

异构交通场景下的宏观交通流建模

郭宇奇, 侯德藻, 李一丁, 衣倩, 黄烨然

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 提出了基于动态图混杂自动机与改进的元胞传输模型相结合的建模方法。通过对不同自动驾驶车辆混入率下路段的流量和密度进行三角基本图拟合, 讨论了临界拥堵密度、通行能力、反向波速等主要参数的变化规律, 并基于此改进了传统的元胞传输模型; 利用动态图混杂自动机表征路网分层递阶的拓扑结构, 并将改进的元胞传输模型嵌入动态图混杂自动机来建立异构场景下的宏观交通流模型。利用OpenModelica搭建了仿真平台, 验证了该建模方法的有效性。结果表明: 随着自动驾驶车辆混入率的增加, 路段的临界拥堵密度、最大通行能力和反向波速等都有较为显著的变化。

关键词: 异构交通场景; 自动驾驶车辆; 基本图; 交通流模型; 元胞基本参数

中图分类号: U491

文献标志码: A

Macroscopic Traffic Flow Modeling Under Heterogeneous Traffic Condition

GUO Yuqi, HOU Dezao, LI Yiding, YI Qian, HUANG Yeran

(Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: A modeling method of dynamic graph hybrid automata combined with an improved cell transmission model was proposed. Based on the triangular fundamental diagram fitting results of flow volume and density of road segment under different mixing ratios of automated driving vehicles, the variation rules of critical congestion density, traffic capacity, reverse wave velocity and other main parameters were discussed, and the traditional cell transmission model was improved. The dynamic graph hybrid automata was used to characterize the hierarchical topology of road network, and the improved cell transmission model was embedded into the dynamic graph

hybrid automata to establish a macroscopic traffic flow model under heterogeneous traffic condition. Finally, simulation platform was built by using the OpenModelica software to verify the effectiveness of the modeling method. The results show that with the increase of the mixing ratio of automated driving vehicles, the critical congestion density, maximum traffic capacity and reverse wave velocity of road segment all have significant changes.

Key words: heterogeneous traffic condition; automated driving vehicle; fundamental diagram; traffic flow model; cell basic parameters

随着自动驾驶技术的不断发展, 同时含有自动驾驶车辆和人工驾驶车辆的异构交通场景下的宏观交通流建模成为研究的热点。从车辆的跟驰模型入手, 通过对不同自动驾驶车辆混入率下流量、密度和速度之间的关系进行分析, 构建异构场景下的LWR(Lighthill, Whitham and Richards)模型^[1-2]; 基于气体动力学描述交通流的空间密度、速度的动力学特征, 在自动驾驶车辆加速度方程式中增加当前车辆与头车速度差的协同因子系数, 建立宏观异构交通流模型^[3]; 将ARZ(Aw-Raschle-Zhang)模型^[4]嵌入二阶交通流模型, 在速度与密度的动力学方程中加入特定参数来表示自动驾驶车辆比例, 从而构建异构场景下的宏观交通流模型, 该模型可以更加全面地表征异构场景下的交通流特性^[5]。上述几类连续模型都是基于偏微分方程建立的, 求解难度大, 并且求解时对模型离散化处理的步长难以选取, 易造成无解等问题。

针对连续模型的不足, 以元胞传输模型(CTM)描述宏观异构交通流模型^[6-10]成为了新的研究方向。

收稿日期: 2021-04-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0102800)

第一作者: 郭宇奇(1986—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为复杂交通网络建模、智能交通控制。

E-mail: gyq@itsc.cn

通信作者: 侯德藻(1975—), 男, 研究员, 工学博士, 主要研究方向为智能交通、交通安全。

E-mail: hdz@itsc.cn



论文
拓展
介绍

从微观驾驶行为出发,考虑自动驾驶车辆与人工驾驶车辆在跟驰模型中反应时间的不同,建立混合多类CTM^[11];基于自动驾驶和人工驾驶的跟驰模型,得到异构场景下混合密度计算公式、流量与密度之间的关系^[12-13],以及元胞通行能力、临界拥堵密度等基本参数与自动驾驶车辆混入比例的量化映射关系,从而构建异构交通场景下的CTM。相比于传统CTM,已有文献并没有给出异构交通场景下宏观交通流模型相关参数的计算方法,导致模型的显式表达仍是一个待解决的问题。

基于高速公路的交通流基本图,分析不同自动驾驶车辆混入率下人工驾驶车辆与自动驾驶车辆跟驰行为对路段“流量-密度-速度”的影响,进而推导出基本图中的元胞参数(通行能力、临界拥堵密度、反向波速、最大拥堵密度等)随不同自动驾驶车辆混入率的变化规律及相应的量化映射关系。对传统CTM进行改进,并将改进的CTM嵌入动态图混杂自动机^[14-16],然后以交通流密度为状态变量,推导出不同自动驾驶车辆混入率下路段中每个元胞的密度更新方程,最后建立高速公路宏观交通流的分段仿射系统模型。

1 异构交通场景下的基本图分析

通常使用如图1所示的三角基本图来表征路段“流量-密度”。由于通过交通流量和交通流密度可以推导出交通流速度,因此该基本图可以描述宏观交通流模型中流量、速度和密度三者之间的基本关系。三角基本图的参数及其含义如表1所示。

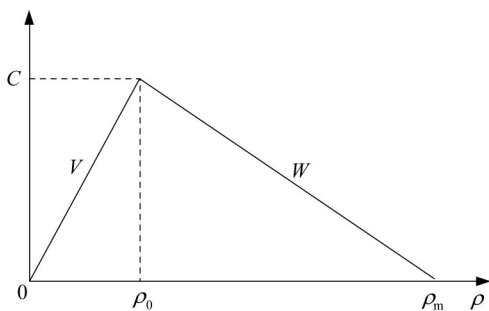


图1 “流量-密度-速度”三角基本图

Fig.1 Triangle fundamental diagram of “flow volume-density-speed”

选取应用较为广泛的IDM(intelligent driver model)^[17]作为人工驾驶车辆跟驰模型,其具体描述如下所示:

$$\dot{v}_n(t) = a \left(1 - \left(\frac{v_n(t)}{v_0} \right)^4 - \frac{S_0 + v_n(t)T + v_n(t)\Delta v_n(t)/2\sqrt{ab}}{h_n(t) - L_V} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $v_n(t)$ 是车辆 n 在 t 时刻的速度; $\dot{v}_n(t)$ 是车辆 n 在 t 时刻的加速度; $\Delta v_n(t)$ 是车辆 $(n-1)$ 与车辆 n 在 t 时刻的速度差; $h_n(t)$ 是车辆 n 在 t 时刻的车头间距; a 是车辆最大加速度参数; v_0 是自由流速度; S_0 是最小安全停车间距; T 是安全车头时距; b 是舒适减速度; L_V 是车长。

表1 基本图参数描述

Tab.1 Parameter description of fundamental diagram

| 基本参数 | 单位 | 含义 |
|----------|--------------------|-----------------|
| ρ | 辆·km ⁻¹ | 元胞的交通流密度 |
| C | 辆·h ⁻¹ | 元胞的最大交通容量(通行能力) |
| V | km·h ⁻¹ | 元胞的自由流速度 |
| ρ_0 | 辆·km ⁻¹ | 元胞的临界拥堵密度 |
| ρ_m | 辆·km ⁻¹ | 元胞的最大拥堵密度(阻塞密度) |
| W | km·h ⁻¹ | 元胞的反向波速 |

自动驾驶车辆为智能网联车辆(CAV),包括协同自适应巡航控制(CACC)和自适应巡航控制(ACC)2种行驶方式。选择加州大学伯克利分校PATH实验室所验证的CACC与ACC作为2类车辆的跟驰模型^[1]。

ACC车辆跟驰模型如下所示:

$$\dot{v}_n(t) = k_1(h_n(t) - L_V - S_0 - t_a v_n(t)) + k_2 \Delta v_n(t) \quad (2)$$

式中: t_a 是ACC车辆期望车间时距参数; k_1 是车间距误差控制系数; k_2 是速度差控制系数。

CACC车辆跟驰模型如下所示:

$$\begin{cases} v_n(t + \Delta t) = v_n(t) + k_p e_n(t) + k_d \dot{e}_n(t) \\ e_n(t) = h_n(t) - L_V - S_0 - t_c v_n(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v_n(t + \Delta t)$ 是车辆 n 在 $(t + \Delta t)$ 时刻的速度; Δt 是CACC系统控制步长; $e_n(t)$ 是车辆 n 在 t 时刻的实际车头间距与期望车头间距的误差; $\dot{e}_n(t)$ 是 $e_n(t)$ 对时间 t 的微分; t_c 是CACC车辆期望车间时距参数; k_p 是CACC车辆车间距误差控制系数; k_d 是CACC车辆车间距误差微分项控制系数。

根据文献[1]可知,当异构交通流中所有车辆以平衡态速度 v_c 行驶时,交通流所覆盖的道路长度可表示为所有车辆车头间距之和,计算式如下所示:

$$L = NP_m h_m + NP_c h_c + NP_a h_a \quad (4)$$

式中: L 是异构交通流所覆盖的道路长度; N 是总的车辆数; P_m 、 P_c 和 P_a 分别是人工驾驶车辆、CACC车辆以

及 ACC 车辆在交通流中的混入比例; h_m 、 h_c 和 h_a 分别是人工驾驶车辆、CACC 车辆以及 ACC 车辆的车头间距。

根据交通流密度定义, 可推导出异构交通流密度计算公式, 如下所示:

$$\begin{cases} \rho = \left((1-P) \left((S_0 + Tv_c) / \sqrt{1 - \left(\frac{v_c}{v_0}\right)^4} + L_v \right) + P(1-P)(t_a v_c + S_0 + L_v) + P^2(t_c v_c + S_0 + L_v) \right)^{-1} \\ q = \rho v_c \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ 是异构交通场景下的交通流密度; q 是流量; P 是自动驾驶车辆比例, $P = P_c + P_a$ 。

为了分析不同自动驾驶车辆混入率对道路基本参数的影响, 选取长度为 1 000 m、最大限速为 120 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的四车道高速公路为研究对象, 基于式(6)计算不同自动驾驶车辆混入率下的流量和密度。通过进一步分析可知, 在异构交通场景下, 随着自动驾驶车辆混入率的增加, 路段的最大限速 V 和最大拥堵密度 ρ_m 不变, 但临界拥堵密度 ρ_0 、通行能力 C 和反向波速 W 等都呈现增大的趋势。根据文献[1]中元胞通行能力随自动驾驶车辆混入率的变化值, 进一步计算出如表 2 所示临界拥堵密度、通行能力和反向波速与自动驾驶车辆混入率的对应关系。

根据混合密度的计算公式, 绘制了表征异构交通场景下流量和密度关系的基本图, 如图 2 所示。

由于自动驾驶车辆的混入使得路段的通行能力、临界拥堵密度、反向波速等参数发生了量变, 进而导致异构交通场景下 CTM 中相应的基本参数需乘以相应系数来表示与传统 CTM^[18] 的区别。根据

$$\rho = \frac{N}{L} = \frac{1}{P_m h_m + P_c h_c + P_a h_a} \quad (5)$$

结合式(1)~(5), 可推导出异构交通场景下混合密度的计算公式以及流量与密度之间的关系, 如下所示:

表 2 元胞基本参数分析结果

Tab.2 Analytical results of cell fundamental parameters

| $P/\%$ | $C/(\text{辆}\cdot\text{h}^{-1})$ | $\rho_0/(\text{辆}\cdot\text{km}^{-1})$ | $W/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$ | $V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$ | $\rho_m/(\text{辆}\cdot\text{km}^{-1})$ |
|--------|----------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 0 | 2 016 | 16.8 | 17.0 | | |
| 10 | 2 172 | 18.1 | 18.6 | | |
| 20 | 2 230 | 18.6 | 19.0 | | |
| 30 | 2 311 | 19.3 | 20.0 | | |
| 40 | 2 398 | 20.0 | 20.9 | | |
| 50 | 2 519 | 21.0 | 22.0 | 120 | 135 |
| 60 | 2 707 | 22.6 | 24.0 | | |
| 70 | 2 941 | 24.5 | 26.6 | | |
| 80 | 3 304 | 27.5 | 30.7 | | |
| 90 | 3 769 | 31.4 | 36.4 | | |
| 100 | 4 597 | 38.3 | 47.5 | | |

表 2 的分析结果, 可计算出通行能力提升倍数 λ 、临界拥堵密度提升倍数 η 和反向波速提升倍数 δ 的具体取值与自动驾驶车辆混入率的对应关系, 如表 3 所示。

通过对表 2 和表 3 计算结果的分析可以得出以下结论: 在异构交通场景下, 人工驾驶车辆和自动驾

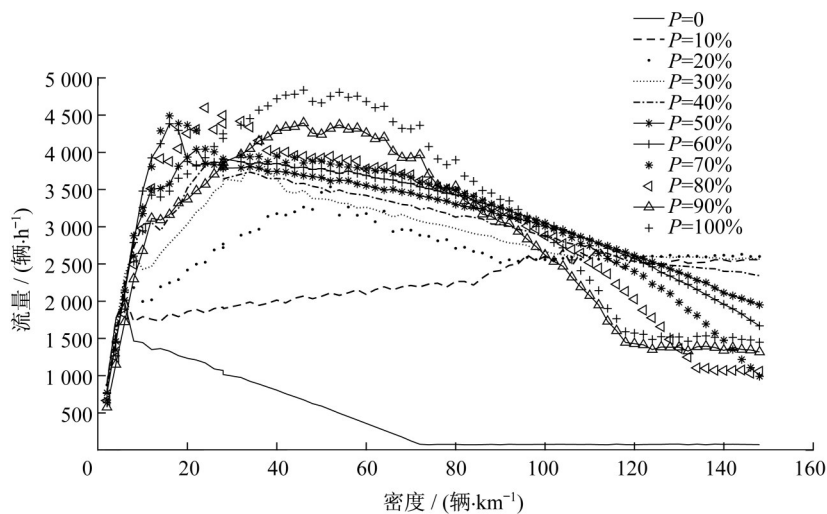


图 2 不同自动驾驶车辆混入率下流量和密度关系

Fig.2 Flow volume-density relationship under different mixing ratios of automated driving vehicles

表3 元胞基本参数变化率

Tab.3 Change rate of cell fundamental parameters

| P/% | λ | η | δ |
|-----|-----------|--------|----------|
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 10 | 1.08 | 1.08 | 1.09 |
| 20 | 1.11 | 1.11 | 1.12 |
| 30 | 1.15 | 1.15 | 1.18 |
| 40 | 1.19 | 1.19 | 1.23 |
| 50 | 1.25 | 1.25 | 1.29 |
| 60 | 1.34 | 1.35 | 1.41 |
| 70 | 1.46 | 1.46 | 1.56 |
| 80 | 1.64 | 1.64 | 1.81 |
| 90 | 1.87 | 1.87 | 2.14 |
| 100 | 2.28 | 2.28 | 2.79 |

驶车辆的性能可以通过交通流基本图相关参数的变化反映;随着自动驾驶车辆混入率的增加,道路的通行能力、临界拥堵密度和反向波速随之增大,而最大限速作为道路固定的值保持不变,最大拥堵密度也保持不变;相比于全是人工驾驶车辆的情况,当所有车辆全部为自动驾驶车辆时,道路的通行能力、临界拥堵密度和反向波速增加2倍以上;自动驾驶车辆的增加可使道路的利用率得到有效提升。

2 异构交通场景下分段仿射系统模型

无论是同构交通环境,还是异构交通环境,道路的基本拓扑结构未发生变化,因此可用动态有向图加以描述。以高速公路为例,按照其出入口匝道的位置、车道数变化位置以及道路曲率半径发生变化的位置,将其分为若干个小路段,每个小路段称为一个元胞;每个元胞可看作是有向图^[14]的顶点,如果相邻的2个顶点之间存在交通流,则交通流向可以看作有向图的有向边,若无交通流则图的边不存在,即图的顶点是固定的(等于元胞数目),其边是随着交通流动态变化的,可用动态图对道路的基本拓扑结构进行描述。本研究中以交通流密度为元胞的状态,每个顶点(元胞)的模式也随着交通流密度的连续变化而变化,当交通流密度从零开始增加到临界拥堵密度时,路段开始由自由流模式转变为拥堵模式;随着车辆的减少,当交通流密度由最大降低到临界拥堵密度时,路段由拥堵模式向自由流模式转变。由连续变量的变化导致元胞离散模式转变的特性符合混杂动态系统,因此可以用混杂自动机^[15-16]对元胞的状态变化进行描述。最终,将动态图和混杂自动机相结合而构成的动态图混杂自动机来描述快速路的拓扑结构(具体的分析和推导过程详见文献[18-19])。

对于异构场景下的元胞*i*而言, $i=1, \dots, N$,若其密度满足 $0 < \rho_i \leq \eta_i \rho_{i0}$,则称其为自由流状态(F: free flow);若其密度满足 $\eta_i \rho_{i0} < \rho_i \leq \rho_{im}$,则称其为拥堵流状态(C: congested flow)。因此,每个元胞都有F和C 2种模式。

对于2个元胞*l*和*i*连接的情况共有5种组合模式,具体的组合模式以及对应模式下元胞之间的传输流量如表4所示。

表4 2个元胞的组合模式分析结果

Tab.4 Analytical results of combination modes for two cells

| 编号 | 组合模式 | (ρ_i, ρ_l) 满足的条件 | 传输流量 |
|----|------------------|--|-------------------------------------|
| 1 | FF | $0 \leq \rho_l \leq \eta_l \rho_{l0}$ $0 \leq \rho_i \leq \eta_i \rho_{i0}$ | $V_l \rho_l$ |
| 2 | F $\vec{\cap}$ C | $0 \leq \rho_l \leq \eta_l \rho_{l0}$ $\eta_i \rho_{i0} \leq \rho_i \leq \rho_{im} - \frac{V}{\delta_l W_l} \rho_l$ | $V_l \rho_l$ |
| 3 | F $\vec{\cap}$ C | $0 \leq \rho_l \leq \eta_l \rho_{l0}$ $\rho_{im} - \frac{V}{\delta_l W_l} \rho_l \leq \rho_i \leq \rho_{im}$ | $\delta_l W_l (\rho_{im} - \rho_i)$ |
| 4 | CC | $\eta_i \rho_{i0} \leq \rho_i \leq \rho_{im}$ $\eta_l \rho_{l0} \leq \rho_l \leq \rho_{lm}$ | $\delta_l W_l (\rho_{im} - \rho_i)$ |
| 5 | CF | $\eta_i \rho_{i0} \leq \rho_i \leq \rho_{im}$ $0 \leq \rho_l \leq \eta_l \rho_{l0}$ | $\lambda_l C_l$ |

对于3个元胞*l*、*i*和*j*连接的情况共有8种组合模式,根据如表4所示的2个相邻元胞之间传输流量的分析结果,对3个相邻元胞对应的每种模式下元胞*i*的密度更新方程进行推导,具体结果如表5所示。表5中, t_s 是采样间隔, L_l 、 L_i 和 L_j 表示元胞*l*、*i*和*j*的长度。

对于包含*n*个元胞的情况,可以按照上述分析方法推导出所有的组合模式,如图3所示。最终,将异构交通场景下的CTM嵌入动态图混杂自动机,建立异构交通场景下分段仿射线性系统模型,如下所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}_{\sigma(t)} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{\sigma(t)} \mathbf{u}(t) + \mathbf{F}_{\sigma(t)} \\ \mathbf{F}_{\sigma(t)} = \mathbf{g}_{\sigma(t)} \rho_m + \boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma(t)} \eta \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ 是所有元胞的密度向量; $\mathbf{u} = (q_{in}, q_{out})^T$ 是路段的输入,其中 q_{in} 、 q_{out} 分别表示时间间隔 $[t_s, (t+1)t_s]$ 内流入和流出本路段的车辆数; $\mathbf{A}_{\sigma(t)}$ 、 $\mathbf{B}_{\sigma(t)}$ 分别是系统矩阵和输入矩阵; $\mathbf{F}_{\sigma(t)}$ 是由元胞基本参数构成的仿射向量; $\mathbf{g}_{\sigma(t)}$ 是与元胞的最大拥堵密度相关的向量; $\boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma(t)}$ 是与元胞的临界拥堵密度相关的向量。

结合表4和表5的计算结果,对异构交通场景不同组合模式下相应矩阵进行计算,结果如下所示:

表5 3个元胞的组合模态分析结果

Tab.5 Analytical results of combination modes for three cells

| 序号 | 组合模态 | 元胞 <i>i</i> 的动态方程 |
|----|--------------------------|--|
| 1 | FFF | $\rho_i(t+1) = \left(1 - \frac{t_s}{L_i} V_i\right) \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_i} V_i \rho_l(t)$ |
| 2 | $FF \overleftarrow{ } C$ | $\rho_i(t+1) = \left(1 - \frac{t_s}{L_i} V_i\right) \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_i} V_i \rho_l(t)$ |
| 3 | $FF \overleftarrow{ } C$ | $\rho_i(t+1) = \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_i} V_i \rho_l(t) + \frac{t_s}{L_j} \delta_j W_j \rho_j(t) - \frac{t_s}{L_j} \delta_j W_j \rho_m$ |
| 4 | $F \overleftarrow{ } CC$ | $\rho_i(t+1) = \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_i} V_i \rho_l(t) + \frac{t_s}{L_j} \delta_j W_j \rho_j(t) - \frac{t_s}{L_j} \delta_j W_j \rho_m$ |
| 5 | $F \overleftarrow{ } CC$ | $\rho_i(t+1) = \left(1 - \frac{t_s}{L_i} \delta_i W_i\right) \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_j} \delta_j W_j \rho_j(t)$ |
| 6 | CCC | $\rho_i(t+1) = \left(1 - \frac{t_s}{L_i} \delta_i W_i\right) \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_j} \delta_j W_j \rho_j(t)$ |
| 7 | CCF | $\rho_i(t+1) = \left(1 - \frac{t_s}{L_i} \delta_i W_i\right) \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_j} \lambda_j C_j$ |
| 8 | CFF | $\rho_i(t+1) = \left(1 - \frac{t_s}{L_i} V_i\right) \rho_i(t) + \frac{t_s}{L_i} \eta_i V_i \rho_0$ |

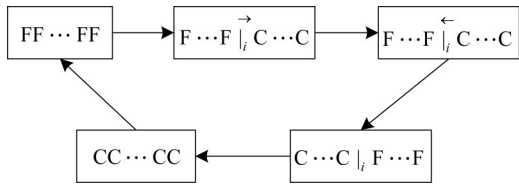


图3 *n*个元胞组合模态演化过程

Fig.3 Evolution process of combination modes for *n* cells

(1) 组合模态 1: $FF \dots FF (0 \leq \rho_k < \eta \rho_0, k = 1, \dots, n)$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \Psi_{n-1} & 0_{(n-1) \times 1} \\ \left[0_{1 \times (n-2)} \quad \frac{t_s}{L} V \right] & 1 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t_s}{L} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} & -1 \end{bmatrix}, g_1 = 0_{n \times 1}, e_1 = 0_{n \times 1}$$

(2) 组合模态 2: $F \dots F \overleftarrow{|} C \dots C (0 \leq \rho_k < \eta \rho_0, k = 1, \dots, i; \rho_0 \leq \rho_l \leq \rho_m, l = i + 1, \dots, n)$

$$A_2 = [A_{21} \quad A_{22} \quad A_{23}]$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} \Psi_i \\ \left[0_{1 \times (i-1)} \quad \frac{t_s}{L} V \right] \\ 0_{(n-i-1) \times i} \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} 0_{i \times 1} \\ 0_{(n-i-1) \times 1} \\ 0_{(n-i-1) \times 1} \end{bmatrix}, A_{23} = \begin{bmatrix} 0_{i \times (n-i-1)} \\ \left[\frac{t_s}{L} \delta W \quad 0_{1 \times (n-i-2)} \right] \\ \Delta_{n-(i+1)} \end{bmatrix}, B_2 = \frac{t_s}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, g_2 =$$

$$\begin{bmatrix} 0_i \\ -\frac{t_s}{L} \delta W \\ 0_{n-(i+2)} \\ \frac{t_s}{L} \delta W \end{bmatrix}, i = 1, \dots, n-1, e_2 = 0_{n \times 1}$$

(3) 组合模态 3: $F \dots F \overleftarrow{|} C \dots C (0 \leq \rho_k < \eta \rho_0, k = 1, \dots, i; \rho_0 \leq \rho_l \leq \rho_m, l = i + 1, \dots, n)$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \Psi_{i-1} & 0_{(i-1) \times 1} & 0_{(i-1) \times (n-i)} \\ \left[0_{1 \times (i-1)} \quad \frac{t_s}{L} V \right] & 1 & \left[\frac{t_s}{L} \delta W \quad 0_{1 \times (n-i-1)} \right] \\ 0_{(n-i) \times (i-1)} & 0_{(n-i) \times 1} & \Delta_{n-i} \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \frac{t_s}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, g_3 = \begin{bmatrix} 0_{i-1} \\ -\frac{t_s}{L} \delta W \\ 0_{n-(i+1)} \\ \frac{t_s}{L} \delta W \end{bmatrix}, i = 1, \dots, n-1, e_3 = 0_{n \times 1}$$

(4) 组合模态 4: $C \dots C \overleftarrow{|} F \dots F (\rho_0 \leq \rho_k \leq \rho_m, k = 1, \dots, i; 0 \leq \rho_l \leq \eta \rho_0, l = i + 1, \dots, n)$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \Delta_i & 0_{i \times 1} & 0_{i \times (n-i-1)} \\ 0_{1 \times i} & 1 - \frac{t_s}{L} V & 0_{1 \times (n-i-1)} \\ 0_{(n-i-1) \times i} & 0_{(n-i-1) \times 1} & \Psi_{n-i-1} \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t_s}{L} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} & -1 \end{bmatrix}, g_5 = \begin{bmatrix} 0_{i-1} \\ \frac{t_s}{L} \delta W \\ 0_{n-i} \end{bmatrix}, e_5 =$$

$$\begin{bmatrix} 0_{i-1} \\ -\frac{t_s}{L}V \\ \frac{t_s}{L}V \\ 0_{n-i-1} \end{bmatrix}, i=2, \dots, n$$

(5) 组合模态 5: $CC \cdots CC (\rho_0 \leq \rho_l \leq \rho_m; l=1, \dots, n)$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & \left[\frac{t_s}{L} \delta W \quad 0_{1 \times (n-2)} \right] \\ 0_{(n-1) \times 1} & \mathbf{\Delta}_{n-1} \end{bmatrix}, B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, g_5 = \begin{bmatrix} -\frac{t_s}{L} \delta W \\ 0_{n-2} \\ \frac{t_s}{L} \delta W \end{bmatrix}, e_5 = 0_{n \times 1}$$

式中: $\Psi_i = I_i + (t_s/L)VF_i, i=1, \dots, n; \mathbf{\Delta}_i = I_i + (t_s/L)\delta W\Phi_i, i=1, \dots, n; I_i$ 表示单位矩阵。 Γ_i 和 Φ_i 的计算式如下所示:

$$\Gamma_i = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{i \times i}, i=1, \dots, n; \Phi_i =$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{i \times i}, i=1, \dots, n$$

与传统的宏观交通流模型相比,自动驾驶车辆的混入使得元胞的通行能力、临界拥堵密度和反向波速发生了变化,进而导致元胞的密度更新方程发生了变化,最终体现在式(7)中矩阵 $A_{\sigma(t)}, B_{\sigma(t)}$ 和 $F_{\sigma(t)}$ 的改变。因此,将表4和表5中相应的结果代入

式(7)中,可计算出不同自动驾驶车辆混入率下对应宏观交通流模型表达式。

3 仿真实例分析

3.1 仿真环境及参数设定

通过对比只有人工驾驶车辆和有自动驾驶车辆混入2种情况下元胞相关参数的变化,验证本建模方法的可行性。然后,利用所建立的模型对异构交通场景下交通流传输进行仿真,实现对交通流密度的预测。

OpenModelica 是基于 Modelica 语言的完全开源的宏观仿真软件^[20-22],基于 Modelica 语言已经开发了交通领域相关的程序库,实现了基于元胞传输模型的传统交通网络建模。因此,选取 OpenModelica 软件对所建立的异构交通场景下宏观交通流模型进行验证。建立如图4所示的包含7个元胞、1个入口匝道的高速路。元胞1和8是源元胞,用于提供交通需求;元胞7是阱元胞,表示路网中车辆的终点,可容纳无限辆车;元胞2至6是单向四车道并具有相同基本参数,长度为1000 m,最大限速为120 km·h⁻¹,通行能力为2016 辆·h⁻¹,临界拥堵密度为16.8 辆·km⁻¹,反向波速为17 km·h⁻¹,最大拥堵密度为135 辆·km⁻¹。

设定以下3种自由流状态下的仿真场景:

(1)保持元胞的所有参数均不变,模拟只含有人工驾驶车辆的场景。

(2)保持元胞的最大限速和最大拥堵密度不变,分别将通行能力、临界拥堵密度和反向波速增加1.5倍,同时在源元胞1中增加交通需求,模拟自动驾驶车辆混入的场景。

(3)在场景(2)的基础上,通过调整源元胞1和8中的交通需求,模拟异构交通场景下元胞组合模态由全自由流到全拥堵流的过程,实现交通流密度的预测。

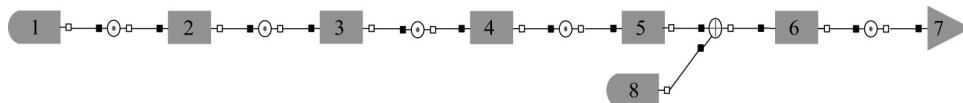


图4 8个元胞结构

Fig.4 Structure of eight cells

3.2 仿真结果分析

分别对场景(1)和(2)进行仿真,并随机选取元胞2和元胞5的仿真结果进行分析。图5是自动驾

驶车辆混入前后通过元胞2的车辆数的对比结果。图6是自动驾驶车辆混入前后通过元胞5的车辆数的对比结果。从仿真结果可以看出:在保证交通需

求充足的前提下,通过元胞的车辆数与元胞的通行能力成正比,进而说明该模型可以模拟元胞的通行能力随着自动驾驶车辆混入率的增加而增大的规律;自动驾驶车辆混入后,同时增加交通需求,元胞仍未出现拥堵,这也可说明所建立的模型可以模拟元胞临界拥堵密度随着自动驾驶车辆混入率的增加而增大的规律。因此,所提出的方法可用于异构场景下的宏观交通流建模。

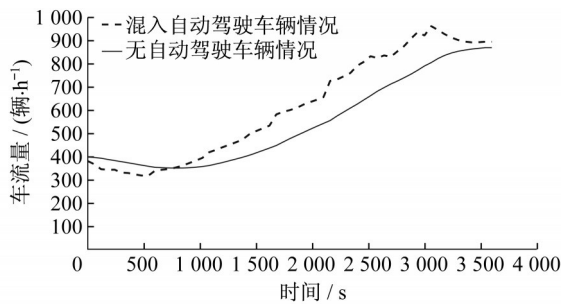


图5 元胞2的仿真结果对比

Fig.5 Comparison of simulation results of Cell 2

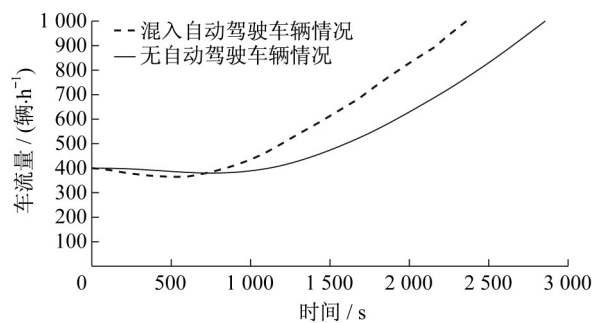


图6 元胞5的仿真结果对比

Fig.6 Comparison of simulation results of Cell 5

第3个场景中,自动驾驶车辆混入率为80%情况下,通过调整源元胞1和8的交通需求,模拟元胞2、3、4、5的组合模态从全自由流(FFFF)到全拥堵流(CCCC)的变化过程,进而实现利用所建模型对元胞交通流密度的预测。元胞的初始密度取 $15 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$,相应元胞密度的演化结果如图7所示。

通过对元胞2、3、4、5密度变化曲线的分析得到以下结论:

(1)4个元胞以初始值 $15 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$ 自由流状态开始,随着元胞间的流量传输,元胞5的密度最先达到临界拥堵密度,拥堵依次向上游元胞4、3、2传递,最后4个元胞都达到拥堵状态,此过程与所建立的模型中元胞组合模态的演变过程是一致的。

(2)此实验中交通流密度的演变是通过所建立的模型推演得到的,因此可借助所建立的模型实现

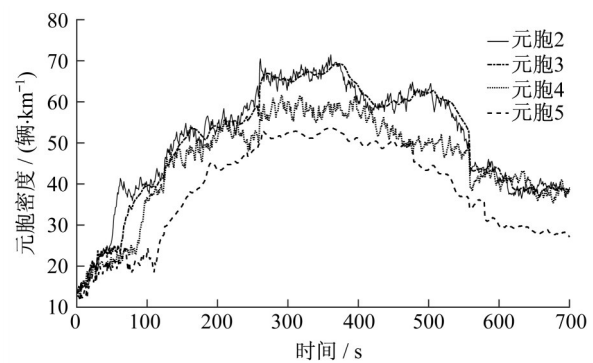


图7 元胞2,3,4和5的交通流密度仿真结果

Fig.7 Simulation results of traffic flow densities for Cell 2,3,4 and 5

异构交通场景下的交通状态预测。

4 结语

通过对人工驾驶车辆和自动驾驶车辆构成的异构交通场景下基本图的分析,得到了在保证元胞最大限速不变的情况下,随着自动驾驶车辆混入率的增加,元胞的通行能力、反向波速和临界拥堵密度等参数随之增加的结论,并计算了元胞基本参数与自动驾驶车辆混入率之间的量化关系。基于此结果,对传统CTM进行了改进,计算了不同元胞组合模态下对应的矩阵,建立了宏观交通流的分段仿射系统模型。最后,通过OpenModelica开源软件搭建了仿真平台,对所建立的模型进行了仿真分析。通过在仿真中改变元胞的通行能力来模拟有自动驾驶车辆混入的情况,在保证交通需求充足的前提下,得出了通过元胞的车辆数与元胞的通行能力成正比的结论,进而证明了该模型可以对元胞的通行能力随着自动驾驶车辆混入率的增加而增大这一规律进行重现。进一步,在给定元胞初始密度的情况下,动态调整交通需求并利用所建立的模型模拟元胞组合模态的变化过程,实现了异构交通场景下元胞交通流密度的预测。

作者贡献说明:

郭宇奇:相关概念讨论,数据分析及论文撰写。

侯德藻:总体架构设计及论文语言组织。

李一丁:实验设计及数据处理。

衣倩:论文格式修改及结果分析。

黄烨然:论文审阅及架构讨论。

参考文献:

- [1] 秦严严. 智能网联环境下异质交通流特性分析方法研究[D].

- 南京:东南大学,2019.
- QIN Yanyan. Study on analytical method of heterogeneous traffic flow characteristics under connected and autonomous environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [2] 秦严严,王昊,王炜. 智能网联环境下的混合交通流LWR模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11):151.
- QIN Yanyan, WANG Hao, WANG Wei. LWR model for mixed traffic flow in connected and autonomous vehicular environments [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11):151.
- [3] NGODUY D. Application of gas-kinetic theory to modelling mixed traffic of manual and ACC vehicles [J]. Transportmetrica, 2012, 8(1):43.
- [4] FAN S, HERTY M, SEIBOLD B. Comparative model accuracy of a data-fitted generalized Aw-Rascle-Zhang model [J]. Networks & Heterogeneous Media, 2014, 9(2):239.
- [5] WANG R, LI Y, WORK D B. Comparing traffic state estimators for mixed human and automated traffic flows [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2017, 78: 95.
- [6] DAGANZO C F. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 1994, 28(4): 269.
- [7] DAGANZO C F. The cell transmission model, Part II : network traffic [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 1995, 29(2): 79.
- [8] TIAPRASERT K, ZHANG Y, ASWAKUL C, *et al.* Closed-form multiclass cell transmission model enhanced with overtaking, lane-changing, and first-in first-out properties [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2017, 85: 86.
- [9] 李志伟. 智能网联车辆与普通车辆混合车流交通状态估计方法研究[D]. 南京:东南大学,2017.
- LI Zhiwei. Study on methods of traffic estimation under connected and autonomous vehicles and manual vehicles mixed traffic flow[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [10] LEVIN M W, BOYLES S D. A cell transmission model for dynamic lane reversal with autonomous vehicles [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2016,68:126.
- [11] LEVIN M W, BOYLES S D, *et al.* A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2016, 62:103.
- [12] QIN Y, WANG H. Cell transmission model for mixed traffic flow with connected and autonomous vehicles [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019, 145(5): 04019014.
- [13] 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.
- 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.
- [14] HARARY F, GUPTA G. Dynamic graph models [J]. Mathematical & Computer Modelling, 1997, 25(7):79.
- [15] LUNZE J, LAMNABHI-LAGARRIGUE F. Handbook of hybrid systems control: theory, tools, applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [16] HENZINGER T A. Verification of digital and hybrid systems [M]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2000.
- [17] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1805.
- [18] CHEN Y Z, GUO Y Q, WANG Y. Modeling and density estimation of an urban freeway network based on dynamic graph hybrid automata[J]. Sensors, 2017, 17(4):716.
- [19] GUO Y. Dynamic-model-based switched proportional-integral state observer design and traffic density estimation for urban freeway[J]. European Journal of Control, 2018, 44:103.
- [20] FRITZSON P, MODELICA. A cyber-physical modeling language and the OpenModelica environment [C]// Proceedings of the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011: 1648-1653.
- [21] DEMPSEY M. Dymola for multi-engineering modelling and simulation [C]// Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006: 1-6.
- [22] 张二青. 基于Modelica语言的交通信息物理系统建模分析与仿真实现[D]. 北京:北京工业大学,2015.
- ZHANG Erqing. Transportation cyber physical system modeling and simulation based on Modelica [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.