

城市快速路入口匝道控制研究综述

章程¹, 赵靖¹, 杨晓光², 穆健滔²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 入口匝道控制是城市快速路交通缓堵的重要手段。为全面了解其研究现状及发展趋势, 回顾了入口匝道控制自提出以来近 60 年的发展历程, 系统梳理了入口匝道控制逻辑与类别, 聚焦入口匝道控制的方法论演进。研究发现: 入口匝道控制范围从局部最优向全局最优发展; 入口匝道控制对象由宏观交通流控制向微观车辆控制发展; 入口匝道控制的建模方法从确定、均质和静态等模型假设向考虑交通流随机性、异质性和动态性方向发展; 入口匝道控制的求解方法分为数学推导和搜索算法两类, 在收敛性和普适性方面各具优势。最后, 分析了入口匝道控制研究现状, 并指出了未来 4 个重要研究方向, 包括宏观与微观交通流协同控制、入口匝道控制的抗干扰与自我恢复能力提升、大规模快速路网控制的高效可靠求解, 以及网联环境下的智能控制技术实现。

关键词: 交通工程; 入口匝道控制; 城市快速路; 智能网联汽车; 协同控制

中图分类号: U 491 **文献标志码:** A

A review of ramp metering for urban expressway

ZHANG Cheng¹, ZHAO Jing¹, YANG Xiaoguang², MU Jiantao²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ramp metering is one of the most important measures to alleviate congestion for urban expressway traffic. For comprehensive understanding of the cutting-edge research on ramp metering and exploring its development trend, this paper reviewed the development of ramp metering over the last 60 years since it was initially proposed, summarized the control logic and classification of ramp metering, and focused on the evolution of ramp metering control methodology. Research has found that: the control scope of ramp metering develops from local optimum to global optimum; the control object of ramp metering develops from macroscopic traffic flow control to microscopic vehicle control; the model formulation of ramp metering evolves from deterministic, homogenous and static modeling with strong assumptions to stochastic, heterogenous and dynamic modeling; the solution methods of ramp metering include mathematical derivation and search algorithms, which have advantages in terms of convergence and applicability, respectively. Finally, this paper analyzed current researches on ramp metering and recommended four future research directions, including coordinated macroscopic and microscopic

收稿日期: 2023-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52202401, 52122215); 上海市浦江人才计划(22PJJC081)

第一作者: 章程(1994-), 男, 博士后. 研究方向: 交通控制与管理. E-mail: chengzhang@usst.edu.cn

通信作者: 赵靖(1983-), 男, 教授. 研究方向: 交通系统设计与交通控制管理. E-mail: jing_zhao_traffic@163.com

traffic flow control, robust and resilient ramp metering, efficient and reliable solution to large-scale control problems, and implementation of intelligent control technology in connected environments.

Keywords: traffic engineering; ramp metering; urban expressway; intelligent connected vehicles; cooperative control

1 入口匝道控制由来与历史

城市快速路作为最高等级的城市道路,承担着长距离交通的功能,是社会经济发展的重要保障。随着城市交通需求迅速增长,城市快速路交通拥堵频发并呈现常态化趋势,追溯拥堵源头,很大程度源于入口匝道合流区这一关键节点,如图1(a)所示。对此, Wattleworth^[1]以及佐佐木纲等^[2]最早于20世纪60年代相继提出了入口匝道控制的概念。其控制原理是通过匝道信号灯将过量的流入车辆转移至入口匝道排队等候,避免短时过量交通涌入主线造成的通行能力骤降,以提升城市快速路交通整体运行水平,如图1(b)所示。

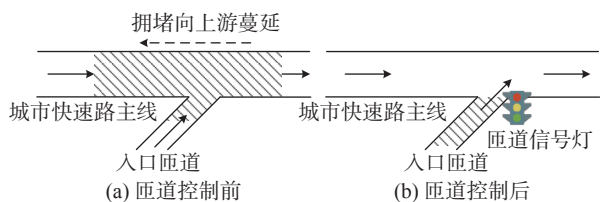


图1 城市快速路入口匝道控制效果示意

Fig.1 Illustration of ramp metering on urban expressways

经过约60年的发展,入口匝道控制已成为缓解城市快速路交通拥堵的重要手段,受到了学术界与工程界的长期关注。Papageorgiou等^[3]介绍了入口匝道控制的基本原理,根据时间顺序综述了控制算法发展历史,并通过案例分析展现了入口匝道控制的缓堵作用。王亦兵等^[4]介绍了快速公路交通宏观流体模型,讨论了主要的城市快速公路交通控制理论。张海军等^[5]分类介绍了常见的入口匝道控制方法,并总结分析了各自的优缺点。陆海亭等^[6]初步探索了国内入口匝道控制工程应用的可能性,分析了入口匝道控制所适用的交通量以及应满足的几何线形,讨论了实施入口匝道控制后随之而来的周边道路管理协调配合、法规执行、政策制定等问题。周彤梅等^[7]列出了主要的城市快速路交通管理与控制策略,并结合实际问题提出工作建议。Grzybowska等^[8]系统综述了各国匝道控制系统的经典工程案例,分析了

匝道控制的实现方式以及实际运行效果。

现有综述主要总结分析了入口匝道控制逻辑、控制建模以及实施效果,本研究在系统梳理入口匝道控制逻辑分类与发展的基础上,补充了最新的控制建模方法,并归纳分析了控制问题常见的求解方法,进而总结研究现状并对未来研究方向提出展望。伴随着交通信息技术的发展,入口匝道控制呈现出精细化与协同化的趋势,因此,本研究不仅综述了传统意义上的入口匝道控制研究(宏观层面流入率的确定),还综述了如何实现微观层面精准流入控制,以及如何与其他措施协同控制的相关研究。

2 入口匝道控制逻辑与类别

入口匝道控制除了最初的定时控制,从20世纪70年代发展至今涌现出诸多动态控制理论和方法。按照控制范围可分为单入口匝道控制、多入口匝道协调控制,以及入口匝道与其他措施的协同控制。按照控制逻辑可进一步分为基于规则的控制和基于优化的控制。控制对象以往主要是针对宏观交通流的流入率确定,近年来已有研究开始探索微观层面的精准流入控制,即流入率的实现。

2.1 单入口匝道控制

单入口匝道控制是对每个入口匝道单独计算匝道流入率,从20世纪70年代提出的感应控制到21世纪10年代开始提出自适应控制,时效性与智能性方面不断提升。其中,多数控制方法属于基于规则的控制,它们或是基于简单逻辑,或是基于经典控制理论。近年来一些控制方法设计目标函数,通过以强化学习为代表的人工智能方法寻优,属于基于优化的控制。

2.1.1 基于规则的控制

伴随着环形线圈等交通检测器的出现与普及,道路断面通过量与通过速度等交通数据得以实时获取,围绕入口匝道合流区范围的感应控制被提出。从20世纪70年代的前馈控制发展至

90年代的反馈控制，目前已形成了稳定成熟的控制方法。为了避免交通流入过量造成通行能力骤降，一种简单的感应控制是根据入口匝道上游交通需求以及下游通行能力(容量)之差计算匝道流入率，称为需求容量控制(DC控制)^[9]。然而，城市快速路交通系统中普遍存在扰动及不确定性因素，这种前馈式的感应控制对系统扰动敏感，容易造成系统震颤及不稳定^[10]。Papageorgiou等^[11]于1991年提出了著名的ALINEA控制，它是一种反馈式感应控制，对匝道汇入的下游检测器的占有率预设一个理想值，通过反馈机制调整前一刻的匝道流入率，以期达到这一理想占有率，占有率的理想值根据历史数据或经验来设定，往往取通过量最大时对应的占有率。X-ALINEA/Q控制^[12]在此基础上特别考虑了入口匝道排队长度的约束。ALINEA控制在缓解入口匝道合流区拥堵以及保证交通系统稳定方面效果显著，并且容易实施，在许多城市快速路及高速公路系统得到应用^[13]。

除了基于简单判断规则，另一类研究基于经典控制理论提出自适应的入口匝道控制，常见做法是围绕系统平衡点进行自适应调控，其控制效果和灵活性随着交通状态估计精度和智能计算速度的提升而改进，近期研究尤为关注控制方法的鲁棒性能。相当一部分自适应控制拓展了经典的ALINEA控制：ITC-ALINEA控制^[14]结合迭代学习，提升了控制效果以及鲁棒性；PI-ALINEA控制^[15]不仅考虑了入口匝道紧邻合流区，还考虑了更远处的主线下游瓶颈；FF-ALINEA控制^[16]能更精准地预测瓶颈处车辆密度，进而确定启动控制的最佳时机；EMC-ALINEA控制^[17]面向不同车型所组成的异质交通流，提出了事件触发式的入口匝道控制。除了主流的ALINEA控制系列研究，齐驰等^[18]提出了神经元自适应的PID控制，有效避免了入口匝道排队溢出以及快速路交通拥堵反复振荡的现象，对于现实中的随机干扰具有良好的抑制能力；Zhou等^[19]运用扩展卡尔曼滤波器进行交通状态参数估计，并据此切换模式进行自适应匝道控制。

2.1.2 基于优化的控制

随着计算机科学技术的发展，一些研究基于强化学习、神经网络等人工智能算法进行寻优，属于基于优化的方法。Lu等^[20]提出了基于强化学习的入口匝道控制，将奖励函数设置为控制优化

目标，最小化研究区域内的总耗费时间。Cho等^[21]建立了基于仿真的优化控制框架，同样以总耗费时间最小为优化目标，通过一种基于遗传算法的随机优化方法，确定ALINEA控制最佳参数。Han等^[22]提出了基于物理信息强化学习的入口匝道控制，优化目标是最大化路网交通量，其迭代训练过程组合使用了一部分的真实历史数据以及仿真模拟数据，从而覆盖更多的复杂交通场景。

单点控制主要用于缓解局部拥堵，但是，车辆更快驶入下游路段可能造成拥堵向下游转移，对于系统层面无益。另一方面，单个匝道的存储容量有限，当存在大量车辆到达时，往往受到入口匝道排队约束，被迫放行车辆，造成控制失效。因此，需要利用多个入口匝道的存储容量来调节交通流入量，面向系统层面同时对一组入口匝道提出控制，多入口匝道协调控制应运而生。

2.2 多入口匝道协调控制

多入口匝道协调控制于20世纪80年代提出，在系统层面同时计算多个入口匝道的流入率。控制方法包括基于规则和基于优化的多入口匝道协调控制。

2.2.1 基于规则的控制

基于规则的控制通过预设的if-then控制逻辑得到控制方案，控制思想分为合作式控制和竞争式控制两类。这两类控制将路段划分为若干区段，并利用它们之间的关联性，协调系统层面的快速路交通运行。从固定划分区段到动态划分区段，区段划分的时空精度及控制精度不断提升，近期研究主要针对交通状态全局实时精准估计以及动态确定协调范围方面进行突破。

早期的合作式控制是被动的，当主线交通拥堵蔓延至某个断面时，关闭最邻近的匝道，若拥堵向上游蔓延，逐次关闭上游匝道。HELPER控制^[23]将距离相近的入口匝道视为匝道组，从更大范围利用匝道存储容量并协调交通流入。Papamichail等^[24]将ALINEA控制拓展为面向系统层面的启发式HERO控制，将拥堵最严重的匝道视为主匝道，将其上游入口匝道动态划分为从匝道，逐次采取更严格的流入控制，HERO控制在澳大利亚、美国等多地高速道路系统应用。徐堃等^[25]实时估计动态临界占有率，并动态确定协调匝道组及匝道数量，以提升控制对于主线及入口匝道交通实时变化的适应性。

竞争式控制的经典方法是 BOTTLENECK 瓶颈控制^[26]。首先根据瓶颈流入流出之差, 确定瓶颈处应减少的交通流入量, 再按照预设权重将这些减少量分配至上游入口匝道, 进而根据每个瓶颈计算得到一个流入率。每个入口匝道的流入率由下游多个主线瓶颈确定, 取最严格的(最小的)流入率, 并考虑各个入口匝道的排队约束, 作为最终的匝道流入率。ZONE 控制^[27]将瓶颈控制拓展为区域控制, 将一段快速路划分为若干区域, 每个区域的下游是瓶颈所在位置而上游处于自由流状态, 通过限制区域上游的交通流入, 实现交通流入流出平衡。SWARM 控制^[28]利用卡尔曼滤波预测车辆密度, 进而确定应减少的交通量。Geroliminis 等^[29]根据瓶颈位置动态划分区段。Kontorinaki 等^[30]针对瓶颈位置不确定的问题提出自适应控制, 实时判断潜在拥堵发生位置, 并提升该瓶颈处的通过量。Peng 等^[31]基于异质因果效应的方法, 动态标定不同入口匝道的交通流入对于瓶颈断面的权重, 相比固定权重能带来更显著的延误降低。

基于规则的控制在一定程度上考虑了城市快速路系统主线及匝道之间的关联, 由于控制逻辑易于实现, 大部分已在工程中得到实践, 具有较好的可行性及可用性, 然而难以从理论上证明其控制效果是最优的, 控制方法存在进一步的提升空间。

2.2.2 基于优化的控制

基于优化的控制运用交通流模型, 对未来一段时间交通流演化及控制效果进行预测, 根据控制的时间范围可分为全局时域优化和滚动时域优化。从均质交通流建模发展至异质交通流建模, 从确定性建模到不确定性建模, 控制方法在精度和可靠性方面不断提升, 近期研究主要基于风险评估, 并面向多因素随机扰动, 提升控制方法的

可靠性和可用性。

全局时域优化是对研究范围内所有时间的多个匝道流入率进行整体优化, 其中, 最著名的是 Kotsialos 等^[32]于 2001 年提出的 AMOC 最优控制, 在荷兰阿姆斯特丹环路大规模应用。滚动时域优化只针对未来一个或多个时间步生成优化控制, 以预设的频率实时更新交通状态及需求, 滚动更新控制方案^[33]。Chen 等^[34]针对由多个入口匝道连续设置引起的主线交通流过饱和问题, 提出了基于存储转发方法的线性规划最优控制。优化控制的目标通常是提升系统效率, 评价指标以总耗费时间为主, 需要注意的是, 优化控制的有效性高度依赖于精准模型, 鉴于交通系统中普遍存在随机扰动且难以精准预测, 鲁棒最优控制值得进一步关注。

在确定性建模的基础上, 鲁棒最优控制特别考虑了不确定性建模与优化, 从而提升了控制的可靠性^[35]。Karafyllis 等^[36]针对系统扰动与检测误差提出反馈式自适应控制, 有助于快速路交通系统趋近平衡点。Li 等^[37]考虑了交通需求的不确定性以及交通流本身的不确定性(体现为流量密度基本图的随机性), 并提出了最小-最大鲁棒控制, 即在最不利情况下达到尽可能好的控制效果。Heshami 等^[38]针对瓶颈处交通流崩溃的现象, 提出考虑通行能力随机性的入口匝道控制方法, 显著降低了瓶颈处交通流崩溃的概率, 且能兼顾系统全局效率以及入口匝道之间的公平性。Gu 等^[39]引入条件风险价值理论, 对最坏情况设置风险约束, 相比确定性的建模与优化能更有效、可靠地缓解拥堵。

基于规则和基于优化的控制在可用性和准确性方面各有特色, 分别作为面向工程应用和理论研究的技术路线, 呈现出相向而行的趋势, 两者的优缺点和适用性如表 1 所示。

表 1 基于规则和基于优化的控制之优缺点和适用性

Tab.1 Advantages, disadvantages and applicability of rule-based and optimization-based control

控制方法类型	优点	缺点	适用性
基于规则的控制	控制逻辑易于实现,大部分已在工程中得到实践	难以保证最优控制效果,存在提升空间	适用于大规模路网、计算能力有限的系统平台
基于优化的控制	理论上可达到最优控制效果	计算时间长,难以实时应用;当模型假设与现实存在偏差时,控制方案难以达到预期效果	适用于小范围路网局部优化、计算能力充足的系统平台

2.3 入口匝道与其他措施的协同控制

除了多个入口匝道之间的协调, 不少研究提

出了入口匝道与其他措施的协同控制, 主要包括可变限速、路径诱导等宏观交通流协同控制, 其

中大部分记录于文献的控制方法是基于优化的控制。近年来随着车路联网的发展，微观层面的精准流入控制开始受到关注。

2.3.1 基于规则的控制

协同控制中只有少数是基于规则的控制。Li等^[40]通过基于规则的控制将入口匝道控制与可变限速整合，当入口匝道排队长度超过阈值时，选择较大的入口匝道流入率，并降低合流区上游路段最高限速，目的分别是避免匝道排队溢出以及交通流量超过合流区通行能力；而正常情况下，分别通过HERO算法得到入口匝道流入率，根据占有率与流量对应得到主线的可变限速值，两者分别控制。针对复合式互通立交合流区拥堵造成匝道排队溢出至相交主线的问题，孙凌峰等^[41]提出入口匝道与上游衔接收费站放行流量联动控制，总体思路是主线合流区处于过饱和状态时，通过入口匝道控制限流，优先保证主线通行；而当入口匝道排队超过阈值时，调整上游衔接的服务区和收费站放行流量，联动控制匝道信号灯、收费站开放车道数量以及收费站入口抬起和落下的时间，避免排队溢出至相交主线。

2.3.2 基于优化的控制

绝大部分入口匝道与其他措施的协同控制属于基于优化的控制，随着协同控制的措施种类不断增多，协同范围由快速路网拓展到相邻的城市地面道路，控制的协同性不断提升。杨晓光^[42]提出的入口匝道优化控制同时考虑了进出口匝道的排队约束。为了实现快速路网交通供需平衡，Kotsialos等^[43]提出入口匝道与路径诱导协同控制，不仅控制某条路径的交通流量，还为驾驶员提供行驶建议及路况信息。针对快速路主线瓶颈路段阻塞，Hegyi等^[44]提出入口匝道与可变限速协同控制，不仅限制入口匝道车辆流入，而且通过可变限速降低主线上游车辆到达率。何廷全等^[45]提出了入口匝道与主线提前换道协同控制，在合流区上游提前诱导车辆选择内侧车道，制造外侧车道车辆间隙以便入口匝道车辆汇入。由于不少城市快速路入口匝道紧邻地面交叉口下游设置，两者存在天然的紧密联系^[46]，保丽霞等^[47]提出入口匝道与衔接交叉口协同信号控制，以提升整体通过量并减小车辆延误，避免入口匝道排队溢出造成的衔接交叉口交通死锁，还有研究针对城市快速路与地面主干路所组成的交通走廊提出协同

控制^[48]，以及利用地面道路进行快速路交通紧急疏散^[49]。一些研究进一步地提出3种及以上控制措施协同，如“入口匝道+可变限速+动态路肩”协同控制^[50]、“入口匝道+可变限速+路径诱导”协同控制^[51]、“入口匝道+信息诱导+主线车道信号”协同控制^[52]、“入口匝道+可变限速+信息诱导+主线车道开闭”协同控制^[53]、“入口匝道+可变限速+换道控制”协同控制^[54]。然而，实践层面可能涉及多个交通管理部门和相关企业的协作，需建立数据共享、协同治理等保障机制。

传统意义上的入口匝道控制研究仅确定宏观层面流入率，然而相同的流入率可以对应不同的流入模式(如“每次流入一辆车”或“每次流入一个车队”等)，对于交通运行效率存在不同影响。因此，Klomp等^[55]提出了微观层面的入口匝道控制，关注入口匝道流入率的实现，研究首先分析了微观层面的车辆加减速行为，然后基于主线外侧车道的车辆间隙识别，合理分配入口匝道信号灯绿灯时间，目标使入口匝道车辆顺利汇入主线交通流间隙，实现微观层面的入口匝道精准流入控制。进一步研究可充分利用匝道信号灯以及部分自动驾驶车辆开展协同控制，在实现微观层面车辆顺利汇入的同时，满足宏观层面的车辆流入限制，以避免远处下游的潜在拥堵。图2梳理了入口匝道控制的主要分类。

3 入口匝道控制建模与求解

上文从入口匝道控制思想的角度，介绍了相关研究的总体脉络。现从方法论的角度，介绍入口匝道控制常用的建模以及求解方法。

3.1 建模方法

入口匝道控制的建模主要包含两方面：交通流模型揭示控制对象状态演变规律，适用于基于规则的控制与基于优化的控制中的交通流预测模块；优化模型包含目标函数与约束条件，用于基于优化的控制。建模方法从确定、均质和静态等模型假设向考虑交通流随机性、异质性和动态性方向发展，并适应智能网联汽车技术所带来的道路交通系统结构性演变。

3.1.1 交通流模型

交通流模型包括宏观与微观交通流模型。宏观模型将交通流视为流体，具体又可分为连续模

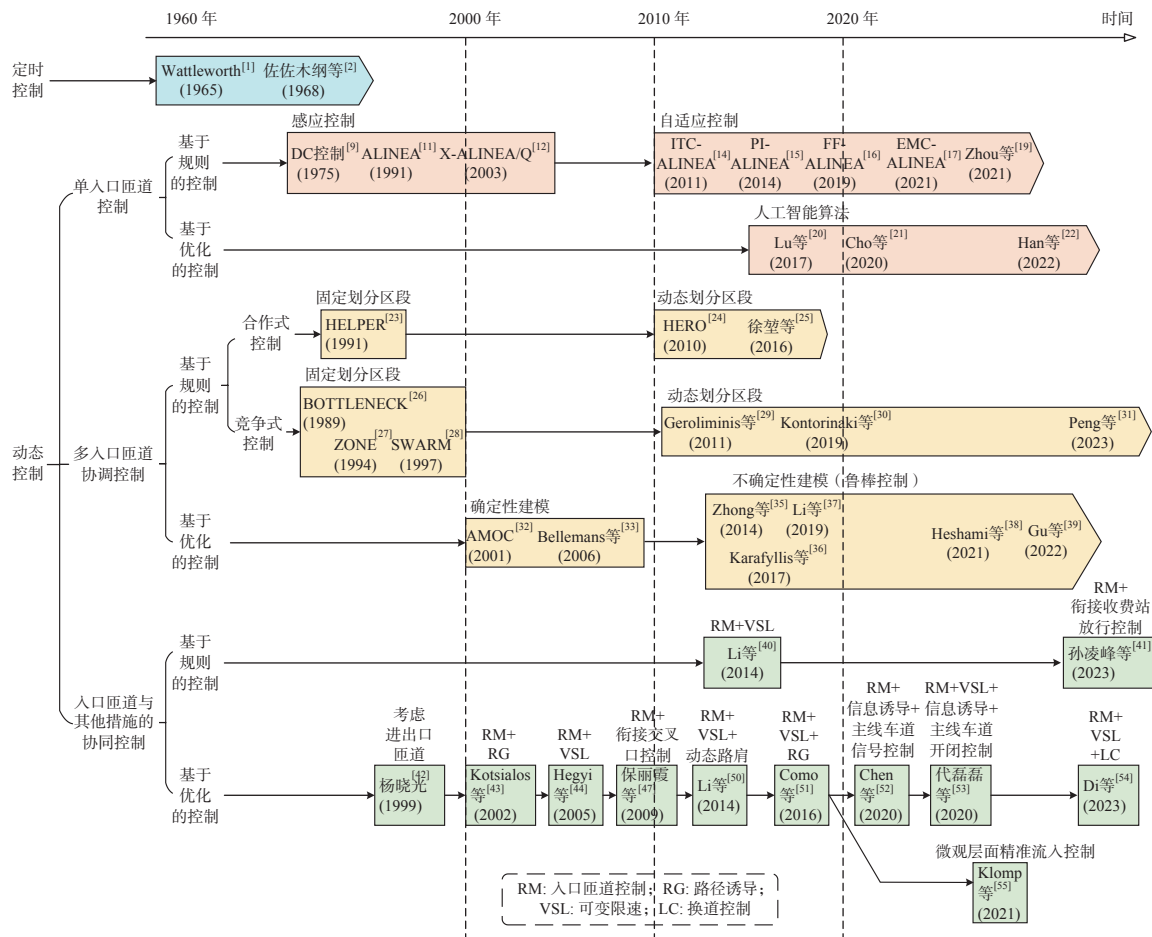


图 2 入口匝道控制的主要分类

Fig.2 Classification of ramp metering control

型(如 LWR 模型^[56])和离散模型。微观模型主要用于解析个体车辆之间的交互作用,具体包括车辆在入口匝道合流区的间隙接受、加减速、汇入位置选择等驾驶行为及决策过程^[57]。然而,这些微观交通流特征很少被已有的入口匝道控制方法考

虑,目前绝大多数入口匝道控制是针对宏观交通流的控制,并且为了便于建模和求解,通常将宏观交通流在时间和空间上离散化,CTM 模型(元胞传输模型)和 METANET 模型是其典型代表。图 3 梳理了入口匝道控制运用的交通流模型分类。

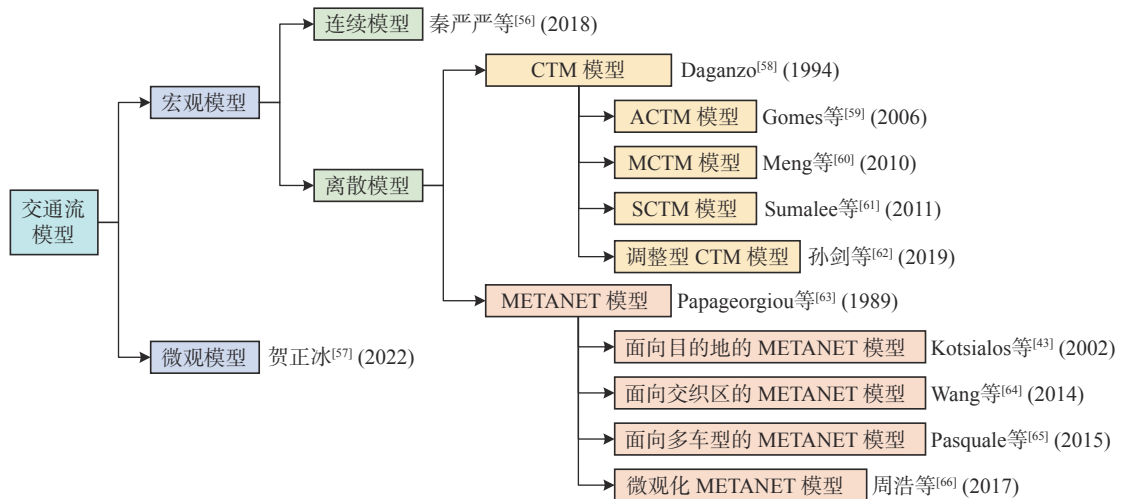


图 3 入口匝道控制运用的交通流模型分类

Fig.3 Classification of traffic flow models adopted by ramp metering control

CTM模型是一阶宏观离散交通流模型，1994年由Daganzo提出^[58]。CTM模型将一条道路划分为若干路段，每个路段称为一个元胞，每个元胞具有发送函数和接收函数两个特性，两者都是流量关于密度的函数，两个元胞之间的流量取决于前一元胞的最大发送流量以及后一元胞的最大接收流量，也称“最大发送-最大接收原则”。一些研究对CTM模型进行改良以接近真实交通流现象：ACTM模型^[59]认为入口匝道相对主线处于从属地位，因此，对入口匝道发送流量乘上一个折减系数；MCTM模型^[60]则认为主线相对入口匝道有绝对的优先权，因此，当合流区的接收流量有限时，先满足上游主线的发送流量，再满足入口匝道的发送流量；SCTM模型^[61]特别关注道路交通需求与供给的随机性，针对交通状态变量平均值与标准差随时间变化的过程进行建模；孙剑等^[62]针对入口匝道合流区瓶颈，提出了一种调整型CTM模型，采用双通行能力基本图，能更好地模拟瓶颈拥堵的传播与消散。然而，一阶的CTM模型总体上难以反映交通流迟滞现象。

METANET模型是二阶宏观离散交通流模型，1989年由Papageorgiou提出^[63]，可以体现通行能力骤降以及交通流到达、堆积、消散等现象。METANET模型被广泛用于入口匝道控制并得到诸多拓展：Kotsialos等^[43]提出了面向目的地的METANET模型；Wang等^[64]在METANET模型中特别考虑了换道交织引起的通行能力折减；Pasquale等^[65]提出了面向多车型混合交通流的METANET模型。周浩等^[66]面向车路联网环境提出微观化METANET模型，利用实时获取的微观交通流信息对宏观交通流进行状态更新及精确预测。

3.1.2 优化模型

优化模型由控制目标、控制约束、以及控制变量这3个部分组成。相当一部分入口匝道控制是基于优化的控制，通过构建优化模型并求解得到最佳控制方案。其中，入口匝道流入率是优化模型的控制变量。随着城市交通治理体系不断完善，入口匝道控制逐渐从以高效为主的单目标优化控制，拓展为兼顾可靠、高效、安全、绿色及公平等多目标优化控制^[67]。

入口匝道控制的主要目标是减少拥堵、提升效率，表2列举了不同时期具有代表性的基于优化的控制，并梳理了这些入口匝道控制的目标。

最初Wattleworth^[1]的控制目标是总交通流入量最大，但缺乏对于车辆流入快速路网后行驶状态的考虑。为了提升路网运转效率，不少研究在控制目标中考虑了总耗费时间最小或总行驶里程最大，一些研究目标收敛于期望密度或期望速度^[68]。还有研究关注效率与公平的最佳平衡，在追求系统效率提升的同时，避免对不同入口匝道车辆造成显著不同的等待时间^[60]。随着世界各国相继提出碳达峰碳中和目标，交通系统的绿色发展成为未来趋势，越来越多的研究开始关注交通排放的测算^[69]，并且面向节能减排的目标优化入口匝道控制方案^[65]。此外，一些入口匝道控制在优化目标中考虑控制轨迹振荡最小以提升控制的稳定性^[32]，减少总预期事故数以提升控制的安全性^[70]。对于多目标优化，常用的方法是通过加权构建目标函数，也可通过帕累托最优方法权衡多目标之间的冲突^[60]。

控制约束方面，几乎所有研究都考虑了主线通行能力和入口匝道流量约束。为了避免入口匝道控制造成的车辆排队蔓延至地面道路，亦有不少控制方法在约束条件或是惩罚函数中考虑入口匝道排队的约束。此外，不少城市出口匝道下游紧邻地面交叉口，极大地限制了出口匝道的通行能力，为了避免出口匝道排队溢出至主线，杨晓光等^[71]考虑了出口匝道排队约束。

随着交通数据采集技术的发展，数据种类趋于丰富，数据质量逐渐提升，为拓展入口匝道控制建模方法提供条件^[72]。应充分利用实测数据感知交通系统状态、建立复杂关联以及模型验证，支撑入口匝道控制的实时性、协同性、智能性以及可用性。同时，现实中数据质量参差不齐，数据的可信性、可靠性、可用性值得关注^[73]。

3.2 求解方法

入口匝道控制模型的快速求解是工程应用的关键问题，已有研究分别从数学推导和搜索算法的角度提出求解方法，如图4所示。数学推导对于特定问题可收敛至精准的最优解，但对于一般问题容易陷入局部最优。搜索算法具有更强的普适性，但在多数情况下只能得到次优解。两者在收敛性和普适性方面各具优势，作为两类主要的求解方法同步发展并结合使用。

从数学推导的角度，早先的入口匝道控制研究对城市快速路交通系统的建模进行了大量简

表 2 入口匝道控制目标总结

Tab.2 Summary of ramp metering control objectives

控制方法	总交通流入量最大	总耗费时间最小	总行驶里程最大	收敛至期望值	振荡最小	公平性最大	总排放最小	总预期事故数最小
Wattleworth ^[1] (1965)	√							
杨晓光等 ^[71] (1998)			√					
Kotsialos等 ^[32] (2001)		√			√			
陈德望等 ^[68] (2003)				√				
王正武等 ^[74] (2007)		√		√	√			
Meng等 ^[60] (2010)		√				√		
Sun等 ^[75] (2014)		√	√					
Pasquale等 ^[65] (2015)		√			√		√	
Pasquale等 ^[70] (2018)		√			√			√
Kotsialos ^[76] (2021)		√			√	√	√	

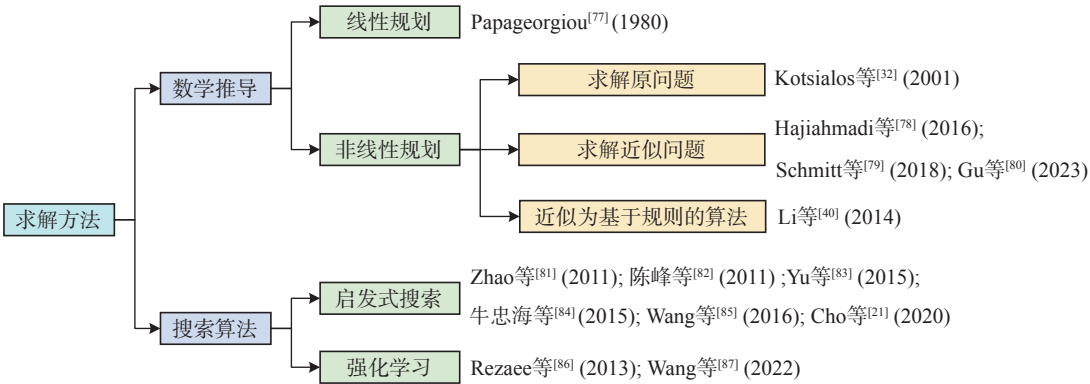


图 4 入口匝道控制的求解方法分类

Fig.4 Classification of solution methods to ramp metering control problems

化,通过状态变量之间线性关系的假设,将入口匝道控制构建为线性规划问题从而快速求解^[77]。鉴于现实城市快速路交通系统存在显著的非线性特征,越来越多的入口匝道控制被构建为非线性规划问题。非线性规划存在两类求解方法:a.求解原问题。Kotsialos等^[32]提出了基于梯度并结合导数反向传播的求解算法,在寻优方面有较好的性能,被广泛用于非线性最优控制问题的求解;b.求解近似问题。Hajiahmadi等^[78]将非线性规划近似为混合整数线性规划,线性化后的问题可大幅缩短寻优时间;Schmitt等^[79]经过严格的数学推导,将非凸的原问题精准松弛为凸问题,然后利用丰富的凸优化工具求解;Gu等^[80]运用Koopman运算符将非线性交通系统转化为线性模型,大幅缩短运算时间以适应实时应用;c.近似为基于规则的算法。Li等^[40]将最优求解算法近似为基于规则的算法,以期接近最优的控制效果。

从搜索算法的角度,主要存在以下两类方法:a.启发式搜索算法。Zhao等^[81]构筑神经网络,建立目标函数相对于状态变量的微分关系,离线训练神经网络以支撑实时求解;陈峰等^[82]模仿人脑运行机制,提出了基于模糊神经网络的入口匝道控制;Yu等^[83]为了平衡搜索的速度和精度,分为两个阶段搜索,第一阶段大致确定解的范围,第二阶段进行颗粒度更精细的搜索;牛忠海等^[84]利用混沌粒子群算法的并行搜索特性,避免陷入局部最优;Wang等^[85]基于决策树进行解的搜索,规定后一时刻的流入率只能在前一时刻的基础上波动有限范围,既缩小了求解空间,又保证了控制的稳定性;Cho等^[21]基于遗传算法调整ALINEA控制参数以提升控制效果。b.强化学习算法。Rezaee等^[86]建立强化学习控制,将控制方案作为动作,车辆密度视作状态,总行驶时间设置为奖励函数;Wang等^[87]运用深度强化学习以应对

大规模快速路交通控制中的维度灾难问题。

4 研究现状评述与发展方向展望

早先的入口匝道控制大量依赖模型获取状态变量，通过模型推导间接建立时空关联。受限于当时的感知与交互及计算能力，难以实现大规模控制、实时控制、多约束多目标优化控制等，因

此，不得不通过简化问题来实现求解。近年来智能网联、大数据、人工智能等技术为代表的新一轮科技革命不断推动着入口匝道控制的发展^[88]。

为了客观地分析入口匝道控制研究现状，本文以“入口匝道控制(ramp metering)”为关键词在中文和英文文献数据库搜索近5年的期刊论文，运用VOSviewer文献分析软件统计摘要中的词频并分析相关性，结果如图5所示。

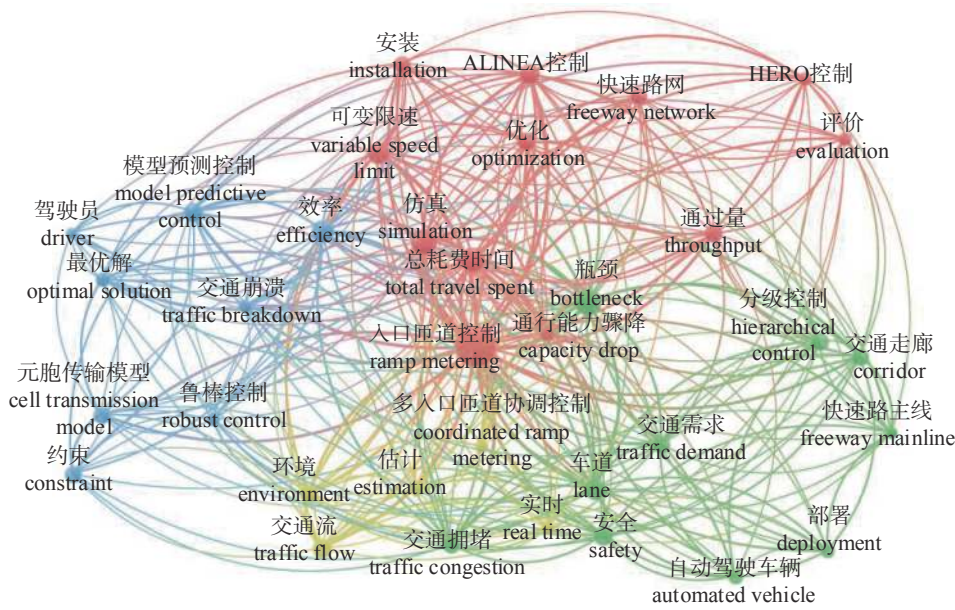


图5 近5年入口匝道控制文献关键词

Fig.5 Key words of literatures on ramp metering in the last five years

结合前文分析，当前入口匝道控制实践与研究情况可归纳如下：

- a. 工程实践方面。入口匝道控制被广泛认为是应对城市快速路主线交通瓶颈和通行能力骤降的重要手段。其中，ALINEA 反馈控制及其拓展方法(如 HERO 控制)在工程实践中相对普及，已在全球多地快速路网上大规模部署应用。
- b. 理论研究方面。许多入口匝道控制将优化模型嵌于模型预测控制框架中，通过宏观交通流模型(如 CTM 模型)预测交通系统演变及控制效果，面向多目标多约束搜索入口匝道流入率最优解^[89]。控制目标主要是减少拥堵、提升效率，总耗费时间通常被考虑在优化目标中，除此之外，近年来考虑控制的环保性、安全性及鲁棒性。

随着智能网联汽车的普及以及道路交通系统的演变，未来研究应面向交通工程行业需求，攻克需求背后的核心科学问题，并实现工程技术成果的有效落地，以支撑“交通强国”建设^[90]。根

据入口匝道控制研究现状及发展趋势，未来研究方向包含但不限于如下几个方面：

- a. 宏观与微观交通流协同控制。当前研究或是在宏观层面提出入口匝道控制策略，或是在微观层面提升车辆合流顺畅，总体而言欠缺两者的协同。随着信息推送、辅助驾驶乃至自动驾驶技术的逐渐普及，进一步研究可探索入口匝道控制策略的最佳实现，既在系统层面满足入口匝道限流要求，又在单点层面优化车辆合流轨迹；还可探索入口匝道控制与预约出行、拥堵收费、出行即服务等系统的广义协同。
- b. 入口匝道控制的抗干扰与自恢复能力提升。由于交通系统普遍存在随机性、不确定性及高度动态性，如何提升入口匝道控制的可靠性及韧性是值得关注的问题。常态下，应进一步研究鲁棒控制以提升入口匝道控制的抗干扰能力，并在风险与效益之间寻求最佳平衡；非常态下，如发生交通事故等突发事件时，应优先保障消防

车、救护车、警车等特殊车辆通行需求,提升系统的自恢复能力。

c. 大规模快速路网控制的高效可靠求解。随着控制范围扩大以及控制对象精准,控制问题复杂度显著增加。为了实现高效可靠求解以支撑实时控制应用,未来研究可提出新型交通感知设备的最佳布设方法,利用实测交通信息替代非必要的模型假设;将集中式控制转变为分布式控制或采取分级控制以降低大规模控制的问题维度;将非线性规划问题精准松弛为线性规划问题;将基于最优的控制近似为基于规则的控制以接近原问题的最优解等。

d. 网联环境下的智能控制技术实现。车路联网、边缘计算、5G通信等技术的发展为智能控制的精准实现提供可能,交通信息处理可由“云端”变为“车端”,缩短信息传输时延,有利于物理世界的实时监测;控制生成可从集中式计算转变为分布式计算,通过本地运算降低信息传输需求,提升系统运行稳定;网联车辆可作为新型交通感知与控制手段,通过车与车、车与路实时信息交互及协作,实现控制方案的精准落地。

5 结 论

本文对城市快速路入口匝道控制研究进行了综述,系统梳理了入口匝道控制逻辑与类别,归纳分析了常用的建模与求解方法,对当前研究进展进行了总结与评述,并展望了未来研究方向,得到以下主要结论:

a. 纵观城市快速路入口匝道控制的发展,从单入口匝道控制到多入口匝道协调控制,再发展到入口匝道与其他措施的协同控制,协同性越来越强;从基于简单规则的控制到基于优化的控制,系统性越来越强;一些入口匝道控制研究充分结合计算机学科及控制理论,将感应控制拓展为自适应控制,或利用人工智能算法寻优,适应性得到加强;交通系统中的不确定性逐渐受到关注,入口匝道控制的鲁棒性得以增强;除了传统意义上对于宏观层面入口匝道流入率的确定,近年来有研究开始关注微观层面入口匝道流入率的实现,探索精准至车辆级的流入控制,精准性有所提升。

b. 梳理入口匝道控制的建模与求解方法发现,数据种类的丰富和数据质量的提升为建模方

法精细化精准化发展提供条件,应充分利用实测数据感知交通系统状态、建立复杂关联以及模型验证,相当一部分入口匝道控制运用宏观交通流模型建模并构建为最优控制问题,控制目标通常是减少拥堵,一些方法的优化目标还考虑了减少控制方案振荡、减少排放或减少事故,并兼顾系统最优与公平的最佳平衡;交通流非线性特征为入口匝道控制的快速求解提出挑战,可通过数学推导将原问题精准地近似为线性问题、凸问题或基于规则的算法,或是提出高效智能的搜索算法以应对大规模优化控制的维度灾难问题。

c. 以智能网联、大数据、人工智能等技术为代表的新一轮科技革命将促进入口匝道控制研究的进一步发展,今后研究的重要方向包括宏观与微观交通流协同控制、入口匝道控制的抗干扰与自恢复能力提升、大规模快速路网控制的高效可靠求解,以及网联环境下的智能控制技术实现等问题。

参考文献:

- [1] WATTLEWORTH J A. Peak-period analysis and control of a freeway system[R]. Arlington: Texas Transportation Institute, 1965.
- [2] 佐佐木纲,明神证. 都市高速道路における流入制御理論[J]. 交通工学, 1968, 3(3): 8-16.
- [3] PAPAGEORGIOU M, KOTSIALOS A. Freeway ramp metering: an overview[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(4): 271-281.
- [4] 王亦兵,韩曾晋,贺国光. 城市高速公路交通控制综述[J]. 自动化学报, 1998, 24(4): 484-496.
- [5] 张海军,杨晓光,张珏. 高速道路入口匝道控制方法综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1051-1055.
- [6] 陆海亭,张宁,钱振东. 高速道路入口匝道控制方法及应用探索[J]. 公路, 2008(8): 180-186.
- [7] 周彤梅,陈楠楠. 城市快速路的交通管理与控制策略综述[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2009, 15(2): 45-47.
- [8] GRZYBOWSKA H, WIJAYARATNA K, SHAFIEI S, et al. Ramp metering strategy implementation: a case study review[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2022, 148(5): 03122002.
- [9] MASHER D P, ROSS D W, WONG P J, et al. Guidelines for design and operation of ramp control systems[R]. Stanford: Stanford Research Institute, 1975.
- [10] BANKS J H. Effect of response limitations on traffic-responsive ramp metering[J]. *Transportation Research Record*, 1993(1394): 17-25.
- [11] PAPAGEORGIOU M, HADJ-SALEM H, BLOSSEVILLE

- J M. ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering[J]. *Transportation Research Record*, 1991, 1320(1): 58–67.
- [12] SMARAGDIS E, PAPAGEORGIOU M. Series of new local ramp metering strategies: emmanouil smaragdis and markos papageorgiou[J]. *Transportation Research Record*, 2003, 1856(1): 74–86.
 - [13] PAPAGEORGIOU M, HADJ-SALEM H, MIDDELHAM F. ALINEA local ramp metering: summary of field results[J]. *Transportation Research Record*, 1997, 1603(1): 90–98.
 - [14] HOU Z S, XU X, YAN J W, et al. A complementary modularized ramp metering approach based on iterative learning control and ALINEA[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1305–1318.
 - [15] WANG Y B, KOSMATOPOULOS E B, PAPAGEORGIOU M, et al. Local ramp metering in the presence of a distant downstream bottleneck: theoretical analysis and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(5): 2024–2039.
 - [16] FREJO J R D, DE SCHUTTER B. Feed-forward alinea: a ramp metering control algorithm for nearby and distant bottlenecks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(7): 2448–2458.
 - [17] PASQUALE C, SACONE S, SIRI S, et al. Hierarchical centralized/decentralized event-triggered control of multiclass traffic networks[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29(4): 1549–1564.
 - [18] 齐驰, 侯忠生, 卜旭辉. 快速路入口匝道排队现象分析及对策[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2009, 9(2): 38–43.
 - [19] ZHOU Y, OZBAY K, KACHROO P, et al. A supervised switching-mode observer of traffic state and parameters and application to adaptive ramp metering[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2022, 18(3): 1178–1206.
 - [20] LU C, HUANG J. A self-learning system for local ramp metering with queue management[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2017, 40(2): 182–198.
 - [21] CHO H W, CHILUKURI B R, LAVAL J A, et al. Genetic algorithm-based simulation optimization of the ALINEA ramp metering system: a case study in Atlanta[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2020, 43(5): 475–487.
 - [22] HAN Y, WANG M, LI L H, et al. A physics-informed reinforcement learning-based strategy for local and coordinated ramp metering[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 137: 103584.
 - [23] LIPP L E, CORCORAN L J, HICKMAN G A. Benefits of central computer control for denver ramp-metering system[J]. *Transportation Research Record*, 1991, 1320(1): 3–6.
 - [24] PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M, VONG V, et al. Heuristic ramp-metering coordination strategy implemented at Monash freeway, Australia[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2178(1): 10–20.
 - [25] 徐堃, 柴干, 李清泉, 等. 自动跟踪动态临界占有率的匝道协调控制方法[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(2): 150–158.
 - [26] JACOBSON L N, HENRY K C, MEHYAR O. Real-time metering algorithm for centralized control[J]. *Transportation Research Record*, 1989, 1232(1): 17–26.
 - [27] STEPHANEDES Y J. Implementation of on-line zone control strategies for optimal ramp metering in the Minneapolis ring road[C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*. London: IEEE, 1994.
 - [28] PAESANI G F. System wide adaptive ramp metering in southern California[C]//*Proceedings of the ITS America 7th Annual Meeting and Exposition: Merging the Transportation and Communications Revolutions*. Washington DC, ITS America, 1997.
 - [29] GEROLIMINIS N, SRIVASTAVA A, MICHALOPOULOS P. A dynamic-zone-based coordinated ramp-metering algorithm with queue constraints for Minnesota's freeways[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1576–1586.
 - [30] KONTORINAKI M, KARAFYLLIS I, PAPAGEORGIOU M. Local and coordinated ramp metering within the unifying framework of an adaptive control scheme[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 128: 89–113.
 - [31] PENG C, XU C C. A coordinated ramp metering framework based on heterogeneous causal inference[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2023, 38(10): 1365–1380.
 - [32] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M, MIDDELHAM F. Optimal coordinated ramp metering with advanced motorway optimal control[J]. *Transportation Research Record*, 2001, 1748(1): 55–65.
 - [33] BELLEMANS T, DE SCHUTTER B, DE MOOR B. Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: a case study[J]. *Control Engineering Practice*, 2006, 14(7): 757–767.
 - [34] CHEN L W, HU T Y. Optimization of consecutive on-ramp control for urban freeways: an application of the store-and-forward approach[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2023, 149(4): 04023004.
 - [35] ZHONG R X, SUMALEE A, PAN T L, et al. Optimal and robust strategies for freeway traffic management under demand and supply uncertainties: an overview and general theory[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2014,

- 10(10): 849–877.
- [36] KARAFYLLIS I, KONTORINAKI M, PAPAGEORGIOU M. Robust global adaptive exponential stabilization of discrete-time systems with application to freeway traffic control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(12): 6195–6208.
- [37] LI Y, CHOW A H F, ZHONG R X. Control strategies for dynamic motorway traffic subject to flow uncertainties[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2019, 7(1): 559–575.
- [38] HESHAMI S, KATTAN L. Ramp metering control under stochastic capacity in a connected environment: a dynamic bargaining game theory approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 130: 103282.
- [39] GU C Y, WU C Z, WU Y H, et al. Distributionally robust ramp metering under traffic demand uncertainty[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2022, 10(1): 652–666.
- [40] LI D, RANJITKAR P, CEDER A. Integrated approach combining ramp metering and variable speed limits to improve motorway performance[J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2470(1): 86–94.
- [41] 孙凌峰, 张军, 宋浪, 等. 复合式互通入口多匝道联动控制算法及应用[J]. *公路*, 2023, 68(1): 235–241.
- [42] 杨晓光. 考虑进出口匝道排队约束的城市快速道路交通系统动态控制方法[J]. *西安公路交通大学学报*, 1999(2): 22–28.
- [43] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M, MANGEAS M, et al. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2002, 10(1): 65–84.
- [44] HEGYI A, DE SCHUTTER B, HELLENDORRN H. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2005, 13(3): 185–209.
- [45] 何廷全, 宋浪, 俞山川. 高速公路主线提前换道与入口匝道协同控制研究[J]. *公路*, 2023, 68(3): 288–293.
- [46] 章程, 杨晓光, 王一喆, 等. 基于多源信息的城市快速路交通走廊协同控制: 综述与展望[J]. *交通信息与安全*, 2020, 38(4): 66–75.
- [47] 保丽霞, 杨晓光. 快速路进口匝道及其衔接交叉口的协调优化控制模型[J]. *中国公路学报*, 2009, 22(2): 82–86.
- [48] 尹胜超, 许润民, 张毅, 等. 城市快速路瓶颈区域控制策略研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2012, 12(2): 27–33.
- [49] 何胜学. 考虑辅路缓冲的快速路紧急疏散最优控制[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(2): 47–53.
- [50] LI Y, CHOW A H F, CASSEL D L. Optimal control of motorways by ramp metering, variable speed limits, and hard-shoulder running[J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2470(1): 122–130.
- [51] COMO G, LOVISARI E, SAVLA K. Convexity and robustness of dynamic traffic assignment and freeway network control[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 91: 446–465.
- [52] CHEN X Y, LI T N, MA Z A, et al. Integrated mainline and ramp signal control for expressway on-ramp bottleneck with unequal lane-setting[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2022, 26(1): 100–115.
- [53] 代磊磊, 刘东波, 华璟怡, 等. 基于主线拥堵场景的快速路级联信号控制方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(4): 56–62.
- [54] DI Y R, ZHANG W H, DING H, et al. Integrated control for mixed CAV and CV traffic flow in expressway merge zones combined with variable speed limit, ramp metering, and lane changing[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2023, 149(2): 04022140.
- [55] KLOMP S R, KNOOP V L, TAALE H, et al. Ramp metering with microscopic gap detection algorithm design and empirical acceleration verification[J]. *Transportation Research Record*, 2022, 2676(1): 91–104.
- [56] 秦严严, 王昊, 王炜. 智能网联环境下的混合交通流 LWR 模型[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 147–156.
- [57] 贺正冰. 微观交通模型: 智能网联化转型与通用驾驶人模型框架[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2022, 20(2): 1–13.
- [58] DAGANZO C F. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1994, 28(4): 269–287.
- [59] GOMES G, HOROWITZ R. Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2006, 14(4): 244–262.
- [60] MENG Q, KHOO H L. A pareto-optimization approach for a fair ramp metering[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2010, 18(4): 489–506.
- [61] SUMALEE A, ZHONG R X, PAN T L, et al. Stochastic cell transmission model (SCTM): a stochastic dynamic traffic model for traffic state surveillance and assignment[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(3): 507–533.
- [62] 孙剑, 殷炬元, 黎海宁. 快速路入口匝道瓶颈宏观交通流模型[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(3): 122–133.
- [63] PAPAGEORGIOU M, BLOSSEVILLE J M, HADJ-SALEM H. Macroscopic modelling of traffic flow on the Boulevard Périphérique in Paris[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1989, 23(1): 29–47.
- [64] WANG X, HADIUZZAMAN M, FANG J, et al. Optimal ramp metering control for weaving segments considering dynamic weaving capacity estimation[J]. *Journal of*

- Transportation Engineering, 2014, 140(11): 04014057.
- [65] PASQUALE C, PAPAMICHAIL I, RONCOLI C, et al. Two-class freeway traffic regulation to reduce congestion and emissions via nonlinear optimal control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 85–99.
- [66] 周浩, 胡坚明, 张毅, 等. 快速路可变限速与匝道控制协同优化策略[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(2): 68–75.
- [67] 胡晓伟, 包家烁, 安实. 城市交通治理政策研究综述与展望[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(5): 139–147.
- [68] 陈德望, 王飞跃, 陈龙. 基于模糊神经网络的城市高速公路入口匝道控制算法[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(2): 100–105.
- [69] 胥耀方, 于雷, 宋国华. 面向路段排放测算的车辆运行模式模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(6): 160–168, 188.
- [70] PASQUALE C, SACONE S, SIRI S, et al. Optimal control for reducing congestion and improving safety in freeway systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(11): 3613–3625.
- [71] 杨晓光, 杨佩昆, 饭田恭敬. 关于城市高速道路交通动态控制问题的研究[J]. *中国公路学报*, 1998, 11(2): 74–85.
- [72] 王殿海, 蔡正义, 曾佳棋, 等. 城市交通控制中的数据采集成研究综述[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(3): 95–102.
- [73] 陆化普, 孙智源, 屈闻聪. 基于时空模型的交通流故障数据修正方法[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(6): 92–100, 117.
- [74] 王正武, 罗大庸, 黄中祥. 高速公路主线限速与匝道融合的协调控制[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(6): 973–976.
- [75] SUN J, ZHANG S, TANG K S. Online evaluation of an integrated control strategy at on-ramp bottleneck for urban expressways in Shanghai[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2014, 8(8): 648–654.
- [76] KOTSIALOS A. A varying parameter multi-class second-order macroscopic traffic flow model for coordinated ramp metering with global and local environmental objectives[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 128: 103106.
- [77] PAPAGEORGIOU M. A new approach to time-of-day control based on a dynamic freeway traffic model[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1980, 14(4): 349–360.
- [78] HAJIAHMADI M, VAN DE WEG G S, TAMPÈRE C M J, et al. Integrated predictive control of freeway networks using the extended link transmission model[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(1): 65–78.
- [79] SCHMITT M, LYGEROS J. An exact convex relaxation of the freeway network control problem with controlled merging junctions[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 114: 1–25.
- [80] GU C Y, ZHOU T, WU C Z. Deep koopman traffic modeling for freeway ramp metering[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(6): 6001–6013.
- [81] ZHAO D B, BAI X R, WANG F Y, et al. DHP method for ramp metering of freeway traffic[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 990–999.
- [82] 陈峰, 贾元华, 牛忠海, 等. 基于模糊神经网络的结合部匝道控制方法研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(1): 108–113.
- [83] YU X F, XU W L, ALAM F, et al. Optimal coordination of ramp metering via iterative dynamic programming[J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2015, 13(3): 203–218.
- [84] 牛忠海, 贾元华, 张亮亮, 等. 一种基于分布式网络多智能体的匝道协同控制方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 81–88.
- [85] WANG X, QIU T Z, NIU L, et al. A micro-simulation study on proactive coordinated ramp metering for relieving freeway congestion[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2016, 43(7): 599–608.
- [86] REZAEE K, ABDULHAI B, ABDELGAWAD H. Self-learning adaptive ramp metering[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2396(1): 10–18.
- [87] WANG C, XU Y, ZHANG J, et al. Integrated traffic control for freeway recurrent bottleneck based on deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 15522–15535.
- [88] 王庆云, 毛保华. 科技进步对交通运输系统发展的影响[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(6): 1–8, 36.
- [89] HAN Y, RAMEZANI M, HEGYI A, et al. Hierarchical ramp metering in freeways: an aggregated modeling and control approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 110: 1–19.
- [90] 王之中, 皮大伟, 吴兵. 从工程科学走向工程技术——新时期交通与运载工程学科发展与展望[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(5): 1–5.

(编辑: 石 瑛)