

面向预约出行的车路联网与协同交通控制: 前沿与展望

杨晓光¹, 朱际宸¹, 彭 晴¹, 杨彦青¹, 郭宇峥¹, 马成元²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 美国威斯康星大学麦迪逊分校
土木与环境工程系, 麦迪逊 53706)

摘要: 预约出行正逐渐成为重要的出行模式, 为了确保预约出行在城市道路交通系统的实施, 交通控制发挥着至关重要的支撑和保障作用, 因此对面向预约出行的车路联网与协同交通控制前沿工作进行综述。以交通控制为研究主线, 对面向预约出行的需求适应性交通控制方法、保障预约出行效益的车辆控制, 以及控制与服务协同 3 个方向的前沿研究进行综述。结果表明, 相比于传统出行方式, 预约出行对于出行时间可靠性要求较高, 交通控制需要保障预约出行的行程时间可靠性。同时, 还需要构建既有利于提升路网整体运行效益, 又能保障预约出行车辆优先通行的控制方法。最后, 需要推动交通控制技术和服务型交通管理技术的融合, 实现交通控制与出行服务的有机结合。

关键词: 交通控制; 预约出行; 车路联网与协同; 出行服务

中图分类号: U 491 文献标志码: A

Research on vehicle-infrastructure cooperative traffic control for urban road travel reservation: frontiers and prospects

YANG Xiaoguang¹, ZHU Jichen¹, PENG Qing¹, YANG Yanqing¹, GUO Yuzheng¹, MA Chengyuan²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison 53706, United States)

Abstract: The trend of road travel reservation is gradually emerging as a crucial mode of transportation. In order to ensure the successful implementation of road travel reservation within the urban road traffic system, traffic control plays an exceedingly pivotal and protective role. Thus, this comprehensive review focused on the cutting-edge work in cooperative vehicle-infrastructure system traffic control pertaining to road travel reservation. With traffic control as the primary research theme, it encompassed a review of adaptive traffic control methods for road travel reservation, vehicle control to ensure the benefits of road travel reservation, and advanced research in control and service coordination. The findings reveal that, in comparison to conventional travel modes, road travel reservation places higher need on travel time reliability, necessitating traffic control to ensure the reliability of road travel reservation.

Simultaneously, it is imperative to develop control methods that not only enhance the overall operational efficiency of the road network but also preserve the priority for individual reserved vehicles. Finally, it is essential to promote the integration of traffic control technology and service-oriented traffic management technology, achieving an organic fusion of traffic control and travel services.

Keywords: *traffic control; travel reservation; vehicle-infrastructure cooperative system; travel service*

随着经济和社会的快速发展，我国居民机动车保有量持续攀升。汽车交通赋予人类出行灵活性的同时，也导致城市道路交通供需矛盾日益突出。每位出行者的出行时刻、目的地和路径选择各异，从而导致出行需求在时空范围内呈现动态变化。由于城市道路交通系统所拥有的资源(如时间、空间、环境容量和投资等)受到限制，一旦道路交通设施建成，其供给能力便呈现出静态特征，无法灵活调整以满足不断变化的出行需求。交通供需的时空不匹配问题往往从一个路口交通拥堵开始，逐渐蔓延至周边交叉口，最终演变为区域性大规模交通拥堵，这给交通安全、通行效率以及资源利用等方面带来了诸多挑战。因此，亟需优化城市道路交通系统的供需结构，调控交通出行需求的时空分布，实现城市道路交通系统的精细化和精准化供需协同管理^[1]。

以往的城市道路交通系统缺乏实时的信息交流和高效的管理手段，造成供需不匹配问题的出现。随着车路联网与协同技术的不断发展，城市道路交通系统已发展成为能够获取全时空范围内出行信息和供给资源的系统。如果能够充分利用城市交通系统的供需信息，将线下的车辆排队拥堵转化为线上的预约排队等候，提前计划制定车辆经过拥堵区域和关键连线的时刻表，可使得有限的交通系统资源得到充分利用，提高城市交通的组织与管理水平^[2]。由此，预约出行作为一种全新的需求管理手段被引入到城市道路交通系统的管控中。出行者可以借助车路联网与协同技术，提前预约出行需求，包括预订交通工具、提前规划路径、安排出行时刻等。预约出行依靠全局优化算法，有计划地安排出行请求，合理调控出行需求在时空范围内的分布，从而实现交通资源的合理配置和优化利用。预约出行将线下的拥堵转化为可利用的时间，缓解拥堵区域和关键连线上的交通压力，是调控城市路网需求时空分布、实现供需匹配的重要手段，因此，它也是实现“人

享其行”的重点研究方向。

另外，交通控制作为调控交通流运行状态的重要手段，通过寻求交通流通行权的最佳分配组合，在挖掘交通系统时空供给资源、缓解和预防交通拥堵等问题方面发挥着关键作用。随着预约出行模式逐渐成为城市交通重要的出行模式，交通控制研究正面临着全新的挑战。虽然预约出行系统可提前安排行程，但预约出行车辆在城市道路上的驾驶状态将受到多种随机因素的影响，无法保证从出发地到目的地的出行时间和行驶速度，从而导致预约出行服务的可靠性仍然存在疑问^[3]。面向预约出行，交通控制工作不仅需要承担提高城市道路交通系统运行效率的任务，还需考虑如何确保预约车辆的有序可靠通行，并动态优化调整控制策略。车路联网与协同技术的发展为交通控制注入了全新的活力，下一代交通控制系统正在快速向自组织和智能化的方向发展，研究面向预约出行的车路联网与协同交通控制问题具有重要的现实意义和理论价值。

相比传统的交通控制问题，面向预约出行的车路联网与协同交通控制具有以下特点：a. 交通控制方法可提高预约出行的可靠性。以往的交通控制往往忽视个体出行者的异质性和优先级，而面向预约出行的交通控制更注重个体用户的需求和偏好，通过车路联网与协同技术，实时获取和分析大量路径信息和轨迹数据，以根据个体用户的出行需求和预约情况进行调整和优化。b. 利用城市路网全时空范围内的信息进行优化控制。通过车路联网与协同技术，预约出行系统能够获取城市路网全时空范围内的交通需求、路网容量和实时轨迹等信息，交通控制方法可以利用预约出行提供的路网信息资源，实现交通控制方案的动态优化。c. 实现交通控制与出行服务一体化。预约出行整合多方出行资源，提供从始发地到目的地的出行服务。交通控制则决定着预约出行车辆的通行效率，是预约出行中的重要一环。协同交

通控制方法与预约出行服务能更好地保障出行者的效益,真正实现城市道路交通系统的供需匹配^[4]。

综上所述,针对预约出行环境的车路联网与协同交通控制已然成为亟需研究的重要课题,然而有关这方面的前沿性研究综述与展望仍然缺乏。借助车路联网与协同技术,交通控制系统可以获取精细、实时的出行信息,如何基于预约出行信息优化交通控制方案是重要的研究方向。伴随着车路联网与协同技术带来的车辆可控性上升,交通控制的边界将被拓展,交通控制系统可以实现与预约出行车辆的交互,通过对车辆进行控制以保障预约出行通行效益。进一步地,交通控制系统需要与出行服务系统协同,实现控制与服务的一体化,能够提前规避预约车辆在出行过程中的不可控因素,提高预约出行的服务可靠性。鉴于此,本文首先回顾了预约出行研究的发展历程,梳理并综述了面向预约出行的车路联网与协同交通控制领域的前沿成果,包括面向预约出行需求适应性交通控制方法、保障预约通行效益的车辆控制策略,以及交通控制与出行服务的协同。最后,展望了面向预约出行的车路联网与协同交通控制未来的发展趋势和重点研究方向。

1 预约出行研究发展历程

1.1 预约出行概念的提出

预约出行的概念首次由 Akahane 等^[5]提出,旨在管理日本东京高速公路的交通需求。其核心思想是借鉴火车座位预订系统的方法,调整高速公路上出行者的出发时间,以确保拥堵路段在高峰期不超过其最大容量。随后, Wong^[6]进一步阐明了预约出行的概念、预约系统的功能和基本框架。这些早期的预约出行理论研究所探讨的预约机制相对简单,主要限于驾驶员向系统提交请求,系统根据每个时段内每个路段的可用容量选择接受或拒绝预约,并提供替代方案。研究表明,预约出行对缓解交通拥堵具有显著效果。

1.2 车路联网与协同技术下预约出行研究的发展与探索

预约出行理论的研究在过去的十多年内取得了长足的发展,然而其研究对象大部分聚焦于高速公路^[7-9]。由于高速公路是一个封闭和连续的系统,交通运行状态相对简单和可控,实施预约出

行的可操作性较强。然而,城市道路交通的开放性、复杂性和不可预测性更强,实施预约出行十分困难。随着车路联网与协同技术的不断发展,城市道路交通系统的感知能力逐渐提升,能够提前获取个体化出行需求与宏观交通供给能力,因此,城市道路交通场景的预约出行正在不断探索与实践当中,基本流程如图 1 所示。预约出行首先要求出行者注册系统,提供出行偏好、出发地、出发时间、目的地、出行方式等信息;然后,预约出行服务平台将汇总所有的出行需求信息,并结合路网的供给资源,对交通系统的状态进行推演与预测,通过优化算法为出行者安排出行的路线、时刻表,与此同时对交通控制方案、管理手段等进行调整;最后,系统将出行方案推荐给出行者,生成最终出行方案后,根据出行者的出行方式,提供车辆路径诱导、多模式交通组合、车辆接送等出行服务,并根据预约车辆的履约情况执行相应的干预措施,如补贴奖励或禁止预约等。

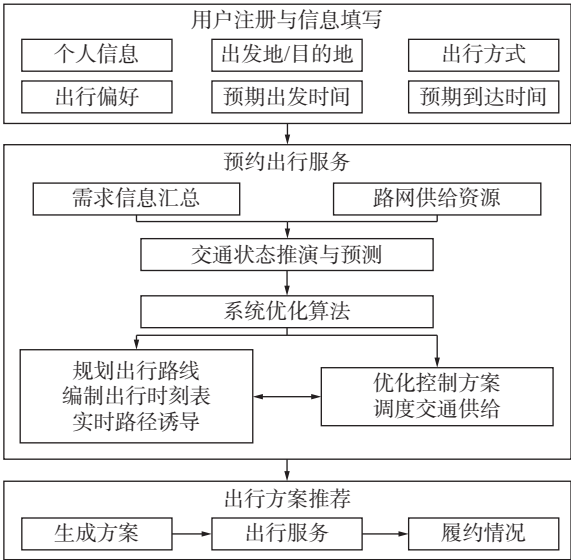


图 1 城市道路交通预约出行流程框架
Fig.1 Framework of urban road travel reservation process

Zhao 等^[10]在城市道路网络中提出的 DSRS (downtown space reservation system) 系统可以被看作是预约出行在城市道路领域的首次探索。Menelaou 等^[11]进一步提出了车辆路径预约系统来管理城市区域内的道路交通,对每辆车进行出发时刻和出行路径的规划,保证每个路段都能够处于不拥堵的状态。大量研究证明,预约出行能够有效缓解城市道路交通拥堵^[12-14],相关的研究与应

用方兴未艾。由于直接在城市范围内实行预约出行较为困难，目前，许多城市正在逐步开展特定场景下的城市道路交通预约出行实践工作，如深圳市正在推动景区道路交通的预约出行政策，通过对预约通行配额、时段、车型和预约方式渠道等进行管理，显著地提升了景区旅游交通的服务水平^[15]；北京市为了解决回龙观地区严重的交通拥堵现象，设计了为用户推荐出发时刻的预约出行系统，通过错峰出行，不仅能够有效缩减个体用户的出行时间，还可以显著降低交通系统的拥堵时间^[16]。此外，国内外针对如公交车辆、紧急救援车辆、特勤车辆等的预约出行也有大量研究与实践工作^[17-19]。随着出行习惯的变迁，未来预约出行模式将会不断推广到多种城市交通场景中，如何保障预约出行服务的可靠性成为交通控制方法重要的研究方向，为交通控制研究提出了新要求：不仅需要关注整体系统运行效率，还需考虑优先预约车辆以保证预约可靠性。

车路联网与协同技术的发展，有助于管理者分析城市道路交通这个复杂的巨系统，由此预约出行能够更好地实现交通资源统筹调度^[20]。如Liu等^[21]使用多智能体系统为智能网联汽车创建了多层预约出行框架，从路网、路径、单车控制多个层次实现高效的预约出行；Habibullah等^[22]通过车路联网与协同技术获取车辆的驾驶信息，开发了一种实时的路线预约方法，能够准确地评估车辆的预约出行费用，并通过调控需求的时空分布有效地避免拥堵。车路联网与协同技术推动了预约出行的发展，为治理城市道路交通问题、实现城市道路交通系统供需最佳协同提供了巨大的帮助。

1.3 面向预约出行的交通控制发展与挑战

上述关于预约出行研究的发展历程可以看出，预约出行作为一种有效缓解交通拥堵的交通管理手段，正在经历场景由高速公路到城市道路、机制由简单模式到复杂关联、方式由理论探讨到实践应用的快速发展阶段。为了确保预约出行在城市道路交通系统中的实施，交通控制发挥着至关重要的支撑和保障作用，形成了面向预约出行模式的城市交通控制研究方向。特别是近年来智能网联和自动驾驶等新技术的兴起，为预约出行的实施提供了更加有利的条件，同时也为交通控制带来了重大挑战。一方面新技术的应用使得预约这一行为本身的可操作性变得更强；另一

方面，预约出行环境下交通控制对象更加复杂，控制目标更加多元，控制方法更加灵活。在车路联网与协同技术的支持下，交通控制研究是影响预约出行能否顺利应用的必要条件和关键环节，是下一代交通控制系统必须要研究的问题。

2 面向预约出行的需求适应性交通控制方法

借助车路联网与协同技术，预约出行能够为交通控制系统提供精细、实时的出行信息。如何基于预约出行信息优化交通控制，以适应实时变化的交通需求，达到供需匹配的目标，是亟待解决的问题。相关研究包括基于预约出行信息的信号优化控制方法与车道预约控制方法。

2.1 基于预约出行信息的信号优化控制方法

预约出行车辆可以提供高精度的轨迹信息、准确的路径信息、起讫点信息、个体转向需求信息、出发时间、预期到达时间等，可以提供的信息如图2所示。

一部分研究依据历史信息直接制定控制策略，将预约出行车辆提供的数据作为传统固定检测器数据的补充和拓展，提高对交通流运行参数的估计精度以支撑信号配时策略^[23-25]。Wang等^[26]首先建立了预约出行车辆和非预约出行车辆的路径诱导模型，随后基于预约出行的路径，得到各路段的交通状态，利用HCM方法^[27]动态优化交叉口的信号配时方案。由于预约出行的交通分配结果无法反映实时动态的交通流变化情况，吴伟等^[28]利用车路联网与协同技术实时感知得到的预约出行车辆信息，构建了实时调整双向协调路径、优化相位差和车辆推荐速度的数学模型，可为基于预约出行信息的实时信号优化控制方法提供依据。

随着车路联网与协同技术的发展，预约出行车辆的出行路径与实时位置信息都可以被获取，因此，可以利用这些信息对交通需求进行主动预测，从而实现主动优化控制^[29]。Gayah等^[30]证明了车辆的转向行为将会影响交通系统的宏观参数，显著影响交通流未来的演变状态，故预约出行车辆提供的大量路径信息与转向需求信息，对于提高交通流预测精度、提升信号主动控制效果具有重要意义^[31]。然而，大多数现有研究都将转

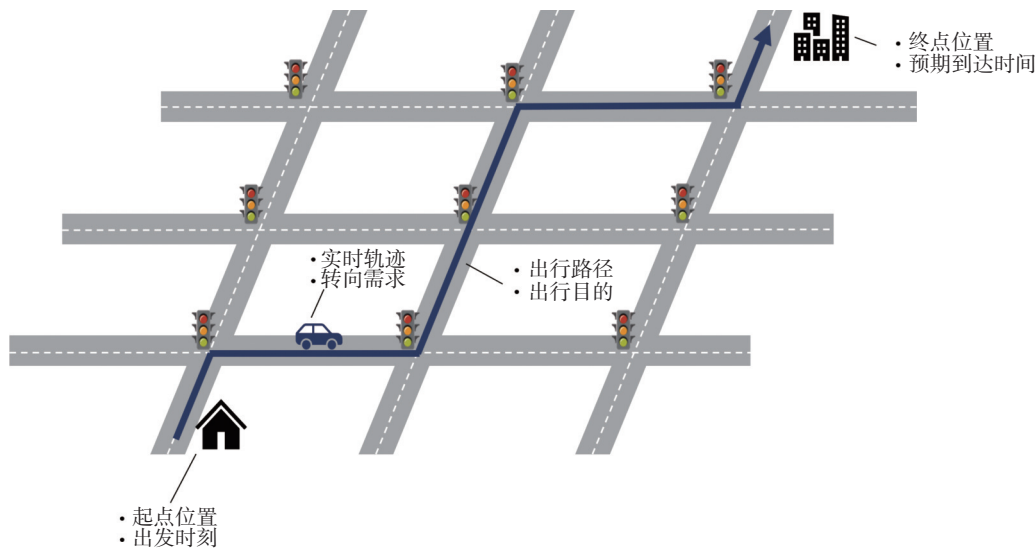


图 2 预约出行车辆提供的信息

Fig.2 Information provided by the travel reservation vehicle

向比例假设为常数^[32-34]。Mousavizadeh 等^[35]提出了利用小波变换方法从浮动车数据中提取预测转向比例的关键因素，进而利用神经网络方法实时估计路网整体转向比例。Lin 等^[36]利用网联车辆的路径信息与出行信息预测各个路段未来的转向比例，以此为基础预测未来的排队长度以主动优化信号配时。尽管许多工作都利用预约出行车辆的信息来预测未来交通流量和转向比例，但转向比例的估计本质上仍是一个集计数据，以往研究大部分是预测较长时间范围内或较大路网范围内的集计转向比例数据^[37-39]。如何利用预约出行车辆提供的非集计信息，预测实时的转向比例仍需要深入研究。此外，转向比例估计与主动预测方法需要大量历史数据作为支撑，模型的计算成本和训练成本较高，难以满足实时信号控制的要求^[40]。

预约出行系统倡导车辆和路网资源的共享，通过合理分配和调度，实现路网资源的高效利用。借助车路联网与协同技术，预约出行可以向交通控制系统提供全网信息，因此，面向预约出行的交通控制方法正朝着路网协同、系统最优的方向发展。传统集中式协同方法将路网所有交叉口的信号配时纳入到统一的优化模型中，其计算成本随着网络规模的增加而呈指数级增长^[41]。分布式方法能够将大规模路网的集中式信号优化问题分解为一系列子问题，虽然提高了计算效率，但其协同效果往往受制于路网系统动态方程的精确度，难以达到全局最优^[42]。预约出行提供路网范围内的出行信息，将有助于提高城市路网

交通状态演变的建模精度，从而提升分布式方法的协同控制效果。Moradi 等^[43]基于车路联网与协同技术建立了路网信号协同控制的分层框架，利用观测到的车辆出行信息识别交通运行状态，提高了分布式信号控制动态方程的预测精度，相比集中式框架大幅缩减了计算时间。如何利用预约出行提供的信息，综合考虑路网均衡条件、预约出行时刻表、路径诱导等多种因素，构建路网系统动态方程^[44]，将是未来重要的研究方向。

2.2 车道预约控制方法

为了保障预约出行车辆的通行效益，有学者提出综合考虑预约出行车辆信息与历史交通流情况，为预约出行车辆预留车道，通过车道入口和出口控制系统，确保预约出行车辆在车道上可以畅行行驶^[45]。Dobre^[46]提出了车道预约的智能控制系统，出行者支付费用预约某条车道，系统确保出行者能够以更高的速度行驶。然而，车道预约控制无法避免将交通压力转移到普通车道上^[47]。Fang 等^[48]考虑到车道预约控制对于正常交通流的负面影响，设计了车道预约控制优化模型，保证预约出行车辆行驶时间的同时降低对社会车辆的负面影响。为了减少预约车道对正常交通造成的负面影响，最大限度地提高预约车道行程时间的稳健性，Wu 等^[49]设计了车道预约的双目标优化模型。进一步地，Bai 等^[50]的研究证明了车道预约控制不仅会影响社会车辆的通行效率，还会带来社会车辆排放的增加。早期的车道预约控制大多基于静态的历史需求数据，导致车道预约控制方

案无法动态适应交通状况，造成通行资源的浪费，甚至恶化社会车辆与路网总体的出行效益^[51]。

随着车路联网与协同技术的发展，城市道路交通系统能够掌握准确的交通需求信息，科学合理地控制车道预约方案，最大程度挖掘车道通行能力，动态精准化车道预约控制成为可能。Viegas等^[52]提出了间歇式车道的概念，通过可变信号灯表示公交预留车道的可用性，引导社会车辆在不影响公交车运行的前提下使用该预约车道。Wu等^[53]利用网联通信技术向社会车辆实时发布预约出行车辆的信息并设置限制区域，允许限制区域范围外的社会车辆自由进出预约车道，以确保预约出行的优先通行权。随着网联自动驾驶车辆的出现，车道预约控制方法能够直接控制预约出行车辆与社会车辆的轨迹，Levin等^[54]在网联自动驾驶车辆环境下，通过控制车辆轨迹实现预约车道的动态使用，并且探索了预约车道与无信号控制交叉口之间的协同控制方法。Zhang等^[55]通过控制预约出行车辆与社会车辆的轨迹，在动态复用预约车道的同时确保预约出行的绝对优先权。在此基础上，文献^[56]进一步提出了预约车道的时空切片算法，将预约车道动态分配给预约出行车辆和社会车辆。

面向预约出行环境，车道预约控制方案需要综合考虑预约出行车辆的实时需求信息，结合预约出行需求与优先级，并考虑交通状态的随机不确定性，判定精准、动态、鲁棒的车道预约控制方案，对于保障预约出行效益、提升路网总体运行效率具有重要的意义。

3 保障预约出行通行效益的车辆控制策略

当预约车辆完成从起点到终点的路径搜索后，在行驶过程中易受到系统随机性干扰，严重影响预约出行的快捷性与轨迹平顺性。车路联网与协同技术的发展可以实现预约出行车辆与交通控制系统的交互，通过对车辆进行控制适应时变的交通状态，从而保障预约出行通行效益。研究方向主要包含车速引导控制与车辆轨迹优化控制。

3.1 车速引导控制

由于人类驾驶员和传统车辆感知条件的限制，车辆的速度控制策略往往不够合理，从而导

致燃油损耗、行程时间、延误等的增加，极大地降低了预约出行的服务可靠性。因此，利用车路联网与协同技术的感知能力，对预约车辆速度进行引导，以适应前方信号控制方案，是未来预约出行环境下优化个体车辆驾乘体验、提高交通系统运行效率的重要方法。

早期的车速引导控制系统主要是为了解决黄灯期间两难区问题和提高驾驶安全性所提出的，基于前方信号配时方案引导车辆以安全速度通过交叉口^[57-59]。在实践中，有学者发现速度引导控制能够有效降低燃油消耗与尾气排放^[60]，因此，以燃油经济性为目标的车速引导研究成为热点。Rakha等^[61]利用网联技术获取前方配时方案信息，构建了车辆燃料消耗最小化的速度建议模型。Kamal等^[62]通过预测前方车辆未来行驶状态与感知的信号方案，使用模型预测控制方法计算车辆的最佳速度。Jiménez等^[63]基于预约出行时刻表，为驾驶员制定每个路段上应保持的最佳燃油经济性速度，能够在满足预约出行时刻表的同时降低燃油消耗，提高了预约出行的服务质量。

Servin等^[64]的研究证明速度引导控制系统尽管能够降低油耗与排放，但是也会导致行程时间与延误的增加。因此，车速引导控制方法开始逐渐关注车辆周围交通流运行状态，以提高系统运行效率为目标。李鹏凯等^[65]利用车路联网与协同技术，基于实时信号状态，以交叉口车辆停车时间最小化为目标，提出了面向个体车辆的车速引导模型。文献^[66]开发了一种速度引导的多级动态规划方法，能够随着信号方案的变化实时调整预约出行车辆的速度引导策略，实验证明该方法可以适应动态的交通需求，从而提高交叉口处的通行效率。Jiang等^[67]进一步提出了不影响交通流整体运行效率的针对网联车辆的个体车辆速度引导与生态驾驶策略。刘显贵等^[68]提出了提高道路通行效率与降低燃油排放的多目标车速引导模型，结合信号灯配时信息，考虑了受控车辆与未受控车辆之间的相互影响。同时，也有研究证明，在多交叉口范围内实行速度引导控制方法，能够有效提高区域路网的通行效率^[69]。

速度引导控制方法从最初的利用信号配时信息与简化驾驶模型的粗略速度建议，逐渐向微观的、直接面向车辆控制的、实时精准建议速度转变。控制目标也从早期的优化个体车辆驾乘体

验,发展为关注系统整体交通流运行状态,提高系统运行效率^[70]。这些工作为未来面向预约出行的交通控制方法提供了参考。针对预约出行车辆,保障预约出行优先、确保预约出行车辆能够按时到达目的地将是未来重要的控制目标。Teng等^[71]为了提高公交车的服务可靠性,开发了一种动态调整车速度的模型,以保证出行时刻表的可靠性。文献^[72]进一步考虑了公交车在路段上受到随机因素的影响。类似的思想在应急车辆出行中也有体现,如Unibaso等^[73]为了保障紧急车辆能够快速通过交叉口,设计了速度引导控制方案以保障车辆迅速通过交叉口,并且提高行驶过程的安全性。目前,保障预约出行优先的车速引导控制策略大多关注提升个体车辆的运行效益,而忽略了交通流中车辆间的相互影响。在未来预约出行环境下,如何通过速度引导方案引导预约出行车辆尽快通过交叉口,同时兼顾周围车辆状态和交通流情况,将是十分关键的问题。

3.2 车辆轨迹优化控制

随着车路联网与协同技术的发展,车辆的可控性逐渐提升。网联自动驾驶车辆的出现拓展了交通控制系统的边界,可以直接对个体车辆的行驶轨迹进行优化控制,以适应前方的信号灯状态。在未来预约出行环境下,网联自动驾驶车辆的轨迹规划将是提高预约出行车辆运行快捷性与轨迹平顺性的重要手段。

在车速引导研究的基础上,早期的车辆轨迹优化控制根据前方信号灯配时方案与周围交通流状态,优化车辆在路段上的行驶轨迹,以适应信号方案,实现降低油耗、提高通行效率的目标。Matsumoto等^[74]建立了对信号配时方案反馈的车辆轨迹强化学习优化方法,训练后的车辆在交叉口的停车次数显著减少。与直接对个体车辆进行控制不同,Han等^[75]注意到绿灯期间车辆往往组成车队通过,因此,首先优化车队头车的轨迹,进而约束整个车队的轨迹以适应信号配时方案。进一步地,Varga等^[76]提出不应当只以车辆快速通行交叉口为目标进行轨迹优化,还应当根据车辆的当前位置和期望到达时间,考虑前方信号灯配时状态,以最小化延误和提高预约出行可靠度为目标优化车辆轨迹。这些研究作为未来网联自动驾驶环境下,保障预约出行按时到达目的地、提高出行服务可靠性的轨迹优化控制提供了

重要参考^[77]。

在适应信号配时方案的轨迹优化控制研究的基础上,许多研究进一步讨论了信号与轨迹协同控制的方法,为面向预约出行的交通控制方法提供了参考。Feng等^[78]利用动态规划算法求解交叉口车辆轨迹和信号配时的协同优化模型。Yu等^[79]实现了车辆轨迹和信号灯配时的集成优化,并将其模型扩展应用于多交叉口干线场景^[80]。针对人类驾驶车辆和自动驾驶车辆混行的场景,轨迹与信号协同控制方法将是未来面向预约出行交通控制重要的研究方向^[81]。在新型混合交通环境下,一个有效方式是将网联自动驾驶车辆作为头车,引领混合车队在绿灯期间通过交叉口,提高运行效率^[82]。另一种方式是基于跟驰模型解析人类驾驶车辆行为,Ma等^[83]在预测人类驾驶车辆轨迹的基础上,建立了横纵向轨迹规划与信号配时协同优化方法,并进一步将该协同方法推广到灵活的配时方案策略中^[84]。随着车路联网与协同技术的不断发展,传统的交通信号控制未来也将被更加精细与精准化的汽车协同驾驶替代^[85]。

面向预约出行环境,轨迹优化控制也面临新的需求与目标。如何通过轨迹优化控制保障预约出行按时到达,提高预约出行服务的可靠性,是未来面向预约出行的基础问题。特别是预约出行车辆与非预约出行车辆混行的条件下,如何考虑周围车辆的状态设计高效的轨迹控制方法,并且兼顾预约出行车辆与社会车辆的效益,将是未来重要的研究方向。

4 交通控制与出行服务的协同

借助于车路联网与协同技术手段,预约出行系统可以汇集交通需求和供给信息,整合多方出行资源,提供从始发地到目的地的出行服务。然而,由于交通系统的随机性、模糊性、不确定性和复杂性等特点,预约出行车辆在城市道路上的驾驶状态仍然受到多种因素的影响。协同交通控制方法与预约出行服务,依托于全局供需优化算法,实现控制与服务的一体化,能够提前规避预约车辆在出行过程中的不可控因素,提高预约出行的服务可靠性。相关的研究包括出行路径与控制方案的协同优化与特殊需求车辆优先方法。

4.1 出行路径与控制方案的协同优化

以往的预约出行研究主要集中于如何为用户

分配出行路径，较少考虑路段的信号控制方案对出行路径的影响^[86]。然而，城市路网的出行路径规划与信号控制是相互耦合、相互关联的，其关联机制如图3所示。信号控制方案会造成路段上的延误与排队，影响行程时间与旅行成本，进而影响预约出行路径规划的结果；预约出行路径规划会影响路段上的交通流量分配，对信号配时的优化造成影响。因此，面向预约出行，出行路径与控制方案的协同优化对于提升路网整体性能、保障预约出行服务具有重要的意义。

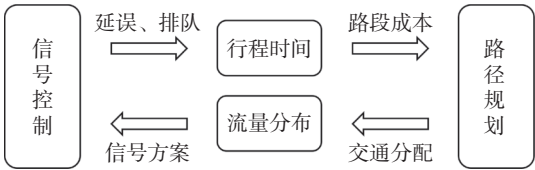


图3 路径规划与信号控制的耦合关系

Fig.3 Coupling relationship between path planning and signal control

由于路径与信号之间的耦合关系，一种常见的协同优化方法是迭代优化思想^[87]：首先，在确定的流量分布下优化信号配时；随后，根据信号方案重新分配路径，直到路径与信号的优化结果满足收敛条件时，判定问题收敛。Gartner等^[88]基于迭代优化的思路，对周期、绿信比、相位差等信号配时参数进行优化。保丽霞等^[89]沿用迭代优化的思想提出试算的方法，建立了消散拥堵和最小化系统总出行时间的双目标优化模型。虽然迭代优化方法逻辑直观，但是缺少严谨的理论解析，并不一定能够获得最优解^[90]。为了克服其缺点，将信号控制变量引入到路径决策模型之中，建立统一的优化模型成为研究的重点。Li等^[91]构建了超网络，将路径诱导与信号配时集中到统一的优化框架下，并采用拉格朗日松弛理论对路径和信号进行分别优化。Taale等^[92]在背压控制原理的基础上，提出了一种交通信号控制与出行路径协同优化的模型。Qian等^[93]进一步提出了车辆的出发时刻、行驶路径、信号配时的协同优化模型。此外，也有学者针对预约出行的路径选择与边界控制的协同优化进行研究^[94]。

随着车路联网与协同技术的发展，移动导航、实时路径诱导等手段使得预约出行车辆可以随时调整路径，在行进过程中变换行驶路线，有效降低路段旅行时间和交叉口等待延误^[95]。因此，面向实时变化的交通需求，实现动态的路径

与控制协同优化，将是未来预约出行环境下交通控制重要的发展方向。Gayah等^[96]指出，应当考虑实时的信号配时方案与交通状态，动态地为司机规划路径以避免局部拥堵区域。Safadi等^[97]考虑了交通控制的实时排队状态，提出了基于排队状态的路径分配与信号方案动态反馈优化模型，并通过最优控制分析方法求解。高淑萍等^[98]建立了交叉口信号配时方案与动态路径诱导的双层优化模型，利用改进蚁群算法来求解优化模型。

在实时变化的交通需求环境下，动态的出行路径与实时的控制方案之间存在复杂的耦合关系，动态的出行路径与信号控制协同优化往往存在大量非线性的系统动态方程，双层优化算法、随机性求解算法以及启发式算法^[99]等都被应用于出行路径与信号配时的动态协同优化中。但协同优化模型随着车辆数和网络规模的增加而快速增加，在大规模网络上的实时优化仍然不现实^[100]。因此，许多研究尝试基于简化的模型假设，以降低模型复杂度，满足实时优化的要求。但是，简化模型将限制协同效果，无法实现系统最优的目标，在城市路网中的应用仍然存在质疑^[101]。因此，当预约出行系统为用户制定出行服务方案时，需要考虑信号控制下的交通流时空演化情况，动态分配出行路径，在交通系统动态精确性、信号控制方案灵活性、路径选择动态性以及算法求解效率等多个要素之间进行平衡^[102]。

4.2 特殊需求车辆优先方法

在城市道路交通预约出行还在不断探索的现阶段，特殊需求车辆(如公交车辆、紧急救援车辆、特勤车辆等)的预约出行方法已经得到了较为广泛的研究与应用。特殊出行需求是城市道路出行服务的重要对象，如何通过控制手段保证特殊需求在城市道路上的出行服务与优先通行要求，是预约出行环境下交通控制与出行服务协同的重要研究方向。

杨晓光等^[103]提出了特殊需求车辆行程时间可靠度的概念，需要通过控制手段确保车辆在规定时间内到达终点，实现交通控制与出行服务的协同，保障特殊需求车辆的优先通行。当多个特殊需求车辆的优先请求冲突时，Mirchandani等^[104]提出利用车路联网与协同技术获取的实时车辆信息，对未来交通流进行预测，通过动态规划方法选取最佳信号方案以保障特殊需求车辆优先通

行。除了信号优先控制方法外, Nguyen等^[105]结合路径优化与信号控制, 首先以最快行驶速度为目标搜索到达救援地点的最佳路径, 随后借助车路联网与协同技术为救援车辆预留出通畅的道路, 并利用信号灯方案协调社会车流。但是, 该方法先安排路径后调整信号方案, 未能够充分协同优化路径分配与信号配时, 优化效果仍有待提高。为了解决路径规划与信号控制之间的复杂耦合关系, Su等^[106]设计了多智能体分布式学习机制, 结果表明, 通过该机制, 紧急救援车辆能够动态选取最佳行驶路径, 信号灯也能够同步优化信号方案, 缩短紧急救援出行车辆的行程时间。

通过交通控制与出行服务的协同, 可以保证特殊需求车辆的优先通行与服务的可靠度, 但是会对普通社会车辆产生影响, 造成延误的增加和拥堵的加剧, 甚至会导致上下游交叉口的拥堵^[107]。因此, 如何在保障特殊需求车辆协同优先的同时, 考虑社会车辆的通行效益, 是未来面向预约出行环境和系统最优目标的重要研究内容, 是下一代交通控制系统必须要考虑的问题。Liu等^[108]基于车路联网与协同技术, 对公交驻站时间、行驶速度以及信号优先控制方案进行协同优化控制, 并尽可能降低对社会车辆的影响。李振龙等^[109]提出了综合考虑公交相位优先与非公交相位补偿的单点信号优化方法。树爱兵等^[110]进一步将该模型拓展到干线场景, 结合绿波控制方法与公交优先控制方法, 实现交通控制与出行服务的协同。He等^[111]针对公交车和私家车混行条件下的交叉口, 构建了基于车队的路网信号协同优化模型。文献^[112]进一步提出了多模式优先控制方法, 针对公交车、私家车以及行人的效益进行综合优化。

作为现阶段预约出行的主要应用和研究场景, 特殊需求车辆的交通控制与出行服务的协同需要更多考虑城市道路交通的整体通行效益, 从追求特殊需求车辆与预约出行车辆个体利益最大化为目标, 转向提升整体道路通行效益为目标, 综合考虑社会车辆、非机动车、行人的效益, 是未来面向预约出行的交通控制与出行服务协同研究的重点。

5 未来展望与重点研究方向

5.1 保障行程时间可靠性的交通控制方法

预约出行为出行者制定出行时刻表, 要求尽

可能在规定时间内将出行者送达至目的地。因此, 相比于传统出行方式, 预约出行对于出行时间的可靠性要求较高, 出行者对出行成本的感知会受到实际行程时间与期望行程时间之间的偏差、早到与晚到损失成本、行程时间波动等因素的影响^[113-115], 现有研究需要更加深入分析控制方案和乘客感知成本之间的关联。作为有效调控交通流运行状态的手段之一, 如何通过交通控制方法降低行程时间的波动, 综合利用车速引导、轨迹优化与信号优先等方式保障预约出行车辆按时到达, 是面向预约出行的交通控制研究中的重要问题。此外, 如何利用预约出行提供的信息精确预测交通流变化, 预测未来行程时间的波动, 从而动态调整控制参数、实时求解优化控制模型是亟需解决的问题^[116]。

5.2 平衡用户最优与系统最优的控制方法

预约出行的目标是高效利用系统资源, 避免路网出现拥堵, 实现交通系统最优, 提高城市道路网络的运行效益。然而, 有学者指出: 只关注部分出行者的利益, 也会损害系统整体的效益; 单纯追求系统最优化, 也会对紧急程度较高、优先级较高的预约出行者不利^[117]。如何平衡用户最优与系统最优的控制目标, 是未来研究的重要方向。目前, 面向预约出行的交通控制研究大多局限于个体预约出行车辆的优先控制, 通过控制方法来确保一部分预约出行车辆的用户获得最优目标, 忽略了控制方法对交通流的整体影响。因此, 需要平衡预约出行车辆个体用户的最优化和交叉口整体交通流系统的最优化, 构建既有利于提升路网整体运行效益, 又能保障预约出行车辆优先通行的控制方法。

5.3 出行即服务与服务型交通管理技术融合

出行即服务(mobility as a service, MaaS)主要由交通出行者、交通运营商、政府管理部门、服务商、数据服务商及其他利益主体构成, 为出行者提供综合信息服务与一站式出行服务, 是未来预约出行的重要技术支撑^[118]。交通控制系统是MaaS技术中不可或缺的一部分, 通过信息与智能技术等手段, 为出行服务提供有效且科学的交通控制方法, 实现交通控制与出行服务的有机结合。随着车路联网与协同技术的发展, 有学者提出在MaaS技术基础上, 构建交通管理即服务(transportation management as a service, TMaaS)体

系,整合政府、用户终端等资源,提供交通控制与路线规划等服务,避免 MaaS 过分强调个体出行服务水平的提高,追求个体最优,而无法保证整体系统最优的缺点^[119]。然而, TMaaS 仍然存在管理与服务系统性整合不足的问题,仅能提供被动服务、被动响应及被动改善。因此,先进智能的交通管理即服务(actively intelligent transportation management as a service, AITMaaS)是下一代交通控制系统与未来城市道路交通系统发展的重要方向。基于预约出行服务和交通控制的先进性与智能化技术,科学而高效地组织交通,对于切实改善交通和出行,乃至发展智能交通产业,具有极其重要的理论意义和实用价值。

6 结束语

车路联网与协同技术的发展对城市道路交通系统将产生深远的影响。预约出行正成为未来发展的重要方向,同时也对交通控制提出了新的要求和目标。本文深入研究了车路联网、协同技术和预约出行技术的发展现状及趋势,并阐明面向预约出行的交通控制研究的必要性。在此基础上,进一步系统地对预约出行的车路联网与协同交通控制研究的关键问题进行了梳理,综述了相关领域的前沿研究成果,并展望了未来的重点研究方向。面向预约出行的交通控制研究不仅在理论上对预约出行创新发展和下一代交通控制系统开发具有重要的意义,而且对于主动服务型城市道路交通控制系统关键技术发展、真正意义上实现城市道路网络交通供需最佳协同具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] 杨晓光,朱际宸,王一喆,等.汽车变革发展中的城市交通系统重构与研究综述[J].交通运输研究,2022,8(3): 2-20.
- [2] 王灵丽,黄敏,薛田莉,等.基于微观交通仿真的道路预约出行效益研究[J].中山大学学报(自然科学版),2022,61(6): 89-98.
- [3] 周睿予,陈红,陈恒瑞.城市道路预约出行策略下的出行方式选择[J].北京交通大学学报,2022,46(6): 43-51.
- [4] 杨晓光,马万经,姚佼,等.智慧主动型交通控制系统及实验[J].工程研究-跨学科视野中的工程,2014,6(1): 43-53.
- [5] AKAHANE H, KUWAHARA M, SATO T. A basic study on trip reservation systems for recreational trips on motorways[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2000, 2000(660): 79-87.
- [6] WONG J T. Basic concepts for a system for advance booking for highway use[J]. *Transport Policy*, 1997, 4(2): 109-114.
- [7] EDARA P, TEODOROVIC D. Model of an advance-booking system for highway trips[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(1): 36-53.
- [8] SU P, PARK B B. Auction-based highway reservation system an agent-based simulation study[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 60: 211-226.
- [9] KIM Y, KANG S C. Innovative traffic demand management strategy: expressway reservation system[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2011, 2245(1): 27-35.
- [10] ZHAO Y, TRIANTIS K, TEODOROVIC D, et al. A travel demand management strategy: The downtown space reservation system[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(3): 584-594.
- [11] MENELAOU C, KOLIOS P, TIMOTHEOU S, et al. Controlling road congestion via a low-complexity route reservation approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 81: 118-136.
- [12] ZHAO Y, TRIANTIS K, EDARA P. Evaluation of travel demand strategies: a microscopic traffic simulation approach[J]. *Transportation*, 2010, 37(3): 549-571.
- [13] 汤若天,薛新,卢健,等.不同预约出行服务机制对节假日旅游景区出行行为的影响——以南京景区为例[J].综合运输,2022,44(9): 24-29,52.
- [14] 郭继孚,刁晶晶,缙凯,等.预约出行模式展望[J].*交通运输系统工程与信息*,2021,21(5): 160-164,173.
- [15] 王乐.交通预约通行政策与深圳市实践[J].*交通与运输*,2019,32(S1): 97-102,107.
- [16] 郭继孚,刁晶晶,王倩,等.预约在城市交通中的应用——北京市回龙观地区的预约出行实践[J].*城市交通*,2020,18(1): 75-82.
- [17] MEWADA A, TANWAR S, NARMAWALA Z. Comparison and evaluation of real time reservation technologies in the intelligent public transport system[C]//2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC). Solan: IEEE, 2018: 800-805.
- [18] ZHOU X M, WEI G H, ZHANG Y B, et al. Optimizing multi-vehicle demand-responsive bus dispatching: a real-time reservation-based approach[J]. *Sustainability*, 2023,

- 15(7): 5909.
- [19] LIU K, CHAN E, LEE V, et al. Design and evaluation of token-based reservation for a roadway system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 26: 184–202.
- [20] 郭继孚, 张建波, 孙建平. 大规模网联车辆协同服务研究进展 [J]. *中国基础科学*, 2021, 23(1): 45–50.
- [21] LIU S R, FENG Y H, WU G Y. Reservation-based network traffic management strategy for connected and automated vehicles: a multiagent system approach[C]//2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Indianapolis: IEEE, 2021: 2150–2155.
- [22] HABIBULLAH B, TENG R, SATO K. Highway toll collection method for connected automated vehicle platooning using spatio-temporal grid reservation[J]. *Communications and Network*, 2022, 14(4): 171–199.
- [23] 马万经, 李金珏, 俞春辉. 智能网联混合交通流交叉口控制: 研究进展与前沿 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36(2): 22–40.
- [24] FENG Y H, HEAD K L, KHOSHMAHAM S, et al. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 460–473.
- [25] 姚佼, 范海雁, 韩印, 等. 基于车载数据的城市道路交叉口自适应控制研究 [J]. *上海理工大学学报*, 2014, 36(3): 239–244.
- [26] WANG J W, YOU L, HANG J Y, et al. Pre-trip reservation enabled route guidance and signal control cooperative method for improving network throughput[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2023, 609: 128405.
- [27] AKÇELİK R. The highway capacity manual delay formula for signalized intersections[J]. *ITE Journal*, 1988, 58(3): 23–27.
- [28] 吴伟, 马万经, 杨晓光. 车路协同环境下基于路径的信号协调优化模型 [J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2014, 44(2): 343–351.
- [29] WANG Q, YUAN Y, YANG X T, et al. Adaptive and multi-path progression signal control under connected vehicle environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 124: 102965.
- [30] GAYAH V V, DAGANZO C F. Effects of turning maneuvers and route choice on a simple network[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2011, 2249(1): 15–19.
- [31] GUO Q Q, LI L, BAN X G J. Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: A survey[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 101: 313–334.
- [32] ZHU J C, MA C Y, YANG X G, et al. An asynchronous cooperative signal control framework in urban road network[C]//2021 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Wuhan: IEEE, 2021: 1105–1111.
- [33] AL ISLAM S M A B, HAJBABAIE A. Distributed coordinated signal timing optimization in connected transportation networks[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 80: 272–285.
- [34] 马成元, 朱际宸, 赖金涛, 等. 基于群体决策的多交叉口协同控制方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(3): 152–161.
- [35] MOUSAVIZADEH O, KEYVAN-EKBATANI M, LOGAN T M. Real-time turning rate estimation in urban networks using floating car data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 133: 103457.
- [36] LIN S C, DAI J C, LI R M. Network-level signal predictive control with real-time routing information[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 147: 104007.
- [37] MAHMOUD N, ABDEL-ATY M, CAI Q, et al. Predicting cycle-level traffic movements at signalized intersections using machine learning models[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 124: 102930.
- [38] YUAN J H, ABDEL-ATY M A, YUE L S S, et al. Modeling real-time cycle-level crash risk at signalized intersections based on high-resolution event-based data[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(11): 6700–6715.
- [39] WANG S L, PATWARY A U Z, HUANG W, et al. A general framework for combining traffic flow models and Bayesian network for traffic parameters estimation[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 139: 103664.
- [40] GHODS A H, FU L P. Real-time estimation of turning movement counts at signalized intersections using signal phase information[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 47: 128–138.
- [41] CHOW A H F, SHA R, LI S. Centralised and decentralised signal timing optimisation approaches for network traffic control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 113: 108–123.
- [42] WANG P R S, LI P F T, CHOWDHURY F R, et al. A mixed integer programming formulation and scalable solution algorithms for traffic control coordination across multiple intersections based on vehicle space-time

- trajectories[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 134: 266–304.
- [43] MORADI H, SASANINEJAD S, WITTEVRONGEL S, et al. The contribution of connected vehicles to network traffic control: A hierarchical approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 139: 103644.
- [44] NARAYANAN S, CHANIOTAKIS E, ANTONIOU C. Modelling reservation-based shared autonomous vehicle services: A dynamic user equilibrium approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 140: 103651.
- [45] SU P, PARK B, LEE J, et al. Proof-of-concept study for a roadway reservation system: integrated traffic management approach[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2381(1): 1–8.
- [46] DOBRE C. Intelligent lane reservation system for highway (s)[J]. *International Journal of Vehicular Technology*, 2012, 2012: 604965.
- [47] 王天昊, 王晓春. 国内 HOV 车道应用综述 [J]. *上海公路*, 2022(3): 120–123.
- [48] FANG Y F, CHU F, MAMMAR S, et al. A new cut-and-solve and cutting plane combined approach for the capacitated lane reservation problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 80: 212–221.
- [49] WU P, CHE A D, CHU F, et al. An improved exact ϵ -Constraint and cut-and-solve combined method for biobjective robust lane reservation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(3): 1479–1492.
- [50] BAI X, ZHOU Z L, CHIN K S, et al. Evaluating lane reservation problems by carbon emission approach[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 53: 178–192.
- [51] HAN L S, WU P, CHU C B. Service-oriented distributionally robust lane reservation[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2022, 25: 100302.
- [52] VIEGAS J, LU B C. Widening the scope for bus priority with intermittent bus lanes[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2001, 24(2): 87–110.
- [53] WU W, HEAD L, YAN S H Y, et al. Development and evaluation of bus lanes with intermittent and dynamic priority in connected vehicle environment[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2018, 22(4): 301–310.
- [54] LEVIN M W, KHANI A. Dynamic transit lanes for connected and autonomous vehicles[J]. *Public Transport*, 2018, 10(3): 399–426.
- [55] ZHANG Z, LAI J T, MA C Y, et al. Ensuring absolute transit priority through trajectory based control of connected and automated traffic[C]//2021 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Wuhan: IEEE, 2021: 1132–1135.
- [56] ZHANG Z, LAI J T, YANG X G. Dynamic spatial slice optimization for bus priority under the environment of mixed traffic[C]//2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Macau: IEEE, 2022: 3023–3025.
- [57] LI M Z, ZHANG L N, YANG X G. A review of yellow dilemma problem and a dynamic speed guidance system design based on CVIS[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 96: 473–479.
- [58] 黄玮, 马万经, 杨晓光. 两难区安全改善问题的感应控制方法研究 [J]. *交通信息与安全*, 2009, 27(4): 75–79.
- [59] PAPAIOANNOU P. Driver behaviour, dilemma zone and safety effects at urban signalised intersections in Greece[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2007, 39(1): 147–158.
- [60] NIU D N, SUN J. Eco-Driving versus green wave speed guidance for signalized highway traffic: a multi-vehicle driving simulator study[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 96: 1079–1090.
- [61] RAKHA H, KAMALANATHSHARMA R K. Eco-driving at signalized intersections using V2I communication[C]//2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Washington: IEEE, 2011: 341–346.
- [62] KAMAL M A S, MUKAI M, MURATA J, et al. Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(3): 831–841.
- [63] JIMÉNEZ F, CABRERA-MONTIEL W. System for road vehicle energy optimization using real time road and traffic information[J]. *Energies*, 2014, 7(6): 3576–3598.
- [64] SERVINO O, BORIBOONSOMSIN K, BARTH M. An energy and emissions impact evaluation of intelligent speed adaptation[C]//2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Toronto: IEEE, 2006: 1257–1262.
- [65] 李鹏凯, 杨晓光, 吴伟, 等. 车路协同环境下信号交叉口车速引导建模与仿真 [J]. *交通信息与安全*, 2012, 30(3): 136–140, 156.
- [66] KAMALANATHSHARMA R K, RAKHA H A. Multi-stage dynamic programming algorithm for eco-speed control at traffic signalized intersections[C]//16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). The Hague: IEEE, 2013: 2094–2099.
- [67] JIANG H F, HU J, AN S, et al. Eco approaching at an isolated signalized intersection under partially connected

- and automated vehicles environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 79: 290–307.
- [68] 刘显贵, 王晖年, 洪经纬, 等. 网联环境下信号交叉口车速控制策略及优化 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(2): 82–90.
- [69] WANG J F, LV J R, ZHANG Q, et al. Impact of connected vehicle guidance information on network-wide average travel time[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(1): 1–9.
- [70] WU W, LI P K, ZHANG Y. Modelling and simulation of vehicle speed guidance in connected vehicle environment[J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2015, 14(1): 145–157.
- [71] TENG J, JIN W M. Development and evaluation of bus operation control system based on cooperative speed guidance[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015, 2015: 928350.
- [72] 滕靖, 金威敏. 基于区间车速引导的公交运行控制方法 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2015, 43(8): 1194–1199.
- [73] UNIBASO G, DEL SER J, GIL-LOPEZ S, et al. A novel CAM-based traffic light preemption algorithm for efficient guidance of emergency vehicles[C]//13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Funchal: IEEE, 2010: 74–79.
- [74] MATSUMOTO Y, NISHIO K. Reinforcement learning of driver receiving traffic signal information for passing through signalized intersection at arterial road[J]. *Transportation Research Procedia*, 2019, 37: 449–456.
- [75] HAN X, MA R, ZHANG H M. Energy-aware trajectory optimization of CAV platoons through a signalized intersection[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 118: 102652.
- [76] VARGA B, TETTAMANTI T, KULCSÁR B, et al. Public transport trajectory planning with probabilistic guarantees[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 139: 81–101.
- [77] LV W X, DANG J W, ZHANG Z H, et al. Collaborative trajectories optimization for tram and connected vehicles at signalized intersection[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 1514.
- [78] FENG Y H, YU C H, LIU H X. Spatiotemporal intersection control in a connected and automated vehicle environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 89: 364–383.
- [79] YU C H, FENG Y H, LIU H X, et al. Integrated optimization of traffic signals and vehicle trajectories at isolated urban intersections[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 112: 89–112.
- [80] YU C H, FENG Y H, LIU H X, et al. Corridor level cooperative trajectory optimization with connected and automated vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 105: 405–421.
- [81] ZHENG F F, LIU C, LIU X B, et al. Analyzing the impact of automated vehicles on uncertainty and stability of the mixed traffic flow[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 112: 203–219.
- [82] 孙伟, 张梦雅, 马成元, 等. 新型混合交通交叉口信号与车辆轨迹协同控制方法 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(1): 97–105.
- [83] MA C Y, YU C H, YANG X G. Trajectory planning for connected and automated vehicles at isolated signalized intersections under mixed traffic environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 130: 103309.
- [84] MA C Y, YU C H, ZHANG C, et al. Signal timing at an isolated intersection under mixed traffic environment with self-organizing connected and automated vehicles[J]. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2023, 38: 1955–1972.
- [85] 姚佼, 杨晓光. 车路协同环境下城市交通控制研究 [J]. *上海理工大学学报*, 2013, 35(4): 397–403.
- [86] MENELAOU C, KOLIOS P, TIMOTHEOU S, et al. On the complexity of congestion free routing in transportation networks[C]//2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Gran Canaria: IEEE, 2015: 2819–2824.
- [87] GARTNER N H. Influence of control measures on traffic equilibrium in an urban highway network[J]. *Transportation Research Record*, 1977, 644: 125–129.
- [88] GARTNER N H, LITTLE J D C, GABBAY H. Simultaneous optimization of offsets, splits, and cycle time[J]. *Transportation Research Record*, 1976, 596: 6–15.
- [89] 保丽霞, 杨兆升, 胡健萌, 等. 交通流诱导与控制协同的双目标优化模型及准最优求解算法 [J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2007, 37(2): 319–324.
- [90] HAN L S, UKKUSURI S, DOAN K. Complementarity formulations for the cell transmission model based dynamic user equilibrium with departure time choice, elastic demand and user heterogeneity[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(10): 1749–1767.
- [91] LI P F, MIRCHANDANI P, ZHOU X S. Solving simultaneous route guidance and traffic signal optimization problem using space-phase-time hypernetwork[J]. *Transportation Research Part B:*

Methodological, 2015, 81: 103–130.

- [92] TAALE H, VAN KAMPEN J, HOOGENDOORN S. Integrated signal control and route guidance based on back-pressure principles[J]. *Transportation Research Procedia*, 2015, 10: 226–235.
- [93] QIAN G M, GUO M, ZHANG L H, et al. Traffic scheduling and control in fully connected and automated networks[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 126: 103011.
- [94] SIRMATEL I I, GEROLIMINIS N. Economic model predictive control of large-scale urban road networks via perimeter control and regional route guidance[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(4): 1112–1121.
- [95] 杜牧青, 鞠姿彦, 吕晨希, 等. 考虑交叉口延误的超路径算法及其应用[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45(4): 626–632.
- [96] GAYAH V V, GAO X Y S, NAGLE A S. On the impacts of locally adaptive signal control on urban network stability and the macroscopic fundamental diagram[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 70: 255–268.
- [97] SAFADI Y, HADDAD J. Optimal combined traffic routing and signal control in simple road networks: an analytical solution[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021, 17(3): 308–339.
- [98] 高淑萍, 赵会宾, 张玲, 等. 基于信号灯配时的动态路径诱导模型[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(1): 109–114.
- [99] CHAI H J, ZHANG H M, GHOSAL D, et al. Dynamic traffic routing in a network with adaptive signal control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 85: 64–85.
- [100] HU L, WANG L J, ZHOU Z R, et al. Network-wide traffic signal optimization under connected vehicles environment[C]//2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Indianapolis: IEEE, 2021: 2463–2470.
- [101] YU H, MA R, ZHANG H M. Optimal traffic signal control under dynamic user equilibrium and link constraints in a general network[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 110: 302–325.
- [102] 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(1): 1–18.
- [103] 杨晓光, 彭春露, 刘好德, 等. 城市道路上救援车辆行程时间可靠性仿真研究[J]. *交通与运输*, 2006(2): 45–49.
- [104] MIRCHANDANI P B, LUCAS D E. Integrated transit priority and rail/emergency preemption in real-time traffic adaptive signal control[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2004, 8(2): 101–115.
- [105] NGUYEN V L, HWANG R H, LIN P C. Controllable path planning and traffic scheduling for emergency services in the Internet of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 12399–12413.
- [106] SU H R, ZHONG Y D, CHOW J Y J, et al. EMVLight: A multi-agent reinforcement learning framework for an emergency vehicle decentralized routing and traffic signal control system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 146: 103955.
- [107] HUMAGAIN S, SINHA R, LAI E, et al. A systematic review of route optimisation and pre-emption methods for emergency vehicles[J]. *Transport Reviews*, 2020, 40(1): 35–53.
- [108] LIU J H, LIN P Q, RAN B. A reservation-based coordinated transit signal priority method for bus rapid transit system with connected vehicle technologies[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2021, 13(4): 17–30.
- [109] 李振龙, 王保菊, 金雪, 等. 综合考虑公交相位优先和非公交相位补偿的单点信号优化方法[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(12): 109–113, 117.
- [110] 树爱兵, 刘明, 刘小高. 干线公交优先下的相位快速补偿机制研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2022, 20(1): 98–107.
- [111] HE Q, HEAD K L, DING J. PAMSCOD: Platoon-based arterial multi-modal signal control with online data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 20(1): 164–184.
- [112] HE Q, HEAD K L, DING J. Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 46: 65–82.
- [113] SUN L T, SONG R. Improving efficiency in congested traffic networks: Pareto-improving reservations through agent-based timetabling[J]. *Sustainability*, 2022, 14(4): 2211.
- [114] 胡盼, 杨晓光. 基于广义出行成本的出行方案优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(4): 982–989.
- [115] 赵靖, 徐竞琪, 严佳超, 等. 考虑行程时间波动的干线信号协调控制鲁棒优化模型[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(4): 1261–1269.
- [116] 王嘉文, 杭佳宇, 李思洁, 等. 自适应信号控制交叉口行程时间可靠性[J]. *系统工程*, 2020, 38(5): 109–117.
- [117] SHEFFI Y, POWELL W B. Optimal signal settings over transportation networks[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1983, 109(6): 824–839.

[25] KAMAL M A S, MUKAI M, MURATA J, et al. Ecological vehicle control on roads with up-down slopes[J]. [IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems](#), 2011, 12(3): 783–794.

[26] ZHANG J J, WANG Y P, LU G Q. Impact of heterogeneity of car-following behavior on rear-end crash risk[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 125: 275–289.

[27] WANG Y P, ZHANG J J, LU G Q. Influence of driving behaviors on the stability in car following[J]. [IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems](#), 2019, 20(3): 1081–1098.

[28] MOUSAVI S M, OSMAN O A, LORD D, et al. Investigating the safety and operational benefits of mixed traffic environments with different automated vehicle market penetration rates in the proximity of a driveway on an urban arterial[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 152: 105982.

[29] RIOS-TORRES J, LIU J, KHATTAK A. Fuel consumption for various driving styles in conventional and hybrid electric vehicles: integrating driving cycle predictions with fuel consumption optimization[J]. [International Journal of Sustainable Transportation](#), 2019, 13(2): 123–137.

[30] KEOGH E, RATANAMAHATANA C A. Exact indexing of dynamic time warping[J]. [Knowledge and Information Systems](#), 2005, 7(3): 358–386.

(编辑: 丁红艺)



[上接第 320 页]

[118] POLYDOROPOULOU A, PAGONI I, TSIRIMPA A, et al. Prototype business models for Mobility-as-a-Service[J]. [Transportation Research Part A: Policy and Practice](#), 2020, 131: 149–162.

[119] 杨晓光, 郝正博, 杨正, 等. 智能交通主动管理与服务系统 (ATMaaS) 框架体系 [C]//交通治理与空间重塑——2020 年中国城市交通规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 2055–2063.

(编辑: 丁红艺)