

智能网联背景下货运通道动态管控策略

黄子轩^{1*#}, 干宏程^{1,2}, 程智鹏¹

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学超网络研究中心, 上海

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年9月28日; 发布日期: 2025年10月23日

摘要

为缓解传统静态管控策略难以适应人机混驾的复杂交互, 尤其在涉及重型卡车(HDT)与智能重卡(CAT)的货运场景中, 车辆异质性、换道冲突及动态协同矛盾日益凸显的情况。基于上海市两港大道高架快速路为研究对象, 结合混合交通流特性, 构建多类型车辆协同管控策略, 通过动态车道管理与卡车编组技术, 优化货运通道的综合运输效能。仿真结果表明, 网联车辆渗透率提升可显著缩短车头间距并降低尾部碰撞风险(TIT指标最大降幅达53%), 为多车道动态管控策略设计提供理论支撑; 当重卡渗透率高于40%时, 专用道策略可显著提升通行能力(重卡行程时间减少9%)与安全性(风险降低100%), 其中“编组-左侧网联专用道”综合性能最优; 低渗透率场景下, 专用道会导致道路资源浪费与小汽车通行效率损失; 在重卡渗透率40%~60%区间, 专用道策略需结合编组技术以平衡效率与安全; 渗透率超80%时, 专用道内侧布局可最大程度减少交织冲突。

关键词

智能网联, 混合交通流, 管控策略, SUMO仿真, 卡车编组

Dynamic Management and Control Strategy for Freight Corridors in the Context of Intelligent and Connected Vehicles

Zixuan Huang^{1*#}, Hongcheng Gan^{1,2}, Zhipeng Cheng¹

¹Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

²Center for Supernetworks Research, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 22, 2025; accepted: September 28, 2025; published: October 23, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 黄子轩, 干宏程, 程智鹏. 智能网联背景下货运通道动态管控策略[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(5): 1091-1104. DOI: 10.12677/sea.2025.145097

Abstract

To address the challenges of traditional static control strategies in adapting to the complex interactions in mixed traffic environments involving human-driven and automated vehicles, particularly in freight scenarios with Heavy-Duty Trucks (HDTs) and Connected Automated Trucks (CATs), where vehicle heterogeneity, lane-changing conflicts, and dynamic coordination issues are increasingly prominent, this study takes the elevated expressway of Liangang Avenue in Shanghai as a case study. Combining the characteristics of mixed traffic flow, a collaborative control strategy for multiple vehicle types is developed. Through dynamic lane management and truck platooning technology, the comprehensive transportation efficiency of freight corridors is optimized. Simulation results demonstrate that an increase in the penetration rate of connected vehicles significantly reduces headway and mitigates rear-end collision risks (with a maximum reduction of 53% in the Time Integrated Time-to-collision (TIT) indicator), providing theoretical support for the design of multi-lane dynamic control strategies. When the penetration rate of heavy trucks exceeds 40%, dedicated lane strategies significantly enhance traffic capacity (with a 9% reduction in travel time for heavy trucks) and safety (a 100% risk reduction), among which the “platooning-left-side connected dedicated lane” strategy delivers the best overall performance. In low-penetration scenarios, dedicated lanes may lead to underutilization of road resources and reduced efficiency for passenger cars. In the 40%~60% penetration range for heavy trucks, dedicated lane strategies must be combined with platooning technology to balance efficiency and safety. When the penetration rate exceeds 80%, an inner-lane layout for dedicated lanes can minimize weaving conflicts.

Keywords

Connected and Automated Vehicles, Mixed Traffic Flow, Control Strategy, SUMO Simulation, Truck Platooning

Copyright © 2025 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

随着货运物流在国民经济中的比重不断提高, 货运通道的物流运输压力与日俱增。日益频繁的交通运输活动提高了人员和货物的流动性, 但也导致了温室气体排放和能源消耗的增加, 以及交通事故严重性的上升[1]。网联自动驾驶汽车(Connected and Automated Vehicle, CAV)的出现为提升交通安全、能源环保和交通效率提供了一个极具前景的解决方案[2]-[4]。随着智能网联技术的不断发展, 政府预计 2030 年自动驾驶车辆的市场占有率将突破 30%, 形成人、机混合驾驶的道路混合交通流。当使用 CAV 时, 交通模式无疑会发生变化, 迎来绿色交通的新纪元[5]。

然而, 由于人工驾驶车辆将在很长一段时间内继续主导交通, 因此网联自动驾驶车辆和人工驾驶车辆将共存于交通流中, 并形成混合交通流[6]。由于人工驾驶车辆的存在, 混合交通流与仅由 CAV 组成的自动驾驶车队不同, 其特点是具有高度不确定性和随机性的人类驾驶行为[7]。因此, 复杂混合交通流的动态变得更加复杂, 车队中车辆之间的通信拓扑结构不均匀[8], 且车辆之间的连接较弱[9], 这给混合交通流高效驾驶控制器的设计带来了巨大挑战。针对单一 CAV 和纯 CAV 车队的解决方案可能不适用于混合交通流[10]。

在这一背景下, 货运通道需要追求效率、安全和环保, 正在面临着双重矛盾: 一方面人机混合驾驶

模式发展打破了传统交通系统的稳态平衡，人工驾驶车辆与自动驾驶车辆在决策逻辑、反应时延等方面存在显著差异；另一方面车辆异构性导致的协同矛盾日益凸显，重型卡车的动力性能、制动性能等参数与小汽车存在显著差异，异构车流的车道精准管控困难。面对未来交通环境中多种驾驶模式和车辆类型的交织运行，现有理论仍存在诸多不足：已有的混合交通流仿真建模研究多基于单一或固定车种比例假设，针对单一驾驶模式或简单混合情形；且大多数混合交通流仿真研究未考虑智能重型卡车编组技术，这种驾驶策略能有效提高车队的通行效率、安全性，同时减少能耗和排放量。

因此，本研究结合混合交通流特性和道路基建条件，确定使用车道管控与卡车编组两种关键策略，并深入分析了不同市场渗透率和交通流量下，为网联自动驾驶车辆设置专用车道带来的交通影响，以及卡车编组对专用车道策略的影响。

2. 混合交通流管控策略

2.1. 混合交通流组成

混合交通流的研究主要集中在三个方面：混合交通流建模、CAV 的高效驾驶策略设计以及不同渗透率下的交通影响分析。

在混合交通流建模方面，最初的一些学者基于公式理论推导、计算机数值仿真[11]，从而探究混合交通流的交通特性，如流量 - 速度 - 密度三要素。在设计 CAV 的高效驾驶策略方面，主要手段通过优化车队纵向和横向运动轨迹来实现。Wang 等[12]和 Shi 等[13]实现了信号化干道上混合交通流的交叉控制，以实现节能和省时目标。在交通效率、安全水平和能源效率等方面的影响分析，Yao 等在混合交通影响分析方面开展了一系列工作，例如分析具有最大可能车队规模的混合交通的安全性、容量、稳定性和效率特性[9]，评估 CAV 对高速公路混合车辆车队的燃油使用和排放的影响[14]，以及计算 CAV 异质性和车队规模对交通容量的影响[15]。

然而，大多数学者关注了 CAV 的优化，忽略了目标函数中的人工驾驶车辆，从而未能充分挖掘节能潜力。且以前研究只考虑了小汽车而未考虑重卡、小车的复杂混合交通流。本文根据驾驶模式分为：自动驾驶车辆与人工驾驶车辆；依据车辆大小分为：小汽车与重型卡车。具体为以下四类：自动驾驶小汽车(Connected-Automated Vehicle, CAV)、自动驾驶重卡(Connected-Automated Truck, CAT，后文统称为“智能重卡”或“CAT”)、人工驾驶小汽车(Human-driven Vehicle, HDV)和人工驾驶重卡(Human-driven Truck, HDT)。如图 1 所示，当领航车前方是网联自动驾驶小汽车(CAV)时，领航车可通过 CACC 模式与前车紧密配合。而当领航车前方为人工驾驶车辆(HDV、HDT)时，由于无法与前方车辆进行 V2V 通信，CACC 模式将退化为 ACC 模式。

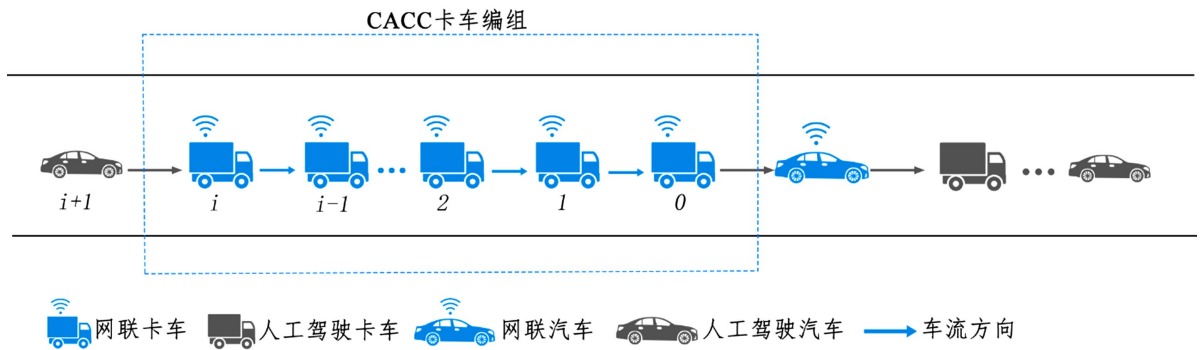


Figure 1. Scenarios composed of mixed traffic flows
图 1. 混合交通流组成的场景

2.2. 车道管控策略

传统的道路管控策略主要包含：匝道控制、车道管控、可变限速等。根据混合交通流的实际特性，本文选择两种策略：卡车编组与车道管控。在混合交通流中，车道管控策略能够有效隔离不同类型的车辆，通过为 CAV 提供专用车道来提高通行效率和安全性。卡车编组策略则通过优化车队中的车辆间距，减少车辆间的相互干扰，从而提升整体交通流效率。

随着自动驾驶技术的发展，新型卡车编组技术通过无线通信技术虚拟连接并相互通信，领车处于车队的第一个位置，由人工驾驶或者采用自适应巡航控制模式，随后的卡车则自动跟随，使卡车能够以车队的形式非常紧密地行驶在一起。卡车的车队化可以通过显著降低反应时间和减少车队内的人为错误来提高交通安全，从而减少追尾碰撞的数量，同时紧密行驶可以改善车队中所有卡车的空气动力学性能，从而减少燃油消耗[16]。

车道管控(Managed Lanes, MLs)一直是管理复杂交通系统的有效策略。与高速公路扩建相比，车道管控在建设成本、环境影响等方面可能是一个更具可行性的选择，通过改善出行能力、缓解拥堵和提高道路安全，车道管控提升了驾驶者的出行效率[17]。通过车道管控，管理型车道可能会降低交通事故发生的概率，从而为驾驶者创造一个更安全的环境[18]。尽管现有研究表明 CAV 可以增强单条车道的通行能力，但混合交通在真实多车道环境中引入的多样化行为和不确定性将阻碍 CAV 的性能[19]。Sala 和 Soriguera [20]指出，由于 CAV 与普通车辆共享现有的基础设施，对 CAV 交通的任何管理不妥可能导致道路通行能力的降低。因此，为了充分利用 CAV 提供的通行能力提升，专用车道的车道配置管理策略应谨慎考虑，以保持车道配置与交通流特性的兼容性。

3. 跟驰模型构建

为了准确模拟单车道内混合交通流的跟驰行为，本文使用多种跟驰模型，包括智能驾驶员模型(Intelligent Driver Model, IDM)、自适应巡航控制模型(Adaptive Cruise Control, ACC)和车辆的协同自适应巡航控制模型(cooperative adapted cruise control, CACC)。

3.1. IDM 模型

智能驾驶员模型(IDM)常被用于表征人工驾驶车辆的跟驰行为，如公式(1)所示， $a_n^{IDM}(t)$ 表示车辆 n 在时间 t 的加速度，公式(2)中的 s^* 表示车辆所需的时间间隙。

$$a_n^{IDM}(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_n(t)}{v_f} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n(t), \Delta v(t))}{s_n(t)} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$s^*(v_n, \Delta v) = s_0 + v_n(t)T + \frac{v_n(t)\Delta v(t)}{2\sqrt{ab}} \quad (2)$$

其中， a 和 b 分别是车辆的最大加速度和舒适减速度。 $v_n(t)$ 是车辆 n 在时间 t 的瞬时速度。 v_f 是车辆自由流动交通条件下的最大速度； $s_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t) - l$ 是本车 n 的车头与前车 $n-1$ 后保险杠之间的距离， l 是前车 $n-1$ 的长度。方程(10)中的 s_0 为静止状态下的最小安全距离， T 为安全车头时距， $\Delta v(t) = v_n(t) - v_{n-1}(t)$ 为领先车辆 $n-1$ 与本车 n 在 t 时刻的速度差。

3.2. ACC 模型

自适应巡航控制模型(ACC)是自动驾驶车辆的基本跟车控制模型，用于控制车辆的加速与减速，以维持与前车的安全车距。ACC 模型可用公式(3)表示， $a_n^{ACC}(t)$ 是 ACC 车辆 n 在时间 t 的加速度。

$$a_n^{ACC}(t) = k_1 [\Delta x_n(t) - l - s_0 - t_a v_n(t)] + k_2 \Delta v_n(t) \quad (3)$$

其中 k_1 和 k_2 为模型控制参数。 $\Delta v_n(t) = v_n(t) - v_{n-1}(t)$ 为前车 $n-1$ 与 ACC 跟随车辆 n 在 t 时刻的速度差值。 $e_{n,a}(t) = \Delta x_n(t) - l - s_0 - t_a v_n(t)$ 为 ACC 车辆 n 在 t 时刻的实际跟随状态与期望跟随状态之间的距离偏差。 $e_{n,a}(t)$ 直接影响跟随车辆的加速度计算：跟随车辆会根据该偏差进行调整，以便增大或减小与前车的距离，从而实现平稳的跟车行为。例如，如果 $e_{n,a}(t)$ 为负值，说明跟随车辆需要减速以增加距离，反之后车可以考虑加速。其中 $v_n(t)$ 是当前 ACC 车辆 n 在时间 t 的速度。 $\Delta x_n(t) - l - s_0$ 为实际跟随状态距离，其中 $\Delta x_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$ 为 ACC 跟随车辆 n 与前车 $n-1$ (小汽车或重卡) 之间在 t 时刻的车距。 t_a 为 ACC 追随车辆对前车行为(如减速或加速)做出反应所需的时间，在该时间内，车辆需要考虑当前速度和与前车的距离，以安全、平稳地调整自己的速度。 l 是前车 $n-1$ 的长度， s_0 为车辆间静止状态下的最小安全距离。

3.3. CACC 模型

车辆的协同自适应巡航控制模型(CACC)，指当 CAV 跟驰 CAV、CAT 跟驰 CAT 时，后车利用 V2X 技术与前车进行信息交互，实现前后车的协同驾驶控制。公式(4)是 PATH 实验室提出的基于 PD 控制的 CACC 模型， $a_n^{CACC}(t)$ 是 CACC 车辆 n 在时间 t 的加速度。

$$a_n^{CACC}(t) = k_p [\Delta x_n(t) - l - s_0 - t_c v_n(t)] + k_d \Delta v_n(t) + k_a a_{n-1}(t) \quad (4)$$

其中 k_p ， k_d 和 k_a 为模型控制参数。 $e_{n,c}(t) = \Delta x_n(t) - l - s_0 - t_c v_n(t)$ 为网联车辆 n 在 t 时刻的实际跟随状态与期望跟随状态之间的距离偏差。 t_c 为 CACC 追随车辆对前车行为(如减速或加速)做出反应所需的时间。 $a_{n-1}(t)$ 为前车 $n-1$ 的加速度，因为该模型需考虑 V2V 通信，以此可以接收前车加速度 $a_{n-1}(t)$ 等附加信息。 $\Delta v_n(t)$, $\Delta v_n(t)$, $\Delta x_n(t)$, l 和 s_0 如先前所定义。

4. 利用 SUMO 的混合交通流仿真分析

本文仿真对象选择上海市“洋山港 - 东海大桥 - 两港大道 - 上海浦东国际机场”的货运通道，两港大道(新四平公路至 S2 沪芦高速)全长约 13.1 km，采用“主线高架 + 地面辅路”形式，设计速度 80 km/h，高架采用双向六车道规模，全线设置 7 对匝道。货运车辆可以在主线高架路段行驶，规避了交叉路口复杂场景所带来的管制难题与安全隐患。由于高速路的主要事故发生地与瓶颈点通常发生在匝道出入口处，因此本文选择两港大道与两港大道的交叉口处前的高架路段，实际地理位置与鸟瞰图如图 2 所示，对该区域前后含匝道的路段进行建模。

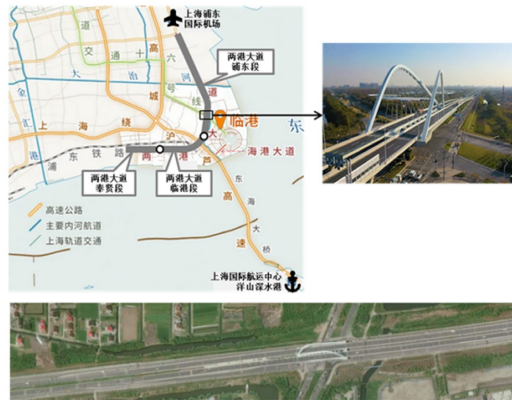


Figure 2. Actual road segment map

图 2. 实际路段图

4.1. 车道管控策略设计

为了充分发挥网联技术的优势，将重卡与其他类型车辆分隔开的车道管理策略是一种能有效提高重卡运输效率和通道安全性的模式。考虑到重卡惯性大、制动性能较差的特点，大多采取重卡行驶于最外侧车道，小型车辆行驶于其他内侧车道的车道分配形式。本研究根据已建成的两港大道高架线路提出了以下 5 种车道分配策略：

策略一：未设置专用车道(现状)，现今两港大道的车道分配如图 3 所示，货车被允许行驶于右侧两车道。最外侧为慢速车道，小汽车可以行驶于所有车道，在外侧两车道会形成客 - 货跟驰，而货车被禁止驶入最内侧的客运车道。只根据车辆的大小来划分车道权限，不考虑网联车渗透率。

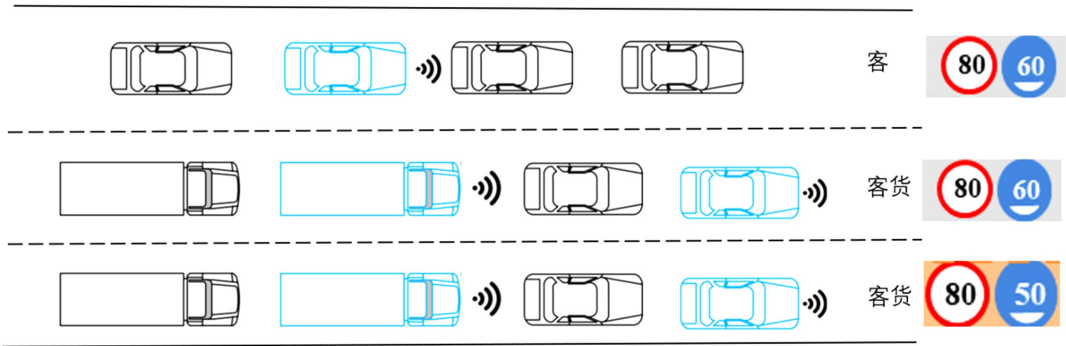


Figure 3. No dedicated lanes provided (current status)
图 3. 未设置专用车道(现状)

策略二：智能重卡专用道(CAT)，如图 4 所示，该管控策略于最右侧开启 CAT 专用道，仅允许 CAT 进入；普通重卡 HDT 仅允许在第二车道行驶，将大型车中的人工驾驶与自动驾驶分开；HDV、CAV 也仅可以在内侧二、三车道行驶。

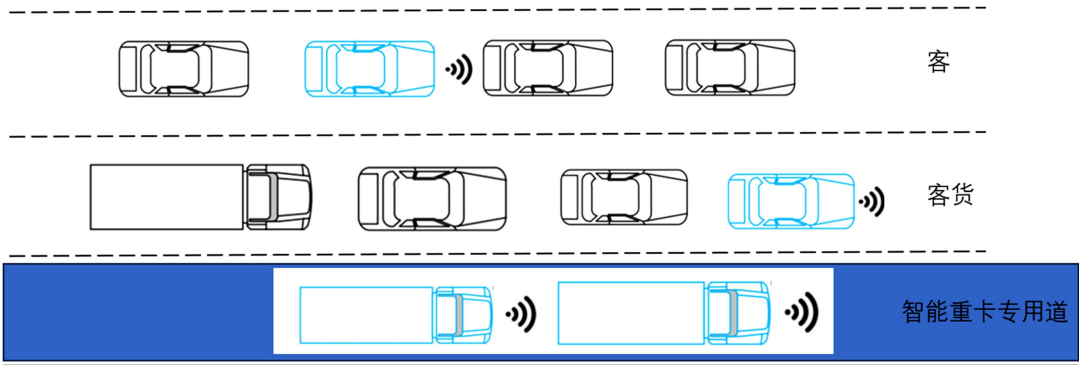


Figure 4. Dedicated lane for intelligent heavy-duty trucks (CAT)
图 4. 智能重卡专用道(CAT)

当车辆需要通过匝道驶入或者驶离高架，专用道的设置导致其他车辆未分配路权，因此在匝道处为需要驶入和驶离的车辆开放路权。路网布局如图 5 所示，仿真路段全场 3.2 km，其中分为前中后 3 段 1 km 长的直行路段，并且在距起点 1.1 km、2.1 km 处根据实际情况先后设置出口匝道、入口匝道，匝道处设有长 100 m 的第四车道用于车辆换道、暂时占用。针对专用道的情况，在出口匝道的上游、入口匝道的下游开放长为 500 m 的交织区，因此有前后各 600 m 的路段供以换道。

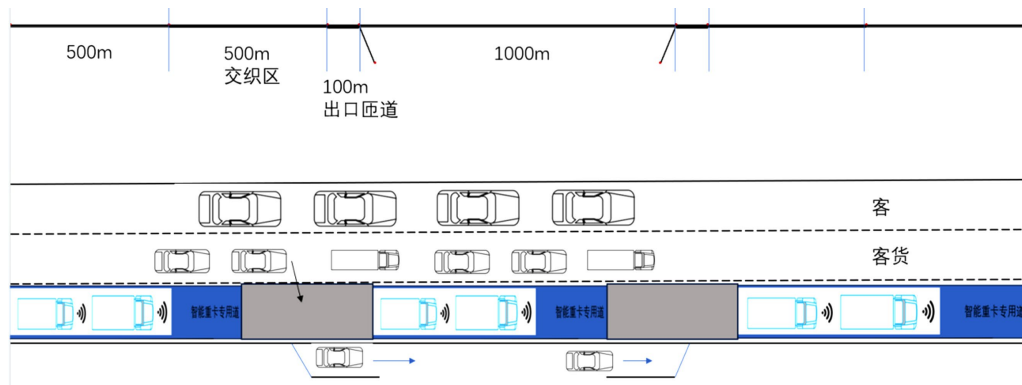


Figure 5. Design of weaving area in ramp zone
图 5. 匝道区域交织区设计

策略三：网联车专用道(CAV、CAT)，如图 6 所示，策略三在最右侧开启网联车专用道，允许所有拥有智能网联功能的自动驾驶车辆驶入；第二车道为客货车道，允许 HDV、HDT 行驶；第三车道仅允许 HDV 驶入。

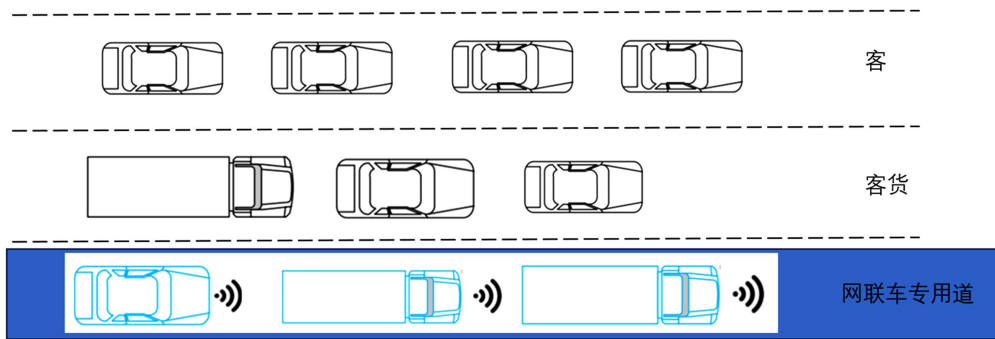


Figure 6. Dedicated lane for connected and autonomous vehicles (CAV, CAT)
图 6. 网联车专用道(CAV、CAT)

采取这种策略主要有两种原因：一方面，CAV 和 CAT 虽然无法组成车队，但同属于智能网联汽车，它们可以通过车联网来通讯，从而确保安全、提高单车道的通行能力；另一方面，在可预见的 CAT、CAV 普及率都不高的未来几年，所有网联车辆行驶于同一车道仍不会达到单车道的通行能力瓶颈。

策略四：左侧 - 智能重卡专用道(CAT)，如图 7 所示。

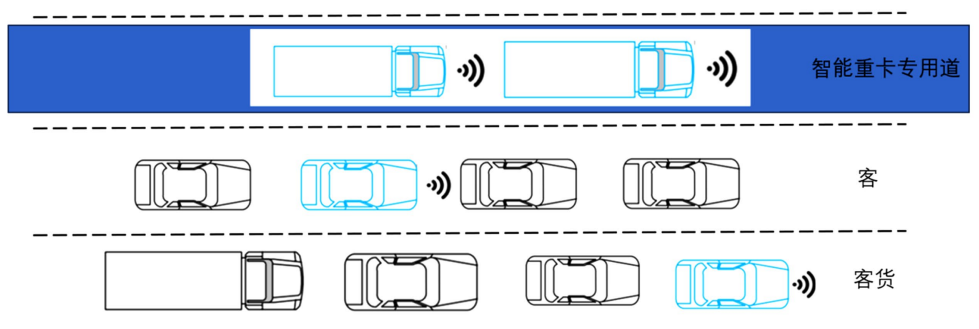


Figure 7. Left side-dedicated lane for intelligent heavy-duty trucks (CAT)
图 7. 左侧 - 智能重卡专用道

策略五：左侧 - 网联车专用道(CAV、CAT)，如图 8 所示。

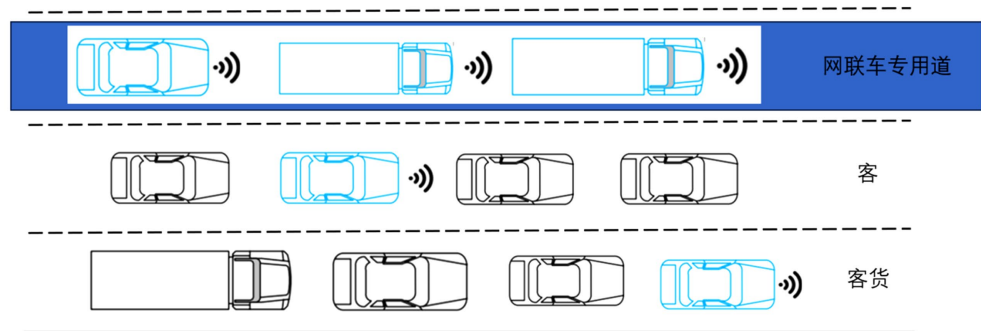


Figure 8. Left side-dedicated lane for connected vehicles (CAV, CAT)
图 8. 左侧 - 网联车专用道

策略四和策略五，主要目的是将专用道内移。通道最内侧为专用车道，中间车道为快速车道，仅允许小型车(CAV 和 HDV)行驶；原先的最外侧车道改为现在的客 - 货混行慢速车道，主要供 HDT 行驶，同时允许 HDV、CAV 驶入。这 2 种策略最大的优点是将 CAT 完全放置在最内侧车道，减少了 CAT 在匝道区域与驶入驶出车辆的交织冲突。

4.2. 智能网联环境下货运通道仿真平台搭建

4.2.1. 利用 SUMO 进行智能网联下环境搭建

在 SUMO 中进行智能网联环境下的交通仿真时，通常需要借助 TraCI (Traffic Control Interface)进行外部控制，以实现车辆间的信息交互、动态路径调整以及网联协同行为。使用 TraCI 接口实时读取前后车辆的信息，如果发生 CACC 退化情况，则将后车调整为 ACC 跟驰模型并修改参数，将 minGap 和 Tau 参数调整为“2.5”和“3”，表明智能网联车辆因无法通讯采用保守的 ACC 跟驰模型，并且加大了跟驰的安全间距和期望间距。

四种车辆的参数设置如下表 1 所示，所有车辆均使用 SUMO 自带的“LC2013”换道模型。

Table 1. Main vehicle parameters
表 1. 主要车辆参数

车辆类型	length/m	accel/(m·s ⁻²)	decel/(m·s ⁻²)	minGap/m	speedDev	maxSpeed/(m·s ⁻¹)
CAV	5	2.6	4.5	0.5	0	22.2
HDV	5	2.6	4.5	2.5	0.1	
CAT	16.5	1.7	2.5	0.5	0	
HDT	16.5	1	1.5	2.5	0.05	
(续)	carFollow Model	Tau/s	lcStrategic	lcAssertive	emissionClass	
CAV	CACC	0.6	5	2	HBEFA3	
HDV	IDM	1	5	2	HBEFA3	
CAT	CACC	1	/	/	HBEFA3/HDV_G	
HDT	IDM	2	/	/	HBEFA3/HDV_G	

上述参数在仿真中的意义如下：

length: 车长，单位米(m)，本研究中将小汽车车长设置为 5 m，重卡为 16.5 m；accel、decel: 车辆的

最大加减速, 单位米每二次方秒($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), 决定了仿真中车辆的制动性能; **minGap**: 最小安全间距, 即两辆相邻车静止停车时应保持的最小安全间距, 本文默认人工驾驶的车辆会保持更长的安全间距; **speedDev**: 车辆的速度波动参数。若其值为 0 则表示车辆会保持该流量下最合理的速度; 若其值为 0.1, 则车辆会在最理想的速度上下浮动 10%, 速度分布呈正态分布, 模拟人工驾驶的不确定性; **Tau**: 期望跟驰时距, 即前后车之间的距离与后车速度的比值。以往研究统一认为, CACC 车辆的跟驰间距会比人工驾驶车辆更小, 小汽车的跟驰间距会比重卡短, 这些是由于智能网联车辆响应速度快和小汽车惯性小; **lcStrategic**、**lcAssertive**: 这两个参数是 SUMO 用于控制车辆换道行为的重要参数。**lcStrategic** (战略性换道参数)即换道是否具有长期规划性, 数值越大, 换道时会更多地考虑全局交通状况。**lcAssertive** (换道积极性参数)即车辆是否敢于进行换道, 尤其是在遇到稍微拥挤的车流时是否会果断执行换道操作, 数值越大, 车辆换道行为越果断和积极; **emissionClass**: SUMO 仿真软件中的车辆排放类别参数, 用于指定车辆的排放特性; 参数中的“HBEFA3”表示使用默认值, 为小汽车排放模型; “HBEFA3/HDV_G”参数中的“HDV”与前文所指代的人工驾驶小汽车不是同一概念, 该参数指代的是大型重卡的排放模型。

采用智能网联重卡编组时, 车流信息文件(*.rou.xml)中的 CAT 车辆属性需要进行的修改与添加如表 2 所示。

Table 2. Grouping CAT parameters

表 2. 编组 CAT 参数

车辆类型	carFollow Model	ccAccel /($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	ploegKp	ploegKd	Tau/s
CAT	CC	1.5	0.2	0.7	3

其中, “CC”代表 Plexe 提供的协同控制(Cooperative Control)模型, 专门用于 CACC 车队仿真, 表示车队内部的车辆采取恒定间距协同跟车。**ccAccel**为 CACC 控制加速度(m/s^2), 定义 CACC 模型在队列行驶时的最大加速度, 影响车队成员对前车加速或减速的响应程度。**ploegKp**和**ploegKd**是 CACC (协同自适应巡航控制)的控制参数。**Tau**与上表不同, 该处的值表示的是车队领头重卡与前车的期望跟驰时距, 而车队内部仍维持最初的恒定间距。

4.2.2. 评价指标

通行能力以标准车/小时(pcu/h)为单位进行衡量, 由于该混合流中含有标准车辆也含有大型重卡, 所以必须分开统计单位时间内通过的小汽车数、重卡车数。在仿真过程中, SUMO 会记录通过终点的车辆 id, 并在仿真结束后通过 TraCI 读取这些车辆的总行程时间和损失时间, 最后将小汽车、重卡分类后进行加权平均。损失时间的计算方法如公式(5)、(6), 损失时间是总行程时间减去畅行路况下的通行时间, L 是通道长度, v_f 为该流量下的畅行速度。

$$LossTime_n = TTT - \frac{L}{v_f} \quad (5)$$

$$LossTime_{avg} = \frac{\sum LossTime_n}{N} \quad (6)$$

安全水平用 TTC 值表征, TTC 代表的是两辆车在当前速度和轨迹下, 若不采取任何制动或加速措施, 预计发生碰撞所需的时间。根据以往研究, 通常将 TTC 阈值设定为 3 s, 即当 TTC 小于 3 s 时, 车辆面临潜在的碰撞风险, 若不采取紧急制动或规避措施, 则极有可能发生事故。因此, 在仿真过程中, 于每个时间步采集所有车辆的 TTC 值, 并统计其中 $TTC < 3\text{s}$ 的次数。

碳排放水平通常使用二氧化碳(CO_2)排放量作为评价指标。SUMO 提供详细的排放模型, 可根据车辆

类型、行驶速度、加速度等参数计算每辆车在仿真过程中的 CO₂ 排放量。本研究基于 SUMO 的 HBEFA 排放模型，对不同类型车辆的碳排放情况进行模拟和分析。在仿真过程中，SUMO 以每个时间步 step 记录各车辆的瞬时 CO₂ 排放量，并在整个仿真时段内进行累积得到总碳排放量，最后将总量与车辆数相除，分别得到小汽车和重卡的车均碳排放量。

4.3. 案例仿真分析

为了分析重卡渗透率 - 策略选择之间的影响作用，参数设置如图 9 所示，其中固定匝道出入比例为 0.1，仿真时间为 3000 step 即 5 min，CAV 渗透率为 0.2，小汽车流量为 2000 辆每小时，重卡流量为 1200 辆每小时。

Figure 9. Simulation parameter settings
图 9. 仿真参数设置

4.3.1. 通行能力分析评价

仿真结果如下图所示。图 10 是不同管控策略下，重卡总行程时间 - 重卡渗透率变化图和重卡 LossTime-重卡渗透率变化图；图 11 是不同管控策略下，小汽车总行程时间 - 重卡渗透率变化图和小汽车 LossTime-重卡渗透率变化图。从变化趋势可以发现，总行程时间和 LossTime 存在明显的相关性，这可以通过公式(5)推理得到。

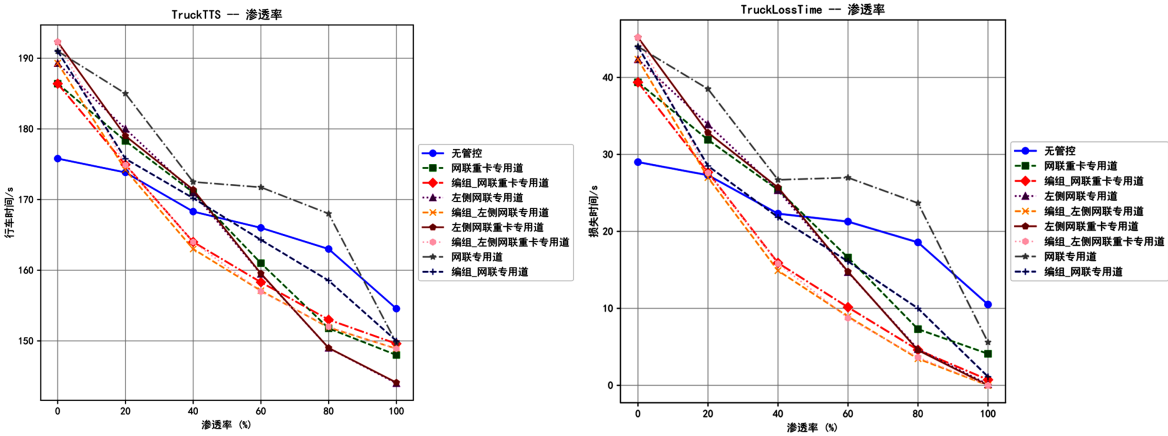


Figure 10. Heavy truck total travel time (left)-Heavy truck LossTime (right) heavy truck penetration rate change chart
图 10. 重卡总行程时间 - 重卡渗透率变化图(左); 重卡 LossTime-重卡渗透率变化图(右)

随着道路中 CAT 的比例越来越多,所有重卡车辆的总行程时间、损失时间逐渐递减,这说明智能网联技术的引入可以显著减少行程损耗、改善重卡的通行能力。在渗透率较低的场景下(即渗透率 0%~20%),策略一无管控的方案要明显优于管控策略;当渗透率大于 40%,无管控策略就明显弱于管控,这是由于此时开启专用道则不会浪费道路资源,而是能更好的将网联车辆集于一处,充分发挥智能网联技术的优势。当渗透率为 100%时,采用最佳的“左侧专用道”策略相较于无管控策略,重卡车辆的平均行程时间提高了 9%,节省了近 10 s 的时间。若进行横向对比,渗透率为 100%并且采用最优管控策略的工况对比 0 渗透率、无管控的工况提升了 19.31%。

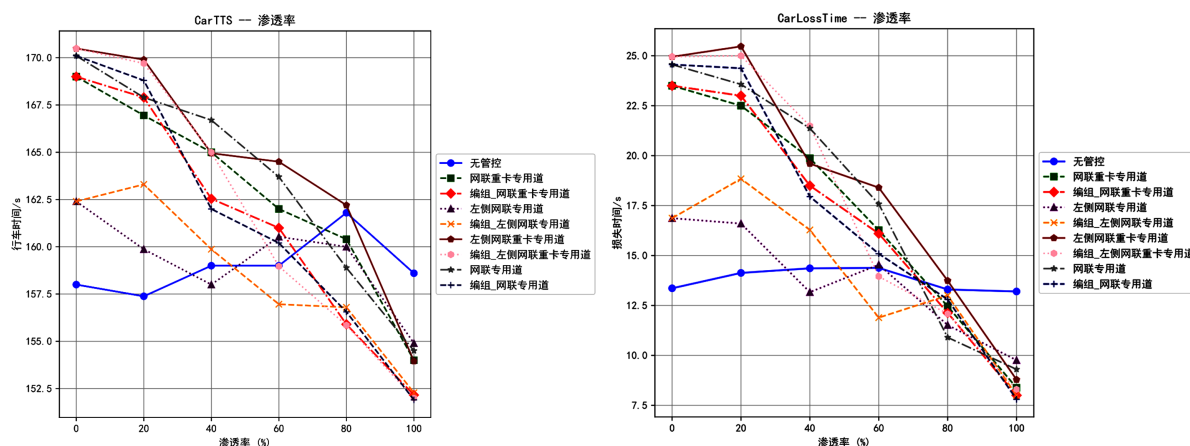


Figure 11. Passenger cars total travel time (left)-Passenger car loss time (right) heavy truck penetration rate change chart

图 11. 小汽车总行程时间 - 重卡渗透率变化图(左); 小汽车 LossTime-重卡渗透率变化图(右)

而小汽车的变化趋势与重卡的变化大相径庭。随着 CAT 渗透率的不断提高,无管控策略下的小汽车的行程时间和 LossTime 先提高后减小,而采取管控策略下的小汽车的行程时间和 LossTime 则是不断下降。当渗透率小于 80%时,所有管控策略都是建立在牺牲小汽车的行程时间来服务重卡的,只有当重卡渗透率超过 80%,任何管控策略对小汽车的通行能力改善才是正向的。当重卡渗透率为 100%时,通道内小汽车可以最多节省约 6 s 的行程时间。

综上所述,站在通行能力的角度分析,在重卡渗透率较低的场景开启专用道会牺牲小汽车用户的利益,只有当渗透率较高时(大于 60%)采取专用道管控策略才是最大效益。同时可以发现,编组策略结合专用道策略可以改善通行效率。

4.3.2. 安全水平分析评价

使用 TTCNum (即小于安全阈值的次数)来评价安全水平,结果如图 12 所示。

随着在重卡渗透率的提高,无管控场景下的危险次数单调递增,这是由于 CAT 会分散在两根客-货车道上行驶,但 CAT 会根据跟驰特性维持一个较短的跟驰间距,可能发生匝道驶入车辆的连续换道行为与影响了右侧两个车道的 CAT,进而提高危险水平。在渗透率较低的场景下,采取策略可能也会带来负面效果,这是由于开启专用道后虽然专用道上的 CAT 不会带来危险,但是 CAT 占用过多的资源导致其他车道上的车流量更大,进而导致危险次数提高。

4.3.3. 碳排放水平分析评价

碳排放结果如图 13 所示。首先图 13(左)中无管控策略,随着重卡渗透率的不断提高,重卡的车均排放量先增加后减少。当采取管控策略时,重卡碳排放量与重卡渗透率呈负相关,渗透率越高则碳排放越

低。这说明智能网联技术对车辆的跟驰行为改善明显，能使车辆行驶过程更加稳定，减少急走急停的现象从而使燃料充分燃烧，进而减少碳排放量。低渗透率时(渗透率小于 40%)，采取专用道管控策略下的重卡排放量显著高于无管控，这是由于道路资源浪费所导致的单车道流量过大引发拥堵。当 CAT 渗透率为 40%时，采用“编组_网联重卡专用道”策略相较于无管控策略，重卡碳排放减少约 7%。

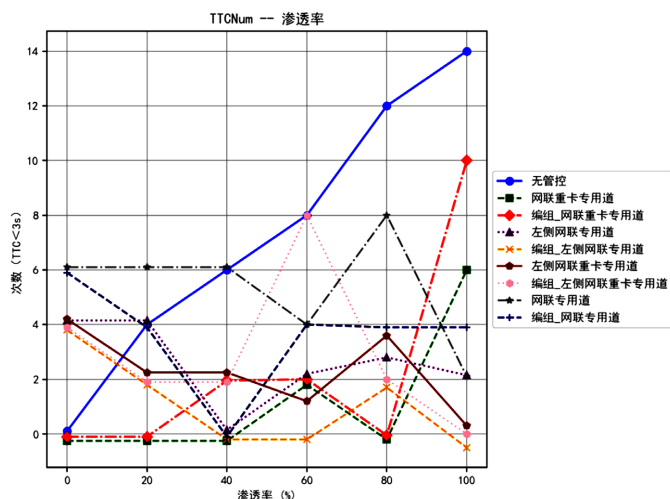


Figure 12. Safety level result chart
图 12. 安全水平结果图

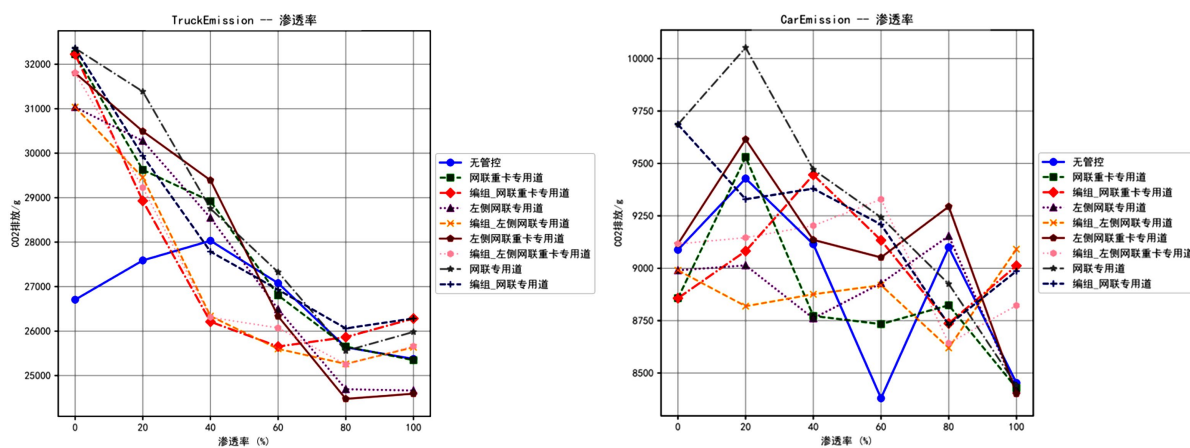


Figure 13. Changes in heavy truck emissions (left); Changes in passenger car emissions (right)
图 13. 重卡排放变化情况 (左); 小汽车排放变化情况 (右)

在图 13 (右)中难以找到小汽车的排放水平和重卡渗透率的明显相关性，但车道管控策略间存在明显的差异，重卡的效益提高一定程度上是源于其他车辆的牺牲，不同策略对小汽车的牺牲幅度不同，所以出现“左侧网联专用道”策略优于“左侧 CAT 专用道”策略。

5. 结论与展望

本研究围绕上海市两港大道高架快速路，在智能网联背景下对智慧货运通道动态管控策略展开深入探究，利用高速公路的真实路段，设计了五类车道管控策略，并结合卡车编组技术进行多场景仿真分析，最终得到以下结论：

(1) 随着网联车渗透率的增加,通行能力提高,尾部碰撞安全风险降低。当网联重卡渗透率增加时,重卡之间的跟驰间距减小,通行能力提升;且在不同重卡渗透率下,网联车渗透率与 TIT 值(衡量安全水平的指标)呈负相关,充分验证了网联车辆对提升交通安全水平的积极作用。

(2) 智能网联重卡专用道策略通过优化跟驰行为,显著降低高渗透率下的重碳排放,但低渗透率时因道路资源浪费可能加剧拥堵和排放,且策略效果伴随对小汽车通行权益的差异化牺牲。

(3) 在实践应用层面,基于 SUMO 仿真软件搭建了智能网联货运通道混合交通流的仿真。实现了对不同车道管控策略和卡车编组技术的模拟与评估,能够直观呈现各类仿真参数,为交通管理决策提供了有效的工具。

在未来,智能网联货运通道动态管控领域仍有诸多可拓展和深入研究的方向。虽构建了多类型车辆的跟驰模型,但仍存在进一步优化的空间。未来可以考虑更多影响因素,如不同天气条件、驾驶员情绪对驾驶行为的影响等,使模型更加精准地反映实际交通状况。同时可以在实际交通环境中进行进一步验证和推广,选择更多的实际路段进行实地测试,对研究中提出的动态管控策略进行优化和完善。

基金项目

国家自然科学基金(71871143)。

参考文献

- [1] Shang, W., Zhang, M., Wu, G., Yang, L., Fang, S. and Ochieng, W. (2023) Estimation of Traffic Energy Consumption Based on Macro-Micro Modelling with Sparse Data from Connected and Automated Vehicles. *Applied Energy*, **351**, Article ID: 121916. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121916>
- [2] Wang, S. and Lin, X. (2020) Eco-Driving Control of Connected and Automated Hybrid Vehicles in Mixed Driving Scenarios. *Applied Energy*, **271**, Article ID: 115233. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115233>
- [3] Vahidi, A. and Sciarretta, A. (2018) Energy Saving Potentials of Connected and Automated Vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **95**, 822-843. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.001>
- [4] Guo, Q., Li, L. and (Jeff) Ban, X. (2019) Urban Traffic Signal Control with Connected and Automated Vehicles: A Survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **101**, 313-334. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.026>
- [5] Han, X., Ma, R. and Zhang, H.M. (2020) Energy-Aware Trajectory Optimization of CAV Platoons through a Signalized Intersection. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **118**, Article ID: 102652. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102652>
- [6] Li, J., Yu, C., Shen, Z., Su, Z. and Ma, W. (2023) A Survey on Urban Traffic Control under Mixed Traffic Environment with Connected Automated Vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **154**, Article ID: 104258. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104258>
- [7] Zhao, X., Wang, Z., Xu, Z., Wang, Y., Li, X. and Qu, X. (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>
- [8] Dai, Q., Shen, D., Wang, J., Huang, S. and Filev, D. (2022) Calibration of Human Driving Behavior and Preference Using Vehicle Trajectory Data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **145**, Article ID: 103916. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103916>
- [9] Yao, Z., Wu, Y., Wang, Y., Zhao, B. and Jiang, Y. (2023) Analysis of the Impact of Maximum Platoon Size of Cavs on Mixed Traffic Flow: An Analytical and Simulation Method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **147**, Article ID: 103989. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103989>
- [10] Sun, W., Wang, S., Shao, Y., Sun, Z. and Levin, M.W. (2022) Energy and Mobility Impacts of Connected Autonomous Vehicles with Co-Optimization of Speed and Powertrain on Mixed Vehicle Platoons. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **142**, Article ID: 103764. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103764>
- [11] Liu, H., Zhuang, W., Yin, G., Li, Z. and Cao, D. (2023) Safety-Critical and Flexible Cooperative On-Ramp Merging Control of Connected and Automated Vehicles in Mixed Traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **24**, 2920-2934. <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3224592>
- [12] Wang, Q., Gong, Y. and Yang, X. (2022) Connected Automated Vehicle Trajectory Optimization along Signalized

- Arterial: A Decentralized Approach under Mixed Traffic Environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **145**, Article ID: 103918. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103918>
- [13] Shi, H., Chen, D., Zheng, N., Wang, X., Zhou, Y. and Ran, B. (2023) A Deep Reinforcement Learning Based Distributed Control Strategy for Connected Automated Vehicles in Mixed Traffic Platoon. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **148**, Article ID: 104019. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104019>
- [14] Yao, Z., Wang, Y., Liu, B., Zhao, B. and Jiang, Y. (2021) Fuel Consumption and Transportation Emissions Evaluation of Mixed Traffic Flow with Connected Automated Vehicles and Human-Driven Vehicles on Expressway. *Energy*, **230**, Article ID: 120766. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120766>
- [15] Yao, Z., Ma, Y., Ren, T. and Jiang, Y. (2024) Impact of the Heterogeneity and Platoon Size of Connected Vehicles on the Capacity of Mixed Traffic Flow. *Applied Mathematical Modelling*, **125**, 367-389. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.09.001>
- [16] Alam, A., Besselink, B., Turri, V., Mårtensson, J. and Johansson, K.H. (2015) Heavy-Duty Vehicle Platooning for Sustainable Freight Transportation: A Cooperative Method to Enhance Safety and Efficiency. *IEEE Control Systems Magazine*, **35**, 34-56.
- [17] 李茜瑶, 牛树云, 车晓琳, 等. 自动驾驶车辆混入下的货车专用车道设置条件评价方法[J]. 公路交通科技, 2023, 40(6):182-193.
- [18] 陈勇圳. 面向智能网联混合交通环境的车道管理策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [19] Qin, Y., Xie, L., Gong, S., Ding, F. and Tang, H. (2024) An Optimal Lane Configuration Management Scheme for a Mixed Traffic Freeway with Connected Vehicle Platoons. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **634**, Article ID: 129444. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.129444>
- [20] Sala, M. and Soriguera, F. (2020) Macroscopic Modeling of Connected Autonomous Vehicle Platoons under Mixed Traffic Conditions. *Transportation Research Procedia*, **47**, 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.089>