), 可得到 FVD、CACC、ACC 三种车辆跟驰模型关于车辆速度、速度差、车头间距的偏微分项, 其表达式分别为

$$\begin{cases} f_v^F = -\kappa \\ f_{\Delta v}^F = \frac{\lambda \alpha}{\alpha s_0 - v_0 \ln(1 - v/v_0)} \\ f_h^F = \kappa \alpha (1 - v/v_0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_v^C = -\frac{k_p t_c}{k_d t_c + \Delta t} \\ f_{\Delta v}^C = \frac{k_d}{k_d t_c + \Delta t} \\ f_h^C = \frac{k_p}{k_d t_c + \Delta t} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} f_v^A = -k_1 t_a \\ f_{\Delta v}^A = k_2 \\ f_h^A = k_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f_v^F, f_{\Delta v}^F, f_h^F$ 分别为 FVD 跟驰模型关于速度、速度差、车头间距的偏微分项;

$f_v^C, f_{\Delta v}^C, f_h^C$ 分别为 CACC 跟驰模型关于速度、速度差、车头间距的偏微分项;

$f_v^A, f_{\Delta v}^A, f_h^A$ 分别为 ACC 跟驰模型关于速度、速度

差、车头间距的偏微分项, Δt 为时间差。

根据交通流非稳定性判别条件式(6), 可分别计算同质交通流中 FVD、CACC、ACC 三种车辆跟驰模型的稳定性判别值 F_F, F_C, F_A 。当计算值小于 0 时, 交通流为非稳定态; 当计算值大于等于 0 时, 交通流为稳定状态, 其具体的计算式分别为

$$F_F = \frac{1}{2} (f_v^F)^2 - f_v^F f_{\Delta v}^F - f_h^F \quad (11)$$

$$F_C = \frac{1}{2} (f_v^C)^2 - f_v^C f_{\Delta v}^C - f_h^C \quad (12)$$

$$F_A = \frac{1}{2} (f_v^A)^2 - f_v^A f_{\Delta v}^A - f_h^A \quad (13)$$

这三种车辆跟驰模型稳定性如图 1 所示。

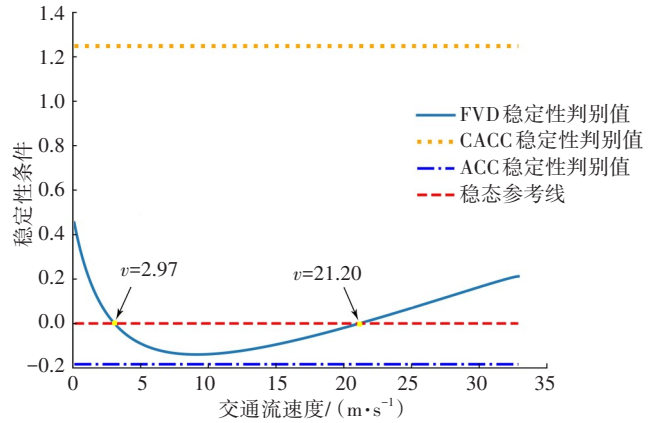


图1 模型稳定性

Fig. 1 Model stability

从图1可以看出, FVD 车辆的稳定性与跟驰模型参数、交通流速度均有关, 当 $0.00 \text{ m/s} \leq v \leq 2.97 \text{ m/s}$ 或 $v \geq 21.20 \text{ m/s}$ 时, FVD 车辆将处于稳定状态; 否则, 车辆将处于不稳定状态。CACC、ACC 车辆的稳定性仅与跟驰模型的参数有关, 但与交通流速度无关。计算可得 CACC 车辆的稳定性边界值 $F_C=1.248$, 恒大于 0, 即 CACC 车辆在任意速度下, 交通流都处于稳定状态。ACC 车辆的稳定性边界值 $F_A=-0.1803$, 恒小于 0, 即 ACC 车辆在任意速度下, 交通流都不稳定, 这一结果与 PATH 实验室的实车测试结果相符。

2 不同自动驾驶车辆管理策略

2.1 无集聚策略

无集聚策略 (no agglomeration strategy, NAS) 指的是当所有的 CAV 车辆和 HMV 车辆处于混行模式

时,由于CAV车辆与HMV车辆之间不具备通信能力,可能产生以下3种车辆控制模式:

- 1) 在CACC控制模式下,CAV车辆跟随CAV车辆时以CACC控制模式行驶;
- 2) 在ACC控制模式下,CAV车辆跟随HMV车辆时以ACC控制模式行驶;
- 3) 在FVD控制模式下,HMV车辆均以FVD控制模式行驶。

设混合交通流共 N 辆车,CAV车辆渗透率为 p ,根据文献[31],异质交通流中CACC车辆比例为 p_c 、ACC车辆比例为 p_A 、FVD车辆数量比例为 p_F ,则有

$$\begin{cases} p_c = p^2 \\ p_A = p(1 - p) \\ p_F = 1 - p \end{cases} \quad (14)$$

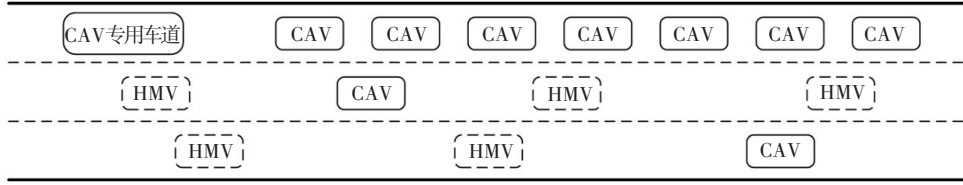


图2 LMS场景

Fig. 2 LMS scenario

2.2 车道管理策略

车道管理策略 (lane management strategy, LMS): CAV 优先在自动驾驶专用车道 (connected and automated vehicles dedicated lane, CAVDL) 上行驶, 当 CAV 车辆的需求大于 CAVDL 的通行能力时, 则 CAV 车辆会在通用车道 (general lane, GL) 上行驶。据此可以计算 CAVDL 的交通量 q_A , 其表达式为

$$q_A = \min(pD, l_A C_A), \quad l_A = 0, 1, 2, \dots, H - 1 \quad (15)$$

式中: l_A 为 CAVDL 的数量;

D 为总的交通需求;

C_A 为 CAVDL 通行能力;

H 为总车道数量。

若 CAV、HMV 车辆都有 GL 路权, 则交通量 q_G 为

$$q_G = D - q_A \quad (16)$$

因此, 在 LMS 策略下 GL 上的 CAV 渗透率 μ 为

$$\mu = \frac{\max(1, pD - q_A)}{\max(1, q_G)} \quad (17)$$

据式(14), GL 混合交通流中 CACC 车辆数量比例 θ_c 、ACC 车辆比例 θ_A 、FVD 车辆数量比例 θ_F 为

$$\begin{cases} \theta_c = \mu^2 \\ \theta_A = \mu(1 - \mu) \\ \theta_F = 1 - \mu \end{cases} \quad (18)$$

2.3 车队管理策略

车队管理策略 (platoon management strategy, PMS): 在智能网联环境下, CAV 由于具备 V2V、V2X 通信技术, 会寻找机会主动形成 CAV 车队 (fleet), 进行编队行驶。CAV 车队由簇头车辆 (fleet leader, FL) 和跟驰车辆 (fleet follow, FF) 组成。根据簇头车辆类别, 可将 CAV 车队分为 F_1 、 F_2 两种类型。考虑到车间通信的有效范围和稳定性, 假设 CAV 车队的规模为 r , 即车队由 r 辆车组成; CAV 车队最大规模为 u , 如图 3 所示。在图 3 中, 跟随 CAV 的车队簇头车辆为 FL_1 , 跟随 HMV 的车队簇头车辆为 FL_2 。

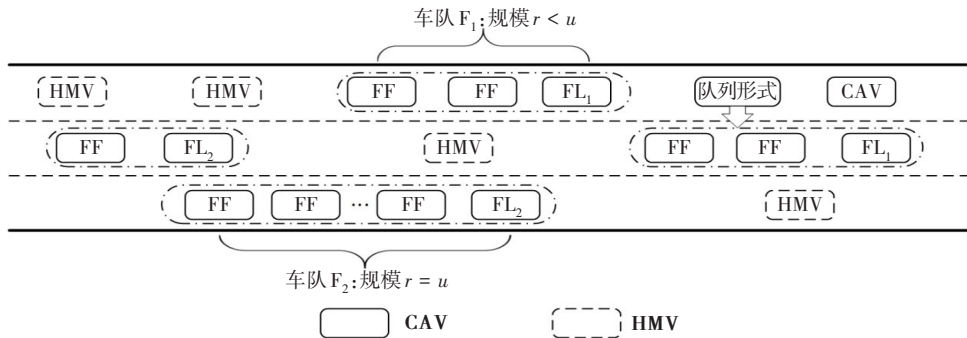


图3 PMS场景

Fig. 3 PMS scenario

在图3中,考虑CAV车辆与HMV车辆之间的通信,即簇头车辆FL₂可接收多前车的行车状态。以FVD跟驰模型结构为基础,应用集成速度与加速度的多前车反馈,构建FL₂车辆跟驰模型^[9]:

$$\dot{v} = \kappa[V(h) - v] + \frac{\lambda}{h - L} \Delta v + \sum_{i=1}^m \gamma_i \Delta \beta_i \quad (19)$$

式中: i 为该车为FL₂的第 i 辆前车;

m 为在FL₂通信范围内可接受反馈信息的前车数量;

γ_i 为反馈系数;

β_i 为FL₂与其第 i 辆前车电子阀门的角度差。

$\Delta \beta_i$ 与车辆速度及加速度之间的关系为

$$\Delta \beta_i = \frac{1}{c} (\Delta \dot{v} + b \Delta v) \quad (20)$$

式中: b 、 c 均为敏感系数,分别取值为0.80,0.27。

在CAV车辆之间的通信范围,CAV车辆可获取前方 m 辆连续行驶HMV车辆的信息,则不同规模车队前方产生 i 辆HMV车辆的概率 $\eta_i^{(r)}$ 为

$$\eta_i^{(r)} = \frac{p_{\text{HMV}}^i}{\sum_{i=1}^m p_{\text{HMV}}^i} \quad (21)$$

因此,在混有CAV车队的交通流中存在4种车辆类型:

- 1) 传统人工驾驶车辆的HMV车辆;
- 2) 跟随CAV的车队簇头车辆FL₁;
- 3) 跟随HMV的车队簇头车辆FL₂;
- 4) 车队内的跟驰车辆FF。

当CAV渗透率为 p 时,4种车辆类型HMV、FL₁、FL₂、FF的概率分别为^[34]

$$\begin{cases} p_{\text{HMV}} = 1 - p \\ p_{\text{FL}_1}^{(r)} = \frac{(1-p)p^{r+1}}{1-p^r} \\ p_{\text{FL}_2}^{(r)} = (1-p)p \\ p_{\text{FF}}^{(r)} = \frac{p^2(1-p^{r-1})}{1-p^r} \end{cases} \quad (22)$$

根据CAV车队的定义,CAV车队可分为簇头车辆跟随CAV的车队F₁、簇头车辆跟随HMV的车队F₂。不同类型、不同规模CAV车队的概率为 $p_{F_j}^{(r)}$,其表达式为

$$p_{F_j}^{(r)} = p_{\text{FL}_1}^{(r)} p_{\text{FF}}^{(r)} \quad (23)$$

式中: $p_{F_j}^{(r)}$ 表示形成第 j 类规模为 r 的CAV车队概率,

($j=1,2;r=2,3,\dots,u$)。

因此,不同规模CAV车队的概率为 $\omega_{F_j}^{(r)}$ 为

$$\omega_{F_j}^{(r)} = \frac{p_{F_j}^{(r)}}{\sum_{r=2}^u p_{F_j}^{(r)}} \quad (24)$$

由此,不同类型CAV车队数量 N_{F_j} 及形成车队的CAV总量 Q_{F_j} 分别为

$$\begin{cases} N_{F_j} = \sum_{r=2}^u \frac{1}{r} \omega_{F_j}^{(r)} p_{F_j}^{(r)} D \\ Q_{F_j} = \sum_{r=2}^u \omega_{F_j}^{(r)} p_{F_j}^{(r)} D \end{cases} \quad (25)$$

交通量更新为 Q_{new} :

$$Q_{\text{new}} = D - \sum_{j=1}^2 Q_{F_j} + \sum_{j=1}^2 N_{F_j} \quad (26)$$

式中: N_{F_j} 为不同类型CAV车队的数量。

则PMS策略下的CAV渗透率更新为 ξ :

$$\xi = \frac{pD - \sum_{j=1}^2 Q_{F_j} + \sum_{j=1}^2 N_{F_j}}{Q_{\text{new}}} \quad (27)$$

当达到车队规模 u 后,CAV车辆不再进行新的编队。由于CAV车队内的车辆之间跟车时距较小(0.6 s),根据CACC跟驰模型的稳定性分析结果,CACC车辆在同质交通流任意速度下将保持稳定,故将CAV车队视为一个整体。其中,车队F₁视为一个以CACC控制模式的整体,车队F₂视为一个FL₂控制模式的整体,HMV车辆仍以FVD控制模式行驶。

$$\begin{cases} \rho_{F_1} = \xi^2 \\ \rho_{F_2} = \xi(1 - \xi) \\ \rho_F = 1 - \xi \end{cases} \quad (28)$$

将不同规模的CAV车队视为一个整体的跟驰模型的车头时距与车队规模有关,以车队F₁为整体的跟驰模型将关于速度、速度差、车头间距的偏微分项分别更新为 $f_{v_r}^{F_1} f_{\Delta v_r}^{F_1} f_{h_r}^{F_1}$:

$$\begin{cases} f_{v_r}^{F_1} = -\frac{k_p t_c'}{k_d t_c' + \Delta t} \\ f_{\Delta v_r}^{F_1} = \frac{k_d}{k_d t_c' + \Delta t} \\ f_{h_r}^{F_1} = \frac{k_p}{k_d t_c' + \Delta t} \end{cases} \quad (29)$$

式中: t_c' 为以车队F₁为整体的跟驰模型车头时距参数。其表达式为

$$t_c' = t_c r_1 \quad (30)$$

式中: r_i 为车队 F_i 具体规模。

同理,将式(19)、(20)代入式(7),可以得到以车队 F_2 为整体的跟驰模型关于速度的偏微分 $f_{v,j}^{F_2}$ 、关于速度差的偏微分 $f_{\Delta v,j}^{F_2}$ 、关于车头间距的偏微分 $f_{h,j}^{F_2}$,其表达式分别为

$$\begin{cases} f_{v,j}^{F_2} = -\kappa \\ f_{\Delta v,j}^{F_2} = \frac{\lambda\alpha}{\alpha s_0 - v_0 \ln(1 - v/v_0)} + \sum_{i=1}^m \frac{b\gamma_i}{c} \\ f_{h,j}^{F_2} = \kappa\alpha(1 - v/v_0) \end{cases} \quad (31)$$

3 交通流稳定性分析

3.1 异质交通流稳定性

根据文献[6],异质交通流非稳定状态的判别式为

$$G = \sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{1}{2} (f_v^n)^2 - f_v^n f_{\Delta v}^n - f_h^n \right) \left(\prod_{m \neq n} f_h^m \right)^2 \right] < 0 \quad (32)$$

式中: n 、 m 为异质交通流中车辆编号;

N 为异质交通流中车辆总数;

f_v^n 、 $f_{\Delta v}^n$ 、 f_h^n 分别为第 n 辆车跟驰模型关于车辆速度、速度差、车头间距的偏微分;

f_h^m 为第 m 辆车跟驰模型关于车头间距的偏微分。

3.2 NAS策略下交通流的稳定性

联合式(1)、(4)、(5)、(14)、(32),可得NAS策略下交通流的非稳定状态判别条件 G_1 :

$$\begin{aligned} G_1 = & Np_C \left[\frac{1}{2} (f_v^C)^2 - f_v^C f_{\Delta v}^C - f_h^C \right] \left[(f_h^C)^{N_{p_C}-1} (f_h^A)^{N_{p_C}} (f_h^F)^{N_{p_C}} \right]^2 + \\ & Np_A \left[\frac{1}{2} (f_v^A)^2 - f_v^A f_{\Delta v}^A - f_h^A \right] \left[(f_h^C)^{N_{p_C}} (f_h^A)^{N_{p_C}-1} (f_h^F)^{N_{p_C}} \right]^2 + \\ & Np_F \left[\frac{1}{2} (f_v^F)^2 - f_v^F f_{\Delta v}^F - f_h^F \right] \left[(f_h^C)^{N_{p_C}} (f_h^A)^{N_{p_C}} (f_h^F)^{N_{p_C}-1} \right]^2 < 0 \end{aligned} \quad (33)$$

式(33)可简化为

$$\begin{aligned} G_1 = & p_C \left[\frac{1}{2} (f_v^C)^2 - f_v^C f_{\Delta v}^C - f_h^C \right] (f_h^A f_h^F)^2 + \\ & p_A \left[\frac{1}{2} (f_v^A)^2 - f_v^A f_{\Delta v}^A - f_h^A \right] (f_h^C f_h^F)^2 + \\ & p_F \left[\frac{1}{2} (f_v^F)^2 - f_v^F f_{\Delta v}^F - f_h^F \right] (f_h^C f_h^A)^2 < 0 \end{aligned} \quad (34)$$

图4描述了NAS策略下的异质交通流稳定性随渗透率及速度变化的演变规律。

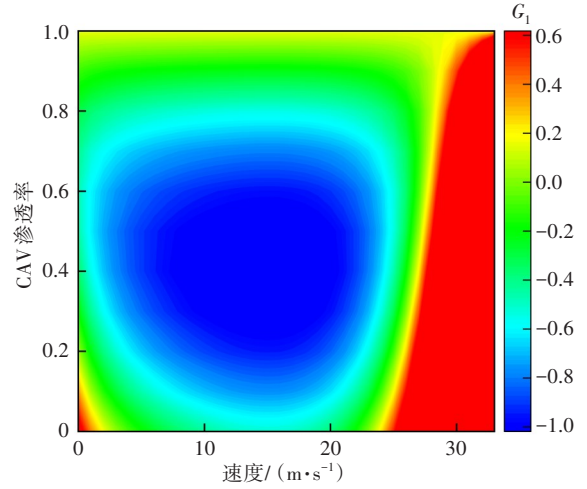


图4 NAS稳定性

Fig. 4 NAS stability

从图4可以看出,当车辆速度高于23.12 m/s或CAV车辆渗透率大于0.92时,异质交通流处于恒稳定的状态。当车辆速度分别为2.97 m/s和23.12 m/s、且CAV车辆渗透率小于0.80时,异质交通流的稳定性较差。出现该现象的主要原因是混行下的CACC车辆的驾驶行为会退化为ACC模式,进而加剧交通流的不稳定性;当渗透率较大或者较小时,交通流趋于同质,稳定性较好。研究还发现,当车辆速度很低时,交通流的稳定性较好,这与实际情况一致,当车辆处于缓行阶段时,车辆的速度波动较小。

3.3 LMS策略下交通流的稳定性

根据CACC模型稳定性分析结果,CACC车辆在任意速度条件下将保持稳定状态,而在CAVDL中,仅CACC车辆拥有通行权。因此,在LMS策略中,将CAVDL视为恒稳定状态,仅对GL交通流进行稳定性分析。

联合式(1)、(4)、(5)、(18)、(32),可得LMS策略下的交通流非稳定状态判别条件 G_2 :

$$\begin{aligned} G_2 = & \theta_C \left[\frac{1}{2} (f_v^C)^2 - f_v^C f_{\Delta v}^C - f_h^C \right] (f_h^A f_h^F)^2 + \\ & \theta_A \left[\frac{1}{2} (f_v^A)^2 - f_v^A f_{\Delta v}^A - f_h^A \right] (f_h^C f_h^F)^2 + \\ & \theta_F \left[\frac{1}{2} (f_v^F)^2 - f_v^F f_{\Delta v}^F - f_h^F \right] (f_h^C f_h^A)^2 < 0 \end{aligned} \quad (35)$$

由式(35)计算结果,可得到在LMS策略下,异

质交通流在不同CAV车辆渗透率与速度条件下的稳定性情况,如图5所示。

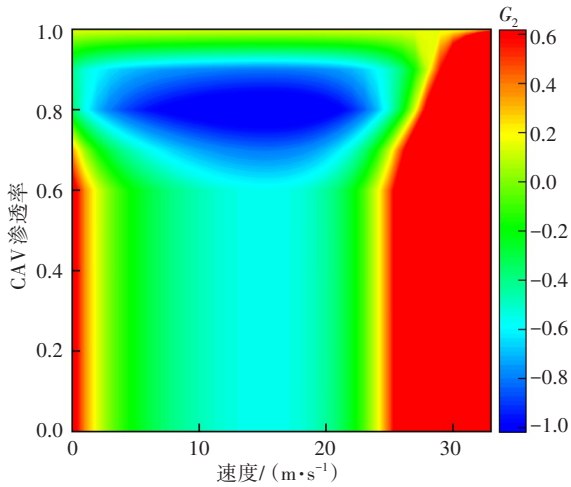


图5 LMS 稳定性

Fig. 5 LMS stability

从图4~5中可以看出,LMS策略下稳定域明显优于NAS策略的。当 $0.60 < p < 0.92$ 时,异质交通流处于极不稳定状态。这是因为,当CAV-L车道达到饱和时,溢出的CAV车辆会选择通用车道,导致通用车道出现异质交通流,使得通用车道交通流稳定性恶化。

3.4 PMS策略下交通流的稳定性

同理,联合式(1)、(4)、(5)、(28)、(29)、(31)、(32),可得PMS策略下交通流的非稳定状态判别条件 G_3 :

$$G_3 = \sum_{r=2}^u \omega_{F_i}^{(r)} \rho_{F_i} \left[\frac{1}{2} (f_{v_i}^{F_i})^2 - f_{v_i}^{F_i} f_{\Delta v_i}^{F_i} - f_{h_i}^{F_i} \right] (f_{h_i}^{F_i} f_h^F)^2 + \sum_{r=2}^u \sum_{i=1}^m \omega_{F_i}^{(r)} \rho_{F_i} \eta_i^{(r)} \left[\frac{1}{2} (f_{v_{r,i}}^{F_i})^2 - f_{v_{r,i}}^{F_i} f_{v_{r,i}}^{F_i} - f_{v_{r,i}}^{F_i} \right] (f_{h_i}^{F_i} f_h^F)^2 + \rho_F \left[\frac{1}{2} (f_v^F)^2 - f_v^F f_{\Delta v}^F - f_h^F \right] (f_{h_i}^{F_i} f_{h_{r,i}}^{F_i})^2 < 0 \quad (36)$$

由式(36)计算结果,可得PMS策略下异质交通流在不同CAV车辆渗透率与速度条件下的稳定性情况,如图6所示。

对比图4与图6可以看出,PMS策略的交通流稳定域均优于NAS与LMS策略的交通流稳定域。当 $v \in [2.97, 23.12] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且渗透率 $p \leq 0.19$ 时,区域存在异质交通流不稳定状态。即在PMS策略中,当CAV车辆渗透率大于0.19时,任何速度区间的异质交通流均处于稳定状态。

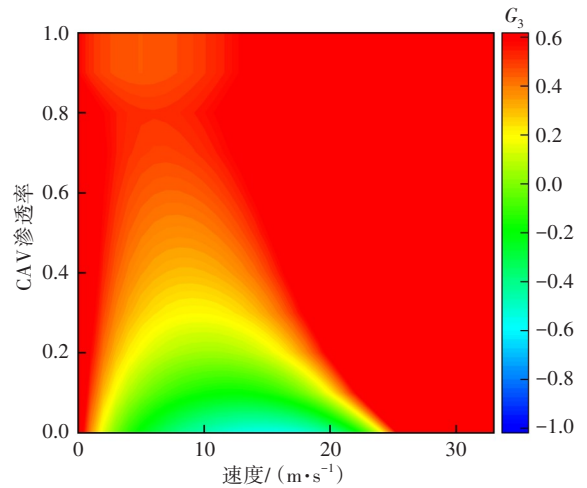


图6 PMS 稳定性

Fig. 6 PMS stability

4 结论

1) 针对人工车辆、CACC车辆与CACC退化后ACC车辆形成的异质交通流,采用PATH实车测试验证的CACC模型,得出该模型的稳定解析域。

2) 研究了在不同交通管理策略下异质交通流稳定性演化机理,提出了NAS、LMS、PMS三种自动驾驶车辆管理策略。基于李雅普诺夫理论,建立了不同自动驾驶管理策略在不同CAV车辆渗透率条件下的异质流稳定性解析框架,将复杂的异质流稳定性问题转变为简单线性函数性质的分析,以便于研究不同平衡态速度、不同CACC车辆比例时的异质流稳定性。

3) 经数值分析发现,在不同的交通管理策略下,车队管理策略稳定域最优;其次,车道管理策略的稳定域整体优于无集聚策略的;CAV随机在道路中混行,会极大地恶化交通流的稳定,而通过车道管理和编队控制后,车流稳定性得到明显的改善。当CAV车辆渗透率较低时,可以通过完全分离异质交通流而提高稳定性;当CAV车辆渗透率较高时,则可通过车辆编队提升稳定性。

参考文献(References):

- [1] 冉斌, 谭华春, 张健, 等. 智能网联交通技术发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2018, 9(2): 119-130. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2018.02.001.

RAN Bin, TAN Huachun, ZHANG Jian, et al.

- Development status and trend of connected automated vehicle highway system [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2018, 9 (2) : 119-130. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2018.02.001.
- [2] 李子辉, 李美玲, 冉晋, 等. 自动驾驶车流对区域规划路网密度的影响分析[J]. *公路与汽运*, 2022(2): 18-21, 26. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.005.
- LI Zihui, LI Meiling, RAN Jin, et al. Analysis on the influence of autopilot traffic flow on regional planning road network density [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2022 (2) : 18-21, 26. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.005.
- [3] 刘新雨, 吴学勤, 王畅, 等. 自适应巡航控制系统对驾驶安全性的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27 (4) : 43-48. DOI: 10.16265/j. cnki. issn1003-3033.2017.04.008.
- LIU Xinyu, WU Xueqin, WANG Chang, et al. Impact of adaptive cruise control system on driving safety [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27 (4) : 43-48. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.04.008.
- [4] LI Y, WANG H, WANG W, et al. Evaluation of the impacts of cooperative adaptive cruise control on reducing rear-end collision risks on freeways [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 98: 87-95. DOI: 10.1016/j.aap.2016.09.015.
- [5] 秦严严, 王昊, 陈全, 等. 车联网环境下巡航控制系统对交通流油耗的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49 (11) : 2894-2900. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.032.
- QIN Yanyan, WANG Hao, CHEN Quan, et al. Impacts of connected cruise control systems on traffic flow fuel consumption in Internet of vehicles environment [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49 (11) : 2894-2900. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.032.
- [6] WARD J A. Heterogeneity, lane-changing and instability in traffic: a mathematical approach [D]. Bristol: University of Bristol, 2009.
- [7] TALEBPOUR A, MAHMASSANI H S, HAMDAR S H. Effect of information availability on stability of traffic flow: percolation theory approach [J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 23: 81-100. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.006.
- [8] MOHAJERPOOR R, RAMEZANI M. Mixed flow of autonomous and human-driven vehicles: analytical headway modeling and optimal lane management [J]. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 2019, 109: 194-210. DOI: 10.1016/j.trc.2019.10.009.
- [9] 李霞, 汪一戈, 崔洪军, 等. 智能网联环境下复杂异质交通流稳定性解析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20 (6) : 114-120. DOI: 10.16097/j. cnki.1009-6744.2020.06.015.
- LI Xia, WANG Yige, CUI Hongjun, et al. Stability analysis of complex heterogeneous traffic flow under connected and autonomous environment [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20 (6) : 114-120. DOI: 10.16097/j. cnki.1009-6744.2020.06.015.
- [10] 秦严严, 王昊. 智能网联车辆交通流优化对交通安全的改善[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(4): 202-210. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.04.024.
- QIN Yanyan, WANG Hao. Improving traffic safety via traffic flow optimization of connected and automated vehicles [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31 (4) : 202-210. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2018.04.024.
- [11] CHEN D J, AHN S, CHITTURI M, et al. Towards vehicle automation: roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 100: 196-221. DOI: 10.1016/j.trb.2017.01.017.
- [13] GHIASI A, HUSSAIN O, QIAN Z S, et al. Lane management with variable lane width and model calibration for connected automated vehicles [J]. *Journal of Transportation Engineering Part A Systems*, 2020, 146 (3): 04019075. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000283.
- [14] 常鑫, 李海舰, 荣建, 等. 混有网联车队的高速公路通行能力分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48 (4) : 142-148. DOI: 10.12141/j. issn. 1000-565X.190371.
- CHANG Xin, LI Haijian, RONG Jian, et al. Analysis of capacity for mixed traffic flow with connected vehicle platoon on freeway [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48 (4) : 142-148. DOI: 10.12141/j. issn. 1000-565X.190371.

- [15] 王祺, 谢娜, 侯德藻, 等. 自适应巡航及协同式巡航对交通流的影响分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 188-197, 205. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.06.019.
- WANG Qi, XIE Na, HOU Dezao, et al. Effects of adaptive cruise control and cooperative adaptive cruise control on traffic flow[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 188-197, 205. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.06.019.
- [16] 任胜利, 黄益绍, 王正武, 等. 考虑驾驶员和车型特征的全速度差跟驰模型与控制稳定性[J]. 系统工程, 2020, 38(6): 90-96.
- REN Shengli, HUANG Yishao, WANG Zhengwu, et al. The full velocity difference model considering drivers' and vehicles' characteristics and its control stability[J]. Systems Engineering, 2020, 38(6): 90-96.
- [17] 秦严严, 王昊, 王伟, 等. 混有协同自适应巡航控制车辆的异质交通流稳定性解析与基本图模型[J]. 物理学报, 2017, 66(9): 257-265. DOI: 10.7498/aps.66.094502.
- QIN Yanyan, WANG Hao, WANG Wei, et al. Stability analysis and fundamental diagram of heterogeneous traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 257-265. DOI: 10.7498/aps.66.094502.
- [18] 秦严严, 王昊, 王伟, 等. 混有CACC车辆和ACC车辆的混合交通流驾驶舒适性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9): 103-108, 173. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201610006.
- QIN Yanyan, WANG Hao, WANG Wei, et al. Driving comfort of traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles and adaptive cruise control vehicles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 103-108, 173. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201610006.
- [19] 梁军, 杨程灿, 王文飒, 等. 自动驾驶车辆混行集聚MAS控制模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 172-183. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.06.017.
- LIANG Jun, YANG Chengcan, WANG Wensa, et al. Agglomeration control model based on multi-agents for autonomous vehicles in mixed traffic environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 172-183. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.06.017.
- [20] 郭丽苹, 朱晓东, 高佳宁, 等. 基于vissim仿真的高速公路客货分道动态控制[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 108-116. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.013.
- GUO Liping, ZHU Xiaodong, GAO Jianing, et al. Dynamic control of passenger-cargo lane separation of expressway based on the vissim simulation[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 108-116. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.013.
- [21] QIN Y Y, WANG H, RAN B. Control design for stable connected cruise control systems to enhance safety and traffic efficiency[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(8): 921-930. DOI: 10.1049/iet-its.2018.5271.
- [22] LIU H, KAN X D, SHLADOVER S E, et al. Impact of cooperative adaptive cruise control on multilane freeway merge capacity[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2018, 22(3): 263-275. DOI: 10.1080/15472450.2018.1438275.
- [23] BUJANOVIC P, LOCHRANE T. Capacity predictions and capacity passenger car equivalents of platooning vehicles on basic segments[J]. Journal of Transportation Engineering Part A Systems, 2018, 144(10): 04018063-. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000188.
- [24] 常鑫, 李海舰, 荣建, 等. 混有网联车辆的交通流稳定性和最大服务流率分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1673-159X.2019.06.006.
- CHANG Xin, LI Haijian, RONG Jian, et al. Analysis on stability and maximum service flow rate for mixed traffic flow with connected vehicles[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2019, 38(6): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1673-159X.2019.06.006.
- [25] ZHOU J Z, ZHU F. Analytical analysis of the effect of maximum platoon size of connected and automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 122: 102882. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102882.
- [26] LIORIS J, PEDARSANI R, TASCIKARA OGLU F Y, et al. Platoons of connected vehicles can double throughput in urban roads[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 77: 292-305. DOI: 10.1016/j.trc.2017.01.023.
- [27] 刘天天, 莫磊, 陈思祺, 等. 智能网联环境下交叉口混

- 行车队通行模型构建[J]. 交通运输研究, 2020, 6(6): 46-54. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2020.06.006.
- LIU Tiantian, MO Lei, CHEN Siqi, et al. Construction of traffic model for mixed platoon at intersection under intelligent network environment[J]. Transport Research, 2020, 6 (6) : 46-54. DOI: 10.16503/j. cnki. 2095-9931.2020.06.006.
- [28] WANG M, HOOGENDOORN S P, DAAMEN W, et al. Delay-compensating strategy to enhance string stability of adaptive cruise controlled vehicles [J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2018, 6(3): 211-229. DOI: 10.1080/21680566.2016.1266973.
- [29] 蒋阳升, 胡蓉, 姚志洪, 等. 智能网联车环境下异质交通流稳定性及安全性分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44 (1) : 27-33. DOI: 10.11860/j. issn. 1673-0291.20190045.
- JIANG Yangsheng, HU Rong, YAO Zhihong, et al. Stability and safety analysis for heterogeneous traffic flow composed of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44 (1) : 27-33. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.20190045.
- [30] JIANG R, WU Q S, ZHU Z J. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. Physical Review E, 2001, 64: 017101. DOI: 10.1103/physreve.64.017101.
- [31] 秦严严, 王昊, 王伟, 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. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2017.10.016.
- QIN Yanyan, WANG Hao, WANG Wei, 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.016.
- [32] SHLADOVER S E, SU D Y, LU X Y. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2324(1): 63-70. DOI: 10.3141/2324-08.
- [33] PLOEG J, SEMSAR-KAZEROONI E, LIJSTER G, et al. Graceful degradation of cooperative adaptive cruise control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 488-497. DOI: 10.1109/TITS.2014.2349498.
- [34] 常鑫, 李海舰, 荣建, 等. 混有智能网联车队的交通流基本图模型分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50 (4) : 782-788. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505.2020.04.024.
- CHANG Xin, LI Haijian, RONG Jian, et al. Analysis on fundamental diagram model for mixed traffic flow with connected vehicle platoons[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50 (4) : 782-788. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.04.024.

(责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:李岳林)