

美国高速公路匝道管控技术应用研究

高青海

(山西省交通规划勘察设计院有限公司, 山西 太原 030000)

摘要:匝道管控技术是交通控制管理、缓解交通拥堵的主要方式之一,与扩建公路里程相比,匝道管控技术具有成本低、周期短、见效快、可持续性强等特点,在欧美国家有大量的工程实践应用。该文从匝道管控技术的基本原理和技术难点出发,详细梳理论述匝道管控技术在美国的应用分布、效益统计和适用条件。统计结果表明:匝道管控技术的应用使得平均行程时间减少 38.7%、平均运行速度增加 38.25%、平均事故率下降 30.1%。同时,结合中国道路管理特点,分析匝道管控技术应用的难点,主要体现在模型参数本地化、几何条件、试点应用等方面。最后,根据匝道管控技术特点和原理,提出匝道管控技术实施流程,为中国高速公路和城市快速路管控提供技术参考。

关键词:匝道管控;应用研究;实施流程;效益分析

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A

根据高德地图发布的《2018 年度中国主要城市交通分析报告》^[1],在中国 361 城市中,61%的城市路网高峰行程延时指数为 1.5~1.8、处于交通缓行状态,13%的城市路网高峰行程延时指数为 1.8~2.5、处于拥堵状态,仅有 26%的城市路网高峰行程延时指数小于 1.5、不受通勤拥堵影响;由统计数据可以看出:高峰时段中国有 74%的城市处于拥堵或缓行状态。表 1 为 2018 年 10 大拥堵城市分布及排名,以北京为例,2018 年度北京路网高峰行程延时指数为 2.032、平均车速 23.35 km/h、高峰平均驾车通勤时间 88 min/d、平均每天通勤拥堵 44.97 min、高峰拥堵路段里程比为 11.08%,即北京平均每 100 km 就有 11.08 km 路段处于拥堵或严重拥堵状态;按照每年 232 个工作日计算,平均每人年拥堵时长达 174 h,相当于一年中有 22 个工作日处于拥堵,折合经济损失约 8 400 多元。交通拥堵问题反映了日益增长的出行需求与有限的道路资源供给之间的结构性矛盾。

高速公路、城市道路互通立交承担交通转换的功能,是连接干线与干线、地方道路与干线公路的重要节点,也是交通拥堵频繁发生的位置之一。匝道管控技术(Ramp Metering)作为交通控制管理、缓解交通拥堵的主要方式之一,主要通过实时监测主线和匝道交通流变化,根据主线通行能力,调控通过匝道进入主线的车辆,从而保证主线交通流畅运行。匝道管控技术是在现有道路交通网的基础上,利用先进的控制理论、感知技术、信息技术,结合交通流特性,挖掘未饱和和干线公路的承载空间、优化交通控制组织形式,从而提升路网承载能力和运营通行效率;与扩建公路里程相比,匝道管控技术具有成本低、周期短、见效快、可持续性强等特点。欧美国家的大量研究和工程实践已经表明:匝道管控技术是解决干线公路拥堵直接、有效、低成本的控制方法^[2]。美国联邦公路局(FHWA)技术报告基于统计数据明确指出,匝道管控技术的成本效益比为 1:15^[3]。

近年来,中国国内对匝道管控技术的应用逐渐引起专家学者的注意。孙剑等^[4-5]采用 MPC 框架,改进 MetaNet 模型设计方案,基于 ALINEA 算法决策信号控制,并通过微观仿真证明匝道管控技术对提高主线运行效率效果明显;朱炯^[6]基于蚁群算法,结合 Meta-Net 模型,针对高速公路交通拥堵和交通事故情形下的匝道控制策略进行研究,并基于微观仿真,探讨控制策略和方法的可行性;林炜鑫^[7]从大数据应用的视角,探索利用迭代反馈整定算法,确定匝道控制器实时交通状态动态控制参数。与国外相比,中国匝道管控技

表 1 2018 年度 10 大拥堵城市分布及排名

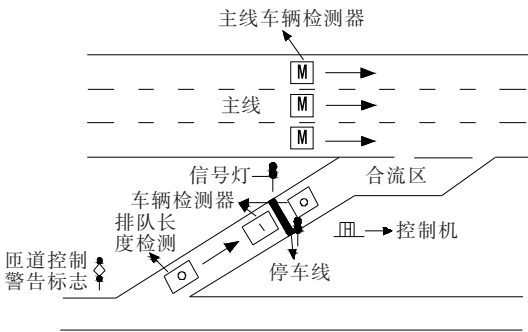
排名	城市	高峰行程 延时指数	排名	城市	高峰行程 延时指数
1	北京	2.032	6	贵阳	1.849
2	广州	1.911	7	济南	1.848
3	哈尔滨	1.903	8	上海	1.847
4	重庆	1.890	9	长春	1.834
5	呼和浩特	1.850	10	合肥	1.801

术研究起步较晚,且仅在上海、杭州等地快速路入口有少量应用示范。随着信息技术、计算机技术、感知技术的发展,道路的智能管控已成为研究的热点。因此,该文从美国匝道管控技术应用现状出发,系统阐述匝道管控技术的基本原理、示范效益、面临挑战等,探讨中国匝道管控技术应用的难点和可行问题,以期为高速公路、城市快速路匝道管控提供参考。

1 匝道管控技术(Ramp Metering)

1.1 基本原理

匝道管控技术是在入口匝道安装信号灯,根据主线和匝道交通流检测的结果,调控进入主线的车辆数,从而保证主线交通流畅通。如图 1 所示,为匝道控制基本原理示意图,在匝道和主线安装车辆检测器,实时监测交通运行状态,匝道排队长度检测器检测车辆的排队长度,通过控制算法,调节信号灯准入或禁止车辆通行;从而保证主线交通顺畅。匝道管控技术起源于 20 世纪 60 年代美国芝加哥艾森豪威尔城际高速公路,因为其独特的优势和效果,在美国、澳大利亚、欧洲等国家和地区被广泛应用。



(a) 匝道管控技术原理示意图



(b) 美国加州 I-101 高速公路匝道管控

图 1 匝道管控技术原理示意图及应用

从时间和控制范围角度,匝道管控技术分为:单点定时控制、单点自适应控制、协同定时控制、协同自适应控制。单点定时控制用于局部交通拥堵问题治理,独立

于上下游匝道,需要定期人工调节红绿灯时间;单点自适应控制与单点定时控制类似,区别在于自适应控制,不需要人工调节;协同定时控制,是指上下游匝道联动,定时控制车辆汇入;协同自适应控制是指上下游匝道联动,根据实时交通流量自适应控制信号灯时长。

单点匝道控制算法主要包括:需求—容量算法、占有率控制算法、ALINEA 算法和 ZONE 算法。需求—容量(Demand-Capacity, DC)算法是以主线交通通行能力作为调节进入主线交通量的方法,保证主线上游和匝道汇入交通量不超过通行能力上限;此方法抗干扰差,面临突发交通状况时难以发挥作用。占有率(Occupancy)控制算法是对 DC 算法的改进,通过测量下游车辆的占有率,控制匝道汇入主线交通流,使其不超过通行能力上限。ALINEA 算法,是一种闭环控制算法,其参数可以选择或者标定,思想来源于自动控制理论的 PID 算法,算法稳定性好、控制效率高,是一种经典的单点控制算法,目前在欧美国家广泛使用^[8-10]。

协同匝道控制算法主要包括:HELPER 算法、LINKED-RAMP 算法、METALINE 算法。HELPER 控制算法分为两层——单线响应层和协同控制层,在单点响应层,HELPER 算法采用占有率算法;在协同控制层,HELPER 算法根据匝道检测的排队长度将交通流量分流至排队长度较小的匝道上。LINKED-RAMP 算法,其基本原理与 HELPER 算法类似,区别在单点响应层采用需求—容量(Demand-Capacity, DC)算法。METALINE 算法是对单点 ALINEA 算法的延伸和扩展,目前在欧美等国家已经应用^[11]。

1.2 适用条件

匝道管控技术借助不同算法,通过调节匝道汇入交通流,来实现提升运营效率的目的,其落地应用有一定的适用范围,该文通过检索已成熟应用的匝道管理案例和规定,将其适用条件梳理,案例实践证明满足以下条件之一,可考虑应用匝道管控技术缓解拥堵^[12-15]:

- (1) 一年中至少 200 d 高速公路行驶速度持续 30 min 以上小于 80 km/h。
- (2) 事故率明显高于临近道路平均值。
- (3) 主线—匝道设计小时交通量有以下情况时:
 - ① 单向双车道小时交通量大于 2 650 veh/h;
 - ② 单向三车道小时交通量大于 4 250 veh/h;
 - ③ 单向四车道小时交通量大于 5 850 veh/h;
 - ④ 单向五车道小时交通量大于 7 450 veh/h;
 - ⑤ 单向六车道小时交通量大于 9 050 veh/h。

(4) 最右侧车道和匝道设计小时交通量大于 2 100 veh/h。

(5) 匝道高峰小时交通量为 240~900 veh/(h·ln)。

匝道管控技术作为一种运营阶段优化管理的辅助手段,大多在建设期并未将其安装纳入考虑因素;因此,当在应用匝道管控技术时,除了考虑交通流量、速度等因素外,几何线形(半径、加速车道长度等)的可实施性也需要考虑。

2 美国匝道管控技术应用现状

2.1 应用分布

匝道管控技术是美国高速公路管理运行集成计划(TSM&O)的组成部分,此计划主要包括:车道管理、匝道管控、信息发布、预警和事故检测、事件管理等。通过与其他组成部分协同作用,提高高速公路整体运行效率、降低事故率。

根据美国统计资料显示,美国约 80%的州将匝道管控技术应用于高速公路日常运营管理。在美国超过 2/3 的大城市均应用匝道管控技术。其中,旧金山、洛杉矶、明尼阿波里斯等城市高速公路匝道管控技术应用超过 300 个入口匝道。除此,从匝道管控技术应用

类型来看,单点匝道控制应用占绝大多数;这表明,在理论上协同匝道控制更具有先进性,但在实际应用过程中,由于交通流的随机性、复杂性、不可控性等,难以系统地对多个匝道和路段的交通运行状态进行实时判别,因此协同型自适应匝道控制目前大多处于理论研究和模拟阶段,在部分路段应用也是进行试点应用验证。这对于中国吸收、消化、引用匝道管控技术具有一定的指导意义。匝道管控技术在美国被广泛接收和认可,目前在日本、澳大利亚、欧洲等国家和地区也有广泛应用。

2.2 应用效果统计分析

科学、有效的匝道管控策略能够实现长期收益,收益大小主要取决于拥堵程度、交通组成等。匝道管控技术应用的效果主要包含以下几个方面:运营效率提升、交通安全水平提升、减少污染物排放等;其中高峰行程时间减少、高峰小时车流量增加和平均行驶速度增加等指标可表征运营效率的改善程度,事故率下降百分比表征改善安全程度,污染物排放减少百分比(通过车流量和平均速度反映)表征环境效益。

通过检索美国各大具有代表性城市的交通局网站,根据其公开报告、论文、演讲、研讨会等资料,对匝道管控技术的应用进行效果分析,统计结果见表 2。

表 2 美国部分城市匝道管控技术应用效果统计

城市	高峰行程时间减少/%	平均速度增加/%	事故率下降/%	高峰小时车流量增加/%	排放物减少/%
明尼阿波里斯(Minneapolis)	20	18	22	25	45
长岛(Long Island)	19	9	15	—	—
波特兰(Portland)	150	155	43	—	—
丹佛(Danver)	37	57	42	—	20
西雅图(Seattle)	51	9	28	—	—
亚特兰大(Atlanta)	10	—	—	—	—
休斯顿(Houston)	22	—	—	—	—
阿林顿(Arlington)	10	—	—	—	—
密尔沃基(Milwaukee)	32	35	15	22	—
底特律(Detroit)	36	8	50	14	—
洛杉矶(Los Angeles)	—	15	20	9	—
凤凰城(Phoenix)	—	—	16	—	—
萨克拉门托(Sacramento)	—	—	50	5	—

注:表中“—”代表无具体统计值。

如表 2 所示,高峰行程时间、平均速度增加和事故率下降是主要统计指标。匝道管控技术的应用使得高峰行程时间减少最大达 150%、最小为 10%,平均行程时间减少 38.7%;平均运行速度增加 38.25%,平均事

故率下降 30.1%。明尼阿波里斯(Minneapolis)是明尼苏达州交通局(MnDOT)选取的典型应用验证点,统计指标不仅限于上述 5 个指标,还包括运力提升、行程时间可靠度等,通过明尼阿波里斯详细统计数据可

知:匝道管控技术的应用使得高峰行程时间减少 20%、运力提升 25%、事故率下降 22%、平均行驶速度提升 18%、行程时间可靠度增加 90%、污染物排放减少 1 160 t。与没有采用匝道管控技术的同类别高速公路相比,成本收益比为 1 : 15。

3 匝道管控技术适用性分析

3.1 匝道管控技术难点分析

(1) 算法稳定性和适用性需本地化数据支撑

该文已经介绍匝道管控的原理和诸多算法,各区域在使用匝道管控技术时均提出了不同的算法。即使是广泛接受的 ALINEA 算法也仅是提出算法框架,如果应用实施,需要根据当地交通流特点、车辆组成、拥

堵程度等因素,标定基本交通流模型参数。归根结底,匝道管控技术是一种交通流干预技术,因此适应中国交通组成、交通行为、交通流特点的基本交流理论模型标定,是合理的控制算法提出的基础。

(2) 现有道路几何条件能否为设备、标志设置提供足够空间,是匝道管控技术应用的决定因素

图 2 为美国加州 I—210 高速公路匝道管控技术设备和预警提示布设图,按照行驶方向依次为:“匝道管控开启”标志、“前方准备停车”标志、“前方匝道管控”提示板、停车线。在进入匝道之前 150 m 处安装提示“匝道管控开启”标志;进入匝道后,设置“前方准备停车”标志,其与停车线的距离为最大排队长度与运行速度停车视距之和;在弯道处路侧安装“前方准备停车”标志或“前方匝道管控”提示板。

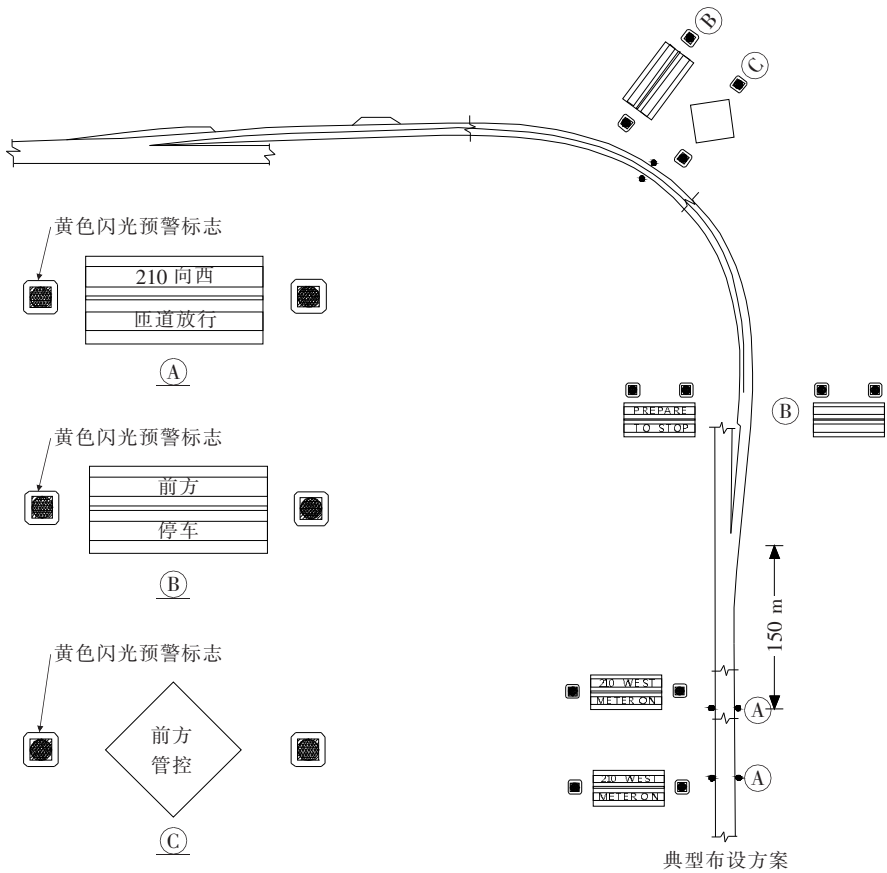


图 2 美国匝道管控设备典型布设图

由此案例可以看出:匝道管控技术通过在匝道设置信号灯调节进入主线车流量,停车线位置的设定需考虑排队长度和加速车道长度的限制,停车线位置既要能满足车辆从停止到安全合流达到主线速度的加速车道长度,又需要尽可能长的排队长度。因此,当拟定算法和控制策略均满足目标需求时,匝道管控技术落

地应用最大的障碍是现有的道路几何条件是否有足够的空间设置信号灯控制车辆,这不仅要考虑匝道排队长度和停车视距,更需要考虑车辆在匝道某处速度从 0 加速到主线合流速度时的距离。

(3) 高速公路、城市快速路的推广应用需试点验证

美国高速公路绝大多数为不收费公路、不设收费站,该文统计数据 and 效果分析也都基于此得到。中国城市快速路,如二环、三环、绕城高速公路等与此类似,但是高速公路大多数均在匝道入口位置设置收费站,因此如何充分应用匝道排队长度空间需考虑收费站影响。除此之外,匝道管控技术虽然在欧美等国家被广泛应用,但在中国仅有上海、杭州等近年有局部示范,因此匝道管控技术的可行性、效益分析亟需更多试点应用示范验证。

3.2 匝道管控技术流程

基于以上事实和分析,该文提出匝道管控技术应用实施的流程,如图3所示。主要包括:问题提出、控

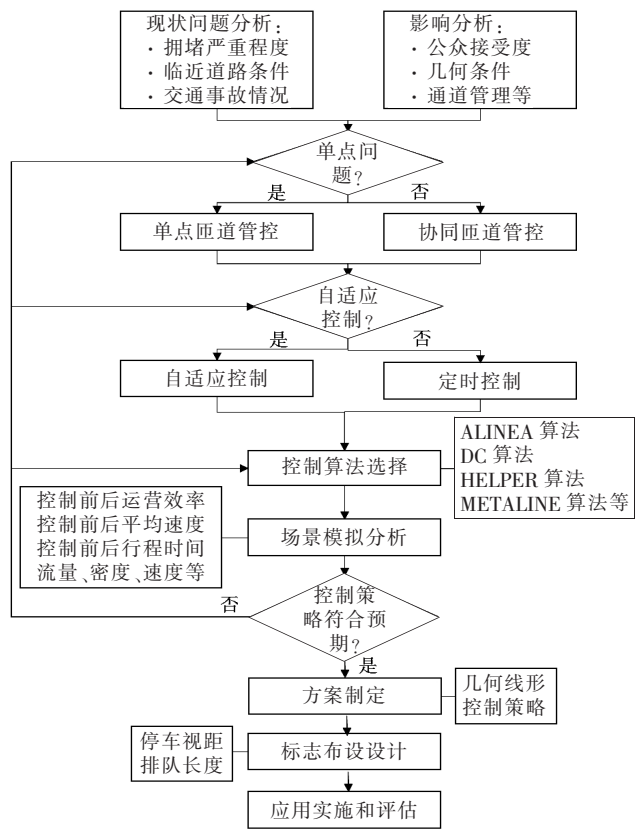


图3 匝道管控技术实施流程

制框架、算法选择、模拟分析和方案制定等环节。首先,明确核心问题是缓解拥堵还是改善局部安全问题,同时宏观政策层面需考虑公众接受程度,道路现有几何条件是否满足排队长度和停车视距要求。其次,根据具体问题,结合统计分析道路拥堵或交通事故是单点问题还是上下游匝道联动问题,从而确定采用单点匝道控制还是协同匝道控制,同时根据交通流特点确定自适应控制和定时控制方案。第三步,根据当

地交通流观测数据,标定交通流模型参数,提出适合此场景的模型标定参数或其他算法。第四步,根据提出的模型算法,在仿真平台建立道路模拟场景,输入模型变量参数、训练场景,得到运营效率、平均速度、流量、密度、速度等对比指标,论证模型和控制策略的可行性。最后根据道路几何条件和控制策略,详细设计设备和标志布设方法,并落地实施。

4 结语

该文从匝道管控技术的基本原理和技术难点出发,详细梳理论述匝道管控技术在美国的应用分布和效益统计,统计结果表明:匝道管控技术的应用使得平均行程时间减少38.7%、平均运行速度增加38.25%、平均事故率下降30.1%。同时,结合中国道路管理特点,分析匝道管控技术应用的难点,主要体现在模型参数本地化、几何条件、试点应用等方面。最后,根据匝道管控技术特点和原理,提出匝道管控技术实施流程。随着智慧高速公路的推进,大量感知设备、管理平台、管控策略逐渐落地实施,该文研究结果可以为中国高速公路和城市快速路管控提供技术参考。

参考文献:

[1] 高德地图. 2018年度中国主要城市交通分析报告[R], 2018.

[2] REILLY Jack, SAMARANAYAKE Samitha, DELLE MONACHE Maria Laura, et al. Adjoint-Based Optimization on a Network of Discretized Scalar Conservation Laws with Applications to Coordinated Ramp Metering [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2015, 167(2): 733—760.

[3] MIZUTA Arianne, ROBERTS Kim, JACOBSEN Les, et al. Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operational Strategy-A Primer[R]. FHWA—HOP—14—020, 2014.

[4] 孙剑,刘好德,李克平. 城市干道交通信号协调控制仿真优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1467—1471.

[5] 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.

[6] 朱炯. 高速公路入口匝道与路段可变限速控制方法研究及实现[D]. 杭州:浙江工业大学, 2012.