

城市快速路下匝道高地联动协同控制方案研究

王清波¹, 刘 灿², 史 亮³, 郝立莉³

[1. 青岛市工程咨询院, 山东 青岛 266041; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092;

3. 青岛城发城市更新有限公司, 山东 青岛 266041]

摘 要: 为实现快速疏解拥堵车流、提升通行能力, 结合车辆在衔接段的交通运行特性, 以青岛市重庆路高架为例, 采用仿真试验对匝道管控方案效果进行仿真实验并将输出指标进行对比, 采取出口匝道信号控制、地面关联交叉口信号、交通诱导、可变车道协同控制, 重点解决高架“下不来”问题。结果表明: 自适应开启的协同控制方案最优, 其次自适应开启的交替放行方案次优, 两者效果均优于全天开启的交替放行方案; 当左转车辆比例较低时, 采取自适应开启的协同控制方案最优; 当左转左车辆比例较高时, 可以采取左转车道外置方案; 对于出口匝道车流左转需求量波动性大的情况, 可增设可变车道, 根据流量等信息确定左转时段及直行时段。

关键词: 快速路出口匝道; 高地联动; 协同控制; 信号控制; 渠化设计; 仿真实验

中图分类号: U491.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0022-05

Research on Highland Linkage Coordinated Control Schemes of Urban Expressway Off-Ramp

WANG Qingbo¹, LIU Can², SHI Liang³, HAO Lili³

[1. Qingdao Engineering Consulting Institute, Qingdao 266041, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group)

Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Qingdao Chengfa Urban Renewal Co., Ltd., Qingdao 266041, China]

Abstract: In order to quickly relieve the congested traffic flow and improve the traffic capacity, combined with the traffic operation characteristics of vehicles in the connecting section, the simulation experiment is conducted for the effect of ramp management and control scheme, and the output indicators are compared. The off-ramp signal control, ground-related intersection signal control, traffic guidance and variable lane coordinated control are adopted to focus on solving the problem of “inability to get off” on elevated roads. The results show that the cooperative control scheme with adaptive opening is the best, followed by the alternating release scheme with adaptive opening. Both have better effects than the alternating release scheme that is open throughout the day. When the proportion of left turn is low, the cooperative control scheme with adaptive opening is the best, and when the proportion of left turn is high, an external left-turn lane arrangement can be adopted. For the scenario where the demand for left turn of off-ramp traffic fluctuates greatly, the variable lane can be added, and the left turn period and straight turn period are determined according to the flow rate and other information.

Keywords: expressway off-ramp; highland linkage; collaborative control; signal control; channelization design; simulation experiment

0 引 言

近年来,随着经济飞速发展,城市机动车拥有量迅猛增长,对城市交通,特别是快速交通提出了更高的要求。城市快速路服务等级高,通行流量大,随着交通流量和交通需求的几何级增长,城市快速路高速度、高容量优势正在不断降低,其中出入口与地面

交叉口通常是运行堵点。目前国内外专家学者开展了大量的科学研究工作,内容涉及到城市快速路系统的规划、设计、运营、管理等各方面,同时对相关方面的交通流模型的建立及验证也进行了深入的探讨。徐江闽等^[1]通过建立拥堵条件下的快速路出口匝道交叉口与下游交叉口协同控制模型,求得的交叉口信号配时方案大大加快了出口匝道拥堵疏解效率;针对城市快速路出入口匝道与平面交叉口衔接段的长度的设计问题,李妙晗等^[2]提出了优化设计模型;徐志红^[3]基于多源数据科学研判交通拥堵问题的成因,运用高地联动的优化策略,以全局最优、

收稿日期: 2024-10-24

作者简介: 王清波(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程设计咨询工作。

系统协同理念制定交通提升实施方案。汤震^[4]提出城市快速路典型交织段的延误计算公式,可对交织区运行延误进行量化计算。综上分析,已有研究成果对高架快速路和地面道路衔接段的研究已逐步深入,但绝大部分研究以控制模型理论研究为主,未考虑衔接段道路交通组织设计及交叉口渠化设计的协同控制研究。

为此,以青岛市高架快速路为例,选取代表性的出口匝道(长沙路出口匝道)与地面衔接段进行分析,优化地面交通组织、渠化设计,以信号控制和渠化调整两种策略,构建六种应用场景,采用 Simulation of Urban Mobility (SUMO)对匝道管控方案效果进行仿真实验并将输出指标进行对比,确定不同的交通需求下的解决方案。

1 工程概况

青岛市主城区南北贯通的道路仅环湾路、重庆路、黑龙江路及青银高速公路4条道路,交通压力很大,重庆路是东岸城区中部一条南北向交通大动脉,承担组团快速集散的功能及日常的通勤交通的集散功能。重庆路快速路南起山东路,北至仙山路,全长约17.7 km,规划高架主线双向6车道,地面辅路双向8车道,全线同步设置9对上下桥匝道服务沿线到发交通。

调研重庆路快速路匝道结构特点和车流方向,梳理影响出口匝道拥堵的主要因素,包括接地断面车道数、接地点与关联交叉口距离、交叉口衔接段渠化设计、远期年流量预测等。围绕关键影响因素,基于每对匝道的预计拥堵情况和改善需求,提出针对性的解决方案与管控策略。选取了其中典型匝道长沙路出口匝道作为研究对象。

现状重庆路与长沙路为十字型信号控制交叉口,交叉口周边为立交预留用地。长沙路出口匝道上跨德兴路,与长沙路交叉口衔接,如图1所示。长沙路出口匝道长度405 m,2045年流量预测为1 200~1 400 pcu/h,在9对匝道中车流量最大;并且匝道接地点与关联交叉口距离短,仅125 m;匝道接地断面车道数为内侧地面辅路2根车道+匝道接地2根车道+外侧地面辅路2根车道,地面衔接交叉口没有增加渠化车道设计(1根左转车道+4根直行车道+1根右转车道)。德兴路右转驶入重庆路地面辅路车辆在长沙路交叉口左转时,与地面直行及出口匝道车流交织,并且需要跨越多根车道;长沙路出口匝道车

流左右转时,与地面车流存在交织,如图2所示。

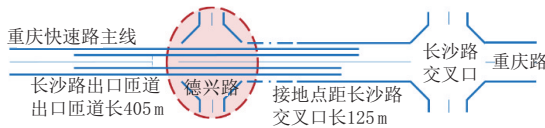


图1 长沙路出口匝道概况

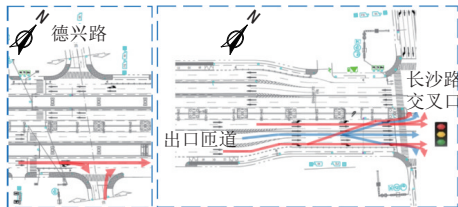


图2 长沙路出口匝道节点车流交织情况

综合考虑各影响因素,该处出口匝道车流会与地面车流产生严重交织,拟采取匝道高低联动协调控制方案。

2 出口匝道管控策略

2.1 信号控制策略

针对长沙路出口匝道接地点与关联交叉口的距离过近、出口匝道与地面流量大、交织严重而造成拥堵,致使出口处通行能力下降的情况,采取“信号控制”策略,在出口匝道接地点设置信号灯控,出口匝道与地面车流交替放行,信号灯与关联交叉口/干线信号协同配时,如图3所示。

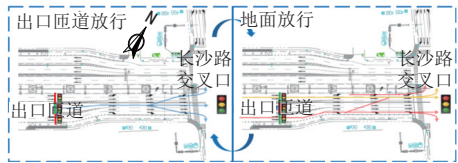


图3 信号控制策略-交替放行

匝道接地点处信号灯与衔接交叉口信号灯的协同控制,控制逻辑为根据实时拥堵情况,改变具体控制方式,如图4所示。该方案是一种分级控制方案,匝道及主线无拥堵为一级,控制方式为无管控;匝道产生拥堵但并未蔓延至主线为二级,控制方式为匝道车流与地面车辆自适应交替放行,根据5 min平均占有率是否大于阈值判断交替放行信号灯是否开启;匝道拥堵蔓延至主线为三级,需要按照预设的协同配时方案改变出口匝道信号灯与衔接交叉口信号灯的配时方案,实现拥堵车辆的快速疏散。实时控制代码文件中,根据每一仿真时刻各感知设备的输出占有率,判断拥堵等级,进而改变控制方式。

2.2 渠化调整策略

针对地面衔接交叉口渠化设计方案不合理,渠化车道与车流方向、各个转向流量占比不匹配,导致

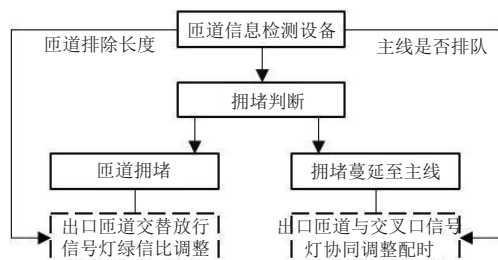


图4 信号协同控制逻辑流程图

部分车道排队过长,干扰其他车道,此类拥堵情况采取“渠化调整”策略,如图5所示。

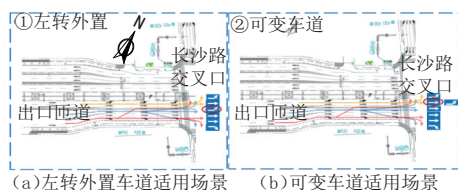


图5 渠化调整策略适用场景

(1)采用左转外置车道,适用于出口匝道车流左转需求量长期较大,与地面直行车流交织,且交叉口进口道车道数较多。渠化调整前,内侧第1根车道为左转车道;渠化调整后,内侧第1根车道、第3根车道均为左转车道(第3根车道对应出口匝道内侧车道以减少交织)。

(2)采用可变车道,适用于出口匝道车流左转需求量波动性大,需求量大时交织严重的场景。渠化调整前,内侧第1根车道为左转车道;渠化调整后,内侧第1根车道为左转车道、内侧第2根车道为可变车道(直行/左转)。

3 设备部署方案

原机电系统布设方案:在快速路出口匝道分流鼻端设置视频监控系统及反向卡口,地面段全线设置视频监控系统。

视频监控系统主要设置于高架主线分合流位置及路段、地面交叉口区域。视频监控摄像机主要负责交叉口、沿线路段视频信息的24 h不间断全天候采集并且实时转换为数字信号进行传回。高架主线匝道分流点设置高清卡口、地面进口道设置反向卡口。

长沙路出口匝道高地联动管控方案新增智能设备:共设置3个多目标雷达检测器(高架与匝道分流鼻端设置2个,匝道接地端设置1个)、1组下匝道信控灯、1组交通诱导系统(可变情报板)、1套高地联动系统。

多功能广域雷达微波检测器采用广域雷达跟踪技术,可跟踪128个目标,检测4~8车道、200 m远;检

测内容包括预设断面的流量、占有率、车速。主要检测排队是否达到关键点位:匝道下半段距地150 m处、匝道上半段距主线分流区100 m处、主线上游距分流区150 m。雷达检测器具体布置示意图详见图6,外场设备部署示意图详见图7。

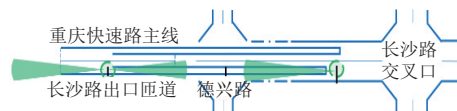


图6 长沙路出口匝道雷达检测器布置示意图

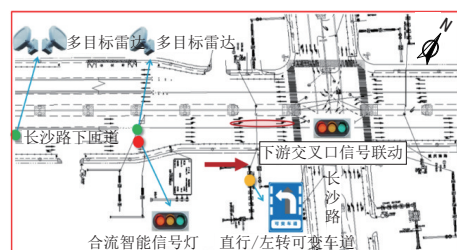


图7 外场设备部署示意图

上述设备可检测以下点位的占有率:出口匝道、主线、地面道路,实现根据出口匝道5 min平均占有率是否大于阈值判断交替放行信号灯是否开启,以及根据各点位的5 min平均占有率,综合判断拥堵等级,切换分级控制方式至不同等级。

相比于全天开启或定时开启的传统控制方法,部署智慧检测设备实现自适应控制的优势主要体现在。

一是灵活性高,可快速辨识交通流状态并做出管控:通过智慧化感知手段,准确获取实时的主线、匝道、地面交通状态,实现多感知器和控制器的信息互通,以及多级管控方案的协作开启与关闭。

二是可实现系统互联,增强管控决策的可信性:与匝道管控系统、交警既有控制平台等互通互联,未来根据需求新增功能系统融合,打造一体化数据中心一站式管控平台。

4 系统物理架构

系统物理架构设计详见图8,包括(1)数据采集子系统,在快速路主线匝道端设置广域毫米波雷达,用于采集匝道段的交通车流量;(2)数据通讯子系统,新增的毫米波雷达、匝道控制信号机、可变情报板等设备利用监控系统已有的交换机,通过现有的光纤网络链路将数据统一传输至交通管控平台;(3)外场控制子系统,将信号控制策略部署于下匝道信号控制机,基于匝道控制算法通过信号灯发布匝道通行的控制指令,联动控制下游就近路口的可变情报板。

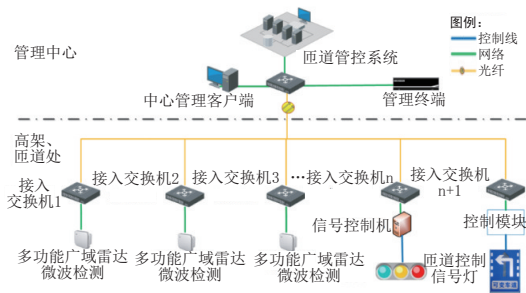


图8 系统物理架构图

5 仿真与效果评估

5.1 仿真建模

采用交通仿真软件SUMO对匝道管控方案效果进行仿真验证与分析,仿真场景设置见表1。选取拥堵时间为评价指标,车辆拥堵导致占有率升高超过阈值即为拥堵,在不同左转比例下对6个场景进行仿真实验。交叉口信号灯配时的设定则是参考设计说明中给出的流量等信息,人为估算后设定。仿真时间设置为3 h,设置每小时仿真范围内各OD对间流量为:低—高一低,以便模拟拥堵形成和消散过程;为了使模型输出可信度更高,避免仿真模型运行不稳定带来的影响,最终的输出数据仅取仿真时间中间两小时的输出。

表1 仿真场景设置

编号	管控策略	管控方案
场景1	信号控制	默认(无管控)
场景2		出口匝道与地面交替放行(全天开启)
场景3		出口匝道与地面交替放行(自适应开启)
场景4		交替放行及交叉口协同控制(自适应开启)
场景1	渠化调整	默认(无渠化调整)
场景5		左转外置
场景6		定时开启可变车道

仿真路网依据工程方案构建,仿真区域内路段限速60 km/h。仿真交通需求基于预测流量分配至OD,并设置高峰时段车流量为低谷时段的1.4倍。由于关联交叉口出口匝道侧(即南方向)进口道的车流交织主要体现在主线南出口匝道车流左转与地面直行车流交织、德兴路车流汇入重庆路地面道路后左转车流与直行车流、主线下匝道车流交织,因此考虑上述两处车流的左转比例,设置左转比例为50%、40%、30%、20%四种场景,并以左转比例35%场景的OD矩阵为基准,如表2所示,采用Webster配时法计算关联交叉口的信号配时。

5.2 仿真输出

选取拥堵时间为评价指标,车辆拥堵导致占有

表2 用于交叉口信号配时的左转比例35%场景下的OD矩阵

OD	主线南	地面北	地面南	长沙西	长沙东	德兴路
主线南	—	798	—	490	112	—
地面北	412	—	701	106	106	—
地面南	—	1314	—	342	144	—
长沙西	222	350	378	—	696	—
长沙东	93	200	157	734	—	—
德兴路	—	171	—	105	24	—

率升高超过阈值即为拥堵。在不同左转比例下对6个场景进行仿真实验,得到结果如图9~图12所示。

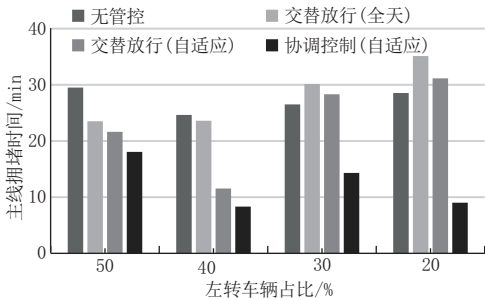


图9 信号控制策略主线拥堵时间对比

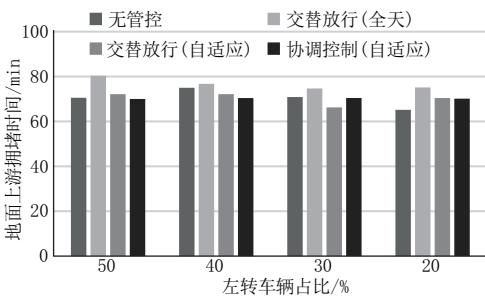


图10 信号控制策略地面上游拥堵时间对比

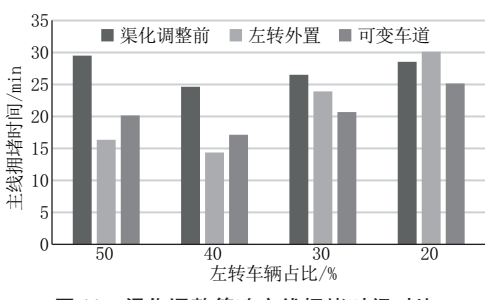


图11 渠化调整策略主线拥堵时间对比

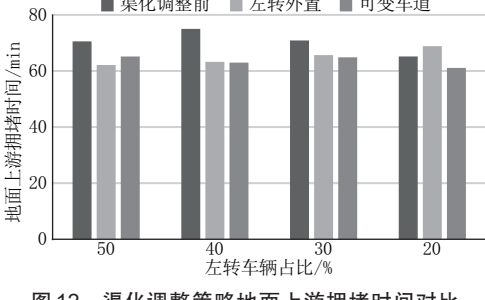


图12 渠化调整策略地面上游拥堵时间对比

- (1)信号控制策略,如图9、图10所示。
- (2)渠化调整策略,如图11、图12所示。
- 对于信号控制策略,基于智慧化检测设备对交

通流参数进行的准确、实时检测,可更加全面的把握交通运行状态,并通过算法实现更加灵活、智能的管控方式,从而取得更好的拥堵缓解效果。

具体而言,在主线拥堵时间方面,相较于无管控:全天开启的交替放行在左转比例50%时,主线拥堵时间下降6 min,但随着左转比例降低,其优势逐渐减小甚至差于无管控,这是因为左转比例低时,交替放行会增加其他方向车辆的延误,进而导致拥堵;自适应交替放行缓解了低谷时段对交通流的影响,效果均优于全天开启的交替放行,左转比例50%时可使主线拥堵时间下降8 min,但左转比例20%时依然会使主线拥堵时间增加2 min;自适应协调控制能在各左转比例下加快车流疏散,取得较好效果,左转比例从50%变化至20%,主线拥堵时间分别下降11、16、12、19 min。

在地面上游拥堵时间方面,各管控方式下的拥堵时长差异较小。

对于渠化调整策略,通过预先改变车道标志标线或渠化方式,实现对特定场景下的拥堵快速疏散。

具体而言,在主线拥堵时间方面,相较于无管控:左转外置管控方法在左转比例从50%变化至20%,主线拥堵时间分别下降13、10、3、-2 min,这是因为在左转需求小时,额外设置的左转车道会使其他流向车辆的疏散速度下降,从而导致拥堵,可变车道在左转比例高时效果略差于左转外置,但依旧能使主线拥堵时间下降,在左转比例低时,可变车道可根据需求实时变化行驶方向,因此同样能使主线拥堵时间下降,左转比例从50%变化至20%,主线拥堵时间分别下降9、7、6、3 min。

在地面上游拥堵时间方面,各管控方式下的拥堵时长差异较小。

5.3 结果分析

对于全天开启的交替放行方案(场景2),在左转比例高时,主线拥堵明显改善,地面拥堵时间增加;左转比例低时,主线及地面拥堵都会增加,效果差;故其适用于左转比例较高的情景。

对于自适应开启的交替放行方案(场景3),其效果优于全天开启的交替放行方案(场景2)。

对于自适应开启的协同控制方案(场景4),其效果优于交替放行(自适应开启),且左转比例低时,依然能够改善交通拥堵。

对于左转外置方案(场景5),当仿真车流量设置

较大,左转外置能够有效改善下匝道左转车流与地面内侧直行车流的交织;但左转比例低时,反而会带来负面效果,拥堵时间增加。可知,该方案适用于出口匝道车流需求量长期较大的情景。

对于定时开启可变车道方案(场景6),仿真3 h车流量有较大波动时:低—高—低,可变车道能够有效满足不同时段的左转需求。因此该方案适用于出口匝道车流左转需求量波动性大的情景。实际中,设置可变车道时,需要根据流量等信息确定左转时段及直行时段。

6 结 语

针对由于道路交通组织设计、交叉口渠化设计、交通信号控制等方面不够科学化和精细化,通行效率不高,加上出口匝道与地面道路交叉口间距较短等原因,导致车流难以快速疏散,形成主线与匝道拥堵,交叉口延误增加,运用“信号控制”、“渠化调整”两大策略,优化设备部署方案,构建系统物理架构,实现匝道出口信号、地面关联交叉口信号、交通诱导、可变车道协同控制,从而实现快速疏散拥堵车流、提升通行能力的效果。结合仿真试验结果,可得出如下结论:

(1)对于出口匝道设置信号控制策略,自适应开启的协同控制方案最优,其次自适应开启的交替放行方案次优,两者效果均优于全天开启的交替放行方案;

(2)对于左转车辆比例较低时,采取自适应开启的协同控制方案最优;

(3)对于转车辆比例较高时,可以采取左转车道外置方案;

(4)对于出口匝道车流左转需求量波动性大的情景,可增设可变车道,根据流量等信息确定左转时段及直行时段。

参考文献:

- [1] 徐建闽,邹祥莉,马莹莹.拥堵条件下的快速路出口匝道交叉口与下游交叉口协同控制方法研究[J].重庆交通大学学报,2019,38(4):9-14.
- [2] 李妙晗,徐鹏,王新竹,等.城市高架式快速路出入口匝道与平面交叉口衔接段长度优化研究[J].公路交通技术,2023,39(1):161-167.
- [3] 徐志红.基于高地联动的城市快速路交通提升策略研究[J].城市道桥与防洪,2023,288(4):8-10.
- [4] 汤震.快速路出口匝道交织区交通组织方法研究[J].中国市政工程,2021,215(2):8-11.