

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230220002

文章编号:1674-599X(2026)02-0098-10

引用格式:况爱武,谷文雄,张生.自动驾驶技术过渡期内的道路阻抗函数研究[J].交通科学与工程,2026,42(2):98-107.

Citation: KUANG Aiwu, GU Wenxiong, ZHANG Sheng. Road impedance function during transition period of autonomous driving technology[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 98-107.

自动驾驶技术过渡期内的道路阻抗函数研究

况爱武,谷文雄,张生

(长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】解决未来自动驾驶环境下道路基础设施的规划与设计问题,提出一种适用于网联自动驾驶环境的混合交通流道路阻抗函数模型。【方法】首先,分析传统道路阻抗函数的优缺点,并对其进行改进;然后,在考虑不同类型车辆驾驶行为差异及自动驾驶车辆功能退化特性的基础上,建立网联环境下的混合交通流基本图模型,提出采用通行能力影响系数描述通行能力与自动驾驶车辆渗透率之间的关系;最后,推导混合交通流道路阻抗函数模型的基本形式,并通过仿真试验验证其有效性。【结果】1) 引入自动驾驶车辆可有效提高道路通行能力,完全由自动驾驶车辆构成的交通流的通行能力是传统人工驾驶车辆交通流的2倍以上;2) 混合交通流路段的通行能力随自动驾驶车辆渗透率的增加而增大,二者呈二次函数关系;3) 道路阻抗函数可有效描述路段行程时间随路段流量及自动驾驶车辆渗透率的变化规律。【结论】所提网联自动驾驶环境下混合交通流道路阻抗函数模型可有效描述路段行程时间的变化规律。

关键词:智能交通;道路阻抗函数;基本图模型;混合交通流;车联网

中图分类号:U491

文献标志码:A

Road impedance function during transition period of autonomous driving technology

KUANG Aiwu, GU Wenxiong, ZHANG Sheng

(School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] To solve the planning and design problem of road infrastructure in the future autonomous driving environment, this paper proposed a road impedance function model for mixed traffic flow applicable to the connected and autonomous driving environment. [Methods] First, the pros and cons of the traditional road impedance function were analyzed, and improvements were made. Second, the fundamental diagram model for mixed traffic flow in the connected and autonomous driving environment was built on the basis of driving behavior differences of different types of vehicles and the functional degradation of autonomous vehicles. The traffic capacity impact coefficient was applied to describe the relationship between the traffic capacity and the penetration rate of autonomous vehicles. Finally, the basic form of the mixed traffic flow impedance function was derived and verified by simulation. [Findings] 1) The road traffic capacity can be improved by introducing autonomous vehicles, and traffic flow capacity composed entirely of autonomous vehicles is more than twice that of

收稿日期:2023-02-20

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(20A023、20A009);国家自然科学基金项目(51978082);湖南省交通科技进步与创新项目(202140);长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJ CX202111)

通信作者:况爱武(1979—),男,副教授,主要从事交通运输规划与管理方面的研究工作。E-mail:jxgakaw@126.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

traditional human-driven vehicles. 2) With an increase in the penetration rate of autonomous vehicles, the traffic capacity of mixed traffic flow increases, and they have a quadratic function relationship. 3) The road impedance function can effectively describe the variation of road travel time with traffic flow and penetration rate of autonomous vehicles. [Conclusions] The proposed mixed traffic flow road impedance function model under the connected and autonomous driving environment can effectively describe the variation of travel time on a road section.

Key words: intelligent transportation; road impedance function; fundamental diagram model; mixed traffic flow; Internet of Vehicles

随着社会经济的快速发展与城市化进程持续加快,机动车保有量逐年攀升,交通拥堵加剧、交通事故频发、交通污染严重等问题日益突出。而5G、自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)、协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC)以及智能车载感知等技术日趋成熟,自动驾驶技术也被各国政府与学界视作解决交通问题的重要突破口^[1-2]。网联自动驾驶车辆(connected and autonomous vehicle, CAV)作为新型交通工具,依托搭载的先进车载设备,融合现代通信与网络技术,可实现车辆自动驾驶,以及车、路、人、云之间的智能信息交互^[3]。相较于传统人工驾驶车辆(human-driven vehicle, HDV),自动驾驶技术能够显著提升交通安全水平、提高道路通行效率、缓解交通拥堵并降低交通污染。

然而,自动驾驶技术的全面落地应用是一个较为漫长的过程。在过渡期内,道路上将长期存在CAV与HDV混行的状态^[4-5]。随着自动驾驶车辆(automated vehicle, AV)市场渗透率持续提升,后续道路规划与设计必须充分考虑自动驾驶车辆普及所带来的影响。道路阻抗反映了路段行程时间(或费用、距离等)与交通负荷之间的关系,会影响出行者的路径选择,是进行交通分配与路网规划的重要基础^[6]。随着自动驾驶技术的广泛应用,道路通行能力、交通流状态、车辆路径选择行为等均会发生改变,传统道路阻抗函数在网联自动驾驶环境下将不再适用。因此,亟需研究适用于网联自动驾驶环境的道路阻抗函数。

众多研究表明,自动驾驶车辆可显著提升道路通行效率与通行能力。秦严严等^[7]构建了协同自适应巡航跟驰模型,分析了不同CACC车辆混入比例下混合交通流的通行能力,结果显示当CACC车辆占比达到100%时,道路通行能力可提升2.33倍。常鑫等^[8]建立了网联自动驾驶环境中高速公路基本

路段的基本图模型与车辆换算系数计算方法,并开展了参数敏感性分析,发现自动驾驶车辆渗透率的提升有助于提高道路通行能力。为探究CAV的引入对道路阻抗函数的影响,CHEN等^[9]通过对CAV与HDV两类车型的流量进行叠加,构建了对称形式的路段行程时间函数。XIAO等^[10]研究了低渗透率场景下将高乘载车道改为自动驾驶车辆专用车道对行程时间的影响,但未推导混合交通流条件下阻抗函数的具体形式。MADADI等^[11]采用车辆换算系数描述不同车型对道路通行能力的影响,并提出了修正后的道路阻抗函数。NGODUY等^[12]分析了不同渗透率下自动驾驶车辆对通行能力的影响,推导了混行状态下的交通流基本图。李淑庆等^[13]构建了混行状态下的路段阻抗函数,并在此基础上建立了城市道路均衡配流模型,但未对不同车型的驾驶行为差异开展具体分析。姚志洪等^[14]通过数值分析,推导了考虑CAV影响的混合交通流路段阻抗函数模型,但仍沿用美国公共道路局(Bureau of Public Roads, BPR)路段阻抗函数的默认参数。

综合以上分析可知,现有研究仍存在以下不足:1)早期部分研究忽略了自动驾驶车辆与传统车辆的驾驶特性差异,简单将两类车流量叠加后直接代入传统阻抗函数模型;2)部分研究虽分析了自动驾驶车辆对路段行程时间的影响,但未考虑自动驾驶车辆存在功能退化的情形;3)部分研究主要聚焦于分析自动驾驶车辆对道路通行能力与通行延误的影响,未能进一步推导适用于混行状态的道路阻抗函数。

因此,本文通过分析各类车辆的微观驾驶行为,推导了不同渗透率下的混合交通流基本图模型;借助交通仿真技术研究网联自动驾驶环境中CAV与HDV混行时的交通流特性,并在此基础上构建适用于网联自动驾驶环境的混合交通流道路阻抗函数模型。

1 道路阻抗函数模型

1.1 传统道路阻抗函数模型

目前应用较为广泛的是美国公共道路局1964年提出的BPR函数^[15],经典BPR函数的表达式为:

$$T = T_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{Q}{C} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

式中: T 为路段平均行程时间; T_0 为自由流行程时间; Q 为路段流量; C 为路段通行能力; α 、 β 为模型参数,分别取值0.15和4。

BPR函数形式简单、计算便捷,能够在一定程度上反映路段行程时间与交通流量的变化关系。但在实际交通流分配中,该函数与真实道路运行状况仍存在一定偏差,其适用性主要存在以下问题:

1) 该函数由大量数据回归分析得到,形式上为行程时间随流量变化的非线性单调递增函数。而在实际交通流中,流量与通行能力之比不会超过1,因此该函数无法反映随交通流密度增大道路交通流量先增后减(路段由畅通向拥挤演变)的变化过程。

2) 自动驾驶车辆的引入使得原有默认参数难以准确反映网联自动驾驶环境下混合交通流路段的行程时间变化规律,有必要对该模型进行修正。

3) 对于BPR函数,采用默认参数时,路段达到临界饱和状态(即流量与通行能力之比为1)时的行程时间仅为自由流行程时间的1.15倍,对道路交通流量的约束不足。

1.2 改进道路阻抗函数模型

综上,传统BPR函数模型虽在国内外交通规划领域得到广泛应用,但该模型及其默认参数在我国实际工程应用中仍存在一定缺陷。对此,国内诸多学者已开展相关修正研究。王素欣等^[16]针对BPR函数无法体现流量随拥堵程度先增后减的现象,提出按交通状态修正BPR函数的思路,但未开展相应的数据验证。姜桂艳等^[17]提出采用累积流量替代路阻函数中的交通量,并开展了相关仿真试验。

对于给定路段,其交通量受路段通行能力的约束。当输入流量小于通行能力时,可认为路段驶入流量与驶出流量均等于输入流量;而当输入流量接近或超过通行能力时,受通行能力限制,驶出流量将小于输入流量,导致平均车速降低、密度增大、路段实际流量减小。为准确刻画行程时间随交通流量的变化规律,本文沿用王素欣等^[16]的思路,采用

改进流量与通行能力之比替代原BPR函数中的流量与通行能力之比。改进流量 Q_c 为:

$$Q_c = \begin{cases} Q & v \leq v_m \\ 2C - Q & v > v_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 为路段空间平均车速; v_m 为路段达到通行能力时的空间平均车速。

将改进流量 Q_c 代入BPR函数中后,得到改进后的路段阻抗函数:

$$T = T_0 \left[1 + \alpha' \left(\frac{Q_c}{C} \right)^{\beta'} \right] \quad (3)$$

式中: α' 、 β' 为模型参数,分别取值0.99和5.42。

由此可知,通行能力是道路阻抗函数的重要组成部分。随着自动驾驶车辆投入应用,道路通行能力将发生相应改变。因此,本文对CAV与HDV的微观驾驶特性进行分析,研究自动驾驶车辆对路段通行能力的影响,并在此基础上对所构建的混合交通流路段阻抗函数模型进行推导与标定。

2 混合交通流通行能力分析

2.1 交通流组成

在过渡期内,道路交通流由CAV与HDV共同构成。当CAV跟驰HDV时,由于前车未配备网联通信设备,无法实现信息交互,CAV将退化为AV^[18]。因此,本文研究的混合交通流中实际存在HDV、CAV和AV三种驾驶模式的车辆,依据车辆位置与驾驶特性差异,可形成四种跟驰模式^[19]:CAV跟驰CAV时,车头时距记为 T_{cc} ;CAV跟驰HDV时,车头时距记为 T_{ch} ;HDV跟驰CAV时,车头时距记为 T_{hc} ;HDV跟驰HDV时,车头时距记为 T_{hh} 。混合交通流跟驰关系如图1所示。

显然,当该混合交通流达到平衡状态时,有 $T_{hh} = T_{hc} > T_{ch} > T_{cc}$ 。由于 $T_{hh} = T_{hc}$,为便于表述,将其统一记为 T_h 。

2.2 跟驰模型

在混合交通流中,CAV、AV与HDV的驾驶行为特性存在明显差异。为提高分析结果的可靠性,本文对CAV和AV分别采用美国加州大学伯克利分校PATH实验室实测标定的CACC模型与ACC模型^[20-21];对HDV则采用TREIBER等^[22]提出的智能驾驶员模型(intelligent driver model, IDM)。

1) CACC模型及ACC模型。

美国加州大学伯克利分校PATH实验室通过分

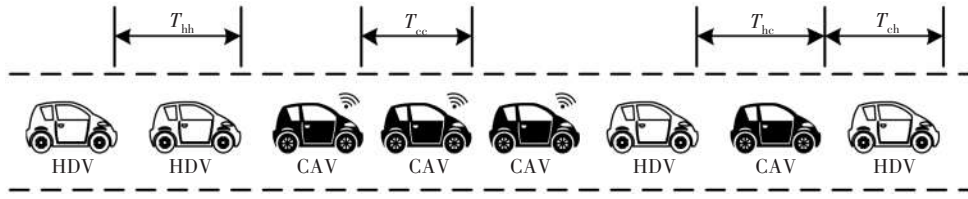


图1 混合交通流车辆分布示意图

Fig. 1 Vehicle distribution in mixed traffic flow

析搭载CACC与ACC控制系统的实车行驶轨迹数据,提出了CACC跟驰模型与ACC跟驰模型并完成了参数标定。这两种基于实车驾驶数据构建的模型,已在自动驾驶及相关领域得到广泛应用。

ACC跟驰模型为:

$$\dot{v}_n(t) = k_1(h_n(t) - l - s_0 - t_a v_n(t)) + k_2 \Delta v_n(t) \quad (4)$$

式中: $v_n(t)$ 和 $\dot{v}_n(t)$ 分别为车辆 n 在 t 时刻的速度及加速度; $\Delta v_n(t)$ 为前后两车在 t 时刻的速度差; $h_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时刻的车头间距; k_1 、 k_2 分别为车间距离误差控制参数及速度误差控制参数,取值分别为0.23和0.07; l 和 s_0 分别为车长及最小安全停车间距,取值分别为5 m和2 m; t_a 为ACC模型期望安全车头时距,取值为1.1 s。

CACC跟驰模型为:

$$\begin{cases} v_n(t + \Delta t) = v_n(t) + k_p e_n(t) + k_d \dot{e}_n(t) \\ e_n(t) = h_n(t) - l - s_0 - t_c v_n(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: Δt 为CACC系统的控制步长; $v_n(t + \Delta t)$ 为车辆 n 在 $t + \Delta t$ 时刻的速度; $e_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时刻的实际车间距离和期望车间距离的差值; $\dot{e}_n(t)$ 为前者对时间 t 的微分; k_p 和 k_d 分别为CACC模型车间距离误差控制参数及车间距离误差微分控制参数,取值分别为0.45和0.25; t_c 为CACC模型期望安全车头时距,取值为0.6 s。

2) IDM模型。

IDM模型能够较好地描述驾驶员实时、准确获取自身及周边车辆状态信息的过程,因此常被用作人工驾驶车辆的跟驰模型,具体形式为:

$$\dot{v}_n(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_n(t)}{v_0} \right)^\delta - \frac{\left(s_0 + v_n(t)t_h + \frac{v_n(t)\Delta v_n(t)}{2\sqrt{ab}} \right)^2}{s_n(t)} \right] \quad (6)$$

式中: a 和 b 分别为车辆最大加速度和舒适减速度,

取值分别为 1 m/s^2 和 2 m/s^2 ; v_0 为自由流速度,取值为 33.3 m/s ; δ 为加速度指数,取值为4; $s_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时刻的车头间距减去车长; t_h 为IDM模型期望安全车头时距,取值为 1.5 s 。

2.3 混合交通流基本图模型

通过分析车辆微观驾驶模型,可建立异质交通流基本图模型。该模型能够表征异质交通流流量、密度与速度的关联关系,同时求解交通流最大通行能力。当交通流达到平衡态时,交通流内各车辆速度均为平衡态速度 v_e ,加速度为 0 m/s^2 ,前后车相对速度差为 0 m/s ,由此可得:

$$\begin{cases} v_n(t) = v_e \\ \dot{v}_n(t) = 0 \\ \Delta v_n(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入IDM模型、ACC模型及CACC模型,可得平衡态下不同车型对应的车头时距:

$$T_h = \frac{\frac{s_0}{v_e} + t_h}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{v_0} \right)^4}} + \frac{l}{v_e} \quad (8)$$

$$T_{ch} = t_a + \frac{l + s_0}{v_e} \quad (9)$$

$$T_{cc} = t_c + \frac{l + s_0}{v_e} \quad (10)$$

此时,平衡状态下混合交通流中的车辆具有相同的平衡态速度 v_e 。以单条混行车道为例,设道路上CAV渗透率为 p ,则HDV的分布概率为 $1-p$ 。根据交通流密度的定义,该混合交通流的密度为其平衡态下平均车头间距的倒数,即:

$$\begin{cases} H_h = T_h v_e \\ H_{ch} = T_{ch} v_e \\ H_{cc} = T_{cc} v_e \end{cases} \quad (11)$$

$$K = \frac{1}{p^2 H_{cc} + p(1-p)H_{ch} + (1-p)H_h} \quad (12)$$

式中: H_h 、 H_{ch} 、 H_{cc} 分别为不同跟驰状态下的平衡态车头间距; K 为该车道的交通流密度。

结合流量、密度与速度之间的相互关系,可得到混合交通流的基本图模型表达式:

$$\begin{cases} K = \frac{1}{p^2(t_c v_e + l + s_0) + p(1-p)(t_a v_e + l + s_0) + (1-p) \left[\frac{s_0 + t_h v_e}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{v_0}\right)^4}} + l \right]} \\ Q = K v_e \end{cases} \quad (13)$$

将平衡态速度从0.0 m/s 逐步增大至33.3 m/s, 即可得到不同渗透率下的混合交通流基本图。由于PATH实验室标定的CACC跟驰模型为线性模型, 当道路上全部为CAV($p=1$)时, 其流量-密度基本图仅存在拥堵态曲线, 缺少自由流态曲线。为此, 本文假定CACC车辆在自由流状态下可始终以自由流速度行驶, 并在交通流基本图中补充自由流态曲线, 最终得到不同渗透率下的混合交通流基本图模型, 如图2所示。

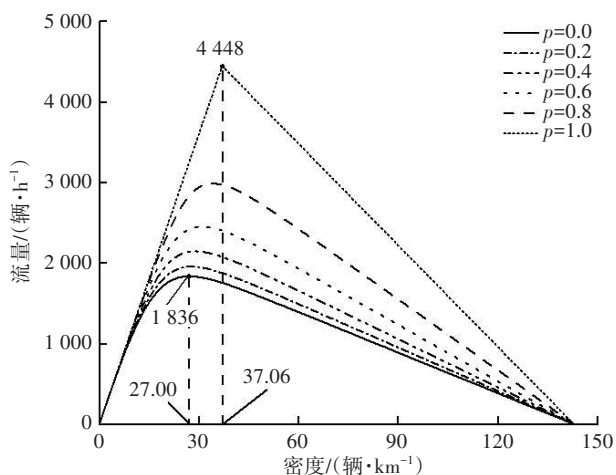


图2 混合交通流基本图模型

Fig. 2 Fundamental diagram model of mixed traffic flow

由图2可知, 随着渗透率提高, 混合交通流通行能力逐渐增大。当渗透率为0.0时, 纯人工驾驶交通流的通行能力为1836辆/h, 对应平衡态密度为27.00辆/km; 当渗透率为1.0时, 纯自动驾驶交通流的通行能力达到4448辆/h, 对应平衡态密度为37.06辆/km, 其通行能力为纯人工驾驶交通流的2.42倍, 平衡态密度提升至原来的1.37倍。

2.4 混合交通流通行能力

通过对混合交通流基本图的分析, 可得到自动驾驶车辆渗透率对单车道混合交通流理论通行能力的影响规律, 如图3所示。

由图3可知, 混合交通流的通行能力 C_p 与渗透率相关。引入通行能力影响系数 γ_p , 用以表征自动驾驶车辆的引入对通行能力的提升效果。纯人工

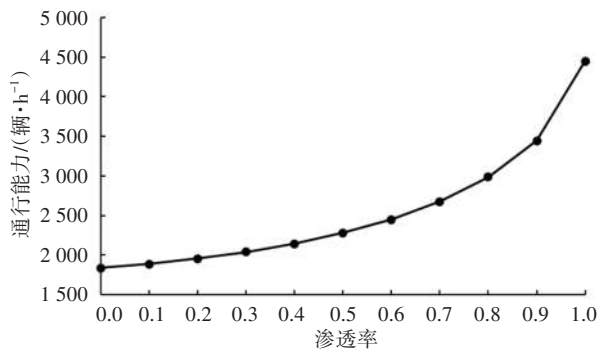


图3 混合交通流理论通行能力

Fig. 3 Theoretical traffic capacity of mixed traffic flow

驾驶交通流的单车道通行能力记为 C_0 。单车道混合交通流通行能力 C_p 可表示为:

$$C_p = C_0 \gamma_p \quad (14)$$

根据通行能力影响系数的定义, 可得到通行能力影响系数与渗透率之间的关系, 如图4所示。由图4可知, 通行能力影响系数与渗透率之间呈一元二次函数关系, 该规律在SHLADOVER等^[23]及PATEL等^[24]的研究中也得到了类似验证。因此, 本文采用一元二次函数对通行能力影响系数随渗透率的变化关系进行拟合, 具体表达式为:

$$\gamma_p = \lambda_1 p^2 + \lambda_2 p + \lambda_3 \quad (15)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为待定系数。

通过对基本图模型得到的理论通行能力进行拟合, 求得 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为1.836、-0.648和1.075, 拟合曲线的决定系数为0.966。

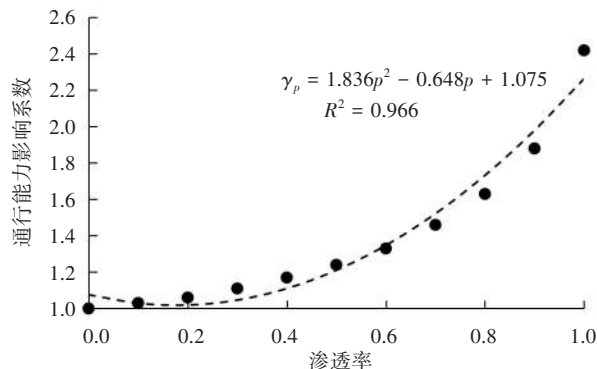


图4 通行能力影响系数与渗透率之间的关系

Fig. 4 Relationship between traffic capacity impact coefficient and penetration rate

尽管通行能力影响系数与渗透率的关系也可采用立方函数、指数函数等形式拟合,但此类函数形式更为复杂,易出现过拟合现象,进而影响交通流分配问题解的存在性与唯一性。因此,实际应用中建议采用二次函数进行拟合。

3 混合交通流路段阻抗函数模型

3.1 混合交通流路段阻抗函数模型

将前文分析得到的通行能力代入所构建的阻抗函数模型,得到网联自动驾驶环境下混合交通流路段阻抗函数模型,具体形式为:

$$T = T_0 \left\{ 1 + \alpha' \left[\frac{Q_c}{(\lambda_1 p^2 + \lambda_2 p + \lambda_3) N C_0} \right]^{\beta'} \right\} \quad (16)$$

式中: N 为该路段单向车道数。

可以看到,该模型能更好地描述行程时间随路段拥挤状态的变化规律,并可反映自动驾驶车辆渗透率对路段行程时间的影响。

3.2 模型验证

由于自动驾驶技术仍在不断发展完善,包含自动驾驶车辆的混合交通流实测试验目前尚难以在现实中开展;而计算机微观交通仿真技术通过对车流与道路的数字化建模,能够较好地反映交通流运行特征。因此,本文采用计算机仿真技术模拟混合交通流,计算相关参数并验证模型的有效性。

仿真基于 Python 语言与 SUMO 仿真软件实现,测试路段为单向双车道,全长 2 km。依据自动驾驶车辆渗透率随机生成并投放自动驾驶车辆与人工驾驶车辆,仿真采用的驾驶模型及参数与基本图模型推导所用参数保持一致。仿真以 5 min 为间隔采集流量、速度、密度等数据;总时长设为 4 200 s,其中前 600 s 进行系统预热,后 3 600 s 进行数据分析;仿真步长为 0.1 s;渗透率设为 0.0~1.0,以 0.1 为间隔逐级变化,每个渗透率下均独立运行 10 次。

3.3 结果分析

1) 基本图模型。

通过仿真得到的不同渗透率下交通流量-密度散点图如图 5 所示。由图 5 可知,随着渗透率提升,路段最大通行流量逐步增大,这表明自动驾驶车辆的加入可有效提高道路通行效率,改善道路运行状态。

基本图模型理论值与仿真结果如图 6 所示。由

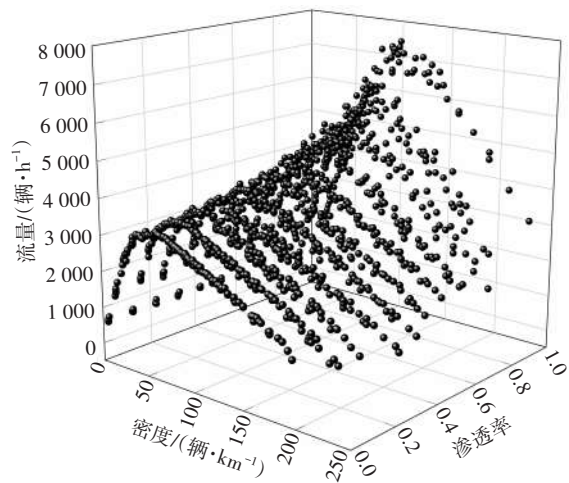


图5 交通流量-密度散点图

Fig. 5 Scatter plot of traffic flow-density

图 6 可知,仿真结果(散点)的分布与变化趋势同基本图模型理论值(虚线)基本一致,这表明本文所构建的基本图模型能够较好地描述网联自动驾驶环境下的混合交通流特性。

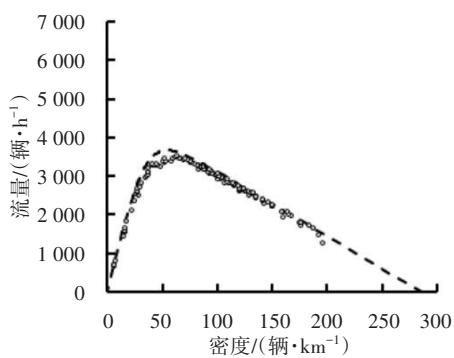
2) 路段通行能力。

仿真得到的路段通行能力与基本图模型理论值对比结果如图 7 所示。由图 7 可知,当渗透率低于 0.3 时,自动驾驶车辆的加入对道路通行能力的提升效果并不显著;随着渗透率不断提高,路段通行能力逐步增大;当渗透率达到 1.0 时,仿真路段通行能力可达 7 400 辆/h 以上,是渗透率为 0.0 时的 2.11 倍。从通行能力影响系数的变化规律来看,仿真结果与理论值基本吻合,平均绝对百分比误差小于 5%,这表明采用通行能力影响系数能够较好地描述混合交通流通行能力随渗透率的变化趋势。

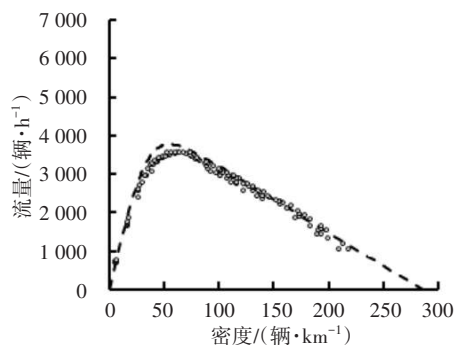
同样对仿真结果的通行能力影响系数变化趋势进行拟合,得到的拟合曲线如图 8 所示。拟合系数分别为 1.395、-0.407 和 1.046,决定系数为 0.985,拟合效果良好。

3) 路段行程时间。

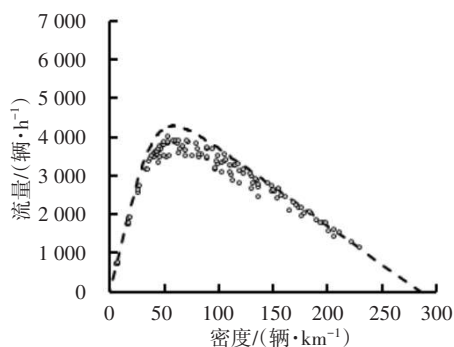
路段行程时间是评价城市道路交通运行状况的重要指标^[25]。为研究不同流量与渗透率条件下路段平均行程时间的变化规律,将路段平均行程时间与自由流程程时间的比值定义为拥堵指数,拥堵指数仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知,在流量未达到通行能力前,路段平均行程时间随流量增大缓慢增加;随着拥挤程度加剧,路段密度逐步上升,路段通行流量逐渐减小,行程时间则显著增加。而随着自动驾驶车辆渗透率提高,近拥堵状态下的路段



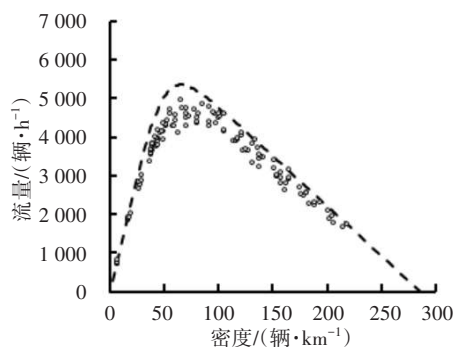
(a) $p=0.0$



(b) $p=0.1$



(c) $p=0.5$



(d) $p=0.7$

图6 基本图模型理论值与仿真结果

Fig. 6 Theoretical values and simulation results of fundamental diagram model

平均行程时间有所降低,这表明引入自动驾驶车辆可有效缩短路段行程时间,缓解交通拥堵。

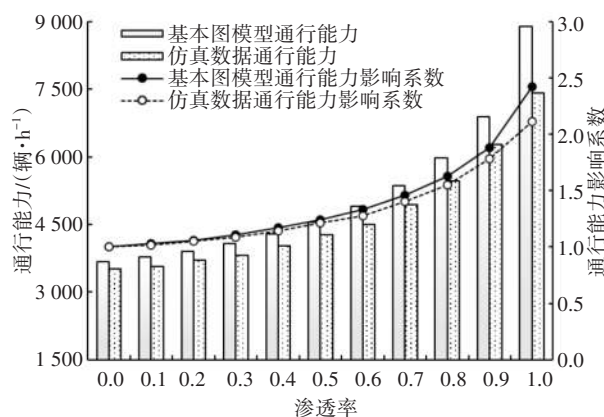


图7 路段通行能力对比

Fig. 7 Comparison of road traffic capacity

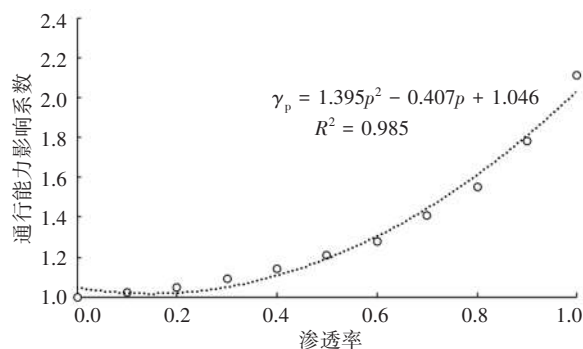


图8 通行能力影响系数拟合

Fig. 8 Fitting of traffic capacity impact coefficients

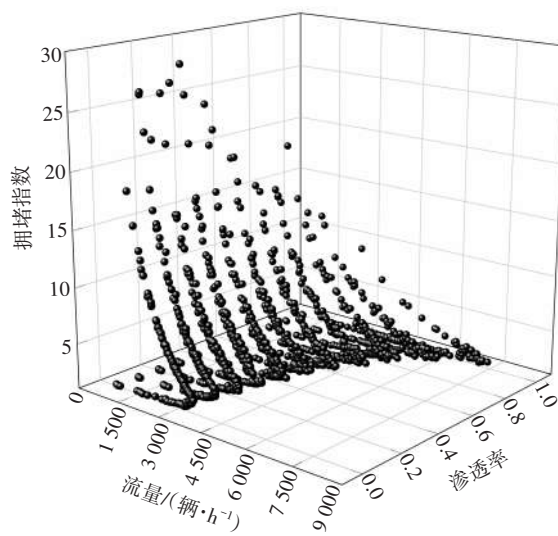


图9 拥堵指数仿真结果

Fig. 9 Simulation results of congestion indexes

基于仿真结果,采用最小二乘法进行参数拟合,得到混合交通流路段阻抗函数模型的具体形式为:

$$T =$$

$$T_0 \left\{ 1 + 0.99 \times \left[\frac{Q_c}{(1.395p^2 - 0.407p + 1.046) \times 2C_0} \right]^{5.42} \right\} \quad (17)$$

式(17)中, C_0 取值为1 758.44 辆/h, T_0 取值为60 s。

不同流量与渗透率条件下,仿真路段拥堵指数的变化规律及其拟合曲面如图10所示。由图10可知,该模型能够较好地描述仿真路段的平均行程时间变化特征。当路段处于临界饱和状态时,模型计算得到的路段平均行程时间约为自由流行驶状态下的2倍,在实际应用中可降低流量溢出的可能性。

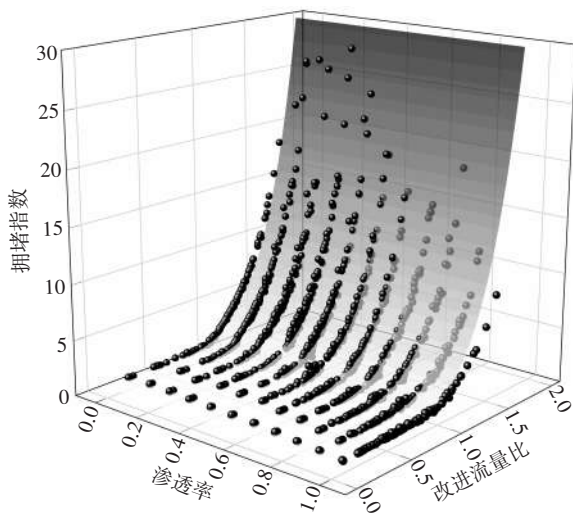


图10 拥堵指数拟合效果图

Fig. 10 Fitting effect of congestion indexes

4 结论

本文通过分析网联自动驾驶环境下不同类型车辆的行驶特性,推导了不同渗透率下的混合交通流基本图模型;研究了混合交通流通行能力随渗透率的变化规律;并在改进传统BPR函数模型的基础上,构建了适用于网联自动驾驶环境的混合交通流路段阻抗函数模型。结论如下:

1) 本文考虑了不同跟驰模型及自动驾驶车辆功能退化对混合交通流基本图的影响,仿真结果表明,本文所推导的混合交通流基本图模型与仿真结果基本吻合,验证了驾驶特性分析与基本图模型推导的正确性与有效性。

2) 自动驾驶车辆的引入可有效改善道路通行状况。当渗透率低于0.3时,其对道路通行能力的提升效果并不显著;随着渗透率不断提高,路段通

行能力逐步增大;当渗透率为1.0时,纯自动驾驶交通流的通行能力较纯人工驾驶交通流的提升2倍以上。

3) 混合交通流路段通行能力随渗透率的变化呈现出一定规律,本文采用通行能力影响系数描述这一变化规律,发现其与渗透率满足一元二次函数关系,并给出了相应的拟合表达式;分别对基本图模型理论值与仿真结果进行拟合,二者决定系数分别达到0.966和0.985,拟合效果良好。

4) 本文所提道路阻抗函数能够有效反映路段平均行程时间与流量、自动驾驶车辆渗透率之间的关系。与传统BPR函数模型相比,本文所采用的参数在实际应用中可有效降低流量溢出的可能性。

参考文献(References):

- [1] LAM S, TAGHIA J, KATUPITIYA J. Evaluation of a transportation system employing autonomous vehicles [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2016, 50(8): 2266-2287. DOI: 10.1002/atr.1458.
- [2] 张志勇, 刘振, 蒋理. 车联网环境下考虑侧向间距的跟驰模型[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(3): 62-68. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.03.008.
ZHANG Zhiyong, LIU Zhen, JIANG Li. A car-following model considering lateral gap in vehicle networking environment [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(3): 62-68. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.03.008.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] ARVIN R, KHATTAK A J, KAMRANI M, et al. Safety evaluation of connected and automated vehicles

- in mixed traffic with conventional vehicles at intersections [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2021, 25(2): 170-187. DOI: 10.1080/15472450.2020.1834392.
- [6] 陈旭, 陆丽丽, 曹祖平, 等. 道路阻抗函数研究综述 [J]. *交通运输研究*, 2020, 6(2): 30-39. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2020.02.004.
CHEN Xu, LU Lili, CAO Zuping, et al. Review of studies on road impedance functions [J]. *Transport Research*, 2020, 6(2): 30-39. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2020.02.004.
- [7] 秦严严, 王昊, 冉斌. CACC车辆跟驰建模及混合交通流分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(2): 60-65. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2018.02.010.
QIN Yanyan, WANG Hao, RAN Bin. Car-following modeling for CACC vehicles and mixed traffic flow analysis [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(2): 60-65. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2018.02.010.
- [8] 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.
- [9] CHEN Z B, HE F, YIN Y F, et al. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks [J]. *Transportation Research (Part B: Methodological)*, 2017, 99: 44-61. DOI: 10.1016/j.trb.2016.12.021.
- [10] XIAO L, WANG M, VAN AREM B. Traffic flow impacts of converting an HOV lane into a dedicated CACC lane on a freeway corridor [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, 12(1): 60-73. DOI: 10.1109/MITS.2019.2953477.
- [11] MADADI B, VANNES R, SNELDER M, et al. Assessing the travel impacts of subnetworks for automated driving: an exploratory study [J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2019, 7(1): 48-56. DOI: 10.1016/j.cstp.2018.11.006.
- [12] NGODUY D, HOANG N H, VU H L, et al. Multiclass dynamic system optimum solution for mixed traffic of human-driven and automated vehicles considering physical queues [J]. *Transportation Research (Part B: Methodological)*, 2021, 145: 56-79. DOI: 10.1016/j.trb.2020.12.008.
- [13] 李淑庆, 石路源, 毛宏黎. 基于人机混驾的道路交通量均衡配流模型 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(24): 379-385.
LI Shuqing, SHI Luyuan, MAO Hongli. The traffic equilibrium flow distribution model of hybrid vehicle [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(24): 379-385.
- [14] 姚志洪, 郝慧君, 巫雪梅, 等. 考虑自动驾驶的混合交通路段阻抗函数 [J]. *交通运输工程与信息学报*, 2021, 19(4): 1-12. DOI: 10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.07.024.
YAO Zhihong, HAO Huijun, WU Xuemei, et al. Cost function of mixed traffic flow with autonomous driving [J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2021, 19(4): 1-12. DOI: 10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.07.024.
- [15] YOSEF S. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1985.
- [16] 王素欣, 王雷震, 高利, 等. BPR路阻函数的改进研究 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2009, 33(3): 446-449. DOI: 10.3963/j.issn.1006-2823.2009.03.011.
WANG Suxin, WANG Leizhen, GAO Li, et al. Improvement study on BPR link performance function [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2009, 33(3): 446-449. DOI: 10.3963/j.issn.1006-2823.2009.03.011.
- [17] 姜桂艳, 李继伟, 张春勤. 城市主干路路段行程时间估计的BPR修正模型 [J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(1): 124-129. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.01.021.
JIANG Guiyan, LI Jiwei, ZHANG Chunqin. Modified BPR functions for travel time estimation of urban arterial road segment [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(1): 124-129. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.01.021.
- [18] 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. 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.
- [19] YAO Z H, XU T R, JIANG Y S, et al. Linear stability analysis of heterogeneous traffic flow considering

- degradations of connected automated vehicles and reaction time [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 561: 125218. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125218.
- [20] MILANÉS V, SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data [J]. *Transportation Research (Part C: Emerging Technologies)*, 2014, 48: 285-300. DOI: 10.1016/j.trc.2014.09.001.
- [21] 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. DOI: 10.1109/TITS.2013.2278494.
- [22] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations [J]. *Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 2000, 62 (2): 1805-1824. DOI: 10.1103/physreve.62.1805.
- [23] 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.
- [24] PATEL R, LEVIN M W, BOYLES S D. Effects of autonomous vehicle behavior on arterial and freeway networks [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2561(1): 9-17. DOI: 10.3141/2561-02.
- [25] 张可可, 韩春阳, 周京, 等. 精准管控下的城市交通拥堵状态研判与建模 [J]. *交通科学与工程*, 2022, 38 (3): 113-120. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.009.
- ZHANG Keke, HAN Chunyang, ZHOU Jing, et al. Towards smart management and control: a novel approach to identify traffic congestion states in urban areas [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2022, 38 (3): 113-120. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.009.

(责任编辑:熊怡;校对:石月珍)