

# 混合流动态交通分配综述：建模、演化与求解

夏新海<sup>1,2</sup>, 邓浩彭<sup>2</sup>, 唐俊杰<sup>2</sup>, 詹琳<sup>2</sup>, 雷虎<sup>\*3</sup>, 易燕<sup>1</sup>, 王首硕<sup>2</sup>

(1.广州航海学院 粤港澳大湾区航运研究院, 广东 广州 510725; 2.广州航海学院 未来交通学院, 广东 广州 510725; 3.广州航海学院 创新创业学院, 广东 广州 510725)

**摘要:** 自动驾驶与网联技术快速落地使混合交通成为常态, 传统基于同质性假设的动态交通分配难以解释容量波动、拥堵传播与由关键参数变化触发的非线性相变。本文综合百余篇代表性文献, 系统梳理异质车辆条件下动态交通分配的建模-均衡-演化-求解研究进展, 阐明用户均衡-系统最优连续谱的形成机理、关键性质与调控空间。从微-中-宏三种建模粒度比较异质车辆差异, 进而引入“自动化水平×网联水平”解耦视角。归纳对比博弈论、变分不等式与多目标三类均衡理论; 解析、仿真与学习三条求解路径, 并整理常用评估场景与指标。本文总结了日内-日际两时间尺度下混合交通均衡的存在、稳定、可达等性质及其判据, 汇总主流研究识别的阶段临界阈值, 并提炼现有工作三类局限: 以二元划分建模为主、目标偏重单一效率、对演化-调控机制刻画尚浅。本文建议以“自动化水平×网联水平”二维建模框架、多目标动态均衡与“开环+闭环”协同调控为核心方向, 提升动态交通分配的机制解释力与现实适应性。所归纳的建模框架与性质判据可为路网管理、专用车道配置以及出行诱导与定价等政策与工程实践提供科学依据与评估参考。

**关键词:** 智能交通; 动态交通分配; 文献综述; 混合交通流; 交通均衡演化; 智能网联车辆

中图分类号: U491.1+12

文献标志码: A

## A review of dynamic traffic assignment in mixed traffic: modeling, evolution, and solution approaches

XIA Xinhai<sup>1,2</sup>, DENG Haopeng<sup>2</sup>, TANG Junjie<sup>2</sup>, ZHAN Lin<sup>2</sup>, LEI Hu<sup>\*3</sup>, YI Yan<sup>1</sup>, WANG Shoushuo<sup>2</sup>

(1.Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Shipping Research Institute, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 2.School of Future Transportation, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 3.School of Innovation and Entrepreneurship, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China)

**Abstract:** The accelerated rollout of automated driving and connected-vehicle technologies is making mixed traffic the norm, while dynamic traffic assignment based on homogeneity assumptions struggles to explain capacity fluctuations, congestion propagation, and nonlinear phase transitions triggered by changes in key parameters. This paper conducts a systematic review of more than one hundred representative studies, covering modeling, equilibrium, evolution, and solution of dynamic traffic assignment under heterogeneous vehicles, and clarifying the formation mechanism, key properties, and the scope for regulation and control of the user equilibrium-system optimum continuum. Heterogeneity is compared across micro, meso, and macro modeling granularities, and a

收稿日期: 2025-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52402423); 广东省普通高校重点领域专项(2022ZDZX1021, 2024ZDZX1033); 广东省科技创新战略专项资金资助项目(PDJH2024A289); 广州市教育局科研项目(2024312023)

作者简介: 夏新海(1978-), 男, 教授, 博士, 研究方向为交通规划与管控, 电话: 13342816658, E-mail: xiaxinhai@gzmtu.edu.cn

通信作者: 雷虎(1978-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为交通安全、交通流理论, 电话: 18122370312, E-mail: hooray@gzmtu.edu.cn

decoupled perspective is introduced through “automation level  $\times$  connectivity level.” Three equilibrium theories—game theory, variational inequality, and multi-objective formulations—are synthesized, and three solution paths—analytical, simulation, and learning—are compared, together with commonly used evaluation scenarios and metrics. On within-day and day-to-day time scales, the existence, stability, and reachability properties of mixed-traffic equilibria and their criteria are summarized. Stage-wise critical thresholds identified by mainstream studies are compiled, and three limitations of current work are distilled: the predominance of binary partition modeling, objectives focused on single-dimensional efficiency, and a shallow characterization of evolution–control mechanisms. It is recommended to center on a two-dimensional modeling framework based on “automation level  $\times$  connectivity level,” multi-objective dynamic equilibrium, and coordinated open-loop plus closed-loop control to enhance the mechanistic interpretability and real-world adaptability of dynamic traffic assignment. The synthesized framework and criteria provide a mechanistic basis and evaluation references for road network management, dedicated lane deployment, and traveler information/pricing in policy and engineering practice.

**Key words:** intelligent transportation; dynamic traffic assignment; literature review; mixed traffic flow; traffic equilibrium evolution; connected and automated vehicles

## 0 引言

动态交通分配 (Dynamic Traffic Assignment, DTA) 将时变出行需求引入经典静态交通分配问题, 核心在于刻画出行者的出发时间选择、路径决策与流量传播耦合作用下的网络状态时空演化, 以寻求并分析网络动态均衡状态<sup>[1-2]</sup>。近年来, 自动驾驶车辆 (Autonomous Vehicles, AV) 与网联车辆 (Connected Vehicles, CV) 迅速发展。世界经济论坛与波士顿咨询公司预测, 到 2035 年, L2 及以上 AV 将占全球新车销量逾 60%<sup>[4]</sup>。与此同时, 在 5G 通信、车联万物 (Vehicle-to-Everything, V2X) 和边缘计算支撑下, 车路协同稳步推进。中国、美国等国家已建设多个和试点示范区<sup>[5-6]</sup>。可以预见, 未来十年多数车辆将具备较高的自动化水平 (Automation Level, AL) 与网联水平 (Connectivity Level, CL), 智能网联车辆 (Connected and Autonomous Vehicles, CAV) 将大规模普及并成为

交通系统变革的关键驱动力<sup>[4]</sup>。

然而, CAV 与人类驾驶车辆 (Human-Driven Vehicle, HDV) 的长期混行, 使交通环境高度异质, 传统以“出行者同质”为前提假设的 DTA 面临深刻挑战<sup>[7-8]</sup>。这种异质性在微观层面重构了跟驰、换道、反应时延与信息获取等机制<sup>[9-10]</sup>, 再经由传播效应, 在宏观上造成路网容量与运行稳定性的不确定改变, 以及拥堵的级联扩散<sup>[11]</sup>。同时, 这也带来系统优化的契机: 通过控制与诱导部分 CAV, 规划者有望推动系统由最小化个体出行成本的用户均衡 (User Equilibrium, UE) 向最小化系统总出行成本的系统最优 (System Optimum, SO) 迁移<sup>[12-13]</sup>, 由此形成介于二者之间的 UE – SO 连续谱<sup>[14]</sup>与过渡区间的“混合均衡”<sup>[15]</sup>。在日内 – 日际耦合视角下, 可将日内均衡视为离散状态, 并以学习/更新机制连接, 得到日际尺度的演化动力学<sup>[16]</sup>; 判明何种演化路径稳定、高效且可达已成为研究焦点。

近十年来，尽管最优比率控制方案（Optimal-ratio Control Scheme, ORCS）<sup>[12]</sup>、非线性互补变分不等式<sup>[14]</sup>、平均场路由博弈<sup>[17-18]</sup>等重要工作推动了混合交通 DTA 研究，但总体仍偏重“以 CAV 渗透率量化性能改善”，缺乏对异质车辆“驾驶行为-路由目标-系统反馈”的机制性剖析。建模仍以 HDV/CAV “二分法”为主，未能体现 AL 与 CL 的异质分布。此外，虽然安全性、稳定性与公平性等议题在传统 DTA 均衡中早有涉及，但在混合环境下其表征机制与权衡关系更为复杂，当前研究对此关注不足，仍主要围绕单一效率目标展开。更深入地，模型推理与仿真结果提示：协作程度与信息完备度等因素可能驱动混合均衡演化经历稳定→振荡→分岔→混沌的受控相变<sup>[19-22]</sup>。这种非线性动力学现象尚未得到充分解释，亦缺乏针对性调控机制。

为回应已有研究在异质性建模、多目标均衡框架与复杂演化机制三方面的不足，构建更具解释力和适应性的 DTA 体系，本文从建模、均衡、求解与调控四个层面梳理混合交通 DTA 的研究进展，具体贡献如下：一、提出以“自动化水平×网联水平”刻画异质车辆差异的二维表征空间，并讨论异质行为假设与参数标定要点；二、归纳存在、连续、单调、稳定与可达“五性判据”，阐明协作比例、利

他权重、学习速率与信息完备度等参数对演化路径与相变边界的作用机理；三、整合不同 CAV 渗透率与调控策略下的性能转折区间，汇总常用测试网络与评估指标，以便检验与复现实验开展。四、总结“闭环为主、开环为辅”的协同范式，以 V2X 协调、编队合流维持系统自稳，并辅以信号配时、匝道计量与路权分配等低频开环措施形成滞回控制。

## 1 混合交通 DTA 建模框架

在混合交通情境下，DTA 建模框架需加以拓展，以表征不同 AL 与 CL 车辆的行为差异及其交互机制<sup>[7,23]</sup>。本节介绍多类车辆异质性建模与多尺度动态网络加载（Dynamic Network Loading, DNL），为后续均衡描述与演化分析奠定基础。

### 1.1 多类异质性车辆建模

如图 1 所示，SAE J3016 标准将自动驾驶等级分为 L0 至 L5，且车辆网联程度各异，现实中的车辆在 AL 与 CL 上连续分布。据工信部数据，目前我国 L2 级及以上自动驾驶的渗透率已达 55.7%（美国约 40%），预计 2035 年将到达 83%（美国约 72%），其中 L3 级车辆在 2026 年将突破百万量级。半自动/半联网的 Semi-CAV 已广泛存在并将在十年内成为交通流主体<sup>[4]</sup>。

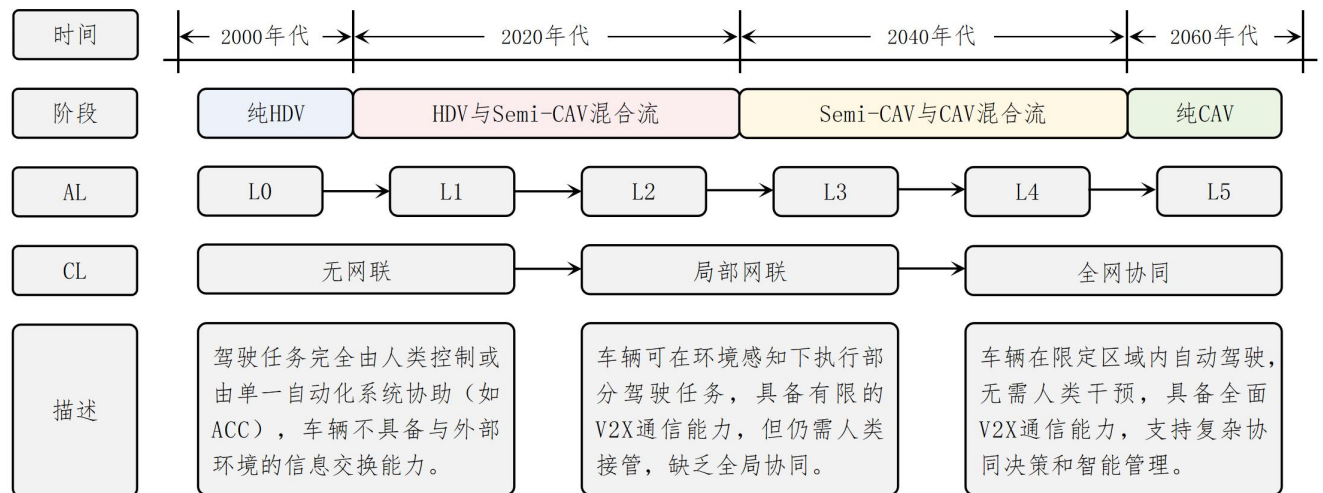


图 1 智能网联技术发展与混合交通流演进概览

Figure 1. Overview of intelligent connected vehicle technology development and the evolution of mixed traffic flow

然而，既有研究常将车辆简单划分为纯 CAV 和纯 HDV，忽视了 Semi-CAV 在决策延迟与稳定性上的中间特性，容易低估跟驰滞后、编队集散及其引

发的容量抖动和速度波动，并削弱对拥堵传播与系统振荡风险的刻画<sup>[24-25]</sup>。事实上，车辆异质性源自行为逻辑、信息处理与均衡趋向不同，可归纳为两

个正交维度。一是驾驶行为：在跟驰间距、编队组织与变道规则上的差异会改变有效容量与时空阻抗；二是路由目标：UE 或 SO 均衡决定路径选择的外部性与协调程度。二者经由 DNL 相互作用，并在网络层面触发级联效应。进一步看，CAV 可分解为 AV 和 CV：AV 倾向依赖车载传感器与本地计算，而 CV 依赖 V2X 实现信息共享与协同控制——前者行为更贴近分散的 UE，后者具备实现 SO 的条件<sup>[26-27]</sup>。相对而言，HDV 决策依赖驾驶员经验与心理，多表现有限理性，趋向随机用户均衡（Stochastic User Equilibrium, SUE）<sup>[28-29]</sup>；而 Semi-CAV 的行为则介于其间，建模需在不同粒度方法间寻求折中。

为更真实地反映多维异质性，本文认为，可将

车辆视为在 AL-CL 二维空间中取值的实体群，并结合实测或统计数据估计其分布特征。据文献<sup>[7]</sup>数据预测，车辆在该空间中呈现随时间演化的混合分布，如图 2 所示。短期内 CV 和 AV 将逐渐增加；长期来看，AL 和 CL 的交互演进将推动两者向 CAV 集群演化，并最终成为混合交通主体。引入 AL-CL 空间后，交通流系统的演化变量从单一 CAV 渗透率拓展为动态分布向量，更能揭示 Semi-CAV 主导下的多类车辆交互机制与均衡演化规律。但与此同时，也增加了计算与参数标定的难度，需要借助合理的离散化与数据驱动的校准策略，以降低维度并提升可辨识性。

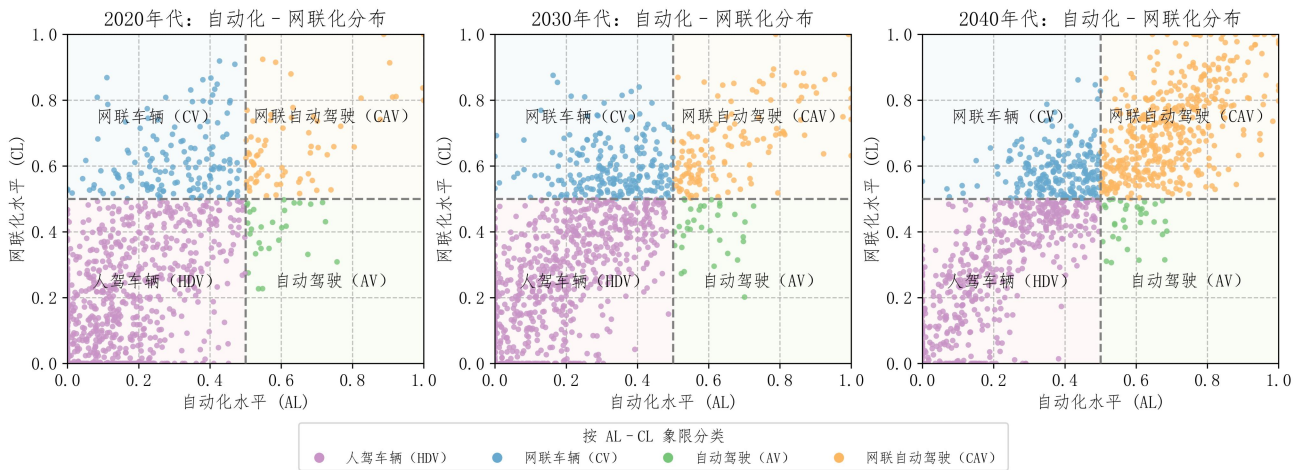


图 2 AL-CL 空间中多时期车辆群异质性分布示意图

Figure 2. Schematic diagram of multi-period vehicle group heterogeneity distribution in the AL - CL space

## 1.2 多尺度动态网络加载

DNL 是 DTA 的核心模块，用于刻画交通流在路网内的时空传播。出于对模拟保真度与计算可扩展性的折衷权衡，实践中形成了宏观、中观与微观三类模型。宏观模型将交通流视作连续介质，Lighthill-Whitham-Richards (LWR) 体系通过偏微分方程描述干线传播与激波现象，并在网络层面借助宏观基本图实现高效的状态估计与边界调控<sup>[30-31]</sup>。微观模型按车辆个体模拟跟驰与换道行为，可复现交通流中的振荡与溢流等现象，保真度高但计算开销大<sup>[32]</sup>。尽管如此，其在策略评估中具有优势；如祁宏生等<sup>[33]</sup>基于主动间隙适配与换道序列规划的微观自动驾驶模型，在仿真中将道路通行能力提升约

24%。中观模型则位于二者之间，以“车辆包”或分布表征车群；Daganzo 提出元胞传输模型（Cell Transmission Model, CTM），作为 LWR 的离散化形式有效再现排队与溢流<sup>[8,34]</sup>，链路传输模型（Link Transmission Model, LTM）进一步以更粗粒度提升效率，适用于大规模网络的预测与控制<sup>[35-36]</sup>。

在混合交通情境下，常见做法是在传播或阻抗函数中加入编队、容量与自由流速度等修正来反映 CAV/Semi-CAV 影响并改进行程时间估计<sup>[7]</sup>。然而，基于微观机理自下而上推导路段阻抗与网络效应的研究仍显不足<sup>[37]</sup>。微观模型可捕捉交通流中的非线性和混沌现象，但难以扩展；而宏观模型利于理论推导与全局分析，但可能牺牲细节。因此，愈来愈多工作转向多尺度耦合：在瓶颈与交织区采用微观

高保真载荷,在骨干网络使用中观传播,并结合宏观理论实施边界控制;同时通过“仿真-优化”迭代,将微观 DNL 与路径更新耦合,且已拓展至异质城市网络的专用车道设计<sup>[13,38]</sup>。然而,关键在于跨尺度的一致性与信息闭环,为保障整体解释力,参数映射、需求-行为-传播的双向校准与联合辨识的相关研究仍有待深化。

## 2 混合交通 DTA 均衡理论

在单类别 DTA 中,通常讨论动态用户均衡(Dynamic User Equilibrium, DUE)和动态系统最优(Dynamic System Optimum, DSO)两种主要的均衡概念:前者是个体无法通过单边改进而获益的自利选择,后者则是系统总目标的最小化,通常需要控制或定价机制实现。在第一节建模的混合交通系统中,异质车辆可能遵循不同决策原则,从而形成介于 UE 与 SO 之间的混合均衡。为更准确地描述不同车辆群体的异质性与互动机制,本节将介绍三种互补的理论框架:博弈论均衡、变分不等式均衡和多目标均衡。

### 2.1 均衡理论早期发展

二战后,欧美汽车迅速普及,而道路规划仍沿袭非机动车时代的格局,供需矛盾日益突出。出行预测与资源分配成为城市管理的核心问题,交通均衡理论由此兴起。1952 年, Wardrop<sup>[39]</sup>提出了奠定现代交通科学基础的 Wardrop 平衡原理,用以刻画交通网络中的两种关键状态:UE 和 SO,分别对应个体最优选择和全局效率目标。同期, Nash<sup>[40]</sup>在博弈论领域提出的 Nash 均衡为研究多主体的决策行为提供了理论工具。随后, Beckmann 等<sup>[41]</sup>通过凸优化模型刻画 UE,为交通分配提供了数学基础。随着计算能力和数学模型的进步,20 世纪 70-80 年代,学者们开始探索 Wardrop 平衡与 Nash 均衡的关系。Haurie 和 Marcotte<sup>[42]</sup>的研究首次证明,在特定条件下 Nash 均衡能够逼近 Wardrop 平衡,揭示了非合作博弈理论与交通网络均衡的深刻联系。此后,研究者相继将随机性与动态性融入交通分配理论,以刻画更贴近现实的个体决策过程。1977 年, Daganzo

和 Sheffi<sup>[43]</sup>提出了 SUE,利用 Logit/Probit 模型模拟驾驶者的感知误差与不完全理性,从而完善了静态用户均衡对理性假设的扩展。Merchant 和 Nemhauser<sup>[1]</sup>于 1978 年在 Wardrop 平衡基础上引入时间维度,提出了 DUE,将路径选择与流量分布建模为多阶段动态博弈,并通过流量-时间函数刻画拥堵传播与反馈机制。Peeta 与 Mahmassani<sup>[44]</sup>则融合二者,系统化了动态 SUE,能够更真实地反映拥堵预期与路径选择的耦合过程。总体而言,早期均衡理论回应了城市交通规模化与机动化的时代需求,不仅奠定了数理基础,还拓展了随机与动态维度,为后续研究与实践打下根基。然而,受限于当时的计算能力、数据匮乏和智能网联技术缺失,对 DSO 及 UE-SO 混合均衡的探索较为不足。

### 2.2 博弈论均衡

博弈论是分析多主体路由与管控互动的有力工具,尤为适用于智能网联水平异质的混合交通。在组合优化视角下,可归并为纳什-古诺、垄断与主从博弈三类范式<sup>[45]</sup>。混合交通的路径选择可视作主从博弈:上层面向 CAV 进行有限干预,下层 HDV 依据 UE 原则选择路径,从而形成双层规划。沿此思路, Zhang 与 Nie<sup>[12]</sup>提出的 ORCS 框架显示,引导少量 CAV 走 SO 路径便能带来显著效率提升,且仅增加少数个体出行成本<sup>[14,46]</sup>。这一结果似乎描绘了“少量受控、全局改善”的美好图景。但从实践角度看,成败终究取决于激励与执行:如若 HDV 不配合、CAV 不执行,这种博弈均衡的可达性就无从谈起,甚至由于“搭便车”问题产生反效果。

随网络与主体规模增长,经典多主体博弈面临维度灾难。为此,研究者引入平均场博弈(Mean Field Game, MFG)与马尔科夫路由博弈(Markov Routing Game, MRG)以简化均衡刻画。MFG 假设局部车辆同质,个体基于群体平均行为决策,从而将多主体博弈近似为“个体-整体”博弈,显著降低计算维度。实践上, Shou 等<sup>[17]</sup>将 MFG 与多智能体深度 Q 学习结合,使 CAV 在全局态势与平均行为的基础上优化路径选择,从而平抑交通波动。MRG 则将路径选择视为马尔可夫纳什过程,结合强化学习使车辆依托实时数据与历史经验自适应路由。Yang 和 Liu<sup>[18]</sup>



提出的平均场深度强化学习 (HMF-DRL) 展示了在大规模随机网络中的可扩展性。总体看来, MFG 与 MRG 把数据驱动范式引入博弈分析, 更能重现现实复杂互动, 但前者受制于同质性假设, 后者在稳定性与收敛性上不能保证, 未来亟需在计算简化与真实性之间寻得平衡。

### 2.3 变分不等式均衡

在动态均衡建模中, 变分不等式 (Variational Inequality, VI) 为混合交通提供了统一而严谨的表述。令  $K$  为可行集,  $C(x)$  为类别路径成本算子。动态均衡  $x^*$  定义为满足  $\langle C(x^*), y - x^* \rangle \geq 0, \forall y \in K$ , 即非线性约束下的“不可改进”稳定点。不同的  $C(x)$  对应不同的均衡: 取自利成本  $C = c$  得到 DUE; 记  $\Phi$  为网络总损失, 取系统成本  $C = c + \partial\Phi / \partial x$  得到 DSO; 若设  $\tilde{C} = (1 - \gamma)c + \gamma(c + \rho\partial\Phi / \partial x)$ , 则由协作比例  $\gamma \in [0, 1]$  与利他权重  $\rho \geq 0$  驱动连续调控机制, 即可实现从 UE 向 SO 的过渡。

基于 VI 的代表工作各有侧重: Bagloee 等<sup>[14]</sup>将 CAV 视作 SO 用户、HDV 视作 UE 用户, 构建 VI 的等价互补问题 (Complementarity Problem, CP) 以描述 UE-SO 混合均衡, 分层清晰但类别成本与受控比例多为外生设定, 难以刻画执行偏差与激励约束; Wang 等<sup>[27]</sup>将混合交通网络最坏情况下的交通分配转化为双层规划问题, 上层优化链路容量、下层通过 VI 计算给定容量条件下的均衡, 实现规划与运行的闭环, 却对不确定集设定与容量参数化较敏感。Ngoduy 等<sup>[13]</sup>则将 DSO 转写为最优控制问题, 一阶条件与传播方程同构, 利于与高保真 DNL 对接, 但参数与边界条件的可辨识性要求较高; Zhang 和 Nie<sup>[12]</sup>把协作比例  $\gamma$  与利他权重  $\rho$  嵌入  $C(x)$ , 实现 UE-SO 连续可调谱系, 提供了面向政策的“旋钮”, 其可达性与唯一性仍受单调性与需求弹性约束。

VI 可直接通过替换成本算子  $C(x)$  建模多主体, 并与优化理论无缝衔接, 例如 CP/KKT 条件可用于梯度投影、对偶分解与并行 ADMM 等算法的设计, 然动态均衡多以无限维 VI 或最优控制给出<sup>[47-48]</sup>, 常

采用时间离散或“日内-日际”解耦缓解计算负担: 如 Cantarella 与 Watling<sup>[16]</sup>在日际 DTA 均衡演化中引入出行者记忆与习惯以解释长期趋稳机理; Ma 与 He<sup>[49]</sup>则在日内 DTA 中刻画实时信息与行为联动对均衡的影响。沿此脉络, 可形成双时间尺度动力学, 在同一状态空间讨论溢流、信号与编队协同下均衡的存在、稳定与可达等性质<sup>[47]</sup>, 据此指导政策干预的最优演化路径。

### 2.4 多目标均衡

近年, DTA 由单一“时间-成本”走向多目标均衡 (Multi-Objective Equilibrium, MOE), 以成本向量在效率、可靠、环境与公平等维度上刻画帕累托权衡。Yang 与 Huang<sup>[50]</sup>提出首个多准则网络 UE-SO 解析模型, 揭示收费策略与多目标流量的耦合边界; Tan 等<sup>[51]</sup>证明了风险规避-可靠性均衡的帕累托效率特性; 环境取向研究将  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等排放写入成本函数, 验证减排-效率双目标配流的可行性<sup>[52-53]</sup>。Ehrgott 等<sup>[54]</sup>提出多目标随机用户均衡 (MO-SUE), 利用 Logit 决策同时权衡时间-费用-排放三维效用; 多目标 SODTA 框架借助实时诱导实现全网时间-排放的协同最小化<sup>[55]</sup>, 而多智能体自私路由模型则揭示多准则驱动下的行为演化规律<sup>[56]</sup>。然而, MOE 仍面临四大难题, 见图 3。

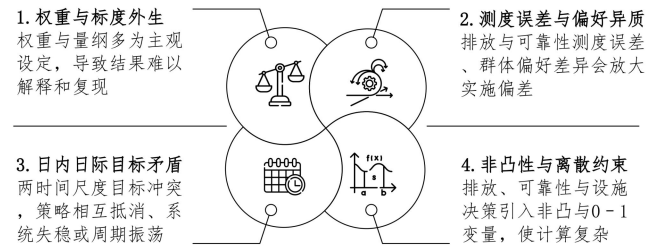


图 3 MOE 四大难点概览

Figure 3. Four major challenges in MOE overview

在混合交通环境中, 除了总体效率外, CAV 与 HDV 的分配公平成为关键: 若仅令 CAV 按 SO 行事而 HDV 维持 UE, 可能出现收益转移与群体劣化, 需引入定价、积分等纠正机制内化外部性方能实现帕累托改进<sup>[57]</sup>。例如, 在瓶颈处通过协同合流等通行权让渡, 略微牺牲 CAV 效率, 可显著改善 HDV 通行条件, 从而在效率与公平间取得更好的折衷<sup>[58]</sup>; 可交易积分机制也被证明能够在不使任何一方受损

的前提下提升整体性能<sup>[46,59]</sup>。政策层面则利用 MOE 分析统一收费中的效率-公平权衡及含环境约束的配流策略<sup>[60-61]</sup>，并对 CAV 车道部署开展效率影响评估<sup>[62-63]</sup>。总体来看，随着自动化和网联水平提升，系统均衡趋向从 UE 向 SO 演进，在过渡期厘清在何种机制与条件下能实现效率、公平与其他目标的协同最优<sup>[14]</sup>。MOE 的价值不在于给出唯一解，而在于将冲突显性化并与可执行的激励相联结，使多目标的改进路径可验证、可比较、可实施。

2.5 均衡理论对比

表 1 对比了三类混合交通 DTA 均衡理论。博弈论均衡重在异质车辆互动与激励机制，但规模化时难以保证收敛；变分不等式均衡提供统一的数理框架，适配中大规模网络，但依赖严格的单调性与可微假设；多目标均衡能兼顾效率、环境与公平，但计算复杂且设定主观。三者各具优势与局限，为混合交通 DTA 提供不同模型描述，从行为建模、数理刻画和目标扩展上形成互补

表 1 混合交通 DTA 均衡理论对比  
Table 1. Comparison of equilibrium theories of DTA in mixed traffic

理论框架	优点	缺点	适用场景
博弈论均衡	刻画异质车辆互动；可嵌入协作比例、利他权重与激励机制；便于与学习求解法耦合	规模化后收敛性无保证；如要化简则与异质性互斥；激励难落实，执行合规成本高	瓶颈区、交叉口等局部策略评估；匝道、限速与拥堵波控制
变分不等式	数学形式统一，便于推导混合均衡；解析性好，易与投影、固定点等经典求解器对接	依赖单调和可微条件，但溢流、编队易破坏条件；动态问题常为无限维，需时空离散简化	大规模网络的均衡与政策评估；解析×仿真/学习两层耦合
多目标均衡	效率-可靠性-环境-公平的帕累托权衡；可与定价、积分和优先权等政策工具衔接	权重外生、偏好差异大；非凸和高维导致计算复杂；指标体系不统一影响可比性	拥堵定价、可交易积分、减排约束与专用道部署等政策设计

3 混合交通均衡状态演化

对于交通规划者而言，核心问题是：随着智能网联程度提升，路网均衡将如何演化，以及相关性质会怎样改变。本节旨在回答上述问题。

3.1 UE-SO 连续谱与演化变量

自利与协同型驾驶者并存，使混合交通均衡不再局限于“纯 UE”或“纯 SO”的二元端点，而呈现介于二者之间的 UE-SO 连续谱<sup>[14,66]</sup>。为描述系统在该谱系中的位置，记演化变量  $\alpha = f(\gamma, \rho, \lambda, \beta)$ ，其中  $f:[0,1]^3 \times (0,\infty) \rightarrow [0,1]$ ，具体参数含义与取值范围见表 2。约定  $\alpha=0$  为 UE 端、 $\alpha=1$  为 SO 端：前者对应纳什均衡<sup>[64]</sup>，任何单边改道均不带来改进；后者对应帕累托最优，可由系统边际成本激励实现<sup>[65]</sup>。

表 2 演化变量的构成要素与时间尺度  
Table 2. Constituent elements and time scales of evolutionary variables

演化变量	影响参数	取值范围	时间尺度	作用描述
$\alpha$	$\gamma$	[0,1]	日内	协作比例：表示参与 SO 协作的车辆占比，决定系统可调控程度
	$\rho$	[0,1]	日内	利他权重：反映车辆路径选择中内化系统边际成本的程度
	$\lambda$	[0,1]	日际	学习速率：刻画出行者根据新信息调整路径的积极性
	$\beta$	(0,∞)	日际	信息完备度：衡量出行者对路径成本差异的反应强度

在此基础上,日内的混合均衡可写成个体感知成本的凸组合  $\tilde{C} = (1-\gamma)c + \gamma(c + \rho\partial\Phi/\partial x)$  使系统在 UE-SO 两端之间形成可连续插值的谱系。进而,日际层面可视为一个离散动力学过程:出行者依据上一日观测与诱导更新路径选择。该定式可见于日际 DTA 文献与离散选择理论中的系统化表述<sup>[67-68]</sup>,有利于把技术、信息与行为对均衡位置与演化路径的影响纳入同一框架加以分析。

需要强调,网络性能并非随演化变量  $\alpha$  单调改善,可以从 AL 与 CL 两方面理解。在 AL 方面,AV 虽能提升局部链路容量,但增容在链路间分布不均时,触发“混合悖论”:全网延误反而随 AL 上升,这点已被 Mehr 与 Horowitz<sup>[69]</sup>严格证明。在网络设计层面的对应即 Braess 逆反:新增容量或专用道可能把混合均衡推向更差状态<sup>[9-12]</sup>。在 CL 方面,信息覆盖与质量的提升通常改善可达性与可靠性,但在 CV 占比较高时边际收益递减:Hoang 等<sup>[70]</sup>指出,在

特定网络与控制条件下,适度延迟反而可通过平滑合流、抑制激波带来净改善。因此,谱系“中段”并非天然优于 UE 端,若缺乏有效激励与约束,系统可能长期停留在次优但稳定的点。此外,某些理论上存在的 UE-SO 混合均衡,在现实的日内-日际调整与 DNL 条件下未必可达,亦可能因非线性传播而失稳。

### 3.2 混合均衡演化的性质分析

明确 UE-SO 连续谱的形态与性质,对求解算法与调控机制设计至关重要。在统一框架下,日内 DNL 与均衡条件写为  $G(x;\alpha) = 0$ , 日际调整过程写为  $x_{k+1} = T(x_k;\alpha)$ 。基于此,既有研究从“存在、连续、单调、稳定、可达”关键“五性”提出典型判据;在混合交通场景下,控制权转移(Transition-of-Control, ToC)、编队集散和 V2X 传输等机制可能破坏这些性质,详见表 3。

表 3 混合均衡演化“五性”判据与风险因素

Table 3. Criteria of the “five attributes” for mixed equilibrium evolution and associated risk factors

性质	核心问题	典型判据	混合交通风险点
存在	是否至少有一组满足 UE-SO 混合均衡的可行解?	有效路径延误算子连续、可行域非空闭有界 $\Rightarrow$ 存在 $x$ 使 $G(x;\alpha) = 0$ <sup>[47]</sup>	溢流、CAV 专用道与编队导致 DNL 算子分段不连续
连续	流量微扰动,成本是否平滑变化而非跳变?	$G(\cdot;\alpha)$ 对 $x$ Lipschitz 连续或半光滑 $\Rightarrow$ 可做灵敏度分析 <sup>[71-72]</sup>	编队集散、V2X 丢包或时延、ToC 事件导致不可微
单调	当流量增加时,路径成本是否随之上升?	$\langle F(x) - F(y), x - y \rangle \geq 0$ (单调/强单调) $\Rightarrow$ 唯一性+局部收敛 <sup>[73]</sup>	路由目标矛盾、异质车辆空间分布不均破坏单调 <sup>[69]</sup>
稳定	系统受扰动后能否回到均衡或其邻域?	日际: $\rho(\partial T/\partial x) < 1$ ; 日内: 对 $G$ 线性化, 阻尼充分 <sup>[16,47,49]</sup>	激波过强、相位失配、通信时延导致振荡、分岔与混沌
可达	求解过程能否在有限步内到达某存在均衡?	对偶间隙、价差与 KKT 残差 $\rightarrow 0$ ; 不同初值收敛结果一致 <sup>[68,74]</sup>	“存在 $\neq$ 可达”: 非凸或非单调导致陷入次优稳定点或循环

“五性”并非彼此孤立,而是一条由算子性质、日内-日际动力学以及政策旋钮共同牵引的因果链。单调性与适度的正则性奠定了存在与可能的唯一性,在此之上,解对演化变量及其参数的连续性决定政策推进是否平稳。稳定性则判断理论解能否执行落地,取决于传播收缩性与行为更新规则,而可达性受学习速率与初始条件制约,学习过快易振荡,过

慢则可能陷入次优吸引域。因而,调控混合均衡演化的关键在于确立一个参数区间,既保持单调与连续,又保证稳定与可达。

### 3.3 渗透率驱动混合均衡演化

在混合交通现有研究中,CAV 渗透率是使用最广的演化变量。其机制解释力虽不及第二节所述的



AL-CL 空间，但口径一致、便于跨研究对比。近五年的仿真与实测结果表明，网络性能随 CAV 渗透率呈现由“混合悖论”到“Braess 逆反”再到“协同域”的三段式演化，详见表 4

表 4 不同 CAV 渗透率区间下网络延误与性能演化汇总表

Table 4. Summary of network delay and performance evolution across different CAV penetration rate ranges

渗透率区间	网络总延误变化 ( $\Delta TT$ 参考范围)	实证 临界点	代表仿真/实测研究	关键机制
0–20 %	微幅恶化或持平 (+3 %~+10 %)	—	Yıldırım 和 Özuysal <sup>[75]</sup> 在 İzmir 网络微观仿真中发现，渗透率仅 10% 时，ToC 事件与低效专用道使平均延误增加约 5–8%。Liu 等 <sup>[76]</sup> 对青岛路网的案例分析显示，渗透率不足 15% 时，总行程时间上升 3%，HDV 与 CAV 差异甚微。Fan 和 Yang <sup>[77]</sup> 在夏洛特信号交叉口的实测证明， $\leq 20\%$ CAV 对走廊运行改善有限。	混合悖论：稀疏 CAV 与随机 HDV 交互→不稳定跟驰与交互冲突
20–60 %	非单调变化， $\approx 25\%$ 时最差； $\approx 40–50\%$ 转为净改善 (–5 %~–20 %)	40~45 %	Zhuang 等 <sup>[78]</sup> 发现动态网络中存在“Braess 逆反”，延误在 25% 渗透率附近峰值达 +15%；Ma 和 Mehr <sup>[79]</sup> 实验采用自适应车头时距控制后，约 40% 渗透率时可弥补约 12% 效率损失；Cai 等 <sup>[80]</sup> 研究隧道入口发现，渗透率超 30% 排队时间下降 18%。	Braess 现象：局部容量提升→路由重新分配→全网延误先升后降
60–100 %	$\Delta TT$ 下降 15%~35 %； 道路容量上升 30 %+	60~70 %	Xu 等 <sup>[81]</sup> 在 10km 封闭测试场验证，约 70% 渗透率可使冲突降 86%，行程时间仅增 2%。Park 等 <sup>[82]</sup> 城市路网仿真指出，容量随渗透率超 60% 后陡增；Garg 和 Bouroche <sup>[83]</sup> 的混合交通安全模型亦显示，就算 V2V 丢包率达 70%，70% 渗透率仍能冲突减 2/3，验证高渗透区间鲁棒性。	协同域：CAV 编队主导，V2X 协同→流量稳定、排队波衰减

这些研究共同强调过渡期（20–60%）策略干预的必要性。建议构建以闭环为主、开环为辅的协同调控机制：在理想吸引域内，优先依靠闭环控制使系统自稳与自愈，例如通过 V2X 速度协调抑制激波、编队控制缓解瓶颈合流冲突、信息整形降低路径选择敏感度，从而分布式消纳短期扰动并提升韧性；一旦参数漂移逼近阈值，出现跳变风险，再以低频低幅的开环措施将系统推回吸引域边界，如信号配时校准、匝道汇入率限制与异质车辆路权分配。两类调控以明确的触发阈值与滞回区间衔接，既避免临界区频繁切换，又压低干预成本与外部性，使系统沿期望均衡轨道长期维持。

## 4 混合均衡求解与评估

当引入多种车辆类型后，DTA 求解的复杂性进一步加剧，不仅需同时满足各类别的均衡条件，还要考虑它们之间的相互作用。过去十余年的研究探索了多种途径，主要可归纳为仿真、解析和学习三类。为便于不同算法在统一框架下对比，本节列出常用测试路网与评估指标。

### 4.1 仿真方法

仿真是解析混合交通均衡问题中最具灵活性的方法之一，能够在微观和中观尺度下重现跟驰、变

道、信号控制及 V2X 交互,从而捕捉 CAV-HDV 间的拥堵传播过程。该方法典型流程如下图 4:

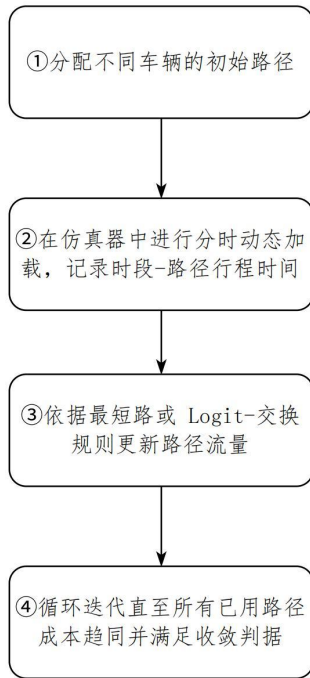


图 4 仿真方法求解流程图

Figure 4. Flowchart of the solution procedure for the simulation method

大量研究在此基础上构建了高保真混合交通仿真框架。例如, Levin 和 Boyles 的多类别 CTM 率先将 CAV 编队效应嵌入中观 DNL, 实现了宏-微耦合的 DTA 仿真<sup>[8]</sup>。Peque 等<sup>[84]</sup>在 DTA 中引入了交通管理中心提供的实时路况信息, 模拟驾驶员在不完全信息下的路径调整行为, 并基于 SUMO 微观仿真验证了其向 Nash 均衡收敛的有效性。然而, 高计算复杂度仍是此类方法的主要瓶颈。

为提升求解效率, Mehrabani 等<sup>[85]</sup>基于 SUMO 平台提出了仿真驱动的 SB-DSO 算法, 通过构建边际行程时间的替代模型, 在大规模 DTA 问题中表现远优于传统逐次平均法 (Method of Successive Averages, MSA) 与 Frank-Wolfe (FW) 算法。他们进一步开发的混合交通 DTA 框架, 能够综合考虑 CAV 在微观与中观尺度下对道路容量的影响, 结合并行计算与稀疏数据结构, 即使在多类别流的大规模复杂网络中, 也可获得理想的近似均衡解<sup>[23]</sup>。

仿真方法的优势在于可灵活集成排队溢出、信号控制、异质驾驶行为及 CAV 协同机制等现实要素,

尤其适用于测试复杂场景下的算法。然而, 其收敛解通常仅为近似值, 且存在收敛性与稳定性风险, 在驾驶行为正反馈增强或信息扰动下容易出现振荡乃至混沌。因此, 提升仿真求解的鲁棒性是研究重点, 当前研究致力于更新松弛、自适应步长、初始化优化等收敛加速策略<sup>[86]</sup>。

## 4.2 解析方法

解析类 DTA 通过显式的数学规划或 VI/CP 框架刻画 KKT 等混合均衡条件, 并借助定点、梯度或投影类算法直接求解, 因而具备可验证的最优性与收敛性。例如 Han 和 Friesz<sup>[48]</sup>的固定点框架利用累积量-延误算子, 在 Lipschitz 弱单调条件下证明全局收敛, 并扩展至百万级节点的 DUE 计算; Thong 等<sup>[87]</sup>进一步在未知全局参数的前提下, 在无限维路径流空间中求解 DUE。对于 DSO, 问题通常表现为含队列约束的最优控制或大规模非线性规划; Ngoduy 等<sup>[13]</sup>基于转移-储存模型扩展链路容量以刻画 CAV 队列形成, 实现加权排队与延误的最小化的快速计算。Mehrabipour 和 Hajbabaie<sup>[88]</sup>提出分布式梯度算法, 将 SO-DTA 问题在 CTM 网络上拆分为局部子问题, 通过邻域通信实现全局一致, 相比集中式求解节省 50–70% 计算时间, 最优性间隙控制在 5% 以内<sup>[89]</sup>。

为缓解连续时间域导致的问题维度爆炸, 解析法常采用时间离散将 DTA 嵌入时空网络, 但由此得到的稀疏大规模非线性规划仍消耗大量内存与时间。同时, 非凸延误、激波传播与容量耦合会破坏算子单调性, 影响算法稳定性<sup>[90-91]</sup>。此外, 离散步长需与传播波速相容: 步长过大易产生数值扩散、过小则引发刚性与内存压力。总体而言, 解析法凭借严谨数理推导为混合交通 DTA 提供了收敛性与最优性保证, 其规模适应性可通过分布式分解、近端/正则化、算子稀疏化与温启动等策略提升。

## 4.3 学习方法

随着交通系统日益复杂, 传统解析与优化方法在效率和适用性上渐显局限, 数据驱动范式带来新的契机<sup>[92]</sup>。多智能体强化学习 (Multi-agent Reinforcement Learning, MARL) 能够自然融入异质

主体, 将动态博弈转化为策略学习过程, 尤为契合混合交通场景。图 5 概括 MARL 六种典型架构<sup>[93]</sup>:

(1-3) 独立学习, 对应策略全局同质、全局异质和组内同质; (4) 集中式控制; (5) 中心化训练、

分布式执行; (6) 去中心化训练、近邻通信与分布式执行。它们可类比中央平台调度、不同 CL 车辆的自利路由、云端训练-车载执行的 CAV 编队, 以及邻近车辆通过 V2X 协作。

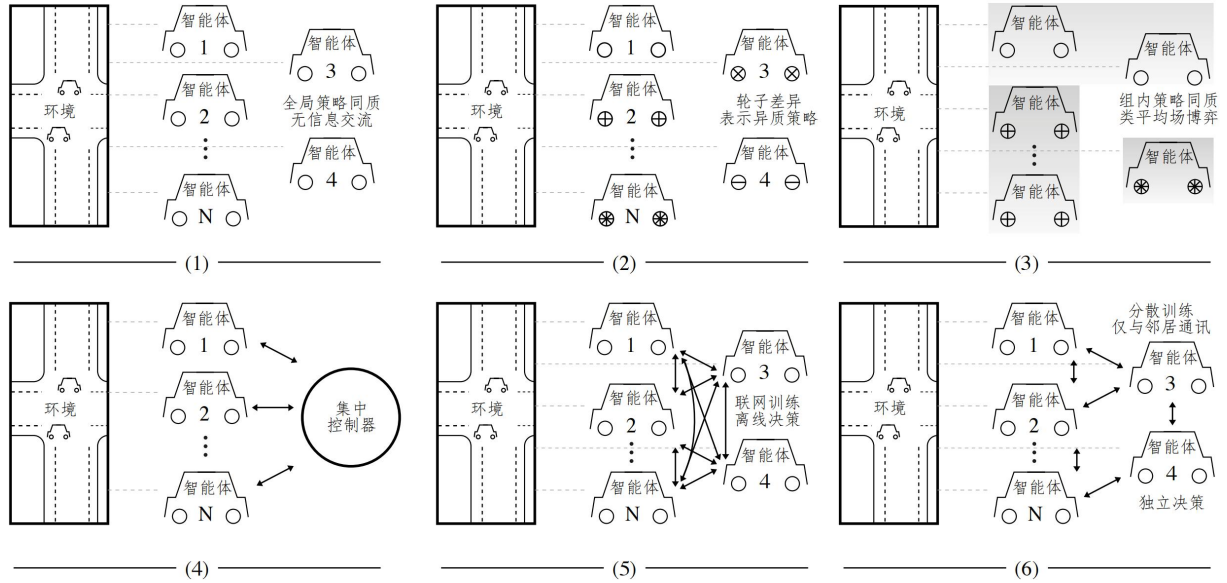


图 5 MARL 六类信息结构与训练 - 执行范式

Figure 5. Six types of information structures in MARL and the training - execution paradigm

Boyan 和 Littman<sup>[94]</sup>率先将强化学习用于动态路由, 随后 Littman<sup>[95]</sup>提出 MRG 框架, 为多智能体在动态网络中交互提供了理论支持。在竞争与合作并存的混合交通中, Hu 与 Wellman<sup>[96]</sup>构建了基于随机博弈的 Nash-Q 学习算法, 验证其在零和博弈中的收敛性, 并于 2003 年推广至一般和博弈<sup>[97]</sup>。徐东伟等<sup>[98]</sup>综述表明深度强化学习与 MARL 能在大时空波动与不完备信息下实现自适应协调控制; 闫超等<sup>[99]</sup>从可扩展性与可迁移性视角归纳 MARL 在大规模交通场景的通信开销、信用分配与非平稳性三大局限。近年来, Shou 等<sup>[17]</sup>结合 MRG 与平均场 MARL, 在中小型网络上实现了由 DUE 向 DSO 的渐近收敛。总体看, MARL 优势在于自适应、去中心化的求解, 并可与 V2X 协同。

然而, MARL 求解依赖动态规划结构 (如 Q 学习系列), 仍面临 Bellman 定义的“维数灾难”、信息不完全与计算开销等挑战<sup>[100]</sup>。为缓解高维与稀疏性, Mnih 等<sup>[101]</sup>通过引入深度 Q 网络架构, 利用深度神经网络近似动态规划问题, 但在路网中难以充分捕获拓扑关联。近期研究将图神经网络 (Graph Neural Network, GNN) 引入混合交通 DTA 求解框

架, 通过消息传递在路网图上聚合邻域信息, 提升可扩展与泛化能力: 例如 Lin 等<sup>[102]</sup>开发的异构 GNN 模型融合自适应图注意机制, 针对异质车辆建模其特定交通行为, 在收敛速度与预测精度上超越传统神经网络。Hu 和 Xie<sup>[103]</sup>则在编码器-解码器框架内引入图注意力网络 (Graph Attention Network, GAT) 来学习和推导 DTA 解决方案, 在多个标准网络上实现低至 3.8%~8.5% 的误差, 且显著缩短计算时间。综合最新综述, GNN 正成为突破混合 DTA 高维、跨尺度与异质性挑战的重要方向<sup>[104]</sup>。

#### 4.4 求解方法对比

表 5 对比三类求解路径: 仿真法为规则驱动, 便于复现机理与做反事实推演, 但算力开销大、解多为近似且稳定性差; 解析法数理可证存在性、收敛性和边际量, 适合作为基线与灵敏度分析工具, 但掣肘于单调与离散化假设, 难覆盖现实复杂性; 学习法由数据驱动, 训练后推理快、可在线, 但训练代价高, 可解释性不足。最佳实践是分层混合: 上层解析给出全局边界与初分配, 中层仿真校准机理与验真, 下层学习承担实时诱导与协同控制。

表 5 混合交通 DTA 研究中的标准测试网络

Table 5. Standard test networks in mixed traffic DTA studies

理论框架	优点	缺点	适用场景
仿真方法	直接建模排队溢出、V2X 信号控制与异质行为交互；无需强假设即可复现激波、拥堵传播、振荡等现象	算力需求高、难以扩展；收敛性弱、无最优保证；依赖大量数据标定参数	异质车辆互动理论的假设检验；复现交叉口、合流区与专用道的局部非线性动态
解析方法	数理表达严谨、解的存在与收敛可证；推导过程透明，可输出关键机理量；算法结构清晰，扩展性良好	求解常需时空离散化，导致问题规模膨胀；难刻画交通的非线性复杂性	大规模网络离线评估，测试调控政策效应；作为多方法耦合框架上层，给出边界与方向
学习方法	可直接从数据学习，无需严格数学假设；适应非线性和高维复杂性；训练后推理快速，支持近实时决策	可解释性与收敛性缺乏保证；训练阶段样本需求大、算力开销高	实时诱导与控制高不确定的交通流；复刻复杂且难以建模的异质车辆交互

#### 4.5 评估场景与指标

表 6 汇总了混合交通 DTA 研究中常用的典型网络，包括从课堂示例到大规模城市级别。这些网络

为算法性能评估、政策效果分析与理论模型验证提供了可靠的试验场。

表 6 混合交通 DTA 研究中的标准测试网络

Table 6. Standard test networks in mixed traffic DTA studies

网络名称	区域	节点/链路/OD	网络类型	原始/权威数据源
Braess	虚拟	4/5/1	玩具/演示网络	Braess,D. <sup>[105]</sup>
Ziliaskopoulos	虚拟	6/7/1	玩具/演示网络	Ziliaskopoulos, A. K. <sup>[106]</sup>
Nguyen-Dupuis	虚拟	13/19/4	小型城区	Nguyen,S.和 Dupuis,C. <sup>[107]</sup>
Sioux Falls	北美-美国	24/76/182	小型城区	LeBlanc,L.J. <sup>[108]</sup>
Eastern Massachusetts	北美-美国	74/258/5,402	小型城区	TNTP (Bar-Gera, H.) <sup>[109]</sup>
Berlin-Friedrichshain	欧洲-德国	224/523/23	小型城区	GMNS Plus (NSF POSE) <sup>[110]</sup>
Anaheim	北美-美国	416/914/1,406	中型城市	GMNS Plus (NSF POSE) <sup>[110]</sup>
Winnipeg	北美-加拿大	1,052/2,836/147	中型城市	TNTP (Bar-Gera, H.) <sup>[109]</sup>
Chicago Sketch	北美-美国	933/2,950/>142,512	中型城市	GMNS Plus (NSF POSE) <sup>[110]</sup>
Terrassa	欧洲-西班牙	1,609/3,264/55	中型城市	TNTP (Bar-Gera, H.) <sup>[109]</sup>
Luxembourg	欧洲-卢森堡	2,372/5,969/—	大型城市	Codeca 等 <sup>[111]</sup>
Gold Coast	澳大利亚	4,807/11,140/1,068	大型城市	TNTP (Bar-Gera, H.) <sup>[109]</sup>
Austin	北美-美国	7,388/18,961/7,388	大型城市	TNTP (Bar-Gera, H.) <sup>[109]</sup>
Washington DC	北美-美国	7,957/14,312/—	大型城市	GMNS Plus (NSF POSE) <sup>[110]</sup>
Berlin-Center	欧洲-德国	12,981/28,376/865	特大型城市	GMNS Plus (NSF POSE) <sup>[110]</sup>
Birmingham	欧洲-英国	14,639/33,937/898	特大型城市	TNTP (Bar-Gera, H.) <sup>[109]</sup>
King County	北美-美国	25,576/47,890/—	特大型城市	GMNS Plus (NSF POSE) <sup>[110]</sup>
Sydney	澳大利亚	33,837/75,379/3,264	特大型城市	TNTP (Bar-Gera, H.) <sup>[109]</sup>
Bay Area	北美-美国	121,875/195,141/—	超大型城际	GMNS Plus (NSF POSE) <sup>[110]</sup>

表 7 归纳了效率、拥堵、可靠性、环境、公平与安全六类主流指标，并给出简要定义与度量。它们构成一套多维评估基线，支撑混合交通 DTA 的系统分析与多目标优化。

表 7 混合交通 DTA 研究中的评估指标汇总  
Table 7. Summary of evaluation metrics in mixed traffic DTA studies

指标	定义与计算	维度	单位	混合交通下的意义	代表文献
系统总出行量/耗时 TSTT/VHT	$TSTT = \sum \text{流量} \times \text{行程时间}$ ; VHT 为车辆出行小时的累计	效率	veh·h	综合衡量系统效率与出行规模，反映 AL-CL 水平对系统效率的提升	Ngoduy 等 <sup>[38]</sup> Xiong 等 <sup>[112]</sup>
行程时间指数 TTI	高峰期行程时间÷自由流时间	拥堵	—	比例化拥堵程度；对诱导与专用车道策略敏感	美国交通统计局 <sup>[113]</sup>
规划时间/缓冲时间指数 PTI/BTI	$PTI = \text{总时间的 } 95\% \div \text{自由流时间}$ ; $BTI = (\text{总时间的 } 95\% - \text{平均时间}) / \text{平均时间}$	可靠性	%	评估导航与信息提供是否有效降低出行时间波动，缓解交通不确定性	Carrion 等 <sup>[114]</sup>
CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> 排放强度	基于行程距离与速度曲线，量化给定交通流况下的污染物排放	环境	g·km <sup>-1</sup>	体现编队、控速与协同路由对污染物排放的削减效果，支撑绿色交通分析	Patil 等 <sup>[52]</sup> Tidswell 等 <sup>[53]</sup>
Gini 系数/Jain 指数	按个体或群体延误分布计算不均衡度量	公平	0–1	评估异质车辆间、中心与边缘地段的分配公平	Dixit 等 <sup>[115]</sup> Rad 等 <sup>[116]</sup>
碰撞时间裕度 TTC/PET	冲突时间裕度，高风险阈 $TTC < 4$ , $PET < 4$	安全	s	用于诊断异质车辆交互潜在冲突，识别协作不足风险	Gettman 和 Head <sup>[117]</sup> He 等 <sup>[118]</sup>

## 5 结语

自动化与网联水平各异的混合交通将成为常态，DTA 面临范式重塑。本文全面综述混合交通 DTA 的建模框架、均衡理论、演化规律、求解算法与评估指标，归纳现有进展与不足，并指出面向多维异质性、多目标均衡与智能调控的研究方向。

主要研究发现如下：

(1) 渗透率的解释力有限：仅用 CAV 渗透率来驱动系统演化，容易忽略半自动车辆在不同场景下的切换与差异，导致对容量、排队传播和出行成本的估计偏差。更合理的思路是将“自动化水平×网联水平”显式拆开，把车辆能力、信息获取和行为策略串联起来，从而更好地解释混合交通的差异化表现。不过，这一做法也对数据获取与参数校准提出了更高要求，是实现工程化应用的关键前提。

(2) UE-SO 连续谱的非单调演化：协作比例、利他程度或信息完备度的增加，并不一定带来线性改善，反而常在中间阶段出现“先恶化、后改善”的拐点，甚至诱发类似 Braess 逆反的结果。而且，混合均衡存在并不保证可达或稳定：日内拥堵与日际学习叠加后，系统可能进入振荡甚至混沌。当前研究缺乏针对均衡性质、临界阈值与稳定边界的统一识别与复现方法，直接限制了调控政策的合理设定。

(3) 求解、评估与决策尚未闭环：解析、仿真与学习方法的结合已逐渐成为主流，兼顾了可解释性、细节刻画和计算效率，但在评估与应用层面仍显不足。现有效率、拥堵、排放、公平与安全等指标尚未形成口径统一的体系，缺乏跨场景可比性；多目标均衡更多停留在理论描绘，而未能与实际的价格、积分、优先权等激励机

制真正打通。这使得研究成果距离形成可操作的治理方案仍有差距。

基于上述发现,未来研究可以从以下三个方面展开:

- (1) 异质车辆建模范式升级:应超越单一“CAV 渗透率”作为系统演化变量,构建 AL-CL 二维空间描述异质车辆。通过实车实验和大规模数据分析,反演出多级车辆混行的跟驰、变道和路径选择行为,并以此为基础,将 AL-CL 空间为自变量,路网指标为因变量,探索交通均衡系统的演化。
- (2) 多目标均衡理论深化:应构建适用于混合交通环境的多目标动态均衡模型,以回应智能网联化带来的安全性、稳定性、公平性与环境友好性等治理需求;深入揭示不同目标之间的内在冲突与协同关系,提出可落地的资源分配与激励机制,引导交通系统向兼顾多维绩效的帕累托最优状态演化。
- (3) 动态调控机制强化:应着重揭示混合均衡演化过程中的受控相变机理,识别并量化影响其演化的关键临界条件及吸引域的边界特性。在此基础上,构建以出行者闭环控制为主、规划者开环干预为辅的分层调控框架,激发混合交通系统的自组织与自学习能力,促使路网向期望均衡有序演化。

## 参考文献 (References):

- [1] MERCHANT D K, NEMHAUSER G L. A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems[J]. *Transportation Science*, 1978, 12(3): 183-199.
- [2] PEETA S, ZILIASKOPOULOS A K. Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2001, 1(3): 233-265.
- [3] 李志纯,钟春平.城市交通网络综合平衡配流模型及求解算法[J].*重庆交通学院学报*, 2001, (01): 55-57. DOI: CNKI: SUN: CQJT.0.2001-01-013.  
LI Z C, ZHONG C P. Integrated equilibrium assignment model in urban traffic network and algorithm[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2001, (01): 55-57. DOI: CNKI: SUN: CQJT.0.2001-01-013.
- [4] World Economic Forum, Boston Consulting Group. Autonomous Vehicles: Timeline and Roadmap Ahead[EB/OL]. (2025-04-24) [2025-09-12]. <https://www.weforum.org/publications/autonomous-vehicles-timeline-and-roadmap-ahead/>.
- [5] 工业和信息化部,公安部,自然资源部,住房和城乡建设部,交通运输部.五部门关于公布智能网联汽车“车路云一体化”应用试点城市名单的通知[EB/OL]. (2024-07-01) [2025-09-12]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content\\_6965771.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6965771.htm).  
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Public Security, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Transport. Notice of five ministries on publishing the list of pilot cities for the “vehicle-road-cloud integration” application of intelligent connected vehicles[EB/OL]. (2024-07-01) [2025-09-12]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content\\_6965771.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6965771.htm).
- [6] U.S. Department of Transportation; Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. Connected Vehicle Pilot Deployment Program (2024 Update)[EB/OL]. (2024-04-18) [2025-09-12]. <https://www.itskrs.its.dot.gov/briefings/executive-briefing/connected-vehicle-pilot-deployment-program-2024-update>.
- [7] WANG J, PEETA S, HE X. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 126: 139-168.
- [8] LEVIN M W, BOYLES S D. A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 62: 103-116.
- [9] SALA M, SORIGUERA F. Capacity of a freeway lane with platoons of autonomous vehicles mixed with regular traffic[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 147: 116-131.
- [10] CHEN D, AHN S, CHITTURI M, et al. Towards vehicle automation: Roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 100: 196-221.
- [11] TALEBPOUR A, MAHMASSANI H S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 71: 143 - 163.
- [12] ZHANG K, NIE Y M. Mitigating the impact of selfish routing: An optimal-ratio control scheme (ORCS) inspired by autonomous driving[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 87: 75-90.
- [13] NGODUY D, NGUYEN C H P, LEE S, et al. A dynamic system optimal dedicated lane design for connected and autonomous vehicles in a heterogeneous urban transport network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 186: 103562.
- [14] BAGLOEE S A, SARVI M, PATRIKSSON M, et al. A mixed user - equilibrium and system - optimal traffic flow for connected vehicles stated as a complementarity problem[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(7): 562-580.
- [15] LIANG Q, LI X, CHEN Z, et al. Day-to-day traffic control for networks mixed with regular human-piloted and connected autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2023, 178: 102847.
- [16] CANTARELLA G E, WATLING D P. A general stochastic process for day-to-day dynamic traffic assignment: Formulation, asymptotic behaviour, and stability analysis[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 92: 3-21.
- [17] SHOU Z, CHEN X, FU Y, et al. Multi-agent reinforcement learning for Markov routing games: A new modeling paradigm for dynamic traffic assignment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*,



- 2022, 137: 103560.
- [18] YANG S, LIU Y. Markov game for CV joint adaptive routing in stochastic traffic networks: A scalable learning approach[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2024, 189: 102997.
- [19] HUANG K, DI X, DU Q, et al. Scalable traffic stability analysis in mixed-autonomy using continuum models[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 111: 616-630.
- [20] Disbro J E, Frame M. *Traffic flow theory and chaotic behavior*[R]. New York (State). Dept. of Transportation, 1989.
- [21] DENDRINOS D S. Traffic-flow dynamics: a search for chaos[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1994, 4(4): 605-617.
- [22] GUO R Y, HUANG H J. Chaos and bifurcation in dynamical evolution process of traffic assignment with flow "mutation" [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009, 41(3): 1150-1157.
- [23] BAMDAD MEHRABANI B, ERDMANN J, SGAMBI L, et al. A multiclass simulation-based dynamic traffic assignment model for mixed traffic flow of connected and autonomous vehicles and human-driven vehicles[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2025, 21(2): 2257805.
- [24] LI Y, CHEN S, HA P Y J, et al. Leveraging vehicle connectivity and autonomy to stabilize flow in mixed traffic conditions: Accounting for human-driven vehicle driver behavioral heterogeneity and perception-reaction time delay[EB/OL]. (2020-08-17) [2025-09-12]. <https://arxiv.org/abs/2008.04351>.
- [25] GUAN H, CHEN X, MENG Q. Mixed traffic network with semi-autonomous vehicles: a three-dimensional macroscopic fundamental diagram and its application to dual-mode perimeter control[EB/OL]. (2024-05-29) [2025-09-12]. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4794719](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4794719)
- [26] XIE T, LIU Y. Impact of connected and autonomous vehicle technology on market penetration and route choices[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 139: 103646.
- [27] WANG J, WANG W, REN G, et al. Worst-case traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles by factoring in the uncertain link capacity[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 140: 103703.
- [28] 熊轶, 黄海军, 李志纯. 交通信息系统作用下的随机用户均衡模型与演进[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2003, (03): 44-48.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2003.03.009.
- XIONG Y, HUANG H J, LI Z C. A stochastic user equilibrium model under ATIS and its evolutionary implementation[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2003, (03): 44 - 48.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2003.03.009.
- [29] 李志纯, 黄海军. 随机交通分配中有效路径的确定方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2003, (01): 28-32.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2003.01.005.
- LI Z C, HUANG H J. Determining the efficient paths in stochastic traffic assignment[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2003, (01): 28 - 32.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2003.01.005.
- [30] LIDTHILL M J, WHITHAM G B. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1955, 229(1178): 317-345.
- [31] BILAL M T, GIGLIO D. Evaluation of macroscopic fundamental diagram characteristics for a quantified penetration rate of autonomous vehicles[J]. *European Transport Research Review*, 2023, 15(1): 10.
- [32] 马庆禄, 牛圣平, 曾皓威, 等. 网联环境下混合交通流偶发拥堵演化机理研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(05): 97-106.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.05.010.
- MA Q L, NIU S P, ZENG H W, et al. Mechanism of non-recurring congestion evolution under mixed traffic flow with connected and autonomous vehicles[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(05): 97 - 106.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.05.010.
- [33] 祁宏生, 应雨燕, 林俊山, 等. 混合自动驾驶场景多换道需求下的主动间隙适配和换道序列规划[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2021, 19(04): 36-51.DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.04.031.
- QI H S, YING Y Y, LIN J S, et al. Proactive gap adaptation and sequence planning for multiple lane-changing requests under mixed autonomous vehicle flow[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2021, 19(4): 36 - 51.DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.04.031.
- [34] YU W, HUA X, NGODUY D, et al. On the assessment of the dynamic platoon and information flow topology on mixed traffic flow under connected environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 154: 104265.
- [35] YPERMAN I. *The Link Transmission Model for Dynamic Network Loading*[D]. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [36] JIN W L. Continuous formulations and analytical properties of the link transmission model[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 74: 88 - 103.
- [37] 姚志洪, 郝慧君, 巫雪梅, 等. 考虑自动驾驶的混合交通流路段阻抗函数[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2021, 19(04): 1-12.DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.07.024.
- YAO Z H, HAO H J, WU X M, 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.
- [38] 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.
- [39] Wardrop J G. Some theoretical aspects of road traffic research[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1952, 1(3): 325 - 362.
- [40] NASH J. Non-cooperative games[J]. *Annals of Mathematics*, 1951, 54(2): 286 - 295.
- [41] BECKMANN M, McGUIRE C B, WINSTEN C B. *Studies in the economics of transportation*[M]. New Haven, CT: Yale University Press, 1956.
- [42] HAURIE A, MARCOTTE P. On the relationship between Nash - Cournot and Wardrop equilibria[J]. *Networks*, 1985, 15(3): 295 - 308.
- [43] DAGANZO C F, SHEFFI Y. On stochastic models of traffic assignment[J]. *Transportation Science*, 1977, 11(3): 253-274.
- [44] PEETA S, MAHMASSANI H S. System optimal and user equilibrium time-dependent traffic assignment in congested networks[J]. *Annals of Operations Research*, 1995, 60(1): 81-113.

- [45] 彭显玥, 王昊. 交通分配与信号控制组合优化研究综述[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(01): 1-18.DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2022.08.018.  
PENG X Y, WANG H. Review of research on combined traffic assignment and signal control problem[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2023, 21(1): 1 - 18.DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2022.08.018.
- [46] ZHANG F, LU J, HU X. Traffic equilibrium for mixed traffic flows of human - driven vehicles and connected and autonomous vehicles in transportation networks under tradable credit scheme[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020(1): 8498561.
- [47] IRYO T. Properties of dynamic user equilibrium solution: existence, uniqueness, stability, and robust solution methodology[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2013, 1(1): 52-67.
- [48] FRIESZ T L, HAN K, BAGHERZADEH A. Convergence of fixed-point algorithms for elastic demand dynamic user equilibrium[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 150: 336-352.
- [49] MA X; HE X. Multi-class within-day dynamic traffic equilibrium with strategic travel time information[EB/OL]. [2025-09-12]. <https://arxiv.org/abs/2410.15260>.
- [50] YANG H, HUANG H J. The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2004, 38(1): 1-15.
- [51] TAN Z, YANG H, GUO R. Pareto efficiency of reliability-based traffic equilibria and risk-taking behavior of travelers[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 66: 16-31.
- [52] PATIL G R, AULTMAN-HALL L, HOLMÉN B A. Environmental traffic assignment: Developing emission-based models[C]//Transportation Research Board 88th Annual Meeting. Washington, DC: TRB, 2009.
- [53] TIDSWELL J, DOWNWARD A, THIELEN C, et al. Minimising emissions in traffic assignment with non-monotonic arc costs[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 153: 70-90.
- [54] EHRGOTT M, WANG J Y T, WATLING D P. On multi-objective stochastic user equilibrium[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 81: 704-717.
- [55] ZHAO Y, MA C, ZHAO M, et al. An optimal multi-objective dynamic traffic guidance approach based on dynamic traffic assignment[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2025, 657: 130257.
- [56] O' NEILL S, BAGDASAR O, BERRY S, et al. Modelling equilibrium for a multi-criteria selfish routing network equilibrium flow problem[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 201: 658-669.
- [57] MANSOURIANFAR M H, GU Z, WALLER S T, et al. Joint routing and pricing control in congested mixed autonomy networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 131: 103338.
- [58] 郝威, 龚雅馨, 张兆磊, 等. 面向高速公路混合交通流的车辆协同合流策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(01): 224-235.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2023.01.024.  
HAO W, GONG Y X, ZHANG Z L, et al. Cooperative merging strategy for freeway ramp in a mixed traffic environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(01): 224-235.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2023.01.024.
- [59] ZHANG F, LU J, HU X. Tradable credit scheme design with transaction cost and equity constraint[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 145: 102133.
- [60] HAN D, YANG H. The multi-class, multi-criterion traffic equilibrium and the efficiency of congestion pricing[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(5): 753-773.
- [61] MEI D, LIU C H. Bi-objective optimization of traffic assignment with air quality consideration via CFD-based surrogate model[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 91: 104425.
- [62] 郝威, 张兆磊, 吕能超, 等. 考虑自动驾驶专用车道的混合交通分配模型[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 317-327.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.10.025.  
HAO W, ZHANG Z L, LYU N C, et al. Mixed traffic assignment model based on autonomous driving lanes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 317 - 327.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.10.025.
- [63] 郝威, 俞海杰, 高志波, 等. 自动驾驶专用车道影响下的CACC车流管理策略[J]. 中国公路学报, 2022, 35(04): 230-242.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.019.  
HAO W, YU H J, GAO Z B, et al. Management methods for cooperative adaptive cruise control vehicles flow considering dedicated lanes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(04): 230-242.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.019.
- [64] Krichene W, Drighès B, Bayen A M. Online learning of Nash equilibria in congestion games[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2015, 53(2): 1056-1081.
- [65] Wang X, Huang H J. Bi-criteria system optimum traffic assignment in networks with continuous value of time[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2013, 25(2): 119-125.
- [66] HOUSHMAND A, WOLLENSTEIN-BETECH S, CASSANDRAS C G. The penetration rate effect of connected and automated vehicles in mixed traffic routing[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1755-1760.
- [67] LI M, LU J, SUN J. Day - to - day traffic assignment model considering information fusion and dynamic route adjustment ratio[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2020, 2020(1): 5751349.
- [68] CANTARELLA G E, WATLING D P. Modelling road traffic assignment as a day-to-day dynamic, deterministic process: a unified approach to discrete-and continuous-time models[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2016, 5(1): 69-98.
- [69] MEHR N, HOROWITZ R. Can the presence of autonomous vehicles worsen the equilibrium state of traffic networks?[C]//2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1788-1793.
- [70] HOANG N H, PANDA M, VU H L, et al. A new framework for mixed-user dynamic traffic assignment considering delay and accessibility to information[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 146: 103977.
- [71] HAN K, PICCOLI B, FRIESZ T L. Continuity of the path delay operator for dynamic network loading with spillback[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 92: 21-23.
- [72] Han K, Friesz T L. Continuity of the effective delay operator for networks based on the link delay model[J]. Networks and Spatial Economics, 2017, 17(4): 1095-1110.
- [73] FRIESZ T L, BERNSTEIN D, SMITH T E, et al. A variational inequality formulation of the dynamic network user equilibrium problem[J]. Operations Research, 1993, 41(1): 179-191.
- [74] BIE J, LO H K. Stability and attraction domains of traffic equilibria in a day-to-day dynamical system

- formulation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(1): 90-107.
- [75] YILDIRIM Z B, ÖZUYSAL M. Autonomous vehicles and urban traffic management for sustainability: Impacts of transition of control and dedicated lanes[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19): 8323.
- [76] LIU C, ZYRYANOV V, TOPILIN I, et al. Investigating the impacts of autonomous vehicles on the efficiency of road network and traffic demand: A case study of Qingdao, China[J]. *Sensors*, 2024, 24(16): 5110.
- [77] FAN W, YANG T. Impact of connected and autonomous vehicles on signalized intersections with transit signal priority[R]. University of North Carolina at Charlotte. Center for Advanced Multimodal Mobility Solutions and Education, 2022.
- [78] ZHUANG D, HUANG Y, JAYAWARDANA V, et al. The braess's paradox in dynamic traffic[C]//2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 1018-1023.
- [79] MA X, MEHR N. Learning to influence vehicles' routing in mixed-autonomy networks by dynamically controlling the headway of autonomous cars[C]// 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 3510-3516.
- [80] CAI J, LIU Y, LI Z. A speed optimization model for connected and autonomous vehicles at expressway tunnel entrance under mixed traffic environment[J]. *PLoS One*, 2024, 19(12): e0314044.
- [81] XU Z, WANG X, WANG X, et al. Safety validation for connected autonomous vehicles using large-scale testing tracks in high-fidelity simulation environment[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2025, 215: 108011.
- [82] PARK J E, BYUN W, KIM Y, et al. The impact of automated vehicles on traffic flow and road capacity on urban road networks[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021(1): 8404951.
- [83] GARG M, BOUROCHE M. Can connected autonomous vehicles improve mixed traffic safety without compromising efficiency in realistic scenarios?[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(6): 6674-6689.
- [84] PEQUE JR G, MIYAGI T, KURAUCHI F. A new perspective of traffic assignment: A game theoretical approach[J]. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2015, 11: 488-506.
- [85] MEHRABANI B B, ERDMANN J, SGAMBI L, et al. Proposing a simulation-based dynamic system optimal traffic assignment algorithm for sumo: An approximation of marginal travel time[C]//SUMO Conference Proceedings. Berlin: SUMO, 2022, 3: 121-143.
- [86] GAWRON C. Simulation-based traffic assignment: Computing user equilibria in large street networks[D]. Köln: Universität zu Köln, 1998.
- [87] THONG D V, GIBALI A, STAUDIGL M, et al. Computing dynamic user equilibrium on large-scale networks without knowing global parameters[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2021, 21(3): 735-768.
- [88] MEHRABIPOUR M, HAJBABAIE A. A distributed gradient approach for system optimal dynamic traffic assignment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 17410-17424.
- [89] MEHRABIPOUR M, HAJBABAIE A. Distributed methodology for a cell-transmission-based system optimal dynamic traffic assignment[J]. *Transportation Research Record*, 2025: 03611981241292339.
- [90] SAMARANAYAKE S, KRICHENE W, REILLY J, et al. Discrete-time system optimal dynamic traffic assignment (SO-DTA) with partial control for physical queueing networks[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4): 982-1001.
- [91] FRIESZ T L, HAN K. The mathematical foundations of dynamic user equilibrium[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 126: 309-328.
- [92] 何逸熙, 林泓熠, 刘洋, 等. 强化学习在自动驾驶技术中的应用与挑战[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(04): 520-531.DOI:CNKI:SUN:TJDZ.0.2024-04-004.
- HE Y X, LIN H Y, LIU Y, et al. Applications and challenges of reinforcement learning in autonomous driving technology[J]. *Journal of Tongji University*, 2024, 52(04): 520-531.DOI:CNKI:SUN:TJDZ.0.2024-04-004.
- [93] YANG Y, WANG J. An overview of multi-agent reinforcement learning from game theoretical perspective[EB/OL]. (2025-8-13) [2025-09-12]. <https://arxiv.org/abs/2011.00583>.
- [94] BOYAN J, LITTMAN M. Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement learning approach[C]// *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 1993, 6.
- [95] LITTMAN M L. Markov games as a framework for multi-agent reinforcement learning[C]// *Machine Learning Proceedings 1994*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1994: 157 - 163.
- [96] HU J, WELLMAN M P. Multiagent reinforcement learning: Theoretical framework and an algorithm[C]// *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning (ICML)*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1998: 242 - 250.
- [97] HU J, WELLMAN M P. Nash Q-learning for general-sum stochastic games[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2003, 4(11): 1039-1069.
- [98] 徐东伟, 周磊, 王达, 等. 基于深度强化学习的城市交通信号控制综述[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2022, 20(01): 15-30.DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.04.017.
- XU D W, ZHOU L, WANG D, et al. Overview of reinforcement learning-based urban traffic signal control[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2022, 20(1): 15 - 30.DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.04.017.
- [99] 闫超, 相晓嘉, 徐昕, 等. 多智能体深度强化学习及其可扩展性与可迁移性研究综述[J]. *控制与决策*, 2022, 37(12): 3083 - 3102.DOI:10.13195/j.kzyjc.2022.0044.
- YAN C, XIANG X J, XU X, et al. A survey on scalability and transferability of multi-agent deep reinforcement learning[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(12): 3083 - 3102.DOI:10.13195/j.kzyjc.2022.0044.
- [100] BELLMAN R. On the theory of dynamic programming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1952, 38(8): 716-719.
- [101] MNH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning[J]. *Nature*, 2015, 518(7540): 529-533.
- [102] LIN Y, ZOU B, NORUZOLIAEE M. Preserving equity: multi-objective connected and automated vehicle (CAV) lane deployment in mixed traffic[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2025: 1-42.
- [103] HU X, XIE C. Use of graph attention networks for traffic assignment in a large number of network scenarios[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2025, 171: 104997.
- [104] LIU Q, LI X, TANG Y, et al. Graph reinforcement learning-based decision-making technology for connected and autonomous vehicles: Framework, review, and future trends[J]. *Sensors*, 2023, 23(19): 8229.
- [105] BRAESS D. Über ein paradoxon aus der verkehrsplanung[J]. *Unternehmensforschung*, 1968, 12(1): 982-1001.

258-268.

- [106] Ziliaskopoulos A K. A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem[J]. Transportation Science, 2000, 34(1): 37-49.
- [107] NGUYEN S, DUPUIS C. An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs[J]. Transportation Science, 1984, 18(2): 185-202.
- [108] LEBLANC L J, MORLOK E K, PIERSKALLA W P. An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem[J]. Transportation Research, 1975, 9(5): 309-318.
- [109] Transportation Networks for Research Core Team. Transportation Networks for Research[EB/OL]. (2025-06-20) [2025-09-12]. <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>.
- [110] Han Zheng IntelliTransport Team. GMNS Plus Dataset[EB/OL]. (2025-05-03) [2025-09-12]. [https://github.com/HanZhengIntelliTransport/GMNS\\_Plus\\_Dataset](https://github.com/HanZhengIntelliTransport/GMNS_Plus_Dataset).
- [111] CODECA L, FRANK R, ENGEL T. Luxembourg sumo traffic (lust) scenario: 24 hours of mobility for vehicular networking research[C]//2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). IEEE, 2015: 1-8.
- [112] XIONG C, YANG M, LEE M, et al. Identification of metrics used for varying levels of traffic analysis[R]. Maryland. State Highway Administration. Office of Policy & Research, 2021.
- [113] U.S. Bureau of Transportation Statistics. National Transportation Statistics[EB/OL]. (2025-08-29) [2025-09-12]. <https://www.bts.gov/product/national-transportation-statistics>.
- [114] CARRION C, LEVINSON D. Value of travel time reliability: A review of current evidence[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(4): 720-741.
- [115] DIXIT M, CHOWDHURY S, CATS O, et al. Examining circuitry of urban transit networks from an equity perspective[J]. Journal of Transport Geography, 2021, 91: 102980.
- [116] RAD T G, ALIMOHAMMADI A. Modeling relationships between the network distance and travel time dynamics for assessing equity of accessibility to urban parks[J]. Geo-spatial Information Science, 2021, 24(3): 509-526.
- [117] GETTMAN D, HEAD L. Surrogate safety measures from traffic simulation models[J]. Transportation Research Record, 2003, 1840(1): 104-115.
- [118] HE Z, QIN X, LIU P, et al. Assessing surrogate safety measures using a safety pilot model deployment dataset[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(38): 1 - 11.

(责任编辑: ×××)