

面向安全改善的收费站收费通道布设方案研究

欧阳任得

(湖南高速信息科技有限公司, 湖南 长沙 410026)

摘要: 基于高速公路收费站分流区安全改善需求,通过航拍获取真实车辆轨迹数据,从中提取车辆微观运动特征,标定车辆微观运动模型及收费通道配置等参数,构建收费站 VISSIM 仿真模型;结合 SSAM 软件,通过单因素变化仿真和正交试验,分析 ETC(电子不停车收费)通道数量、ETC 通道位置、ETC 通道限速与 ETC 车辆比例对收费站交通安全的影响,研究面向安全改善的收费站收费通道布设方案。

关键词: 公路交通;收费站;收费通道;ETC(电子不停车收费)通道;交通安全

中图分类号: U491.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0034-06

出于可重复性、成本、安全等考虑,对收费站通道布设方案无法进行实地测试,主要通过交通微观仿真分析方案运行结果得出最佳布设方案。目前收费站仿真分析软件有 TPSIM、VISSIM、Paramics 等。Al-Deek H. M. 采用 TPSIM 微观仿真模型研究了 ETC(电子不停车收费)收费通道的引入对收费站整体交通延误的影响^[1]。Jehad A. E. 等结合 VISSIM 和 SSAM 软件进行仿真,评估不同收费通道配置对收费站交通安全的影响^[2],但其仿真模型未使用真实轨迹数据标定,不能完全反映真实交通运行情况。赵述捷利用 Paramics 研究了 ETC 收费通道的通行能力及收费通道的开放情况对收费站通行能力的影响^[3]。

也有学者对收费站安全影响因素进行了分析,如吴晓武认为收费广场渐变率、服务水平和收费广场入口段纵断面坡度等收费站几何参数是影响高速公路收费站交通安全的重要因素^[4];张志召通过探究高速公路收费站和立体交叉口分流区的交通冲突种类,依据采用碰撞时间 T_{TTC} 与后侵入时间 T_{PET} 计算模型得到的冲突数量,构建了以交通量、交通组成、运行速度为核心因素的交通冲突预测模型^[5];张莹、孙博认为收费通道配置方案的变化会通过影响 ETC 用户换道决策间接影响车辆行驶安全^[6-7]。

针对收费站收费通道配置方案,Zarrillo M. L. 等基于不同收费类型和车辆类型构建 SHAKER 模型,得到了收费站最佳收费通道配置方案^[8-9];Levinson D. 等研究了 ETC 收费通道数量和通行费折扣的最佳组合^[10];Zhang X. Y. 等建立了以最小

化系统熵为目的的收费站收费通道数量优化模型^[11];Hajiseyedjavadi F. 等认为最安全的收费通道配置是仅由 ETC 收费通道组成的配置^[12]。目前对收费站的研究缺乏真实交通流数据的采集与分析,导致仿真结果失真,无法反映真实车辆安全状态,也缺乏对安全改善的关注,多从宏观角度出发,缺乏对微观车辆相互作用的分析。本文基于主线收费站的现状进行仿真模型搭建及校验,研究面向安全改善的收费站收费通道布设方案。

1 数据处理

采用无人机在南京某高速公路收费站东进口分流区垂直上空拍摄大范围的俯拍角度视频,利用视频轨迹识别软件获得 1 104 辆车的完整轨迹数据,从中提取真实微观运动特征。在视频识别中,取分流区 1 道 ETC 起始点为坐标原点,建立直角坐标系,并标定 6 个关键节点的坐标(大地坐标),绘制收费站分流区等比例示意图(见图 1)。

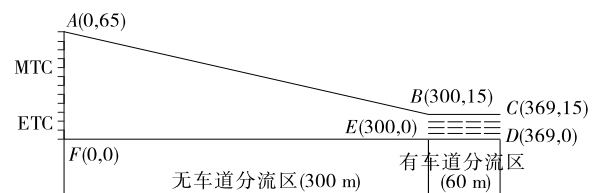


图 1 收费站等比例示意图

基于轨迹数据,提取如下参数:车辆 i 在时间 t 的形心坐标 $O_{t,i}$;车辆 i 在时间 t 的速度 $v_{t,i}$;车辆 i 在分流区的总行驶时间 T_i ;车辆 i 通过指定断面时

的车头时距 S_i ;车辆 i 在时间 t 的速度方向与 x 轴正方向之间的夹角 $\theta_{i,i}$;车辆 i 在时间 t 的拓展碰撞时间 $T_{\text{ETTC},t,i}$;车辆类型 $V_{\text{type},i}$,包含小汽车、货车和大客车;车辆的初始通道 $V_{\text{initial},1}$;车辆的收费通道 $V_{\text{target},i}$,由内侧向外侧依次编号为1~12;时间 t 时车辆 i 与前车 j 之间的距离 $D_{ij,t}$ 。

1.1 特征检验

为评估数据的准确性,对车辆行程时间进行正

态性检验,包括Kolmogorov-Smirnov检验(K-S检验)和Shapiro-Wilk检验(S-W检验)。由于MTC(人工半自动收费)车辆样本数量过多,结合P-P图示法对MTC车辆的行程时间进行正态分布检验。检验结果见表1、图2、图3,均服从正态分布。

运用Tukey's Hinges算法(T-H算法)检验车辆速度数据的正常范围,检验结果见表2。在此基础上,进一步进行K-S检验,检验结果表明车辆在分

表1 车辆行程时间的K-S检验和S-W检验结果

车辆类型	正态参数		最极端差值/s			检验统计	渐进显著性(双尾)
	均值/s	标准差/s	绝对	正	负		
全部车辆	18.420	3.06	0.02	0.02	-0.02	0.02	0.12
ETC车辆	18.011	2.84	0.04	0.04	-0.02	0.04	0.08
MTC车辆	18.710	3.19	0.04	0.04	-0.03	0.04	0.02

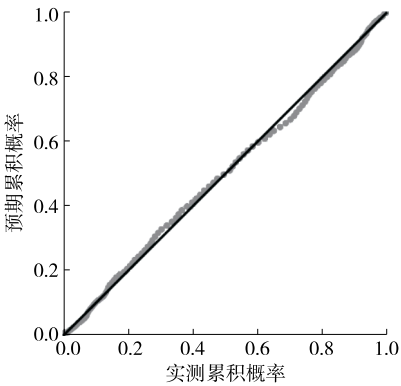


图2 MTC车辆行程时间的正态P-P图

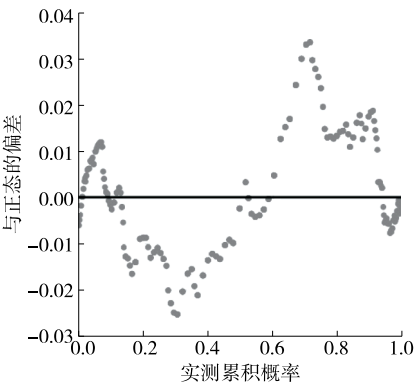


图3 MTC车辆行程时间的去趋势正态P-P图

流区的初始和最终速度服从正态分布(见表3)。
对车头时距分布进行指数分布拟合检验,采用MATLAB进行负指数分布拟合,得相关系数为0.990 8,均方根误差为0.018 7。拟合度较高,认为车头时距服从负指数分布,车辆到达服从泊松分布。

表2 车辆速度的T-H算法检验结果

单位:km/h			
速度分类	车辆类型	正常数据最大值	正常数据最小值
初始速度	全部车辆	99.62	53.70
	MTC车辆	101.05	52.12
最终速度	ETC车辆	111.80	47.97
	全部车辆	95.86	30.59
最终速度	MTC车辆	93.47	22.65
	ETC车辆	93.78	25.51

表3 分流区车辆行驶速度的K-S检验结果

单位:km/h					
速度分类	车辆类型	最小值	最大值	均值	标准差
初始速度	全部车辆	54.08	99.41	72.79	10.27
	MTC车辆	54.08	99.66	71.92	10.15
最终速度	ETC车辆	48.36	110.87	74.27	12.06
	全部车辆	0.00	92.58	50.31	12.36
最终速度	MTC车辆	0.00	90.51	47.77	16.45
	ETC车辆	25.60	92.58	53.94	13.90

因此,采用泊松分布对该收费站的车辆到达进行描述。

1.2 基于交通冲突替代指标的行车安全分析

相较于交通事故,交通冲突往往难以直接观察和测量,故引入交通安全替代指标进行量化判别。考虑到收费站分流区交通冲突存在多角度的特征,采用拓展碰撞时间 T_{ETTC} 对行车事故风险进行估

计^[13],计算公式如下:

$$T_{ETTC_i}(t) = \frac{\sqrt{(O_i - O_j)^T(O_i - O_j)} - 0.5L_1 - 0.5L_i}{1/\sqrt{(O_i - O_j)^T(O_i - O_j)}(O_i - O_j)^T(v_i - v_j)}$$

式中: O_i 、 O_j 分别为车辆 i 、 j 的中心点(形心); L_1 为前车的长度; L_i 为后车的长度; v_i 、 v_j 分别为车辆 i 、 j 的速度。

基于车辆轨迹数据,计算得到所有车辆在收费站分流区的 T_{ETTC} 分布。根据统计分析结果,大多数车辆的 T_{ETTC} 为 2~5 s。选取 3 s 作为危险场景判别阈值,共有 66.58% 的冲突为高危冲突,车辆在收费站分流区的行车风险较大。

进一步对 ETC 与 MTC 车辆的交通冲突情况进行 T 检验,结果见表 4。显著性小于 0.05,ETC 和 MTC 车辆之间存在较大的行车风险差异。

表 4 车辆 T_{ETTC} 值 T 检验结果

车辆类型	车辆数量/辆	T_{ETTC}/s				显著性
		最小值	最大值	均值	标准差	
MTC 车辆	13 666	0.00	3.00	1.64	0.83	
ETC 车辆	11 645	0.00	3.00	1.51	0.85	0.01
全部车辆	25 311	0.00	3.00	1.58	0.85	

2 仿真模型搭建

2.1 模型建立

图 4 为南京某收费站 VISSIM 仿真系统框架,主要包含输入模块、仿真模块与输出模块。

以收费站实际几何设计为参考设置几何参数:4 条主线车道,每条宽度为 3.75 m,定义主线车道一般行为为自由车道选择;收费通道共 12 条,驾驶行为定义为某类收费通道仅允许通行对应类型车辆,禁止收费通道间的换道行为,其中 ETC 收费通道 3 条,MTC 收费通道 9 条,从内到外依次分布,通道宽度均为 3.5 m,中央分隔带宽度 1.8 m;分流区总长为 360 m,其中无车道划线分流区(减速渐变段)300 m,有划线分流区 60 m;收费岛宽度约 70 m。按照以上数据在 VISSIM 中绘制收费站道路模型。

根据实测收费站车流数据,同等比例放缩得到 1 h 交通量,并定义各车辆类型的物理参数(包含车宽与车长)、期望速度分布和加减速速度(见表 5)。

ETC 与 MTC 车流量比例是收费站微观交通流仿真建模的重要参数。为此,以真实车辆比例进

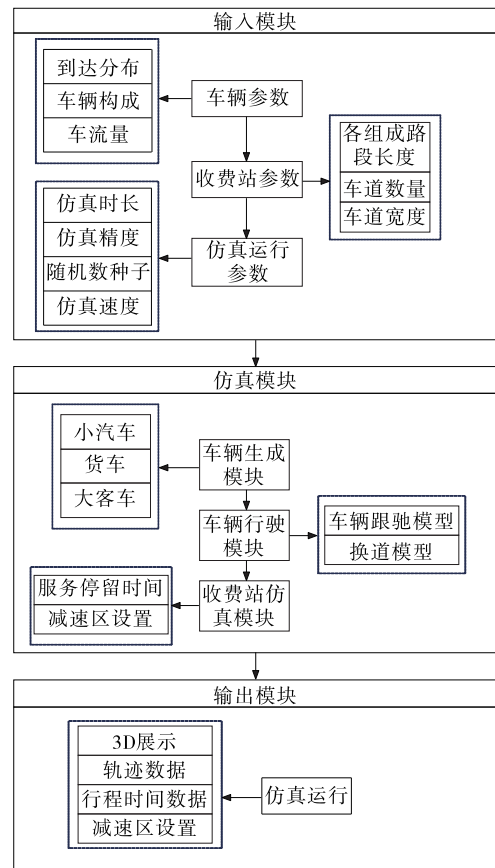


图 4 VISSIM 仿真系统框架

表 5 车辆物理参数及动力参数标定

车辆类型	物理参数		期望加速度/期望减速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	
	长/m	宽/m	($m \cdot s^{-2}$)	($m \cdot s^{-2}$)
小汽车	4.11~4.76	1.50	(3.50,250.00)	(-2.8,0.0)
大客车	11.54	2.50	(2.50,250.00)	(-1.3,0.0)
货车	10.21	2.50	(1.50,250.00)	(-0.9,0.0)

行参数标定,同时根据实际车辆收费流程,将 MTC 通道收费处的速度设置为零,缴纳通行费停留时间设置为 10~20 s 且服从泊松分布;根据车辆类别和实际情况将 ETC 车辆通过收费通道的速度设置为 10~20 km/h 且服从泊松分布。停车缴费通过创建停车标志(Stop Sign)实现,ETC 减速不停车收费通过创建减速区实现。

按上述方法建立的仿真模型见图 5。设置仿真

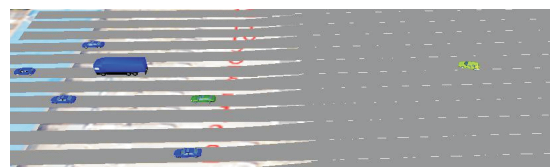


图 5 南京某收费站仿真模型 3D 图

时间为 3 600 s,仿真时间步长为 5 s,随机数种子为 42,选择最大仿真速度和评价指标,完成仿真。

程时间、交通量、车辆换道情况进行仿真模型校验,校验结果见表 6。各项误差均在 7%以内,仿真模型基本与真实情况相符。

2.2 仿真模型校验与安全评价

根据实测数据选取断面车辆平均速度、车辆行使用SSAM对收费站模型进行安全评价,交通

表 6 仿真模型校验结果

车辆类型	交通量			分流区最终速度			换道次数			行程时间		
	实测值/ (辆·h ⁻¹)	仿真值/ (辆·h ⁻¹)	误差/ %	实测值/ (km·h ⁻¹)	仿真值/ (km·h ⁻¹)	误差/ %	实测 值/次	仿真 值/次	误差/ %	实测 值/s	仿真 值/s	误差/ %
ETC 车辆	382	395	3.40	—	—	—	—	—	—	18.0	18.9	5.00
MTC 车辆	518	490	5.41	—	—	—	—	—	—	18.1	19.3	6.63
全部车辆	900	885	1.67	50.31	47.3	5.93	2 569	2 648	3.08	18.4	19.2	4.35

冲突替代指标包括 T_{TTC} 、 T_{PET} 、最大速度 v_{max} 、速度差 v_{delta} 。将 T_{TTC} 、 T_{PET} 的阈值设为 4 s,4 s 内交通冲突指标计算结果见表 7,其中 v_{delta} 均在 15 km/h 以内,说明在冲突发生时两车的速度差较小,紧急制动情况较少,安全水平较高。

表 7 SSAM 交通冲突替代指标计算结果

指标	最小值	最大值	平均值	方差
T_{TTC}	1.40 s	4.00 s	2.62 s	0.84
T_{PET}	1.00 s	3.80 s	2.38 s	0.40
v_{max}	1.38 km/h	14.74 km/h	7.93 km/h	12.86
v_{delta}	0.65 km/h	14.74 km/h	7.43 km/h	12.31

3 面向安全改善的收费通道配置优化

3.1 单一因素变化仿真

在控制其他因素不变的情况下,分别改变 ETC 收费通道数量、ETC 收费通道位置、ETC 收费通道限速与 ETC 车辆比例,分析各因素变化对收费站交通安全的影响程度,寻求安全性最高的收费站收费通道布局。仿真方案相关参数见表 8。

(1) ETC 收费通道数量影响分析。设置 ETC 车辆比例为 55%、ETC 收费通道限速为 15 km/h,改变 ETC 收费通道数量进行仿真。ETC 收费通道数量起始值为 6 条,最大值为 9 条,变化步长为 1 条,由收费站内侧向外侧依次增加。仿真结果表明,随着 ETC 收费通道数量的增加,交通冲突数增加,两者呈正相关关系。

(2) ETC 收费通道位置影响分析。设置 ETC 收费通道数量为 7 条、ETC 车辆比例为 55%、ETC

表 8 单因素变化仿真分析的相关参数

指标	取值	控制指标	参数值
ETC 收费通道数量	6 条	ETC 收费通道位置	内置
	7 条	ETC 收费通道限速	15 km/h
	8 条	ETC 车辆比例	55%
ETC 收费通道位置	内置	ETC 收费通道数量	7 条
	外置	ETC 收费通道限速	15 km/h
	中置	ETC 车辆比例	55%
ETC 收费通道限速	15 km/h	ETC 收费通道数量	7 条
	25 km/h	ETC 收费通道位置	内置
	35 km/h	ETC 车辆比例	55%
ETC 车辆比例	30%	ETC 收费通道数量	7 条
	40%	ETC 收费通道位置	内置
	50%	ETC 通道限速	15 km/h

收费通道限速为 15 km/h,分别对 ETC 收费通道位于收费站出口内侧、外侧、中央进行仿真。仿真结果表明,将 ETC 收费通道设置于收费站中央时交通冲突数最高,安全性最差;将 ETC 收费通道设置在收费站内侧时冲突数最少,安全性最高。

(3) ETC 收费通道限速影响分析。控制其他因素不变(ETC 收费通道数量为 7 条,ETC 收费通道内置,ETC 车辆比例为 55%),改变 ETC 收费通道限速进行仿真。控制 ETC 收费通道限速为 15~45 km/h,步长为 10 km/h。仿真结果表明,ETC 收费通道限速发生变化,交通冲突数变化不显著,ETC 收费通道限速对收费站安全的影响较小。

(4) ETC 车辆比例影响分析。控制其他因素不变(ETC 收费通道数量为 7 条,ETC 收费通道内

置,限速为 15 km/h),改变 ETC 车辆比例进行仿真。控制 ETC 车辆比例为 50%~80%,步长为 10%。仿真结果表明,随着 ETC 车辆比例的上升,交通冲突数呈现下降趋势,两者呈负相关关系。

3.2 正交试验

根据上述单一因素变化仿真结果,ETC 收费通道限速对主线收费站安全的影响不明显。因此,正交试验因素选为 ETC 收费通道数量、ETC 车辆比例、ETC 收费通道位置,试验指标为交通冲突数。ETC 收费通道数量设为 4 个水平,分别为 6 条、7 条、8 条、9 条;ETC 车辆比例设为 4 个水平,分别为 50%、60%、70%、80%;ETC 收费通道位置设为 3 个水平,分别为内置、外置、中置。

对正交试验结果进行方差分析,结果(见表 9)表明,ETC 车辆比例和 ETC 收费通道位置对主线收费站安全有显著影响,其中 ETC 车辆比例的影响最大。

表 9 正交试验结果的方差分析

影响因素	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
ETC 通道数量	25 485.09	3	8 495.03	2.57	0.09
ETC 车辆比例	64 995.70	3	21 665.23	6.56	0.01
ETC 通道位置	25 311.26	2	12 655.53	3.83	0.04
误差	49 500.15	15	3 300.01		

对正交试验结果进行 S-N-K 检验,结果(见表 10)表明,最优的组合方案为 ETC 收费通道数量为 6 条、ETC 收费通道内置、ETC 车辆比例为 80%。

表 10 正交试验结果的 S-N-K 检验

影响因素	因素水平	交通冲突值	最优水平
ETC 收费通道数量	1	59.00	1
	2	87.83	
	3	90.67	
	4	137.67	
ETC 车辆比例	1	145.67	4
	2	138.17	
	3	57.17	
	4	34.17	
ETC 收费通道位置	1	58.63	1
	2	86.75	
	3	136.00	

对正交试验结果进行极差分析,结果(见表 11)表明,3 个因素的主次顺序即重要性大小为 ETC 车辆比例>ETC 收费通道位置>ETC 收费通道数量。结合各因素的最佳水平,得出最优方案为 ETC 收费通道数量为 6 条、ETC 收费通道内置、ETC 车辆比例为 80%,与 S-N-K 检验结果一致。

表 11 正交试验结果的极差分析

影响因素	因素水平	K 值	\overline{K}	最佳水平	水平数量	R	R'
ETC 收费通道 数量	1	354	59.00	1	4	78.67	86.72
	2	527	87.83				
	3	544	90.67				
	4	826	137.67				
ETC 车辆比例	1	874	145.67	4	4	111.50	122.90
	2	829	138.17				
	3	343	57.17				
	4	205	34.17				
ETC 收费通道 位置	1	469	58.63	1	3	77.37	113.79
	2	694	86.75				
	3	1 088	136.00				
主次顺序		ETC 车辆比例>ETC 收费通道位置>ETC 收费通道数量					

3.3 收费通道配置优化方案

根据仿真及正交试验结果,面向安全改善的收

费站收费通道配置优化方案为 ETC 车辆比例为 80%、ETC 收费通道数量为 6 条、ETC 收费通道内

置,同时设置指示牌引导 MTC 车流在进入分流区前处于主线车道的外侧、ETC 车流处于主线车道的内侧,减少交通流交织形成交通冲突(见图 6)。该收费站的 ETC 通道改建已基本完成,优化后 ETC 车辆占比得到显著提高且仍在增加,上述收费通道配置方案符合未来发展方向,能有效改善收费站的安全状况,降低事故发生概率。

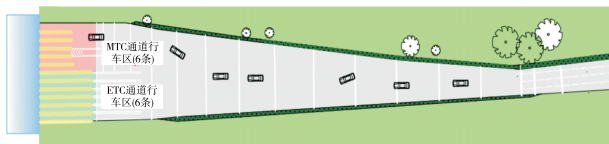


图 6 收费站通道布局示意图

4 结语

本文基于南京某收费站的实际车辆轨迹数据建立微观仿真模型,通过仿真对收费站进行安全性评价。基于仿真模型,采用正交试验方法得出不同 ETC 收费通道数量、ETC 收费通道位置、ETC 收费通道限速及 ETC 车辆比例对收费站交通冲突的影响程度,进行各因素影响严重程度排序。基于仿真模型和分析结果,提出针对 ETC 收费通道数量、ETC 收费通道位置、ETC 收费通道限速及 ETC 车辆比例的收费通道配置优化方案,以改善收费站交通安全状况,降低事故发生概率。但仍有许多因素未考虑周全,如收费广场渐变率和收费站服务水平等,未来可以考虑这些因素进行安全影响分析,建立更符合主线收费站实际情况的跟车换道模型,增强仿真模型的可靠性,更全面地评估主线收费站的交通安全。

参考文献:

- [1] AL-DEEK H M. Analyzing performance of ETC plazas using new computer software[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2001, 15(4): 309—319.
- [2] JEHAD A E, ISMAIL A, BORHAN M N, et al. Modeling and optimizing of electronic toll collection (ETC) at Malaysian toll plazas using microsimulation models[J]. International Journal of Engineering & Technology,

2018, 7(4): 2304—2308.

- [3] 赵述捷. 高速公路收费通行能力及关键设计参数研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [4] 吴晓武. 高速公路收费站交通安全研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [5] 张志召. 高速公路立交分合流区和收费站交通冲突研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [6] 张莹. 基于人一车一路系统仿真的 ETC 收费广场最小安全长度研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [7] 孙博. 基于交通冲突技术的收费站交通安全分析方法[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [8] ZARRILLO M L, RADWAN A E. Modeling the OOCEA's toll network of highways using plaza capacity analyses[C]//ITS America, ITS Australia, ERTICO(Intelligent Transport Systems and Services-Europe). 8th World Congress on Intelligent Transport Systems, 2001: 00961987—00961997.
- [9] ZARRILLO M L, RADWAN A E. Methodology SHAKER and the capacity analysis of five toll plazas[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(3): 83—93.
- [10] LEVINSON D, CHANG E. A model for optimizing electronic toll collection systems[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(4): 293—314.
- [11] ZHANG X Y, SUN C T, ZHUO J W. A system entropy model for optimizing the number of tollbooths at highway toll plazas[C]//IEEE. 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2009: 77—80.
- [12] HAJISEYEDJAVADI F, MCKINNON I, FITZPATRICK C D, et al. Application of microsimulation to model the safety of varied lane configurations at toll plazas[C]. Transportation Research Board, TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers, 2015: 01552331—01552344.
- [13] XING L, HE J, ABDEL-ATY M, et al. Examining traffic conflicts of up stream toll plaza area using vehicles' trajectory data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 125: 174—187.

收稿日期: 2023—05—20