

复杂交通流对混合交通的影响研究

宋国治, 李 旭

天津工业大学, 天津

收稿日期: 2023年1月20日; 录用日期: 2023年2月16日; 发布日期: 2023年2月23日

摘 要

随着AI(人工智能)的兴起,许多行业变得与人工智能息息相关,同时使得自动驾驶逐步变成现实。人工驾驶车辆跟自动驾驶车辆共存是实现完全自动驾驶的必经阶段。本文研究智能驾驶车辆的不同特征跟不同渗透率的实施,预计对城市道路交通流产生的影响。本文建立了使用描述智能驾驶车辆跟人工驾驶车辆的模型,运用自适应优先算法探究人机驾驶混合交通流不同的状态演变过程,为混合交通流的理论跟方法的研究奠定基础。研究发现:在不同天气条件下,随着自动驾驶车辆的渗透率分布不同,在一定程度上对混合交通流的交通和环境有着积极的影响,并且随着智能驾驶车辆渗透率提升到50%左右时,整体的运行时间优化了7.68%左右,在冰雪条件下,智能驾驶车辆渗透率在提升到30%时,运行时间的环比优化率达到了最高值为5.01%。这都表明随着智能驾驶车辆不断地增加有利于减轻交通拥堵。

关键词

人工驾驶车辆, 智能驾驶车辆, 混合交通流, 跟驰模型, 天气模型

Study on the Impact of Complex Traffic Flow on Mixed Traffic

Guozhi Song, Xu Li

Tiangong University, Tianjin

Received: Jan. 20th, 2023; accepted: Feb. 16th, 2023; published: Feb. 23rd, 2023

Abstract

With the rise of AI (Artificial Intelligence), many industries have become closely related to AI, while making autonomous driving a reality step by step. The coexistence of human-driven vehicles with autonomous vehicles is a necessary stage to achieve fully autonomous driving. In this paper, we study the expected impact on urban road traffic flow due to the implementation of different characteristics and penetration rates of smart driving vehicles. This paper establishes a model

describing intelligent and human-driven vehicles and uses adaptive priority algorithms to investigate the different state evolution processes of human-machine driven hybrid traffic flows, laying the foundation for the study of the theory and methodology of hybrid traffic flows. The study found that under different weather conditions, with the different penetration rate distribution of autonomous vehicles, the traffic and environment of mixed traffic flow were positively affected to a certain extent, and the overall running time was optimized by 7.68% when the penetration rate of intelligent vehicles was increased to about 50%. Under the condition of snow and ice, when the penetration rate of intelligent driving vehicle increases to 30%, the optimization rate of running time reaches the highest value of 5.01%. This shows that the increasing number of smart driving vehicles will help reduce traffic congestion.

Keywords

Artificial Driving Vehicles, Intelligent Driving Vehicles, Mixed Traffic Flow, Follow-The-Leader Model, Weather Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

从 11 月 20 日召开的 2021 世界制造业大会新能源汽车产业发展论坛上获悉, 到今年 9 月底我国汽车保有量达到了 2.97 亿辆, 年底将超过 3 亿辆, 预计“十四五”期间将保持年均 4% 的增长速度[1]。机动车保有量的持续增长与环境问题有着紧密的联系, 机动车保有量的持续增长会加剧城市交通拥堵, 交通事故以及环境污染等城市问题。随着人类深度机器学习技术与新一代计算机视觉科技应用的迅速蓬勃的发展, 智能辅助驾驶系统为人们提高道路交通的安全性能和提高城市交通的效率带来了一种全新的解决方案。智能辅助驾驶系统综合运用了包括人工智能、通讯、半导体、车辆电子等的多种前沿科技, 涉及的产业链条长、价值和创新发展空间大, 已逐渐成为全国各地汽车产业发展和高科技产业的跨界、竞合中的必争之地。科技的进步、政府的推动、巨头的入局、资本的进入、成本的降低、场景的成熟, 从上述各方面迹象上看来, 智能辅助驾驶技术历经了十几年来艰辛探索, 目前已然成功站在了商业化和落地阶段的一个重要时间节点, 浪潮已至。

1.1. 研究现状

但实现完全实现智能驾驶之前不可避免的会存在智能驾驶车辆与人类驾驶车辆均存在的混合交通流。对于联网自动驾驶车辆 Siyuan Gong 团队[2]提出了一种混合协同排队控制算法, 在目前公认的 Newell 汽车跟驰模型基础上建立了约束单步或 P 步 MPC 模型, 以控制联网自动驾驶车队在人类驾驶车队上下游的运动, 更有效地稳定整个混合流排队的交通流, 基于这种思想, Zhihong Yao 团队[3]建立了混合交通流稳定性的分析方法, 得到了不同空速下混合交通流的稳定性条件, 进而推导出了不同渗透率下混合交通流的基本图模型, 分析整理了基本图的影响因素, 但以上都只对混合交通流中车辆的跟驰模型做了仿真实验, 同时其仿真场景太过单一。2020 年 Xiangmo Zhao 团队[4]探讨了真实情况下动态跟驰行为的变化, 最后发现传统的跟驰模型需要更新才能适应混合交通流的结论。重庆交通大学的胡月豪在他的硕士毕业论文[5]中提到了基于元胞自动机思想的无人驾驶模型参与混合交通; 清华大学和新加坡国立大学联合成

的 Bokui Chen 团队[6]也首次提出一个 AVs 和 HVs 共存元胞自动机模型,从微观角度研究混合交通系统,得到了临界混合车辆密度的理论解,对于控制未来智能交通系统中 AVs 和 HVs 的密度和比例至关重要。以上研究者研究混合交通流中车辆大多从跟驰模型的角度进行研究,并未考虑现实中交通环境的复杂性。在以城市交叉路口为例的混合交通流主动控制方面,长安大学的吴霞博士[7]在其博士学位论文中进行了详细的研究,其提出了在高速公路长路段下,极低智能驾驶车辆占有率的交通流主动控制方法。同时,验证了不同的智能驾驶车辆渗透率下,所提出的混合交通流主动控制方法的控制效果,最后,还建立了基于预定义函数的智能驾驶车辆轨迹优化模型。但其主要研究的交通路段为高速公路,并不适用于城市交通中常见的十字路口的混合交通流,同时其并未考虑到环境因素带来的变化。

1.2. 总结

目前为止,在自动驾驶以成为全球汽车产业发展的热点,但在全面普及自动驾驶车辆的一段时间内不可避免的会出现自动驾驶汽车跟人类驾驶车辆都存在的混合交通阶段,在这个阶段内,传统的智能交通模式最终将会逐渐失去了其最原本应有的经济效益,人类对驾驶智能汽车所感知到的各种决策和行为也将会逐渐随着智能自动辅助驾驶系统汽车系统的逐步加入应用而逐渐产生变化。而以上针对混合交通流的研究,主要集中在混合交通流的稳定性,自动换道模型,基本图等方面。上述针对混合交通研究大部分研究人工智能车辆和智能驾驶车辆的跟驰模型。本文主要研究不同渗透率下自动驾驶车辆参与的混合交通受不同天气条件下的影响研究,并将改进后的自适应优先算应用在不同的天气模型中进行结合,实验结果表明能有效缓解城市道路交通拥堵。

2. 自动驾驶车辆参与下的混合交通流模型构建

2.1. 自动驾驶车辆特征行为分析

对于车辆本身来说,对于影响其驾驶行为的分析有多种因素,例如:动力学理论,周围的环境,同时还有车辆行驶的路况和规则(红绿灯,限速,车道线),十字路口等等。在对智能驾驶车辆的特征行为分析建模前,首先应考虑其与传统道路的区别:当车辆交通流量较大时,车与车的车间距减少,道路上的车辆的行驶状态都会受前车行驶状态的影响,人类驾驶车辆只能通过依靠自身的感知来获取前车信息进而调整自身驾驶车辆的状态,但由于每个驾驶员的跟车状态不同,车与车之间的跟驰间距也不尽相同。而在自动驾驶车辆中,由于车路协同,周围环境对车辆判断的影响更加的显而易见。同时针对特定场景建模时,多变性应考虑作为影响因素,这使得建模参数的变化范围尽可能的大。当自动驾驶车辆参与到混合交通中,人类驾驶员的驾驶特征会因为自动驾驶车辆发生改变,与遇到人类驾驶车辆的反应不同。因此车辆的跟驰模型需要进一步优化。

车辆跟驰行为是最基本的微观驾驶行为,描述了在限制超车的交通道路上行驶车队中相邻两车之间的相互作用。跟驰模型是一种动力学模型,用于研究由于前车运动状态的变化而引起的跟驰车辆的相应行为。通过对每辆车的逐辆行驶方式的分析,了解车道的交通流特征,从而在驾驶员微观行为与交通宏观现象之间架起一座桥梁。

2.1.1. 人工驾驶车辆跟驰模型

基于此,本文在智能驾驶员模型(Intelligent Driver Model, IDM)的基础上,进一步改进,具体模型如下,

$$a_{i,k} = a \left(1 - \left(\frac{v_{i,k}}{v_0} \right)^\sigma - \left(\frac{S_i^*(v_{i,k}, \Delta v_{i,k})}{S_{i,k}} \right)^2 \right)$$

$$S_i^*(v_{i,k}, \Delta v_{i,k}) = S_0 + \Delta v_{i,k} T - \frac{v_{i,k} \Delta v_{i,k}}{2\sqrt{ab}}$$

其中:

v_0 : 理想驾驶速度, S_0 : 静止安全距离

S_i^* : 期望安全舒适间距, a : 舒适加速度

b : 舒适减速度, σ : 为加速度指数

传统的 IDM 模型具有明确的参数意义, 同时具有容易标定和改进的特点, 所以对实际情况能够更清楚的表达, 而且能够根据自动驾驶车辆进行适应和优化。根据实验得到优化后的相关参数值如表 1:

Table 1. Common values of IDM model-related parameters

表 1. IDM 模型相关参数常用值

影响因子	取值	影响因子	取值
a	0.84 m/s ²	S_0	2.0 m
b	2.7 m/s ²	v_0	53.53 m/s
σ	4.0		
T	1.06s		

2.1.2. 智能驾驶车辆跟驰模型

CACC 控制方式是基于车与车之间的无线通信。它打破了 ACC 模型只能获取前车信息的限制。CACC 智能驾驶模型可以获取周围车辆的信息(基于在周围车辆中安装 CACC 系统)。该方法在获取感知环境时具有综合、准确、时滞小的优点, 可以进一步减少行车时滞, 保证行车安全。同时, 基于真实的车辆轨迹数据, CACC 模型可以更好地描述智能驾驶车辆的特性。

加州伯克利 PATH 实验室提出的恒定车间时距策略的 CACC 模式是一种广泛使用的方法。由于考虑到道路安全方面的问题, 因此要考虑到混合交通中的最小跟驰安全距离, 因此自动驾驶模型为:

$$v_{i,k} = v_{i,k-1} + k_p * e_{i,k-1} + k_d * \frac{(e_{i,k-1} - e_{i,k-2})}{\Delta t}$$

$$e_{i,k} = X_{i-1,k-1} - X_{i,k-1} - L - t_d * v_{i,k-1} - d_0$$

其中:

k_p , k_d 为控制参数, t_d 为期望车头时距, e 为相邻两车间距的误差。

智能驾驶车辆跟驰模型的相关参数值如表 2。

Table 2. Common values of relevant parameters of CACC model

表 2. CACC 模型相关参数常用值

参数	取值
k_p	0.45 s ⁻²
k_d	0.25 s ⁻¹
t_d	0.01 s

2.2. 交通灯算法模型设计

在对不同车辆渗透率下的仿真模拟实验中, 本文整合编写出了一个新的适合该种环境的算法。该算

法的思想是利用当前布置在路段中的感应线圈采集自动驾驶汽车像交通系统中实时传输本车相对路口的距离, 本车在该路段的等待时间和该路段的智能驾驶车辆的个数, 交叉口红绿灯在经过计算四个路段的综合放行权重之后选择放行两个相对路口的车流, 进而达成通过对自动驾驶车辆的控制从而达到对整个交通流的控制。

算法公式为:

$$W_{lane-release} = Num_{AVS} * W_{AVS} + Max_{wait-time} * W_{wait-time} + \frac{W_{AVS-distance}}{Min_{AVS-distance}}$$

式中:

$W_{lane-release}$ 表示自动驾驶车辆在十字路口的优先级。

Num_{AVS} 表示十字路口路段中自动驾驶车辆的数目。

$Min_{AVS-distance}$ 表示自动驾驶车辆距离交通灯的最小距离。

$Max_{wait-time}$ 表示自动驾驶车辆的最大等待距离。

其中权重与十字路口的路段的优先级紧密相关, 权重的值取决于路段的设计, 交通强度, 人口等, 在我们实验中, 分别赋予权重比值为: $W_{AVS} = 1$, $W_{wait-time} = 0.1$, $W_{AVS-distance} = 100$ 。

3. 基于场景因素耦合影响下的通行分析

恶劣天气会导致道路通行能力不足, 交通效率降低, 加剧道路交通拥堵。这种变化将随着智能驾驶车辆参与混合交通而改变。研究恶劣天气情景下的混合交通流特征, 了解智能驾驶汽车不同渗透率下的恶劣天气对混合交通的影响, 有助于提高城市交通的混合交通能力, 从而制定科学有效的智能驾驶汽车交通管理措施和应对方案。保证了混合交通路段的安全高效。

场景模型设置

由于智能驾驶车辆使用感应器来检测前车, 而人类驾驶车辆依靠驾驶员的感知跟驰前车, 所以二者的跟驰行为模式会有所不同, 模拟中用上述给出的按照各种道路参与者作为分类方法跟驰模型方法完成标定。

当车辆在不同的天气场景下行驶时, 恶劣天气会对车辆产生更大的负面影响, 尤其是对人的驾驶。在冰雪天气场景下, 驾驶员的视觉能见度会受到一定程度的影响, 从而改变人类驾驶车辆的驾驶行为。因此, 本节对以下冰雪天气引起的人类驾驶车辆模型参数进行数值标定, 并通过仿真计算量化其对混合路段的影响。在此基础上, 实验设计将对晴天、雪天等常见天气下的模型参数进行校准, 以测试其对通行能力的影响。

在冰雪条件下, 由于驾驶员对外部环境变化的感知和响应不同, 在后续驾驶过程中对速度、跟随距离、加减速等因素的控制与正常天气条件相比会产生各向异性的变化, 对城市交通运行会产生不同程度的影响。因此在雨雪天气中, 人类驾驶员会通过调节加速度, 减速度和驾驶速度来调整安全跟驰距离从而保证混合路段中驾驶安全和通行能力。因此将 IDM 模型的参数进行重新标定, 如表 3 所示:

Table 3. Common values of relevant parameters of IDM model under ice and snow conditions
表 3. 冰雪条件下 IDM 模型的相关参数常用值

影响因子	取值	影响因子	取值
a	0.7	b	2.88
T	1.28	v_0	64.69

4. 路网建立

本实验设计的路网模型包括四个方向的八车道和布置在车道上不同位置的 24 个智能感应线圈。八车道以双向双车道交叉口的形式布置, 这是中国交通环境中最常见的交叉口形式之一, 具有普遍适用性。在道路网络中, 每条车道都有自己的编号。数字为 1 的车道为入口车道, 交通流从这些车道进入路网。每个入口车道将配备两个智能感应线圈, 分别布置在信号灯的交叉口和远离交叉口的五个车身长度处, 由于五个车体的距离表明路段拥挤, 设置智能感应线圈的位置不仅满足实验要求, 还减少了路边单元的数量, 从而降低了道路建设成本。智能感应线圈用于检测通过车辆的等待时间、交叉口到车辆的距离以及两个线圈之间的当前车辆数。在本实验的路网设计中, 数字为 0 的车道是出口车道, 交通从车道流出路网。每个出口车道将只配备一个智能感应线圈, 设置在信号灯的交叉口。出口车道和入口车道交叉口的线圈共同作用, 以检测交叉口是否仍有车辆通过, 从而控制红绿灯相位的变化。具体的道路网络模型如图 1 所示。

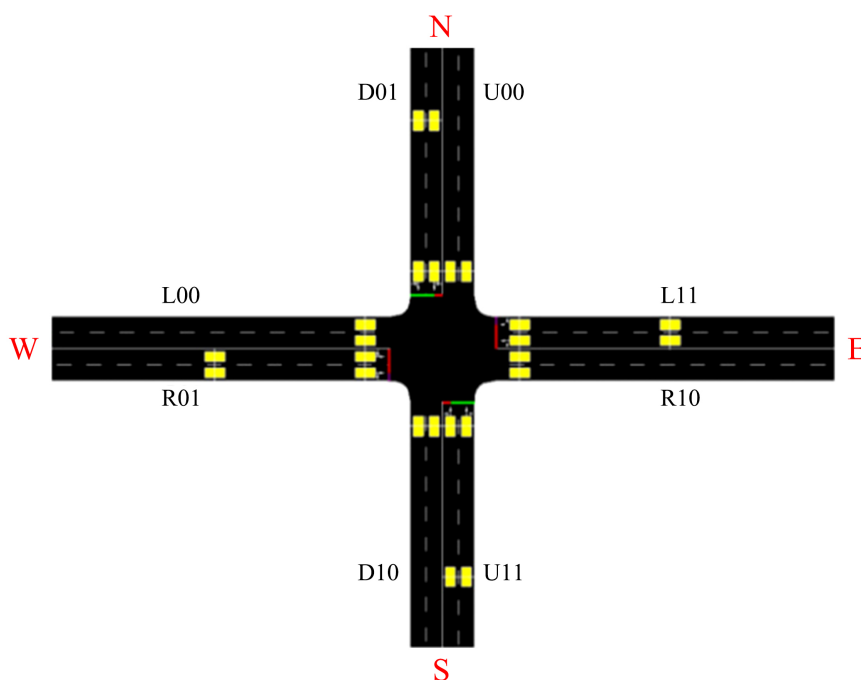


Figure 1. Simulation road network structure
图 1. 仿真路网结构图

该实验通过城市交通仿真(SUMO)模拟器进行了验证。为了最大限度地模拟车辆在真实道路条件下的行驶, 采用自适应缓解算法的实验结果是可靠的。我们规定每个交叉口左转、右转和直转的概率基本相等, 并建立了 11 组交通流模型, 从所有路网车辆中智能 A-V 渗透率的 0% 到 100%, 并控制除车辆运行模式外的所有变量都相同。实验中, 黄色车辆代表人类驾驶车辆, 绿色车辆代表智能驾驶车辆, 并在 SUMO 模拟器中进行重复仿真。

5. 实验结果分析

本次实验结果对比分析为模型中所有车辆从进入路网到离开路网的时间的分析对比。根据 SUMO 仿真时间的结果如表 4 所示:

Table 4. Running time of vehicles with different permeability under clear weather model
表 4. 在晴朗天气模型下, 不同渗透率车辆的运行时间

智能驾驶车渗透率%	晴朗天气下运行时间 s	冰雪天气下运行时间 s
0	586	671
10	606	658
20	589	639
30	583	607
40	555	592
50	541	581
60	536	559
70	529	525
80	523	515
90	522	512
100	523	511

根据大量实验获得的数据, 绘制了基于自适应释放算法的不同自主车辆渗透率的交通流模型运行时间对比分析图, 如图 2 和图 3 所示。从图 2 和图 3 可以清楚地看出, 在两种不同天气模型下, 随着智能驾驶车辆渗透率不断提高, 该算法可以显著减少整个路网的交通时间, 随着智能驾驶车辆渗透率的增加, 可以改善城市交通拥堵的状况。同时对比图 2 和图 3 发现, 在智能驾驶车辆的渗透率达到 70% 左右时, 在冰雪天气模型下, 实验的运行的时间会小于晴天天气模型下, 这意味着随着智能驾驶车辆的投入使用, 即使在不利天气下, 智能驾驶车辆渗透率的提高也会对未来道路交通的拥堵影响会显而易见的改善。同时表明在未来智能驾驶车辆市场下, 对于改善城市交通也具有一定的参考价值。

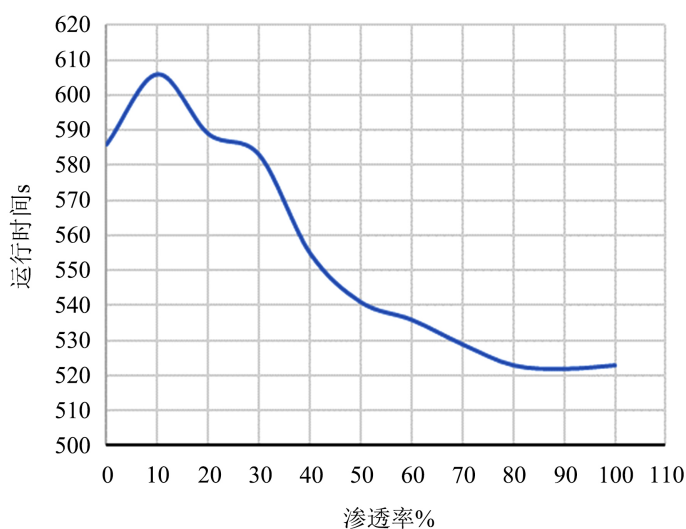


Figure 2. Running time curve in clear weather
图 2. 晴朗天气下运行时间曲线图

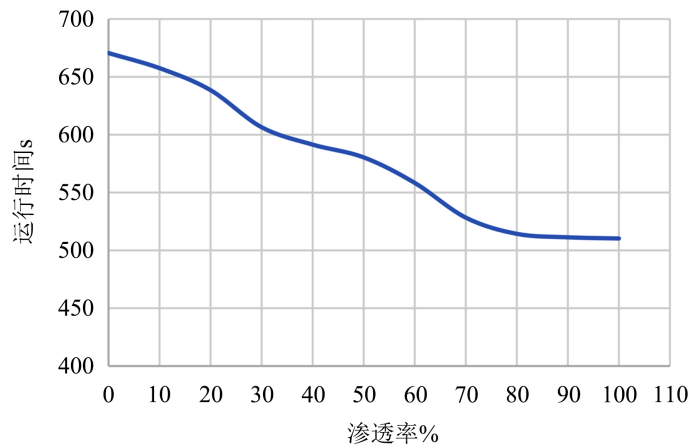


Figure 3. Running time curve in snow
图 3. 冰雪天气下运行时间曲线图

6. 总结

为了解决混合交通背景下的车辆交通问题, 实现交通灯相位的自适应变化, 提出了一种新的自适应算法。并将该自适应算法应用到不同的天气模型下进行仿真, 实验结果表明, 在不同天气模型下, 随着自动驾驶车辆的渗透率分布不同在一定程度上对混合交通流的交通和环境有着积极的影响, 并且随着智能驾驶车辆渗透率提升到 50%左右时, 整体的运行时间优化了 7.68%左右, 在冰雪条件下, 智能驾驶车辆渗透率在提升到 30%时, 运行时间的环比优化率达到了最高值为 5.01%。这都表明随着智能驾驶车辆不断的增加有利于减轻交通拥堵, 该算法可以减少车辆的交通时间, 提高人们的交通效率。同时, 由于停车等待时间的减少, 也减少了车辆的空气污染和噪声污染, 这对绿色智慧城市的建设具有重要意义。

参考文献

- [1] 中国汽车协会, 中国经济信息社. 中国新能源汽车产业高质量发展报告 2021 [R]. 合肥: 安徽省人民政府, 2021.
- [2] Gong, S.Y. and Du, L.L. (2018) Cooperative Platoon Control for a Mixed Traffic Flow Including Human Drive Vehicles and Connected and Autonomous Vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, **116**, 25-61. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.07.005>
- [3] Yao, Z.H., Hu, R., Wang, Y., Jiang, Y.S., Ran, B. and Chen, Y.R. (2019) Stability Analysis and the Fundamental Diagram for Mixed Connected Automated and Human-Driven Vehicles. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **533**, Article ID: 121931. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121931>
- [4] Zhao, X.M., Wang, Z., Xu, Z.G., Wang, Y., Li, X.P. and Qu, X.B. (2020) Field Experiments on Longitudinal Characteristics of Human Driver Behavior Following an Autonomous Vehicle. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **114**, 205-224. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.018>
- [5] 胡月豪. 人机驾驶混合交通流建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [6] Chen, B.K., Sun, D., Zhou, J., Wong, W.F. and Ding, Z.J. (2020) A Future Intelligent Traffic System with Mixed Autonomous Vehicles and Human-Driven Vehicles. *Information Sciences*, **529**, 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.02.009>
- [7] 吴霞. 基于智能网联车辆可控性的高速公路与城市道路混合交通流主动控制方法[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.