

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.01.022

基于车流波动理论的匝道达到控制与仿真效果评价

康诚, 潘新福, 严欣, 范欣炜

(中汽研汽车试验场股份有限公司, 江苏 盐城 224100)

摘要:以匝道达到控制为主体的合流区主动交通管控是高速公路与城市快速路在提升交织区通行能力与交通安全采用的重要方法。采用历史真实交通数据,结合优化的速度波动理论模型,构建车辆在拥挤流交织过程中的运行状态模型,量化分析混合控制决策下最优化的管控方案,并通过优化的仿真平台,获取车辆轨迹、分布及冲突状况等信息,验证结论的实际效果。以秦洪立交为例进行模型试验论证,对比匝道单一控制与匝道主线混合控制的优化效果。结果表明,相对于无管控状态,单一匝道控制下冲突减少52.5%,但车辆延误增长20.5%;混合控制下冲突减少68.1%,且车辆延误降低12.0%。由此可知控制模型对匝道交通安全与效率有明显优化效果。其中,采用匝道主线混合控制时效果最佳,有效提升匝道通行效率和交通安全效益。

关键词:车流波动理论;交通组织;入口匝道控制;交通仿真;交通安全评价

中图分类号:U491

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)01-0191-10

Ramp Metering and Simulation Effect Evaluation Based on Traffic Fluctuation Theory

KANG Cheng, PAN Xinfu, YAN Xin, FAN Xinwei

(CATARC Automotive Proving Ground Co., Ltd., Yancheng 224100, China)

Abstract: The active traffic control in the merging area, which takes ramp arrival control as the main body, is the main means adopted by the expressway and urban expressway to improve the capacity and traffic safety of the weaving area. In this study, the historical real traffic data and the optimized theoretical model of speed fluctuation are used to build the vehicle arrival model in the process of congestion and queue weaving, and the optimal control scheme under the mixed control decision is quantitatively analyzed. Through the optimized simulation platform, the vehicle trajectory, distribution and conflict status are obtained, and the actual effect of the conclusion is verified. This study takes Qinzhong Interchange as an example to demonstrate the model test, and verify the optimization effect of ramp single control and ramp main line mixed control under the optimization effect. The results show that the conflict under ramp control is reduced by 52.5% and the vehicle delay is increased by 20.5% compared with the uncontrolled state. The conflict and vehicle delay under hybrid control are reduced by 68.1% and 12.0%, respectively. It can be seen that the control model has obvious optimization effect on ramp traffic safety and efficiency. One of the most effective control strategies is the ramp mainline mixed control, which leads to significant improvements in ramp traffic efficiency and traffic safety.

Keywords: Traffic fluctuation theory; traffic organization; on-ramp control; traffic simulation; traffic safety evaluation

0 引言

当前我国城市快速路交通流量急剧增加,各种交通问题也随之出现,尤其是由匝道汇入的支线车辆与快速路主线车辆在合流区发生并道合流所形

成的交织区范围内。在该路段由于强制的换道行为与交通冲突导致局部交通拥堵、匝道排队溢出以及交通事故频发,严重影响了城市快速路以及匝道上游连接道路的通行秩序和通行效率,解决入口匝道交通问题刻不容缓^[1-2]。因此,本研究基于真实场景的历史交通数据,构建符合我国城市快速路交通特性的微观交通模型,基于车流波动理论,设计匝道优化控制模型系统框架,并通过仿真模型来模拟和分析所提出的控制策略在应用时可取得的效果。

目前研究的入口匝道控制方案大多是对匝道交通流进行调节控制,或采取快速路车速诱导及限速的协调控制方案,从而实现交通流量的控制和交通拥堵事故的疏散,而对快速路主线车辆的通行权不加控制^[3-4]。同时,针对匝道控制的模型多半为单目标或者多目标的开环/闭环控制,这种单

收稿日期:2023-02-20

基金项目:江苏省科技项目(BF2021067)。

第一作者简介:康诚,高级工程师。研究方向为智能网联汽车试验、交通流仿真,E-mail: kangcheng@catarc.ac.cn

引文格式:康诚,潘新福,严欣,等.基于车流波动理论的匝道达到控制与仿真效果评价[J].森林工程,2024,40(1):191-200.

KANG C, PAN X F, YAN X, et al. Ramp metering and simulation effect evaluation based on traffic fluctuation theory[J]. Forest Engineering, 2024, 40(1):191-200.

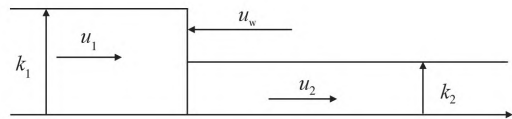
一性的控制方案无法很完美地覆盖当下匝道多车道复杂环境下的效率与安全性问题^[5-6]。在以往针对匝道控制的研究过程中, Hossain^[7-8]应用微观交通仿真模型分析了匝道合流过程的通行能力和饱和流量; 随后, Elefteriadou 等^[9]应用微观交通仿真系统 MITSIMLab 评估快速路的匝道控制。Lertworawanich 等^[10]采用 Vissim 微观仿真模型研究了车辆换道行为和车辆运行轨迹对匝道交织的影响; Vieira 等^[11]研究了微观交通模型与交通管理策略对匝道控制影响的关系。Ngoduy 等^[12]基于交通流的特性, 运用交通波理论研究造成拥堵的临界条件, 并将其拓扑特征分解为一系列单向链路, 并在此基础上研究复杂条件下的匝道交织情况。

基于上述问题, 本研究充分结合城市快速路的交通现状, 利用车流波动理论和交通管控策略, 构建匝道控制优化模型。城市快速路入口匝道交织区交通管控策略旨在缓解交通拥堵, 提高道路通行效率和安全性, 目前常见的管控策略包括交通信号灯控制^[15]、车道限行^[16]和车辆分流^[17]等。现有策略存在以下核心不足: 1) 策略部署约束。当前管控策略依赖于道路旁的传感器和交通信号灯等设施, 仅在有限范围内布设, 无法应对城市道路网络复杂的交通状况; 2) 管控效果不佳。往往只能缓解部分情况下的交通拥堵, 无法解决交通瓶颈本质问题, 且在高峰期和节假日等特殊情况下效果非常有限; 3) 数据支持薄弱。目前城市交通数据采集和分析的技术并未大面积投入实地使用, 数据质量和实时性存在一定问题。通过研究交织区当前的交通行为与车辆轨迹发现, 目前当城市快速路上的交通量趋于饱和时, 车辆经常采取与前车保持较小的间距以争取在入口匝道合流区的优先通行权, 而快速路车流的车头间距过小直接导致入口匝道上的车辆无法及时汇入快速路, 从而导致匝道车辆拥堵及排队溢出现象频繁发生, 严重扰乱了入口匝道上游相邻道路的行车秩序。城市交通系统内各元素的性能、状态及其之间的规律联系由多方面影响因素共同作用, 单一的结构模型与管控方式通常难以对其进行准确详细的描述和评估分析, 因此, 需要从交通系统角度出发, 结合道路几何特征、交通需求结构和匝道信号设置的影响机理。本研究利用路网的历史交通信息和实时采集信息, 采用交通分配和最优化理论, 结合微观交通仿真验证的方法, 验证了管控策略在真实交通流量下的实际效果。

1 基于车流波动理论的匝道优化管控模型

1.1 优化的车流波动理论

根据车流波动理论, 道路上交通流量的变化会引起车流的疏密程度变化, 这种变化可以理解为车流中存在的交通波。该波以速度 u_w 稳定地朝向某一方位进行传播, 反映道路的运行情况。当车流从高速低密状态逐渐转变为低速高密状态时, 道路上的交通流可能会出现拥堵现象, 形成集结波, 这种现象会导致车流量速度下降。当主车道和匝道车辆在合流区域汇合形成较少车道数的车流时, 交通流特性发生相应变化, 可能导致该汇合区域的实际通行能力低于其设计通过能力, 从而形成交通瓶颈区段, 如图 1 所示^[13-14]。



u_w 为集结波波速; u_1 为高峰时段区间平均速度; u_2 为平峰时段区间平均速度; k_1 为高峰时段车流密度; k_2 为平峰时段车流密度。

u_w is the gathering wave velocity; u_1 is the average speed during peak hours; u_2 is the average velocity in the normal peak period; k_1 is the density of traffic flow during peak hours; k_2 is the traffic flow density during normal peak hours.

图 1 车流波动理论示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traffic flow fluctuation theory

依据车流波模型, 集结波波速见式(1)。

$$u_w = \frac{u_1 k_1 - u_2 k_2}{k_1 - k_2} = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad (1)$$

式中: u_w 为集结波波速; u_1 为高峰时段区间平均速度; u_2 为平峰时段区间平均速度; q_1 为高峰时段流量; q_2 为平峰时段流量; k_1 为高峰时段车流密度; k_2 为平峰时段车流密度; Δq 为高峰时段与平峰时段流量差; Δk 为高峰时段与平峰时段车流密度差。

1.2 匝道车流运行情况

匝道车辆的时空轨迹图如图 2 所示。由图 2 可知, 当匝道交叉口信号灯为红灯时, 驶入匝道的车辆均在停车线 O 处等候, 导致集结波 ω_1 朝向上游方向进行传播运动, 断面 O 向后的排队长度也会不断增大。当匝道交叉口信号灯转为绿灯后, 车流将以饱和流率 S_1 逐渐消散。断面 O 处消散波 ω_2 开启朝向上游进行传播运动, 而集结波 ω_1 将以原有速度开启朝后方进行传播, 从而导致排队车辆队列进一步增长。此后, 消散波将在断面 O 追上集结波, 排队车辆队列完全消散, 后续车辆将不再需要进行排队等候。

原则是通过最小化交叉口各方向交通的车辆平均延误,确保其服务水平,进而达到车辆运行效率的最佳效果,通常以交叉口饱和度来体现。为确保道路交通公平性,本研究将车流在一个周期内的平均延误作为优化控制目标。

实际交通运行过程中受到多种因素的影响,并且该系统具有随机性,导致其参数可能发生波动和变化,难以避免对原有模型准确性产生负面影响。为应对不确定性,可采用鲁棒优化控制的方法,通过牺牲部分目标来构建相应的保护框架,以避免其不确定性可能带来的约束条件失效。这种方法旨在提高匝道处交通组织系统的鲁棒性,以确保在具有可变性情况下系统的稳定性和可靠性。该模型中的约束失效表明交通流的排队长度超过入口匝道的长度,导致交通容量下降和交通冲突风险增加。交通流波动具有一定的不确定性,因此在设计优化策略时,需要考虑交通流的波动,以实现有效的交通控制。

以 X 表示交叉口饱和度的上限,以 D 表示一个周期内快速路-匝道交叉口车流总延误,构建城市快速路入口匝道合流区交通组织优化模型(P_1),针对总延误最低的优化目标,控制参数通过最优化函数进行求解,目标函数与条件约束见式(8)~式(17)。

$$\min \bar{D} = \min \frac{D}{C(Q_e + Q_r)} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } g_e \geq t_e + l_e/v_e \quad (9)$$

$$g_r \geq t_r + l_r/v_r \quad (10)$$

$$l_r \leq L \quad (11)$$

$$\frac{Q_e}{S_e \cdot g_r / C} < X \quad (12)$$

$$\frac{Q_r}{S_r \cdot g_r / C} < X \quad (13)$$

$$g_e \geq g_{\min} \quad (14)$$

$$g_r \geq g_{\min} \quad (15)$$

$$C \geq C_{\min} \quad (16)$$

$$M_{\max} = M' + (k + 1)\xi \quad (17)$$

式中: \bar{D} 为一个周期内交叉口车流平均延误; D 为一个周期内交叉口车流的总延误; Q_e 、 Q_r 分别为快速路与匝道的车流量; C 为信号控制周期值; g_e 、 g_r 为快速路绿灯时间、匝道绿灯时间; t_e 、 t_r 为快速路、匝道绿灯启动损耗时间; l_e 、 l_r 为快速路、匝道车辆排队长度; v_e 、 v_r 为车辆在快速路、匝道正常行驶的速度;

S_e 、 S_r 为快速路、匝道的饱和流率; g_{\min} 、 g_{\min} 和 C_{\min} 分别为快速路有效绿灯时间、匝道有效绿灯时间以及信号控制周期最小值; X 为控制目标参数; M_{\max} 为单次迭代最大样本数; M' 为抽样数量; k 为解集的鲁棒度; ξ 为平衡参数。

式(12)和式(13)表明从匝道上驶来的车辆始终需要在有效绿灯时间内通过路口,保证到达 S (或 S')路段时不会遇到剩余车辆超过上一周期(否则多周期累计预留车辆会增加,较难实现目标调控效果)。式(14)~式(17)用于确保交叉口信号周期和各相位绿灯时间不低于相应最小值,避免过于频繁的信号相位转换和车辆行驶方向的反复变更,最大程度利用交叉口的时空资源,同时提升交通安全性。假定信号配时周期损失时间(包含车辆启动损失与红灯时间)为 δ ,基于信号控制配时原理与车流波动理论,各项参数满足式(18)。

$$C = g_e + g_r + \delta \quad (18)$$

2 实例验证及仿真分析

本研究以秦洪互通立交为例,运用所搭建的微观仿真模型对设计的匝道控制方案进行相应模拟,并基于间接安全评价方法对比不同设计方案下的安全指标特性,进而得到最优解。

以左转车辆(A)和直通车辆(B)为例,图3展示了安全间接分析模型(Surrogate Safety Assessment Model, SSAM)各项交通指标的计算方法。基于交通安全理论和道路冲突研究技术,通过对微观仿真平台输出的车辆轨迹数据进行一系列分析,获取车辆冲突数据、冲突的归类和分布特征。通过特定的算法和交通安全理论对提取的道路冲突数据进行相应的数理计算和统计分析,进而选取有效指标进行后续研究分析。

2.1 微观交通仿真模型建模与标定

连续型模型的仿真研究主要目的在于构建一个离散模型,以近似表达连续现象,通常采用常微分方程初值问题数值解法进行研究。仿真过程中假定仿真模型可以通过状态方程来表示仿真系统的状态,并在计算机上进行仿真。

单步法的优势在于只需提供初始状态即可进行仿真,使得计算简单便捷。但是在处理交通仿真过程中,由于其复杂性和剧烈变化,可能会导致误差积累,从而降低仿真精度。为克服欧拉法在精度方面的不足,可选择使用Runge-Kutta法。该方法

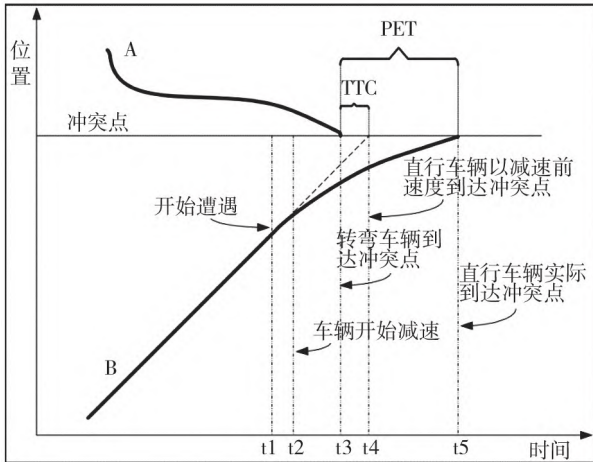


图 3 冲突车辆时间-空间轨迹图

Fig. 3 Time-space trajectories of conflicting vehicles

同时考虑到计算的便利性,可以通过规定步长并使用预测校正技术来进行计算,从而提高仿真的准确性,具体计算方法见式(19)和式(20)。Runge 首先提出间接采用 Taylor 展开方法,即用几个节点上函数值(f)的线性组合来代替其导数,然后按 Taylor 展开,确定其系数,以期提高方法精度。

$$y_{n+1} = y_n + h \sum_{i=1}^S C_i K_i \quad (19)$$

$$K_i = f(x_n + a_i h, y_n + h \sum_{s=1}^S b_{is} K_s), i = 1, 2, \dots, S; a_1 = 0. \quad (20)$$

式中: C_i 为待定权因子; h 为 Euler 法系数; S 为使用的 f 的个数; a_i 、 b_{is} 为参数; K_i 为 Taylor 展开子项,如式(20)所示。

在仿真模型中,基于研究对象和仿真需求等条件选择不同的数学模型。相比欧拉法等其他数值计算方法,采用龙格-库塔法可以保证仿真的高精度和精细化,同时也为仿真研究带来更大的灵活性和自由度。该方法的主要特点包括在仿真过程中,只需了解前一时刻的系统状态即可进行任意时刻的仿真计算,具有自启动能力。此外,由于计算所需条件较少,内存占用也较少;该方法对递推公式给出不同的参数,可有不同的计算方式,解不唯一,具有灵活性;该方法能够根据精度要求来改变步长的值,在每一步的计算中都采用相同的步长来计算系数即可;该方法的仿真精度仅基于步长的选择和所应用方法的阶次,便于修正。

2.2 匝道主线双车道的方案一分析

方案一为无控制状态下的交通流运行情况,研究目标匝道处为双车道,即 2 个汇入口,主车道为双车道且允许车辆变道。在匝道和主车道的车辆通行次序方面上,方案一假设主车道的车辆拥有道路的优先

通行权。图 4 为方案一秦洪立交路段示意图。

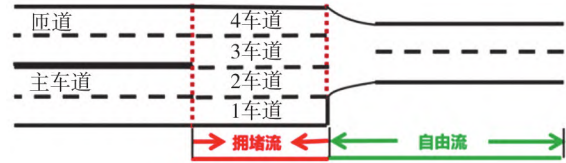
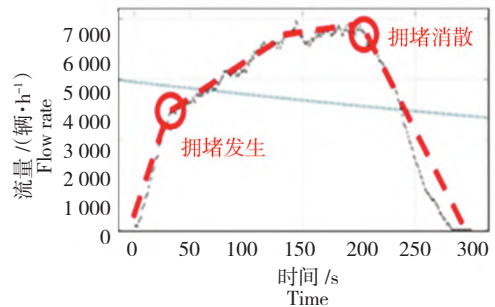


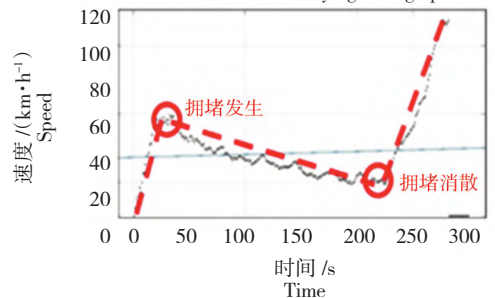
图 4 方案一秦洪立交路段示意图

Fig. 4 Schematic diagram of scheme 1 QinHong interchange section

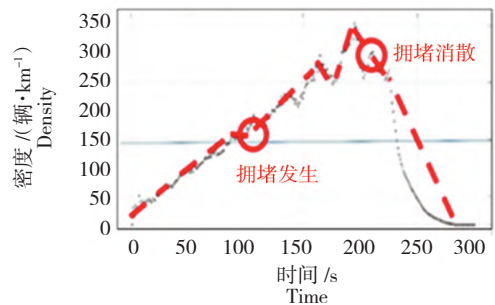
由图 4 可以看出,相较于其余路段的车辆平均延误时间,匝道处的车辆平均延误时间较高。对方案一的秦洪立交进行更加详细的分析,基于 SUMO 仿真以及 SSAM 分析的结果,分别得到方案一的流量、速度和密度的时变图。方案一的 3 个时变如图 5 所示。



(a) 流量时变图
(a) Flow time-varying flow graph



(b) 速度时变图
(b) Speed time-varying graph



(c) 密度时变图
(c) Density time-varying graph

图 5 方案一时变图

Fig. 5 Time-varying diagram of scheme 1

对图5中的3个时变图分析可以发现,流量在0~200 s内稳定增加,200 s之后流量开始逐渐下降;速度在0~200 s整体呈下降趋势,在225 s时陡降至18.83 km/h,在225 s之后呈上升趋势;密度在0~200 s内显著增加,在195 s时陡增至353 辆/km,在200 s之后整体呈下降趋势。在获取到方案一的流量、速度以及密度时变图之后,通过SSAM软件绘制得出在方案一情况下的秦洪立交路段冲突分布图,如图6所示。

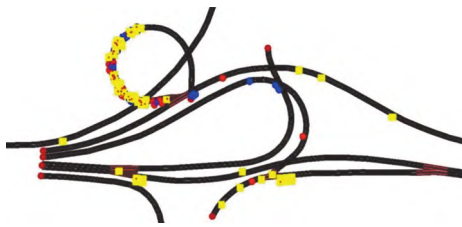


图6 方案一秦洪立交路段冲突分布图
Fig. 6 Conflict distribution map of scheme 1

对该路段冲突分布图和时空图分析可以看出,在原现状的交通流运行情况下,即匝道处为双车道,2个汇入口,主车道处为双车道,与其他路段的车辆冲突相比,匝道处路段的车辆冲突分布较为密集。在7 200 s时,路段开始产生拥堵,1车道拥堵速度约为2 km/h,2车道的拥堵速度约为4 km/h,3车道拥堵速度约为6 km/h,4车道的拥堵速度约为12 km/h。路段由最内侧车道向右侧最外侧车道速度逐渐降低,即匝道与主线合流时,对最外侧车道的车流影响最大,最内侧的车道车流影响最小。

2.3 匝道单汇入口的方案二分析

试验方案二通过限制匝道汇入车道数目试验交通流主动控制,通过试验限制匝道在交汇过程中为单车道,即单个汇入口,主车道为双车道且允许车辆变道。在匝道和主车道的车辆通行次序方面上,假设主车道的车辆拥有道路的优先通行权。图7为方案二秦洪立交路段示意图。

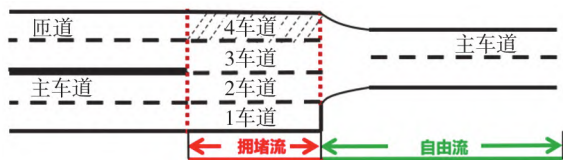
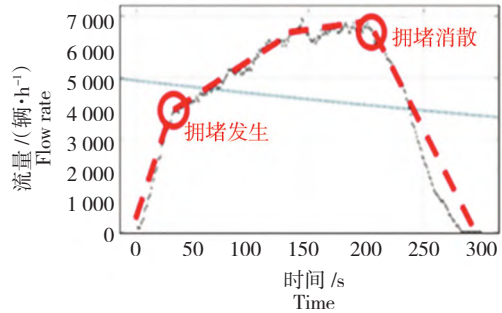
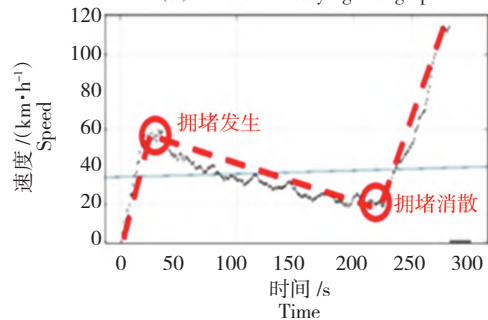


图7 方案二秦洪立交路段示意图
Fig. 7 Schematic diagram of scheme 2 Qin hong interchange section

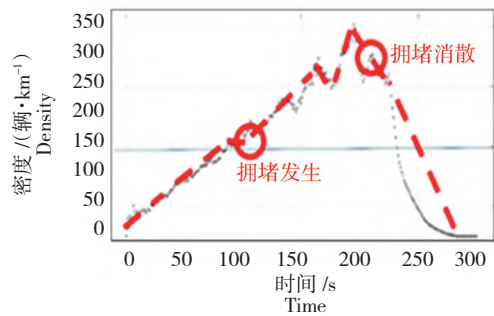
对方案二的秦洪立交进行详细的分析,基于微观仿真以及SSAM分析的结果,分别得到方案二的流量、速度和密度的时变图。方案二的3个时变如图8所示。



(a) 流量时变图
(a) Flow time-varying flow graph



(b) 速度时变图
(b) Speed time-varying graph



(c) 密度时变图
(c) Density time-varying graph

图8 方案二时变图

Fig. 8 Time-varying diagram of scheme 2

对上述3个时变图分析可以发现,流量在0~200 s内稳定增加,200 s之后流量开始逐渐下降;速度在0~50 s上升很快,在33 s时速度达到58.5 km/h,随后在33 s之后整体呈下降趋势,在225 s时陡降至14.33 km/h;密度在0~200 s内整体呈上升趋势,在225 s时为356 辆/km,之后密度就呈下降趋势。在获取到方案二的流量、速度以及密度时变图之后,通过SSAM软件绘制并得出在方案二情况下的秦洪立交路段冲突分布图,如图9所示。

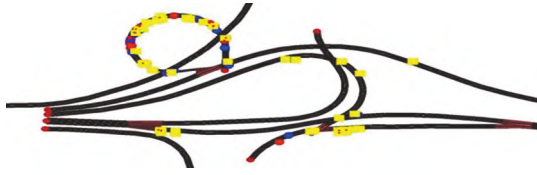


图 9 方案二秦洪立交路段冲突分布图

Fig. 9 Conflict distribution map of scheme 2
Qinzhong interchange section

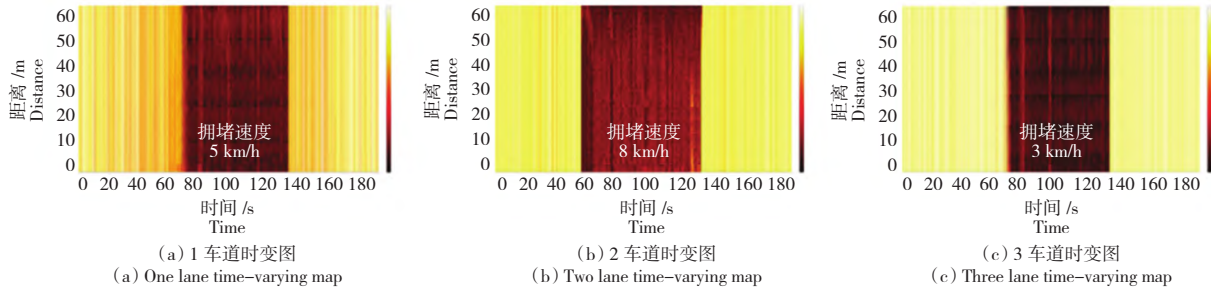


图 10 二车道时空图

Fig. 10 Time-space diagram of scheme 2

堵在 6 800 s 时开始产生,在 12 500 s 时开始消散,1 车道的拥堵速度约为 5 km/h,2 车道的拥堵速度约为 8 km/h,3 车道的拥堵速度约为 3 km/h。

2.4 主线单车道的方案三分析

方案三通过限制主线交汇区域车道数目实现的交通流主动控制。此时的匝道处为双车道,即双汇入口,主车道通过控制形成单车道。在匝道和主车道的车辆通行次序方面,假设主车道的车辆拥有道路的优先通行权。图 11 为方案三秦洪立交路段示意图。

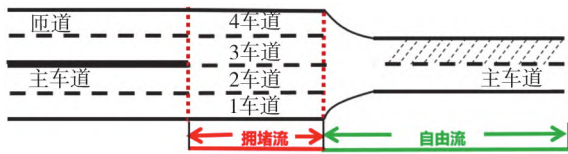


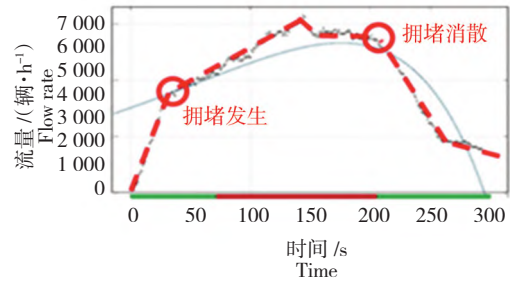
图 11 方案三秦洪立交路段示意图

Fig. 11 Schematic diagram of scheme 3 Qinzhong interchange section

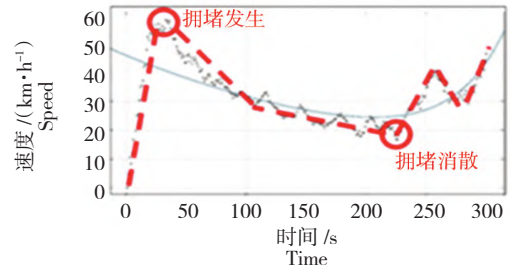
对方案三的秦洪立交进行更加详细的分析,基于微观仿真以及 SSAM 分析的结果,分别得到方案三流量、速度和密度的时变图。方案三的 3 个时变如图 12 所示。

对上述 3 个时变图分析可以发现,流量在 0~200 s 内稳定增加,200 s 之后流量开始逐渐下降;速度在 0~200 s 整体呈下降趋势,在 226 s 时陡降至 16.74 km/h,在 226 s 之后整体呈上升趋势;密度在 0~200 s 内显著增加,在 225 s 时密度为 256 辆/km,

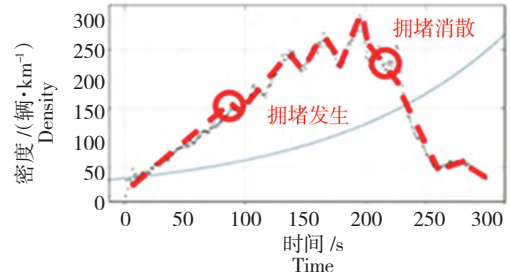
对该路段冲突分布图分析可以看出,在方案二的交通流运行情况下,与其他路段的车辆冲突相比,匝道处路段的车辆冲突分布较为密集。方案二匝道处为单个汇入口,主车道为双车道且允许车辆变道,且主车道车辆拥有道路的优先通行权。从时空图 10 可以看出,匝道拥堵程度严重,造成了排队向上游蔓延,平均车辆延误有所上升。其中,匝道拥



(a) 流量时变图
(a) Flow time-varying flow graph



(b) 速度时变图
(b) Speed time-varying graph



(c) 密度时变图
(c) Density time-varying graph

图 12 方案三时变图

Fig. 12 Time-varying diagram of scheme 3

在 225 s 之后呈下降趋势。在获取到方案三的流程、速度以及密度时变图之后,通过 SSAM 软件绘制得出在方案三情况下的秦洪立交路段冲突分布图,如图 13 所示。

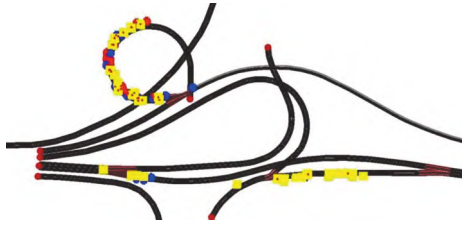


图 13 方案三秦洪立交路段冲突分布图
Fig. 13 Conflict distribution map of scheme 3
Qin hong interchange section

对该路段冲突分布图分析可以看出,在方案三的交通流运行情况下,与其他路段的车辆冲突相比,

匝道处路段的车辆冲突分布依旧较为密集。方案三匝道为双汇入口,由于该合流区长度较短,拥堵传播较快,各区间拥堵均在约 3 700 s 产生,在约 14 500 s 时开始消散。依据车流波在合流区的冲突分析,匝道车辆汇入最容易影响主线外侧车道,因此 1 车道速度相对较低。4 车道时空图颜色较浅,拥堵发生时速度约为 70 km/h,在高峰时段速度受影响较小,因此很少拥堵,匝道交通效率实现有效提升,如图 14 所示。

仿真并分析秦洪立交的 3 种设计方案,基于交叉口冲突、换道冲突以及追尾冲突,选取 300 s 的仿真时间,主要选用碰撞时间 (Time To Collision, TTC)、后侵入时间 (Post Encroachment Time, PET) 和平均车辆延误 (Average vehicle delay) 等指标进行交通安全风险评价,得到设计方案总评价表。表 1 为 3 个方案在 SSAM 各个评价指标下的运行结果。

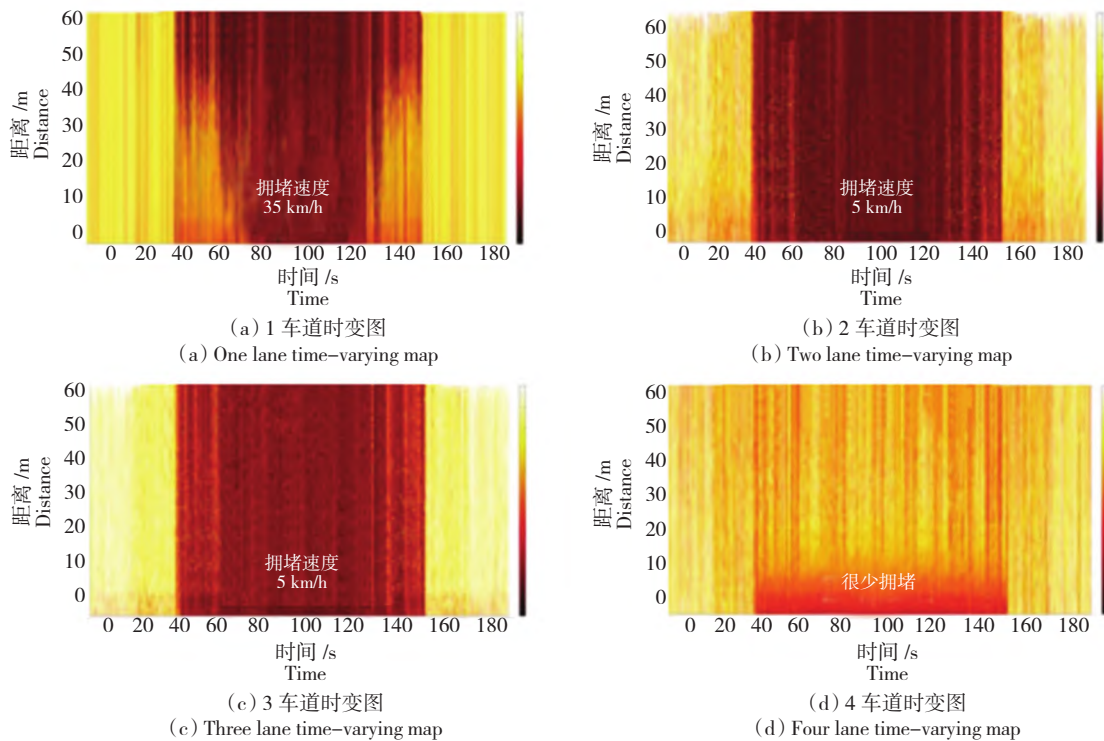


图 14 方案三车道时空图

Fig. 14 Time-space diagram of scheme 3

为验证优化控制模型对匝道交通安全和通行能力的提升效果,对 3 种设计方案的交通冲突数据进行提取采集。由表 1 可知,方案一为原现状的交通流运行情况;方案二为限制匝道的交通流运行情况,即将匝道的 2 个汇入口限制为一个汇入口;方案三为限制主线车道的交通流运行情况,即将两车道限制为单车道。相对于方案一,方案二的交通冲突

数降低了 52.5%,交通冲突时间增长 5.9%,平均车辆延误增长 20.5%。同样,相对于方案一,方案三的交通冲突降低 68.1%,交通冲突时间增长 17.6%,平均车辆延误降低 12.0%。由此可见,方案二、三冲突数均有明显减少,优化控制模型对匝道交通安全有明显的改善效果。方案三通过设计限制主线车道的交通流运行情况,有效减少匝道交叉口处的车

表 1 交通安全风险评价总表
Tab. 1 Traffic safety risk assessment table

方案 Scheme	交通冲突数 Number of traffic conflicts	追尾冲突数 Number of rear end conflicts	变道冲突数 Number of lane change conflicts	交叉冲突数 Number of cross conflicts	TTC/s Time to collision	平均车辆延误/s Average vehicle delay	排队长度/m Queue length
方案一 Scheme 1	257	96	83	78	0.17	25.09	70
方案二 Scheme 2	122	57	34	31	0.18	30.23	75
方案三 Scheme 3	82	55	17	10	0.20	22.07	67

辆冲突和交通拥堵,降低车辆停车等待时间,进而提高道路通行效率。交通冲突得到较好缓解,车辆延误和排队长度有所降低,有效提升了匝道交叉口处通行效率和交通安全,实现入口匝道控制优化。

3 结论

本研究根据车流波动理论对入口匝道车流运行时空特性进行了分析,通过当前城市快速路的交通现状,研究了交织区在交通流量增加时的交通行为与车辆轨迹,构建了优化的车流波动模型。同时,针对现有问题提出了系统性的匝道组织管控方案。以交叉口整体车流延误最小为目标,建立了城市快速路入口匝道交叉口交通控制优化模型,分析了不同匝道控制方案条件下的交通冲突指标。在此基础上,研究以秦洪立交为例进行仿真试验,分析了基于单种管控策略与主线+匝道混合管控策略下的实际交通运行状况。根据试验结果表明,通过混合管控策略可以使匝道通行能力和交通安全得到明显改善,实现匝道控制优化,进而验证基于车流波动理论的优化模型控制效果的有效性。

【参 考 文 献】

- [1] 刘兰,孙剑,李克平. 城市快速路入口匝道速度控制研究[J]. 交通信息与安全,2011,29(3):15-19.
LIU L, SUN J, LI K P. On-ramp speed control of urban expressway[J]. Traffic Information and Safety, 2011, 29(3):15-19.
- [2] 钟连德,荣健,周荣贵,等. 城市快速路与高速公路交通流特性的对比分析[J]. 公路交通科技,2005,22(1):48-51.
ZHONG L, RONG J, ZHOU R G, et al. Contrasting analysis of traffic stream characteristics between urban and intercity expressways[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(1):48-51.
- [3] BEN-AKIVA M, CUNEO D, HASAN M, et al. Evaluation of freeway control using a microscopic simulation laboratory[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2003, 11(1):29-50.
- [4] JIE L, VAN ZUYLEN H, CHEN Y, et al. Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 31:172-184.
- [5] 郑进炫. 基于多层统计模型的城市快速路分流区通行能力影响因素分析[J]. 交通与运输,2018,24(7):72-77.
ZHENG J X. Research on influencing factors of traffic capacity in diverging area at urban expressway based on multilevel model[J]. Traffic and Transportation, 2018, 24(7):72-77.
- [6] PEL A J, BLIEMER M C J, HOOGENDOORN S P. A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations[J]. Transportation, 2012, 39(1):97-123.
- [7] HOSSAIN M. Capacity estimation of traffic circles under mixed traffic conditions using micro-simulation technique [J]. Transportation Research Part A: Police and Practice, 1999, 33(1):47-61.
- [8] HOSSAIN M. Estimation of saturation flow at signalised intersections of developing cities: A micro-simulation modelling approach[J]. Transportation Research Part A: Police and Practice, 2001, 35(2):123-141.
- [9] ELEFTERIADOU L, KONDYLI A, BRILON W, et al. Ramp metering enhancements for postponing freeway-flow breakdown [J]. Transportation Research Board Annual Meeting, 2011:348-357.
- [10] LERTWORAWANICH P, ELEFTERIADOU L. A methodology for estimating capacity at ramp weaves based on gap acceptance and linear optimization [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(5):459-483.

- [11] VIEIRA DA ROCHA T, CAN A, PARZANI C, et al. Are vehicle trajectories simulated by dynamic traffic models relevant for estimating fuel consumption[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013, 24:17–26.
- [12] NGODUY D, HOOGENDOORN S P, HENK J V. Modeling and simulation of multilane and multiclass traffic flow at on and off ramps[A]. *The 5th Triennial Symposium on Transportation Analysis*[C]. Berlin, 2004:1–9.
- [14] AWAD W H. Neural networks model to estimate traffic capacity for weaving segments [C]// *Proceeding of the Fourth International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*, IEEE, 14 October 2003, College Park, MD, USA, 2003:1236144.
- [15] 钱国敏, 凡俊生, 何春光, 等. 智能网联混行环境下交叉口时空资源配置优化[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(6):1019–1026.
- QIAN G M, FAN J S, HE C G, et al. Optimization of spatial-temporal resources at intersections under environment of mixed traffic flow with connected and autonomous vehicles and human-driven vehicles[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(6):1019–1026.
- [16] 汪宏晨, 张霞, 唐炉亮, 等. 时段交通限行的时空动态建模与路径优化方法[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(5):89–96.
- WANG H C, ZHANG X, TANG L L, et al. Time and space dynamic modeling and route optimization method of time-dependent traffic restriction[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(5):89–96.
- [17] 张经纬. 面向高速公路施工区的出入口匝道交通流管控研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- ZHANG J W. Research on traffic flow control of on-ramp ramp metering expressway construction area[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.

(上接第 190 页)

- [12] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- LIAO G Y, HUANG X M. Application of ABAQUS finite element software in road engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [13] 涂义鹏. 考虑温度场的沥青路面车辙变化特征分析研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- TU Y P. The analysis of rutting variation of asphalt pavement considered temperature field[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [14] 马翔, 倪富健, 陈荣生. 沥青混合料动态模量试验及模型预估[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(3):35–39, 52.
- MA X, NI F J, CHEN R S. Dynamic modulus test of asphalt mixture and prediction model[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(3):35–39, 52.
- [15] 白琦峰. 沥青路面力学经验法车辙预估研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
- BAI Q F. Study on rutting prediction of asphalt pavement mechanics by empirical method[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [16] 白琦峰, 钱振东, 李浩天, 等. 基于统计回归法的沥青路面温度场模型[J]. *公路交通科技*, 2011, 28(11):27–31.
- BAI Q F, QIAN Z D, LI H T, et al. Asphalt pavement temperature field model based on statistic regression method[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(11):27–31.
- [17] 张争奇, 罗要飞, 雷宗建. 箱梁结构参数对铺装结构受力的影响分析[J]. *公路*, 2013, 58(8):149–155.
- ZHANG ZQ, LUO Y F, LEI Z J. Influence of box girder structural parameters on mechanistic performance of pavement structure[J]. *Highway*, 2013, 58(8):149–155.
- [18] 鲁正兰, 孙立军. 沥青路面车辙预估方法的研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(11):1476–1480.
- LU Z L, SUN L J. Research on rutting prediction of asphalt pavement[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35(11):1476–1480.
- [19] LIU G, CHEN L L, QIAN Z D, et al. Rutting influencing factors and prediction model for asphalt pavements based on the factor analysis method[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2021, 37(4):421–428.