

混合异质交通流道路通行能力影响分析

高佳宁, 由婷婷, 郭丽苹

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘要: 随着智能网联汽车技术的发展, 道路将呈现混合异质交通流的驾驶特征。智能网联汽车的车辆性能、驾驶特征与传统人工驾驶车辆存在较大区别, 导致道路通行能力发生变化。首先分析了混合异质交通流下的道路通行能力影响因素, 重点包括车间时距、智能网联汽车(CAV)车辆渗透率、车辆混合类型等; 其次, 基于Wiedemann跟驰模型、PATH实验室的分析数据, 构建了混合异质交通流的车辆跟驰模型; 最后, 选取试验路段, 利用VISSIM仿真软件, 对不同CAV车辆渗透率下的道路通行能力进行仿真测算。结果表明, 相较于传统人工驾驶车辆, 当CAV车辆渗透率达到100%时, 道路交叉口的通行能力将上升50%、路段通行能力将上升40%。

关键词: 智能网联; 异质交通流; 道路通行能力; 跟驰模型; VISSIM仿真

中图分类号: U41

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0001-04

Analysis of the Impact of Mixed Heterogeneous Traffic Flow on Road Capacity

GAO Jianing, YOU Tingting, GUO Liping

(North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd. China Academy of Urban Construction, Tianjin 300074)

Abstract: With the development of intelligent connected vehicle technology, roads will exhibit driving characteristics of mixed heterogeneous traffic flow. Due to the significant differences in vehicle performance and driving characteristics between intelligent connected vehicles and traditional manually driven vehicles, road traffic capacity will change. This study first analyzed the factors affecting road capacity under mixed heterogeneous traffic flow, with a focus on factors such as workshop time distance, CAV vehicle penetration rate, and vehicle mixing type; Secondly, based on the Wiedemann car following model and analysis data from PATH laboratory, a vehicle car following model for mixed heterogeneous traffic flows was constructed; Finally, a test section was selected to simulate and calculate the road traffic capacity under different CAV vehicle penetration rates using VISSIM simulation software. The results showed that compared to traditional manually driven vehicles, when the CAV vehicle penetration rate reached 100%, the intersection traffic capacity would increase by 50% and the section traffic capacity would increase by 40%.

Keywords: intelligent networking; heterogeneous traffic flow; road traffic capacity; car following model; VISSIM simulation

0 引言

5G与物联网技术的发展, 推动了自动驾驶技术从封闭测试向开放道路应用的跨越, 目前, 自动驾驶技术已在部分城市实现示范区及城市级示范运行。未来较长时间内, 我国城市交通将呈现智能网联汽车(Connected and Autonomous Vehicle, CAV)与传统人工驾驶汽车(Human-driven Vehicles, HV)共融的常态。尽管雄安新区等地在进行道路设计时, 已前瞻性地考虑了自动驾驶车辆的发展, 但相关理论支撑

仍需完善。因此, 深入研究混合异质交通流的道路通行能力具有重要意义。传统人工驾驶车辆(HV)与智能网联汽车(CAV)在道路上混合行驶的交通流, 被称为混合异质交通流^[1-5]。本研究针对混合异质交通流, 分析CAV渗透率对道路通行能力的影响, 并利用VISSIM仿真模型对结果进行验证, 为后续的道路设计奠定基础。

根据CAV^[6-7]的不同发展阶段, 其跟驰状态可分为自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)和协同自适应巡航控制(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)。CACC是在ACC车辆获取前、后车行驶状态的基础上生成, 依靠车-车通信, 主动交换各自的行驶状态数据。

收稿日期: 2025-05-13

作者简介: 高佳宁(1992—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事道路交通设计工作。

1 道路通行能力影响因素

道路通行能力^[8]定义为,在特定的道路环境下,单位时间内通过某一断面的最大车辆数。受到车身长度、设计速度、车间时距、车辆驾驶特征等因素的影响,混合异质条件下道路通行能力受以下因素的影响。

1.1 车间时距

车间时距定义为,前车的车尾与后车车头之间通过某一断面的时间差值,该值越小,道路通行能力越大。该指标与驾驶人的驾驶特征关系较大,CAV具备灵敏的环境感知模块和精细的路径规划模块,降低了车间时距。

1.2 CAV 车辆渗透率

HV 在行驶过程中,行驶速度容易产生波动,而 CAV 不存在速度随机波动问题。当 CAV 数量达到一定水平后,可维持更紧密的车头间距跟驰前车,使得道路通行能力得到提升。CAV 数量的增长和道路基础设施的完善是渐进式上升的过程,随着 CAV 车辆渗透率的增大,城市交通的运行状态将得到改善。

1.3 车辆混合类型

在由 CAV 与 HV 构成的车流中,会形成多种车辆跟驰类型,当 CAV 渗透率为 p 时,HV 车型比例为 $1-p$ 。其中,当 CACC 跟驰 HV 车辆时,当前车不具备通信功能时,CACC“退化”为 ACC 车辆。因此,ACC 车辆出现的比例为 $p(1-p)$,CACC 的比例为 p^2 。具体的车辆跟驰情况、类型及其出现比例如图 1 和表 1 所示。

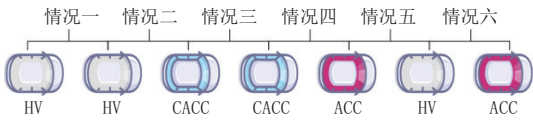


图 1 混合异质交通流跟驰情况

表 1 混合异质交通流跟驰概率

跟驰情况	跟驰类型	发生概率
情况一	HV 跟驰 HV	$(1-p)\times(1-p)$
情况二	HV 跟驰 CACC	$p^2\times(1-p)$
情况三	CACC 跟驰 CACC	$p^2\times p$
情况四	CACC 跟驰 ACC	$p\times p(1-p)$
情况五	ACC 跟驰 HV	$p\times(1-p)$
情况六	HV 跟驰 ACC	$p(1-p)\times(1-p)$

根据表 1,在情况三、四、五中,由于跟驰车辆为 CAV 车辆,需考虑 CACC 车辆与 ACC 车辆之间的相互转化。

1.4 车身长度

与 HV 相比,CAV 随着技术的发展,将一步步取消方向盘、刹车踏板等操作空间,因此,车身长度会小于 HV 车辆。但当前两者在车身长度方面并未表现出明显的差异,可暂不考虑两者的区别。

1.5 设计速度

在道路上行驶的车速越快,车身通过断面的时间越短,单位时间内通过的车辆数越多,道路通行能力越大。由于当前智能驾驶技术尚不成熟,其设计速度与传统人工驾驶车辆未表现出较大差异,可不考虑两者的区别。

2 混合异质交通流跟驰模型

2.1 HV 跟驰模型

Wiedemann 跟驰模型是交通流中的一种经典模型,作为生理—心理跟驰模型的典型代表,模型的核心是驾驶员面对前、后车的相对速度及距离时产生的生理与心理反应。在 VISSIM 仿真软件中内置 Wiedemann 模型,作为交通流仿真基础模型。其中,Wiedemann74 模型是一种适用于城市道路交通流的跟驰模型,具体模型参数如表 2 所示。

表 2 Wiedemann 跟驰模型内置参数默认值

序号	参数	默认值
1	最大加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$3.5-3.5/40\times v$
2	最大减速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$-20+1.5/60\times v$
3	期望停车间距加系数	1.25
4	期望停车间距倍乘系数	2.5
5	期望跟驰间距加系数	2.0
6	期望跟驰间距倍乘系数	1.0
7	期望间距加系数	1.5
8	期望间距倍乘系数	0.55

2.2 CAV 跟驰模型

加州大学伯克利分校 PATH 实验室通过对自适应控制模型交通流特性的深入研究,并经实测数据标定,提出了 CACC/ACC 车辆的跟驰模型^[9],公式如下:

$$\begin{cases} v=v_p+k_p^e+k_d\dot{e} \\ e=h-l-s_0-t_c v \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为 CACC 车辆该时刻的速度, km/h ; v_p 为上一控制时段的速度, km/h ; k_p^e 为误差系数(车间距); k_d 为误差微分系数(车间距); e 为实际值与期望值间的误差; $\dot{e}$ 为 e 的微分项; t_c 为 CACC 期望车头时距; s_0 为最小车头间距; h 为车头间距, m ; l 为车身长度, m 。

CACC 模型各参数的参考取值如表 3 所示。

表 3 CACC 跟驰模型参数取值

模型参数	参数值
k_p	0.45
k_d	0.25
t_c	0.6
l	5
s_0	2

ACC 车辆的跟驰模型公式如下:

$$\dot{v} = k_a(h - l - s_0 - vt_a) + k_b\Delta v \tag{2}$$

式中: $\dot{v}$ 为本时刻车辆的加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; k_a 、 k_b 为控制系数; t_a 为 ACC 期望车头时距; Δv 为该时刻与上一时刻车辆速度的变化值。

ACC 模型各参数的参考取值如表 4 所示。

表 4 ACC 跟驰模型参数取值

模型参数	参数值
k_a	0.23
k_b	0.07
t_a	1.1
l	5
s_0	2

3 仿真验证

为衡量 CAV 车辆渗透率对道路通行能力的影响,本研究采用 VISSIM 仿真软件,对不同 CAV 渗透率(p)下的道路通行能力进行仿真试验(见图 2)。

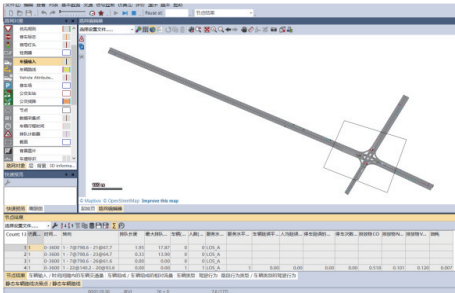


图 2 试验道路 VISSIM 仿真模型构建

3.1 试验道路选取

本研究选取一条长为 1 km 的城市主干道作为试验路段,车道数为双向 6 车道。通过改变交通组成中 CAV 车辆的占比,即通过调整 CAV 车辆的渗透率和输入的交通流量来进行仿真试验,当路段中的车辆数不在增长时,分析渗透率对路段和交叉口通行能力的影响。

3.2 仿真参数设置

本文采用适用于一般城市道路的 Wedemann 74 模型,作为 HV 车辆的交通流跟驰模型,依据文献^[10-15]中 CAV 车辆的跟驰模型参数进行设置,使其

驾驶行为接近 PATH 实验室标定的数据,具体参数设置如表 5 所示。

表 5 CACC、ACC 车辆跟驰参数设置

模型参数	CACC	ACC
停车最小安全间距/m	1.6	2.0
车头时距/s	0.6	1.1
车身长度/m	5.0	5.0

3.3 试验结果分析

设置不同构成比例的 HV 与 CAV 车辆跟驰模型,CAV 的车辆渗透率为 p , $0 \leq p \leq 100\%$,且以 10% 的增长率增加,得到不同渗透率下路段和交叉口的通行能力(见图 3 和图 4)。

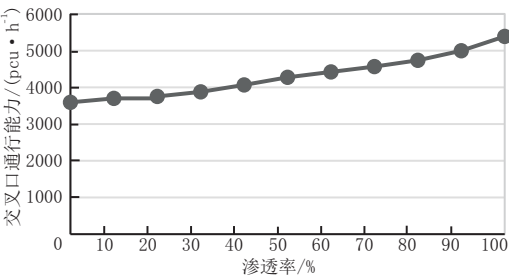


图 3 不同渗透率 p 下交叉口的通行能力

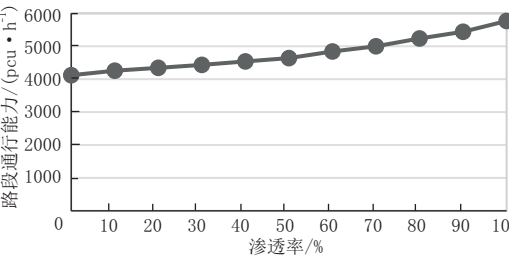


图 4 不同渗透率 p 下路段的通行能力

为了验证仿真模型的有效性与稳定性,以交叉口通行能力为例,本研究对每组渗透率进行 10 次重复仿真,得到通行能力波动图(见图 5)。

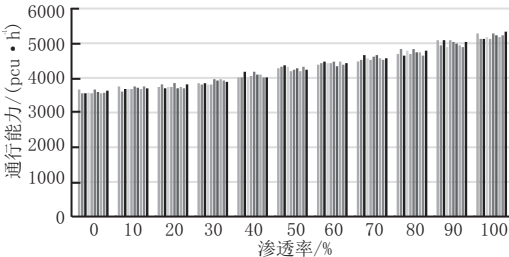


图 5 道路通行能力波动图(路口)

通过分析发现,随着渗透率 p 的增大,道路通行能力逐渐提高,当城市道路中的 $p < 30\%$ 时,通行能力提高缓慢;当城市道路中的车辆全部为 CAV 时,交叉口通行能力提升约 50%、路段通行能力提升约 40%,发展 CAV 对交叉口通行能力的提升将大于对路段通行能力的提升。这主要是因为车辆在交叉口需要频繁地停车制动,而 CAV 由于其精准的车一车

通信功能,可采取更加精确的操作策略,便于更快地通过交叉口,从而提升交叉口的通行能力。

4 结 论

本研究通过对混合异质交通流的道路通行能力进行分析,得到以下结论。

(1)通过分析混合异质交通流下的道路通行能力影响因素,发现车间时距、CAV车辆渗透率、车辆混合类型等因素对该模式下的道路通行能力有较大影响。其中,道路渗透率 p 可直观地衡量不同智能网联汽车发展阶段对道路通行能力的影响。

(2)构建了混合异质交通流跟驰模型,包括适用于HV的Wiedemann跟驰模型、适用于CACC/ACC车辆的PATH跟驰模型,并给出各模型参数,为仿真模型提供数据基础。

(3)选取试验路段,利用VISSIM仿真软件,对不同CAV车辆渗透率下的道路交叉口、路段的通行能力进行仿真测算。结果表明,相较于HV,当CAV车辆渗透率达到100%时,道路交叉口通行能力将提升50%、路段通行能力将提升40%,CAV对交叉口通行能力的影响更大。

(4)本文中的CAV跟驰模型主要基于PATH实验室的试验结果,未对试验结果重新进行标定,未来可根据所仿真路段对仿真参数进行实测标定。

参考文献:

- [1] 汪雯娟.高速公路设置货车专用道的车流条件及实证研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [2] 张金金,尹升,马克,等.智能网联环境下CAV专用道对道路通行

- 能力的影响[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(9):294-297.
- [3] LIU Z C, SONG Z Q. Strategic Planning of Dedicated Autonomous Vehicle Lanes and Autonomous Vehicle/Toll Lanes in Transportation Networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019(106): 381-403.
- [4] SANTANA E F Z, COVAS G, DUARTE F, *et al.* Transitioning to a Driverless City: Evaluating a Hybrid System for Autonomous and Non-autonomous Vehicles[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2021(107): 102210.
- [5] CHEN S K, WANG H, MENG Q. Designing Autonomous Vehicle Incentive Program with Uncertain Vehicle Purchase Price[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019(103): 226-245.
- [6] 左小莉.智能网联环境下城市交叉口时空资源协同方法研究[D].北京:中国人民公安大学,2022.
- [7] 唐鸿辉.高速公路网联车队混合交通流通行能力分析 with 车道管理策略研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- [8] 付丙旭.智能网联汽车对道路通行能力影响分析与专用车道优化设置[D].淄博:山东理工大学,2024.
- [9] 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.
- [10] 宗芳,石佩鑫,王猛,等.考虑前后多车的网联自动驾驶车辆混流跟驰模型[J].中国公路学报,2021,34(7):105-117.
- [11] 华雪东,王炜,王昊.考虑车与车互联互通技术的交通流跟驰模型[J].物理学报,2016,65(1):52-63.
- [12] 蒋阳升,刘梦,王思琛,等.基于跟驰特性的智能网联车混合交通流轨迹重构[J].西南交通大学学报,2021,56(6):1135-1142.
- [13] 秦严严,胡兴华,李淑庆,等.智能网联环境下混合交通流稳定性解析[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(3):152-157.
- [14] 孙倩,郭忠印.基于长短期记忆神经网络方法的车辆跟驰模型[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1380-1386.
- [15] 王殿海,金盛.车辆跟驰行为建模的回顾与展望[J].中国公路学报,2012,25(1):115-127.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

