

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.012

# 收费站与衔接交叉口半感应控制研究

刘伟铭, 宋文通, 区俊锋

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:**为了解决高速公路出口匝道及衔接交叉口车辆排队导致交通拥堵倒灌至收费广场甚至高速公路主线的现象,文章结合目前电子不停车收费系统(ETC)车流量迅速增长现状,提出在无法改善交通组织的前提下,基于经典的感应控制方法理论,引入对收费站通行的 ETC 车辆车速的控制,采用对城区高速公路收费站与衔接信号交叉口进行半感应控制的方法。以该方法借助微观交通仿真软件 VISSIM 对广州市北二环高速公路石湖收费站进行仿真实验,采用信号控制延误等参数评价服务水平。案例仿真结果表明,该方法可以有效地提高收费站及衔接交叉口的通行效率,使通行区域的平均排队长度减少 42.3%,平均延误时间与停车次数下降约 20%,服务水平由 D 级提高到 C 级。

**关键词:**高速公路;半感应控制;延误;VISSIM 软件;电子不停车收费系统(ETC)车辆

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)03-0358-06

## Research on semi-actuated control of toll station and adjacent intersection

LIU Weiming, SONG Wentong, OU Junfeng

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In order to solve the phenomenon that the queuing of vehicles on the exit ramps and adjacent intersections of the expressway causes traffic congestion back to the toll plaza or even the main line of the expressway, under the current situation of the rapid growth of electronic toll collection(ETC) traffic at toll stations and the premise that the traffic organization cannot be improved, and based on the classic actuated control theory, this paper introduces the control of the speed of the ETC vehicles passing through the toll station, and adopts the method of semi-actuated control of the urban expressway toll station and the adjacent signal intersection. This method is used to simulate the Shihu toll station of the Guangzhou North Second Ring Expressway with VISSIM, utilizing the delay at the intersection and other parameters to evaluate the service level. The case simulation results show that this method can effectively improve the traffic efficiency of toll stations and adjacent intersections, reduce the average queue length of the traffic area by 42.3%, reduce the average delay time and the number of stops by about 20%, and improve the service level from D level to C level.

**Key words:** expressway; semi-actuated control; delay; VISSIM software; electronic toll collection (ETC) vehicle

## 0 引言

一直以来,在城区高速周边,由于通往城市道路的出口匝道频繁出现排队现象形成拥堵,而导

致主线交通拥挤的现象在北京环线和上海高架桥的出口处屡见不鲜<sup>[1]</sup>,甚至出口匝道处排队所造成的影响也成为这 2 个城市高速公路交通堵塞的主要痛点之一。随着我国政府当前深入落实电子

收稿日期:2021-03-05

基金项目:广东省科技计划资助项目(2014B090901012)

作者简介:刘伟铭(1963—),男,湖南宁乡人,博士,华南理工大学教授,博士生导师。

不停车收费系统(electronic toll collection, ETC)车道与车辆的普及政策,高速公路收费站的服务水平与通行能力得到了极大提升,收费站出口处通过的车流会以更快的车速涌入下游出口匝道以及衔接路段、交叉口,而与此同时交叉口的通行能力并没有增加,这一交通拥堵现象会更频繁地出现在一、二线城市的高速公路。仅对道路进行交通设计和组织优化已经无法很好地解决新的大环境下的车流交织与交通拥堵问题。国内外的学者已经开始研究在交通设施无法改良的情况下,通过有效的交通控制方法来提升路段通行能力,以此来解决高速公路与衔接城市道路及交叉口之间的交通流交织与冲突问题<sup>[2-8]</sup>。与此类似的城市快速路匝道与衔接交叉口协同控制的研究成果较多,采用的模型与涉及的方法理论主要有匝道信号灯协调配时模型<sup>[9-10]</sup>、集计模型<sup>[11]</sup>、多个交叉口分层控制理论<sup>[12]</sup>等。

目前国内外针对城市道路与高速公路或城市快速路的协同控制已经能较大幅度改善路网的交通环境,减少衔接处的拥堵状况。但是随着近年来高速公路 ETC 车道的普及与 ETC 车辆的增多,车辆通过收费站后汇入匝道,城市道路的速率会相应增加,更易形成下游路段的拥堵排队。而现有的相关研究无法很好地解决这一问题。本文在深入分析前人研究成果的基础上,基于半感应控制方法,将其应用于新的背景条件。半感应信号控制适用于主要道路与次要道路交通流量相差较大的路段,尽可能提供主路通行权,可以避免主路车流被次路打断,将系统延误降至最低。此外,本文引入对收费站通行车辆车速的控制,通过不同方案下车辆排队长度和车辆延误的仿真计算,对交通系统的服务水平进行分析与研究,提高运行效率,以广州市北二环高速公路石湖收费站及其出口匝道衔接交叉口为研究对象,论证该方法对整体交通路网的影响。

## 1 优化指标选取

在评价信号交叉口的服务水平时,主要参考以下几个参数<sup>[13-14]</sup>:① 通行能力,包括整个交叉口进口道各车道通行能力的总和。② 交叉口延误,指车辆经过交叉口时因交通冲突而导致的时间损失,分为总延误与车均延误。③ 饱和度,为拥堵状况的直接指标,是路段最大交通量  $V$  与最大通行能力  $C$  的比值。④ 车辆排队长度,为路段拥堵状况的直观反映。⑤ 车辆平均停车率,指每

辆车通过交叉口的平均停车次数。

考虑到后续仿真过程中参数评价的稳定性与可靠性,本文主要将排队长度、车均停车次数、车均延误等作为后文研究衔接交叉口通行效率的指标,作为其改善效率的依据。

### 1.1 交叉口排队长度

交叉口排队长度能够直观体现交叉口的拥堵状况。从交叉口处的车流停车运行的时间开始计算,假设排队的车辆全部消散的时间为  $t$ ,则有:

$$v_p t = v_s(t - t_r),$$

其中: $v_p$  为停车波波速; $v_s$  为启动波波速; $t_r$  为红灯持续时间。

依据上述公式求解可得交叉口排队消散所需时间为:

$$t = \frac{v_s t_r}{v_s - v_p}.$$

通过分析可知,若  $t < T$  ( $T$  为一个周期),表明车队能在本周期内全部消散。假设车辆最远排队距离为  $L_d$ ,排队车辆以速度  $v_2$  通过交叉口,则车队通过交叉口所需的时间为  $t_d = L_d/v_2$ 。若  $t_d < t - t_r$ ,表明排队车辆可以在一个周期内全部通过,否则无法全部通过,最大排队长度  $L$  为:

$$L = v_p \frac{v_s t_r}{v_s - v_p}.$$

### 1.2 平均停车次数

在评价交叉口运行状态的参数中,车辆平均停车次数可以反映交叉口的服务水平与拥挤程度。停车次数过多,如二次停车或多次停车,不仅影响驾驶员的驾驶体验,也会造成交叉口处的燃料消耗以及尾气排放增加。因此在众多的控制方法或控制系统中,停车次数是一个十分重要的优化目标。

### 1.3 交叉口车均延误

交叉口延误是车辆受阻情况的描述,在交叉口主要存在排队延误、停车延误等。车均延误指在某一车道或路段,一段时间内总的车辆延误与该时段内该路段通行车辆数的比值,单位为 s/辆。车均延误不仅反映经过车辆延误的平均值,也可间接体现交叉口的服务水平与服务经济性。

## 2 模型建立

逻辑流程图如图 1 所示。

根据半感应控制信号配时公式,即

$$g_s' = \frac{q_r R}{n_1/t_a - q_g},$$

其中: $g_s'$  为初始绿灯时间; $q_r$ 、 $q_g$  分别为进口道红

灯时间和绿灯时间内的左转车辆到达率,通过案例路口进行流量统计调查实现统计; $R$  为有效红灯时间,通过冲突相位的绿灯时间来计算; $n_1$  为

在每个周期时间内,通过人行横道的左转车辆数; $t_a$  为左转车穿越人、自行车群的临界间隙,通过视频观测数据或者现场调研可进行平均计算。

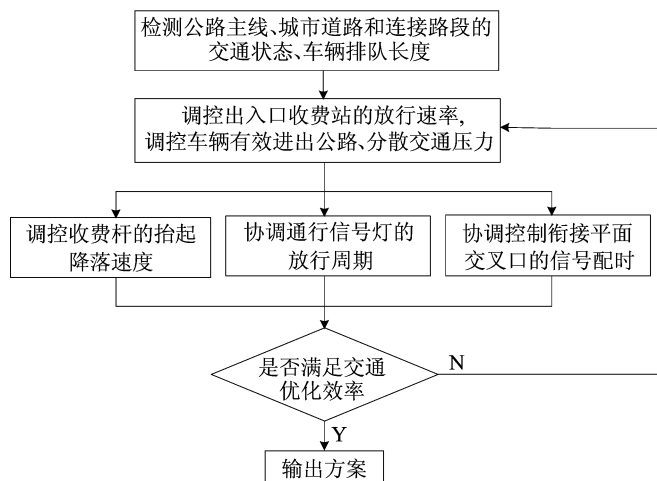


图 1 逻辑流程图

而在理论上,初始绿灯时间的选取应在满足路口通行的情况下尽量取最小值。因此,取初始绿灯时间为 30 s。

单位绿灯延长时间根据检测器到停车线的距离与车辆在交叉口进口道的速度来计算。

最大绿灯时间按照感应方向定时控制时间为绿灯长度的 1.5 倍计算。

出口 ETC 车道与公路半自动车道收费系统(manual toll collection system, MTC)车道的车辆逗留时间分别为  $t_j (j=1, \dots, j_1)$  和  $t_j' (j=j_1+1, \dots, n_{ex})$ , 根据 ETC 车道通行能力计算公式,即

$$C_{ETC} = \sum \frac{3\ 600}{t_0} = \sum \frac{3\ 600}{L/(v/3.6)} =$$

$$v = \frac{-\left(\frac{1\ 000t}{t_j} - 1\ 000\right) \pm \sqrt{\left(\frac{1\ 000t}{t_j} - 1\ 000\right)^2 - 4 \times \frac{3\ 600}{254\phi t_j} \frac{3\ 600(v + L_{安})}{t_j}}}{\frac{2 \times 3\ 600}{254\phi t_j}}$$

已知  $(1\ 000t/t_j - 1\ 000) > 0$ , 且电子不停车收费系统(ETC)车道车辆平均时速  $v > 15$  km/h,

$$v = \frac{-\left(\frac{1\ 000t}{t_j} - 1\ 000\right) + \sqrt{\left(\frac{1\ 000t}{t_j} - 1\ 000\right)^2 - \frac{6.48 \times 10^6 (v + L_{安})}{127\phi t_j^2}}}{\frac{3\ 600}{127\phi t_j}}$$

### 3 案例分析

以广州市北二环高速公路石湖收费站及其衔接友塘南街交叉口为案例进行仿真分析。

$$\sum \frac{1\ 000v}{L_{车} + L_{安} + \frac{vt}{3.6} + \frac{v^2}{254\phi}}$$

其中: $t_0$  为车头时距; $L$  为车头间距; $v$  为 ETC 车道车辆平均行车速度; $t$  为驾驶员感知反应时间; $L_{安}$  为车辆间所保持的安全距离; $L_{车}$  为车辆平均长度,ETC 车道服务车辆为小汽车,取值 6 m; $\phi$  为地面附着力系数。

ETC 车道车辆行车速度计算公式为:

$$\frac{3\ 600}{t_j} = \frac{1\ 000v}{L_{车} + L_{安} + \frac{vt}{3.6} + \frac{v^2}{254\phi}}$$

运用一元二次方程求根公式求解行车速度,计算公式为:

进一步化简,得到 ETC 车道车辆平均时速的计算公式为:

石湖收费站出口匝道南接友塘南街十字路口,两者间距 130 m,交叉口相位相序及车流情况如图 2 所示。收费站出口经改造后为 4 条 ETC 车道,南北

相位为感应相,东西相位为非感应相。出口匝道为单向两车道,长度为 300 m。不考虑行人、非机动车以及小岔路对车流的影响。

本文借助微观交通仿真软件 VISSIM,对北二环高速公路石湖收费站及其衔接信号交叉口进行仿真试验,使仿真参数与实际路况基本接近,对比拥堵时期现状信号方案、经典韦氏信号配时方案、半感应控制配时方案的效果。

运用经典韦氏周期公式计算的结果见表 1 所列。

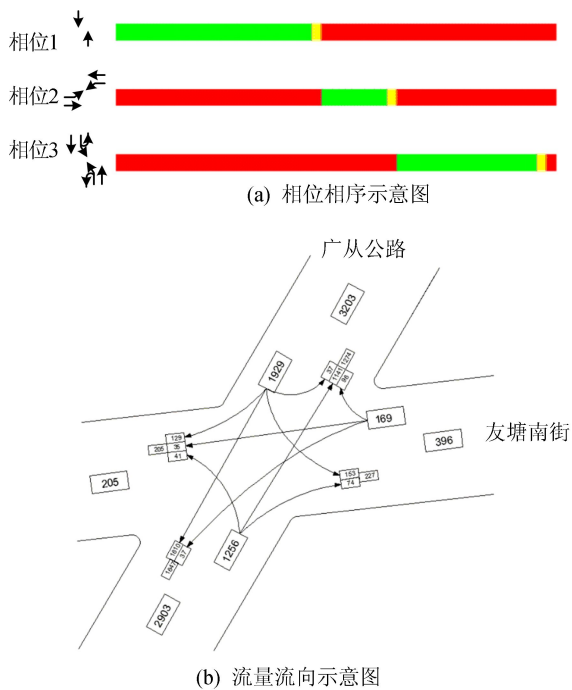


图 2 交叉口相位相序及车流情况

表 1 石湖收费站衔接交叉口韦氏周期计算结果

相位	相位 1	相位 2	相位 3
周期/s	63	23	49
关键车流	北直	西混行	北左转
交通量/(pcu · h <sup>-1</sup> )	2 107	168	218
饱和交通量/(pcu · h <sup>-1</sup> )	3 295	1 439	1 154
流量比 $\gamma_i$	0.426	0.117	0.188
流量比总和 $Y$	0.812		
初始周期时长 $C_0/s$	98		
韦氏配时绿信比 $\lambda$	0.583	0.160	0.257
韦氏配时绿灯时间/s	57	16	25

注: $C_0=(1.5L+5)/(1-Y)$ 。

仿真环境设置步骤如下:

(1) 将石湖收费站及其衔接交叉口的平面图作为 VISSIM 仿真路网导入,构建底图,建立仿真路网。

(2) 依据路网实际的几何构型、各个进口道

的交通流量分布情况以及交通渠化的现状进行路径决策。

(3) 依据研究区域交叉口的实际相位配时表编辑信号灯组。

(4) 输入道路交通流量,根据收费站与城市道路车速、车型比例的调查以及相关道路的限速标准,设置高速公路主线车辆行驶的期望车速为 85~110 km/h,小型车与大型车数量的比值设置为 4:1;匝道行驶车辆的期望车速为 25~35 km/h;城市道路车辆行驶的期望车速为 48~58 km/h;将石湖收费站工作日高峰时期的收费站出口交通流平均值特性曲线数据以及出口匝道与友塘南街交叉口交通流数据输入 VISSIM 仿真软件,进行本实例的仿真评价。

(5) 设置检测器,在交叉口中设置节点,检测排队长度、平均停车次数以及平均延误时间。将排队检测器设置在距离匝道出口 100 m 左右的位置,采集排队停车车辆数。

(6) 进行模型仿真,模型运行过程中观察交叉口各进口相位时间的变化及交通需求量的波动情况,对车辆不受信号控制、车辆突然消失、部分车道一段时间内无车流、检测器无数据或采集得到的数据不合理等情况进行修改与调整。案例分析仿真路网如图 3 所示。进行多次仿真反复验算,仿真结果如图 4~图 6 所示,见表 2 所列。

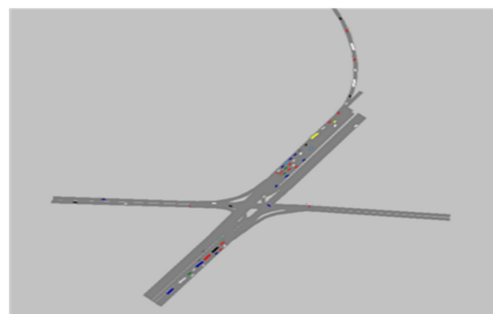


图 3 案例局部仿真路网

仿真时间为 14 400 s(4 h),在原相位下进行仿真,仿真过程可以看出,路网整体起始的交通密度不高,交通环境较为良好,系统状态保持均衡稳定,然而在仿真进行到约 1 800 s(30 min)前后,开始出现车辆排队延误持续增加的情况,收费站及城市道路到达的车辆堆积在交叉口各个进口道,交通环境急剧恶化。在半感应控制方案的仿真条件下,路网整体车辆平均延误的分布更为均衡,平均排队长度下降尤为明显。

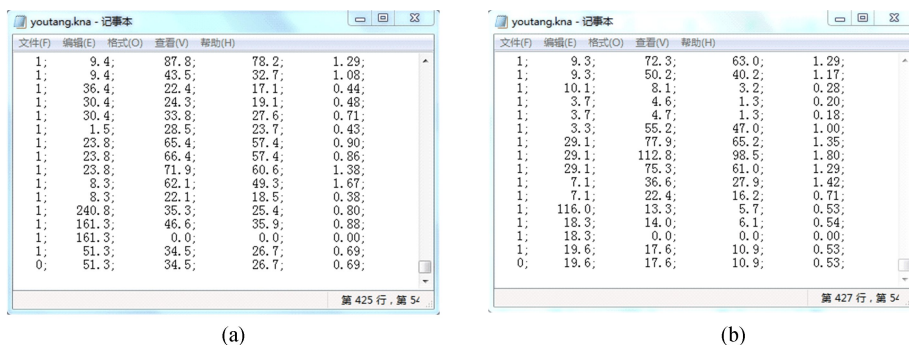


图 4 仿真输出数据

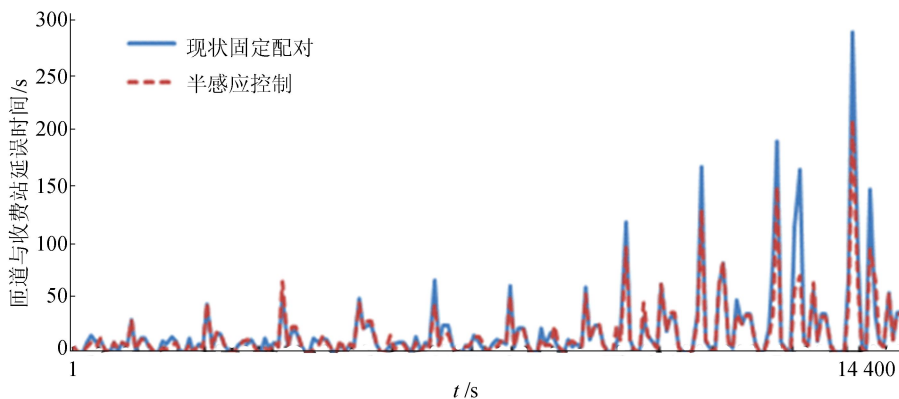


图 5 延误对比

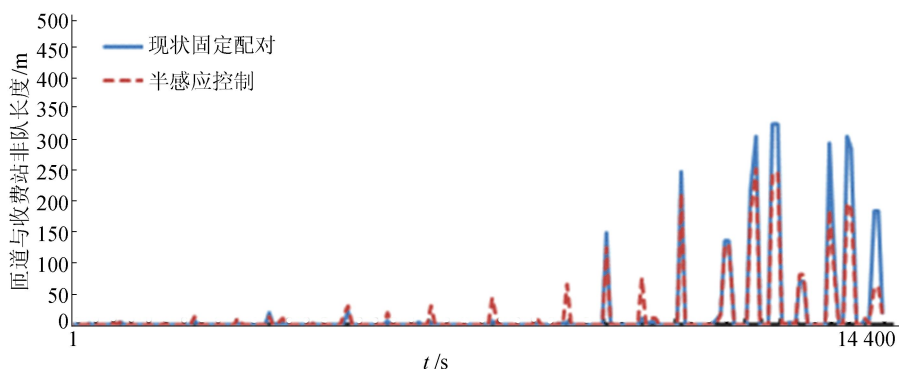


图 6 排队长度对比

表 2 现状与改善方案的交通优化率对比

节点	控制方案	评价指标		
		车均延误/s	车均排队长度/m	车均停车次数
交叉口	现状固定配时方案	34.5	51.3	0.69
	韦氏信号周期方案	26.6	38.2	0.70
	半感应控制方案	27.6	29.6	0.53
	改善率/%	20.00	42.30	23.19

在半感应控制方案下,因为提前进行了收费站与衔接交叉口的协同控制,所以车辆排队情况更加均衡,在仿真过程中也得到体现。通过仿真结果可以看出,在本文提出的半感应控制方案下,平均排队长度下降最为明显,改善率为 42.30%,

相对于现有相关研究,优化幅度提升 8%。此外,交叉口的车均延误相比于现状定周期控制信号配时方案下减少了 6.9 s,平均停车次数也有显著的下降,交叉口的总体服务水平由 D 级提高到 C 级,交叉口的整体延误有比较明显的降低,服务水

平得到了较大的提升。由仿真过程也可看出,整个仿真路网,包括收费站出口、出口匝道以及交叉口的交通环境都得到了极大改善。

#### 4 结 论

基于经典感应信号控制方法,在广州市北二环石湖收费站对本文方法计算的信号配时方案进行了验证,结果表明,该收费站出口匝道衔接交叉口的平均排队长度由 51.3 m 减少到 29.6 m,改善效果明显,而平均延误减少 6.9 s,平均停车次数下降 0.16 次,通行环境得到较大幅度的改善,由此可见本文提出的模型能够满足算法要求,并能够显著改善城区高速出口匝道与衔接交叉口的拥堵状况,提升交叉口服务水平。由于高速公路的独立性,其与城市道路分别归属不同的部门管理,国内目前关于高速公路与城市道路协调控制的研究较少。随着 ETC 车道及车辆的普及,收费站的通行能力大大提升,车辆以接近于较低车速自由流的形式通过收费站,而新形势、新背景下收费站下游路段与上游高速公路主线之间的相关协同拥堵治理更是亟待研究。本文将 ETC 普及后的高速公路与城市道路作为一个整体,进行收费站与衔接交叉口的感应控制研究,具有较高的先进性与创新性,并将创造一定的经济效益和社会价值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 肖鹏飞,王秋鸿.我国高速公路交通管理现状[J].道路交通管理,2017(11):14-15.
- [2] 徐堃,柴干,李清泉,等.自动跟踪动态临界占有率的匝道协调控制方法[J].交通运输工程学报,2016,16(2):150-158.
- [3] BERG M V D, SCHUTTER B D, HELLENDORRN H. Integrated model predictive control for mixed urban and freeway networks[C]//The 83th Annual Meeting of Transportation Research Board Meeting. [S. l.: s. n.], 2004: 27-49.
- [4] 于德新,刘珩,郑黎黎,等.高速公路瓶颈区域可变限速控制方法[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(3):120-125.
- [5] 梁子君,张卫华,杨伟,等.基于时空资源优化的交叉口交通流动态控制方法研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(9):1240-1249.
- [6] 朱增辉,李卓丹.河百高速公路限速设置方法研究[J].公路,2020,65(9):218-221.
- [7] 熊健.基于遗传蚁群算法优化的高速公路匝道协调控制[J].科技传播,2015,7(6):164-165.
- [8] 史煜阳.高速公路出口收费站与衔接交叉口协调优化研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [9] LIM K G, KIM J H, SHIN E K, et al. A signal control model integrating arterial intersections and freeway of f-ramps [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(2): 385-394.
- [10] 周浩,胡坚明,张毅,等.快速路可变限速与匝道控制协同优化策略[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(2): 68-75.
- [11] ZHAO J, MA W J, XU W. Increasing the capacity of the intersection downstream of the freeway off-ramp using presignals[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(8): 674-690.
- [12] 保丽霞,杨晓光.快速路进口匝道及其衔接交叉口的协调优化控制模型[J].中国公路学报,2009,22(2):68-75.
- [13] 张腾月,翁小雄.基于收费数据的高速公路行程时间可靠性估计模型[J].广西师范大学学报(自然科学版),2016, 34(4):70-77.
- [14] 李敢,谢秉磊.基于 MPC 的快速路智能协同控制系统[J].中国公共安全(学术版),2017(3):70-73.

(责任编辑 张 镛)

#### (上接第 357 页)

- [6] 合肥市城乡建设局.关于进一步加强全市房屋建筑工程抗震管理的通知[EB/OL].(2019-11-26)[2021-01-01].<http://cxjsj.hefei.gov.cn/zwgk/zcfg/wgfhxhrcglwj/17610437.html>.
- [7] 华南理工大学建筑设计研究院有限公司.高层建筑混凝土结构技术规程:DBJ/T 15-92—2021[S].北京:中国城市出版社,2021:22-27.
- [8] 鲁松.既有医疗建筑抗震性能提升技术及经济分析研究[D].南京:东南大学,2018.
- [9] 容绍章.钢筋混凝土框架结构的耗能减震性能化加固设计方法研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [10] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范:GB 50011—

2010[S].2016 版.北京:中国建筑工业出版社,2017: 31-32.

- [11] 广州大学.建筑消能减震技术规程:JGJ 297—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:25-26.
- [12] 北京金土木软件技术有限公司.ETABS 中文版使用指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2004:7-21.
- [13] 李立.抗震性能化设计在 ETABS 中的实现[EB/OL].(2017-03-01)[2021-01-01].<http://www.cisec.cn/Information/SubscribeAndUnsubscribe.aspx>.

(责任编辑 张淑艳)