

高速公路收费站入口车道管控仿真研究^①

张威奕^{②*} 李歌亮^{***} 齐建宇^{****} 秦刚^{****} 马浩^{****} 李海舰^{③*****}

(* 北京大学经济学院 北京 100871)

(** 招商局公路网络科技股份控股有限公司 北京 100022)

(*** 浙江温州甬台温高速公路有限公司 温州 325002)

(**** 招商新智科技有限公司 北京 100070)

(***** 北京工业大学北京市交通工程重点实验室 北京 100124)

摘要 收费站通行能力的大小直接影响到高速公路交通流的运行状况。为调控主线流量可对收费站实施收费通道控制等策略。针对收费站控制建立了高速公路收费站管控模型,利用 VISSIM 软件对甬台温高速公路温州南收费站进行了仿真。仿真过程中设置了不控制通道数量和控制通道数量两个场景,研究了针对改进收费站管控模型的仿真建模方法,对检测器位置、基础流入量、期望路段交通密度等参数进行了设置。通过仿真输出两个场景的流量、速度、旅行时间、延误等指标。仿真结果表明,在拥堵交通流状态下,通过实施收费通道控制,通过收费站的车辆的匝道延误有所增加,但是车辆主线下游延误有所降低。从整体来看收费通道管控对改善收费站主线下游拥堵有一定的效果。

关键词 收费站;高速公路;管控模型;VISSIM 仿真;效果

0 引言

高速公路收费站的管控对于整个高速公路的运行来说十分重要。车辆在进入收费站前需要选择收费通道且需要停车缴费,这就导致收费站区域容易发生拥堵,因此,需要对其进行一定的管控。常见的管控措施有入口流量控制、主线速度控制、收费通道控制等。国内外学者对高速公路收费站管控也进行了很多研究。Kuang 等人^[1]建立了微观仿真模型和收费站的结构,分析了车辆产生模型,基于最小安全距离的车辆跟随模型以及车辆行驶轨迹选择模型。Dheeraj 等人^[2]运用排队论来分析高速公路收费广场的交通拥堵现状,并提出可能的解决方案以提高通行效率。Herna 和 Dewanti^[3]确定收费站与现有

收费站之间的连接道路的足够长度,以减少收费公路业务实体的投资并确保更长的特许权回收期。宋安宁和乔建刚^[4]构建了高速公路收费站排队系统模型,建立了车流控制系统,为解决道路拥堵提出了新的研究思路。苏靖^[5]运用管理学以及精细化标准化相关理论全面研究了 X 收费站的精细化管理。田佳敏等人^[6]研究了收费站外车道合流方式,并基于排队模型和合流模型进行了优化和改进。

为验证车道管控措施是否有效需要对其进行仿真模拟。VISSIM 是在交通仿真中常用的仿真软件,国内外对其应用十分广泛。Yang 和 Li^[7]简要介绍了 VISSIM 模型,选取西安市未央区渭滨路与凤城一路交叉口、渭滨路与凤城二路交叉口的交通状况作为研究对象进行了模拟。Lv 等人^[8]建立了基于 VISSIM 仿真的开放社区交通评价模型。Zhu 等

① 北京市自然科学基金(9202001)资助项目。

② 男,1982年生,博士,高级工程师;研究方向:应用经济学及智能交通系统;E-mail: zhangweiya@cmhk.com

③ 联系人,E-mail: lihaijian@bjut.edu.cn

(收稿日期:2020-09-21)

人^[9]采用 VISSIM 交通仿真软件研究城市快速路出口匝道控制问题。王君^[10]基于 VISSIM 建立了高速公路基本路段仿真模型。赵秀云和王健^[11]采用 VISSIM 对高架桥调查数据进行仿真分析并提出不同调控方案。Huang 等人^[12]和 Zheng 等人^[13]利用 VISSIM 软件建立了车辆群体换道仿真模型并进行参数设定,分析了不同管控策略下匝道区通行效率和运行效果。

目前在利用 VISSIM 软件对高速公路收费站入口车道管控仿真方面的研究还不足,基于此,本文基于现有高速公路收费站管控模型,利用 VISSIM 建立仿真环境,针对甬台温高速公路温州南收费站进行了仿真验证,从而证明进行收费站入口车道管控的有效性。

1 高速公路收费站管控模型

在建立收费站管控模型时,考虑到实际管控的可实施性、管控的周期以及管控模型的鲁棒性,本文采用基于反馈控制的高速公路收费站通道数调节方法进行收费站管控^[14]。在文献[14]的基础上,考虑到车辆进入收费站后有时会再次分流,进入高速公路主路的上下行方向,有时只进入某一方向,故引入某方向流量比 p_i 用于同时考虑不同收费站设置情况。若进入收费站的车辆只有一个行进方向,则 $p_i = 1$,若有上下行两个行进方向, p_i 为调控方向流量与上下行两个行进方向流量之和的比值,则 $0 < p_i < 1$ 。另外,高速公路主线下游某一方向的流量同时受到从收费站进入该方向的流量与高速公路主线上游流量的影响,在不考虑高速公路主线上游的流量变

化的情况下,针对某一方向优化管控的收费站通道数调节模型如下:

$$Q_{i,t} = q_{i,t-\Delta t} - \frac{1}{p_i} \times (k_{i,t} - k_{cr,i})v_{cr,i} \cdot \Delta t + M \quad (1)$$

$$M = \max[0, l_{i,t} - l_{i,control}] \quad (2)$$

其中, $Q_{i,t}$ 为收费站 i 在 t 时刻下一 Δt 执行周期内调节车流量($t = 1, 2, 3, \dots$); Δt 为方案执行周期时长; $q_{i,t-\Delta t}$ 为 $t - \Delta t$ 时刻的实际流入量; $k_{i,t}$ 为 t 时刻收费站 i 调控方向的检测路段密度; $k_{cr,i}$ 为收费站 i 调控方向对应的期望路段交通密度; $v_{cr,i}$ 为 $k_{cr,i}$ 状态下的对应速度; M 为排队超限惩罚项; $l_{i,control}$ 为设定的收费站 i 控制排队长度(辆), $l_{i,t}$ 为收费站 i 在 t 时刻的排队长度(辆)。

令 j 和 k 分别为控制开放的 ETC 和 MTC 车道数,对于收费站 i 而言, t 时刻控制开放通道数为 $N_{i,t}\{j,k\}$ 由下一控制周期内调节车流量 $Q_{i,t}$ 与混合收费站的通行能力共同确定。当 $Q_{i,t}$ 小于 Δt 周期内混合收费站总通行能力时,则按照式(1)进行调节管控;当 $Q_{i,t}$ 大于 Δt 周期内混合收费站总通行能力时,则开放混合收费站所有车道。

可采用文献[15]给出的不同总车道数下混合收费站的通行能力表来确定不同调节车流量 $Q_{i,t}$ 下的车道调节方案,并在文献[15]的基础上增加总车道数为 2 时的收费站通行能力(见表 1),这样能够改善文献[14]假设不同混合收费站单车道通行能力相同的弊端。在实际应用中,可以通过调研不同混合收费站多车道组合下的交通流数据来确定更多情形下的混合收费站不同车道数组合下的通行能力。

表 1 不同总车道数下混合收费站的通行能力

其中包含 ETC 车道数	总车道数通行能力/辆/h					
	2	3	4	5	6	7
1	867	1167	1479	1783	2065	2398
2	1558	1858	2161	2468	2796	3198
3	—	2376	2758	3087	3410	3882
4	—	—	3186	3596	3965	4412
5	—	—	—	3910	4381	4842
6	—	—	—	—	4610	5092
7	—	—	—	—	—	5213

收费站通道数调节不同于实施匝道控制,太频繁的收费站通道数调节也会影响对进入收费站驾驶员的选择,同时也不利于收费站管理人员的调控实施。在实际应用中,建议方案执行周期时长 Δt 的取值为 10 min、30 min 或 1 h。在确定 Δt 时,可考虑交通流的波动程度来确定,如在平峰-高峰交通流的转化时段, Δt 宜取小值,在夜晚时段或高峰期、平峰期交通流时段, Δt 宜取大值。此外,模型中有两大类参数值,其一为动态变化值,如 $q_{i,t-\Delta t}$ 、 $k_{i,t}$ 、 $l_{i,t}$ 、 p_i , 可通过实时交通流检测器、收费数据等检测或计算;其二为道路属性值,如 $k_{crt,i}$ 、 $v_{crt,i}$ 、 $l_{i,control}$, 这些与收费站本身及对应管控方向的路段有关,可通过检测器历

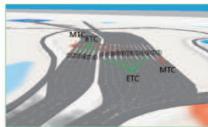
史数据和交通流理论进行标定。

2 仿真环境及参数设置

2.1 温州南收费站建模

本文基于甬台温高速公路温瑞段温州南收费站进行建模,温州南收费站 VISSIM 模型图及收费站出入口信息见表 2。车辆进入温州南收费站后,行驶约 800 m 进入分流点,分流点左侧车道可进入台州方向,分流点右侧车道可进入福州方向,本文以福州方向主线交通流优化为例。

表 2 温州南收费站建模信息表

站名	站码	模型图	入口车道数/辆	出口车道数/辆
温州南收费站	1253		ETC5	ETC10
			MTC1	MTC2

2.2 仿真场景设计

(1) 检测器设置

基于现状仿真场景,为检测收费站入口通道、匝道以及主线的流量、速度、旅行时间、延误等参数,在南白象互通上下游设置流量、速度检测器,同时设置

延误、旅行时间检测器,检测器设置位置如图 1 所示,各检测器信息如表 3 所示。通过调整进入收费站车道数量控制收费站车辆的进入。

(2) 场景 1:无收费站通道调节场景

场景 1 选取收费站附近某日某一小时作为现状

表 3 各检测器信息

检测器名称	布设位置	检测参数	功能
流量、速度检测器 1(RF1)	温州南收费站入口处	流量、速度	记录通过温州南收费站的流量、速度
流量、速度检测器 3(RF2)	福州方向的主线合流点匝道后 1000 m 处	流量、速度	记录匝道流量、速度
延误、旅行时间检测器(RT)	开始断面同 RF1 位置,结束断面为 MF2 后 1000 m	延误、旅行时间	记录匝道延误、旅行时间
流量、速度检测器(MF1)	福州方向的主线合流点主线后 1000 m 处	流量、速度	记录主线上游流量、速度
流量、速度检测器(MF2)	福州方向主线下游 1000 m 处	流量、速度	记录主线下游流量、速度
延误、旅行时间检测器(MT)	开始断面福州方向主线上游,结束断面同 RT(结束)	延误、旅行时间	记录主线延误、旅行时间

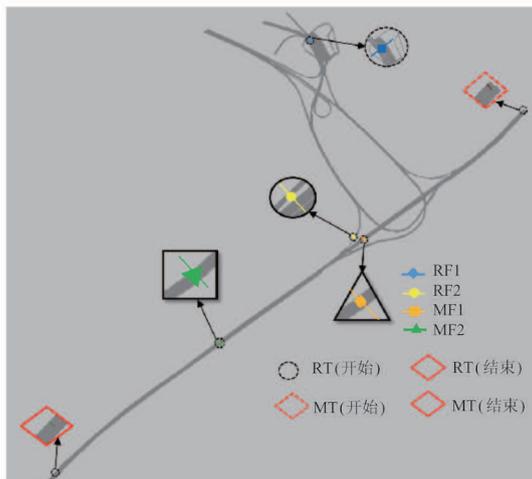


图1 甬台温高速南白象互通检测器设置位置示意图

主线流量、收费站入口流量,收费站控制各收费站入口流量输入如图2所示。温州南收费站实际情况较为复杂,通过收费站后部分车辆驶向台州方向,部分车辆驶向福州方向,还有一小部分车辆驶入另一高速公路,同时另一高速公路的车辆也有一部分通过匝道进入福州方向主线。假设进入收费站驶向另一高速公路的车辆数与通过另一高速公路进入主线的车辆数基本相同,因此,在仿真设置时不考虑从另一高速公路进入匝道的车辆。除此之外,假设上一时段收费站收费广场排队车辆数为0,温瑞段除隧道限速80 km/h外,其余路段限速100 km/h。不对收费站进行任何控制,为了实施收费站控制策略需要仿真主线拥堵情况,设置收费站入口实际流入量为1000辆/h,其中从温州南收费站进入的车辆福州方向与台州方向的比为7:3,福州方向流量为700辆/h,台

州方向流量为300辆,主线上游流入量为3400辆/h。仿真时间为1h,期望路段交通密度为55辆/km。完成场景1仿真后,输出流量、速度、延误、旅行时间等指标。

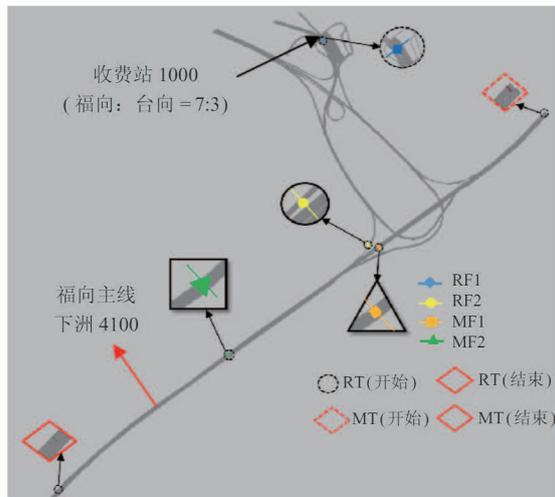


图2 流量输入情况

(3) 场景2:收费站通道调节场景

场景2基于场景1的路网结构,在同样流量输入、事故设置等情况下,通过控制温州南收费站入口车道数量,调控进入收费站的流量。为确定温州南收费站入口开放通道数,根据实际情况确定期望交通密度下对应的速度为70 km/h,福州向主线交通量为4100辆/h,通过场景1仿真福州方向主线检测器(MF)的输出可得主线下游实际速度为63.5 km/h。通过流量-速度-密度关系可计算出平均密度值为64.57辆/km。结合场景1和场景2仿真情形,表4给出了各模型参数取值。

表4 模型参数取值表

参数	$q_{i,t-\Delta t}$	Δt	$k_{i,t}$	$l_{i,t}$	p_i	$k_{crt,i}$	$v_{crt,i}$	$l_{i,control}$
取值	1000 辆/h	1 h	64.57 辆/km	0 辆	0.70	55 辆/km	70.0 km/h	100 辆

利用表4、式(1)和式(2),确定下一控制周期内的调节车流量 $Q_{i,t}$ 为43辆/h,又因温州南收费站入口共有5条ETC车道、1条MTC车道,对照表1且根据实际情况可知,可选择开放1条ETC车道和1条MTC车道。利用同样图2的输入流量进行仿真,输出流量、速度、延误、旅行时间等指标。

3 仿真结果及讨论

3.1 仿真结果

场景1不进行通道调节控制,仿真3600s后,输出流量、速度、旅行时间、延误等指标。根据计算结

果,利用 VISSIM 设置温州南收费站入口通道数量,以实现收费站控制的目的,形成场景 2 所对应的收费站控制仿真方案。仿真结果以流量、速度、延误、旅行时间等指标输出,对比结果如图 3~6 所示。其中,图 3 说明两种场景下流量基本相同,进行管控后

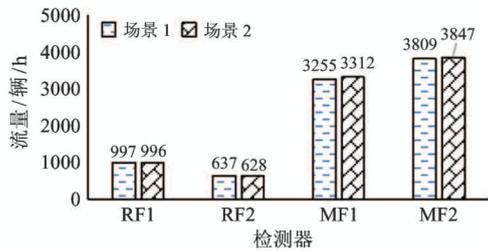


图3 两种场景下流量仿真结果

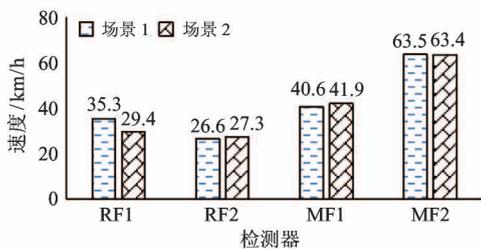


图4 两种场景下速度仿真结果

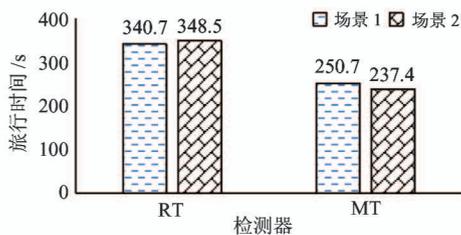


图5 两种场景下旅行时间仿真结果

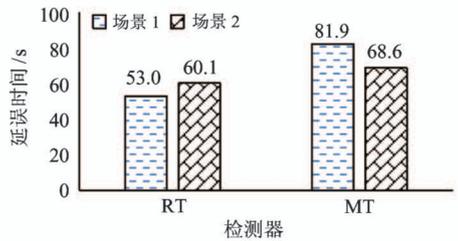


图6 两种场景下延误仿真结果

保障了原有流量通行;图4说明进行管控后主线上游车辆以及匝道下游车辆的速度都有所提升,图5说明进行管控后主线车辆的旅行时间有所降低。

3.2 仿真结果讨论

通过算法调整场景2关闭收费站车道数目,从仿真结果输出可知,通过收费站控制提升了高速公路主线的通行能力,在保证收费站通行流量的情况下,降低了主线拥堵路段延误。收费站控制后,通过收费站的车辆的延误虽然增加了,但是收费站主线车辆的延误降低了,高速公路收费站和主线的总延误也有所降低。另外,通过收费站管控提高了高速公路匝道下游车辆和主线上游车辆的平均速度,对缓解匝道下游拥堵也具有一定的作用。由表5可知,通过收费站车道控制,相比现状的收费站主线延误,关闭部分车道延误降低了16.24%,车辆总延误相比现状降低了12.76%。因此收费站车道管控虽然对通过收费站的车辆有所影响,但整体来看对改善收费站下游主线拥堵有一定的效果。

表5 不同仿真场景平均延误对比结果

	RT/s	MT/s
车辆数	700	3400
场景1(现状均车延误)	53.0	81.9
场景1福州方向车量总延误	$700 \times 53.0 = 37100$	$3400 \times 81.9 = 278460$
场景1福州方向车量总延误合计(收费站+主线)	$37100 + 278460 = 315560$	
场景2(管控后均车延误)	60.1	68.6
场景2福州方向车量总延误	$700 \times 60.1 = 42070$	$3400 \times 68.6 = 233240$
场景2福州方向车量总延误合计(收费站+主线)	$42070 + 233240 = 275310$	
单车延误相比现状变化率	13.40%	-16.24%
车辆总延误相比现状变化率	-12.76%	

4 结论

(1) 选用基于反馈控制的高速公路收费站通道数调节方法进行收费站车道管控,建立了收费站管控模型。

(2) 选用甬台温高速公路温州南收费站作为仿真对象,建立了温州南收费站模型,在南白象互通上下游设置了流量、速度、时间检测器。设置了两个仿真场景,场景1不对收费站进行任何控制,场景2基于场景1对收费站入口车道数进行控制,利用建立的收费站管控模型确定了进行管控时开放1条ETC车道,1条MTC车道。

(3) 通过仿真输出了现状的流量、速度、旅行时间、延误等指标,对管控前后的指标情况进行了分析,通过分析发现,相比现状的收费站主线延误,关闭部分车道延误降低了16.24%,车辆总延误相比现状降低了12.76%。整体来看收费站车道管控对改善收费站下游主线拥堵有一定的效果。

今后在本文基础上可围绕以下三方面开展进一步研究。其一,在收费站管控模型方面,采用其他调节算法与运用基于反馈控制的高速公路收费站通道数调节方法作为对比,以得到更加优化的管控模型;其二,在仿真层面上设置不同主线流量和收费站输入流量,以期找到车辆总延误率减小最大化的流量值;其三,利用新兴的车路协同技术,获得更加准确的车辆行驶信息等,优化收费站入口调节方法,以缓解高速公路收费站入口以及主线拥堵压力。

参考文献

- [1] Kuang X Y, Zhou S, Xu L H. Simulation and experiment for highway toll station[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 178-181: 1786-1789
- [2] Dheeraj D, Nishant A, Prateek D, et al. Application of queuing theory to address traffic problems at a highway toll plaza[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 592-594: 2583-2587
- [3] Herna P A, Dewanti D. The effect of toll gate type on the queue of vehicles in connecting roads: a case study of Ba-

wen-Yogyakarta toll road[J]. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 2020, 6(1): 1-12

- [4] 宋安宁, 乔建刚. 高速公路主线收费站缓堵管控技术研究[J]. *物流科技*, 2017, 40(4): 69-72
- [5] 苏靖. 高速公路 X 收费站精细化管理研究[D]. 保定: 河北大学管理学院, 2017: 5-9
- [6] 田佳敏, 宫尚俊, 牛希璨, 等. 基于排队和汇流模型的收费站优化[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2019, 35(3): 30-36
- [7] Yang K X, Li M Q. Traffic simulation optimization and evaluation of adjacent intersections based on VISSIM model[J]. *Applied Science and Innovative Research*, 2020, 4(2): 53-59
- [8] Lv B Y, Li G Z, Wang T L, et al. Traffic evaluation model of the opening road in residential area based on VISSIM simulation[J]. *International Journal of Communications and Networks*, 2020, 3(9): 1-8
- [9] Zhu Z D, Chen S H, Yang Y Q, et al. VISSIM simulation based expressway exit control modes research [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 137: 738-746
- [10] 王君. 基于高速公路基本路段通行能力分析的 VISSIM 模型优化[J]. *黑龙江交通科技*, 2020, 43(5): 190-192
- [11] 赵秀云, 王健. VISSIM 仿真技术在高架路拥堵治理中的应用[J]. *科技视界*, 2020(6): 235-236
- [12] Huang Z F, Zhang Z H, Li H J, et al. Determining appropriate lane-changing spacing for off-ramp areas of urban expressways [J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2019, 11(7): 1-15
- [13] Zheng S, Li H J, Huang Z F, et al. Flow-balanced-based collaborative strategies and simulation of vehicle group behaviors for on-ramp areas [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2020, 103: 1-17
- [14] 郑立勇, 常云涛, 王奕彤. 基于反馈控制的高速公路收费站入口通道调节效果研究[C]//第十一届中国智能交通年会大会论文集, 北京, 2016: 52-62
- [15] 罗梓铭. 高速公路混合收费站通行能力及车道配置研究[D]. 南昌: 华东交通大学交通运输与物流学院, 2019: 40-42

Simulation on entrance control of freeway toll station

Zhang Weiyi^{**}, Li Geliang^{***}, Qi Jianyu^{****}, Qin Gang^{****}, Ma Hao^{****}, Li Haijian^{*****}

(^{*} School of Economics, Peking University, Beijing 100871)

(^{**} China Merchants Highway Network Technology Co. Ltd., Beijing 100022)

(^{***} Zhejiang Wenzhou Yongtaiwen Expressway Co. Ltd., Wenzhou 325002)

(^{****} China Merchants New Intelligence Technology Co. Ltd., Beijing 100070)

(^{*****} Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract

The capacity of a toll station directly affects traffic operations on freeways. To control the traffic flow of main lines, entrance control strategies can be implemented at toll stations. Aiming at simulation of entrance control, this paper proposes a control model of freeway toll station, and uses VISSIM to simulate Wenzhou South toll station of the Yongtaiwen freeway. Two simulation scenarios are set up and compared. The simulation method for improving the toll control effect is studied. The parameters, such as detector locations, basic traffic flow and expected traffic density, are implemented in VISSIM. The simulation results show that, under the condition of congested traffic flow, the ramp delay of vehicles passing through toll increases, but the delay of downstream vehicles in the main line decreases. From the overall point of view, entrance control has a certain effect on reducing the congestion of the main line nearby a toll station.

Key words: toll station, freeway, control model, VISSIM simulation, effect