

Simulation and Optimization of Vehicle Access Control System for Gated Community Facing Urban Main Road*

Qian Qiu, Jun Li

School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou
Email: stsljun@mail.sysu.edu.cn

Received: May 14th, 2012; revised: May 29th, 2012; accepted: Jun. 7th, 2012

Abstract: The characteristics of the vehicle flow on community entrances opening directly to city main roads are analyzed, vehicle queue system model under signal and access controlled is proposed, GPSS programming language is utilized to realize simulation under the different scenarios to evaluate the design of vehicle access control system. A case study of the south gate of South Campus of Sun Yat-sen University is presented; the impacts of position and efficiency of access control is evaluated, and the optimization strategies for different scenarios are proposed.

Keywords: Vehicle Queuing; Vehicle Access Control; Community Entrance Optimization; Traffic Simulation

开向城市主干道的小区出入口门禁系统仿真与优化*

邱 乾, 李 军

中山大学工学院, 广州
Email: stsljun@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 5 月 14 日; 修回日期: 2012 年 5 月 29 日; 录用日期: 2012 年 6 月 7 日

摘 要: 分析了直接开向城市主干道带门禁系统的小区出入口车辆运行特点, 建立信号和门禁控制下的车辆排队模型, 利用 GPSS 语言编程仿真分析, 给出了多场景下交通流状态评价准则。以中山大学南校区南门出入口为案例, 分析了门禁位置与效率对通行能力与延误的影响, 给出了不同场景下的优化设置方案。

关键词: 车辆排队; 车辆出入控制; 小区出入口优化; 交通流仿真

1. 引言

城市道路交通规划设计规范(GB 50220-95)^[1]规定主干道两侧不宜设置小区出入口, 但现实生活中仍然存在小区出入口直接开向城市主干道的现象。在这类特殊交叉口中, 受到城市主干道大流量车流的影响, 小区出入口通行能力降低, 车辆延误增大, 形成小区交通出行的瓶颈^[2]。为提高小区交通出行的便利性, 探索小区出入口的控制优化方法也有其意义所在。小区出入口管理一般受到信号控制和门禁控制两种控制方式, 而关注信号控制优化方法的研究较多。考虑

小区出入口大流量行人^[3]、波动交通流^[4]、车辆排队状态^[5]的基础上, 优化特殊交叉口的信号配时, 从而提高交叉口的通行能力。然而中国目前 80%以上的城市新建小区都采取了门禁系统管理模式^[6], 因此还需要考虑门禁控制系统对小区出入口的影响。门禁控制系统的运作方式相当于收费站, 在收费站的研究中, 高速公路收费站的研究较为完善, 高速公路收费站^[7]、ETC 收费站^[8]及收费广场^[9]的车辆排队仿真模型已建立, 但对于小区出入口收费站, 特别是在收费站道路与城市主干道成交叉口的情景下则研究较少。保持原有信号控制前提下, 分析门禁控制系统对小区出入口车辆运行状态的影响, 为小区出入口门禁系统设置及

*资助信息: 国家自然科学基金(批准号: 51178475)资助的课题。

交通组织与管理提供依据。

2. 仿真模型

信号控制和门禁控制的小区出入口(如图1所示), 车辆运行模型有以下假设: 1) 小区出入口通行车辆以小型车为主; 2) 小区出入口车辆的到达间隔符合泊松分布; 3) 出入口道路为双向两车道, 车辆不会出现转换车道和超车行为; 4) 通行车辆分别在信号控制、门禁控制产生排队现象; 5) 不考虑行人的影响。基于上述假设, 建立信号和门禁控制的小区出入口车辆排队模型。

2.1. 车辆排队模型

2.1.1. 参数定义

出入口车辆排队模型实体组成如图1所示, 将门禁控制和信号控制看成两个服务台。活动实体为车辆, 固定实体为门禁服务台和信号服务台, 车辆先后在两个服务台进行排队活动和服务活动。信号和门禁控制小区出入口车辆运行排队论模型的主要参数符号定义如下:

H ——小区出入口到达车辆时间间隔(s);

L ——小区门禁与交叉口停车线间的路段长度(m);

K ——路段 L 的安全停车容量(个);

S_a ——门禁服务台平均服务时间(s);

S_s ——信号服务台平均服务时间(s);

T_a ——车辆通过门禁服务台的平均时间, 即门禁服务台排队系统中的平均消耗时间(s);

T_s ——车辆通过信号服务台的平均时间, 包括车辆在路段 L 的平均行驶时间和在信号服务台排队系统中的平均消耗时间(s);

T_L ——车辆在路段 L 的平均行驶时间(s);

T_p ——车辆在出入口的平均逗留时间, 即车辆通过门禁服务台、信号服务台离开小区出入口的总时间(s)。

在通常城市道路设计范围内, 停车时的车头安全间距为 7 m, 则路段 L 的安全停车容量 K 可按式(1)计算。

$$K = \frac{L}{7} \quad (1)$$

根据上述参数定义, 车辆在出入口的平均逗留时间 T_p 按式(2)计算。

$$T_p = T_a + T_s \quad (2)$$

2.1.2. 模型描述

图2给出了信号和门禁控制下的出入口车辆排队系统, 系统由门禁服务台和信号服务台组成, 信号服务台容量有限, 具体描述如下:

1) 车辆泊松流到达门禁服务台;

2) 当信号服务台前的排队长度小于 K 时, 经门禁服务完的车辆就立即进入信号服务台; 当信号服务台前的排队长度等于 K 时, 经门禁服务完的车辆不能立即进入信号服务台, 而是暂时停留在门禁服务台, 此时门禁服务台休假;

3) 红灯时, 信号服务台休假, 车辆在路段 L 等待; 绿灯时, 信号服务台服务, 车辆通过小区出入口;

4) 两个服务台的平均服务时间及车辆到达的平均时间间隔三者相互独立;

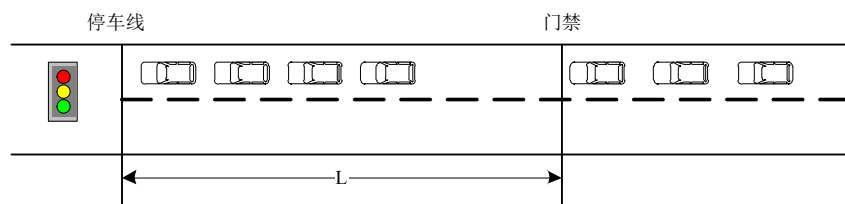


Figure 1. Diagrammatic drawing of community entrance under signal and access controlled
图 1. 信号控制和门禁控制的小区出入口示意图

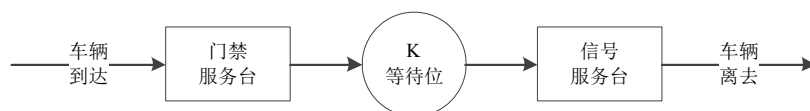


Figure 2. Vehicle queuing system of community entrance under signal and access controlled
图 2. 信号和门禁控制下的出入口车辆排队系统

5) 到达系统的车辆按先到先服务(FCFS)的规则接受服务, 而且只有先被门禁服务台服务完、再被红绿灯服务台服务完后才能离开。

2.2. 仿真流程

容量限制的两级串联排队系统的平稳形态已被证明, 但由于计算过程复杂不利于工程实践。为了简便精确预测信号和门禁控制下出入口车辆运行过程, 采用仿真的方法来获取其交通流参数。图 3 给出了以车辆流动为主线的信号和门禁控制下出入口车辆排队系统实体流程图, 在图中单线框表示事件, 双线框表示活动, 其中条件判断(菱形框)后的事件为条件事件。

2.3. 仿真实施

GPSS(General Purpose Simulation System)语言一种使用最广泛的离散系统仿真语言, 它采用一组标准的程序块(Block)来表示其逻辑结构, 一个程序块对应一条 GPSS 语句, 因而具有通用性好, 逻辑功能强、表达简捷及自动统计输出的特点^[10]。GPSS 建模的指导思想是排队论, 它按照随机服务系统(排队系统)的机理进行仿真, 已广泛用于交通运输系统中车辆排队

过程的仿真^[11], 高架道路上匝道连接区车辆排队过程的模拟^[12], 串联收费站系统中车辆排队过程的模拟^[13], 城市公交运营系统中车辆调度过程的模拟^[14]。

根据开向城市主干道的小区出入口车辆排队系统实体流程图(图 3), 建立其 GPSS 语言的程序块图(图 4), 图中符号含义如下: F_a 、 F_s 分别代表门禁服务台、信号服务台; Q_a 、 Q_s 分别代表车辆在门禁服务台、信号服务台前的队列; T_r 、 T_g 分别代表信号控制红灯时间、绿灯时间。在图 4 中, GENERATE 模块按照 POISSON 函数产生活体实体车辆, 接着车辆在固定实体门禁服务台 F_a 前进行排队活动, 若信号服务台 F_s 前的排队长度 Q_s 小于路段 L 的安全停车位 K 时, 则车辆进行收费服务 S_a , 然后车辆离开门禁服务台, 行驶过路段 L 到达信号服务台 F_s 进行排队活动, 最后车辆在绿在灯绿灯时, 经过信号服务台服务, 离开小区出入口。

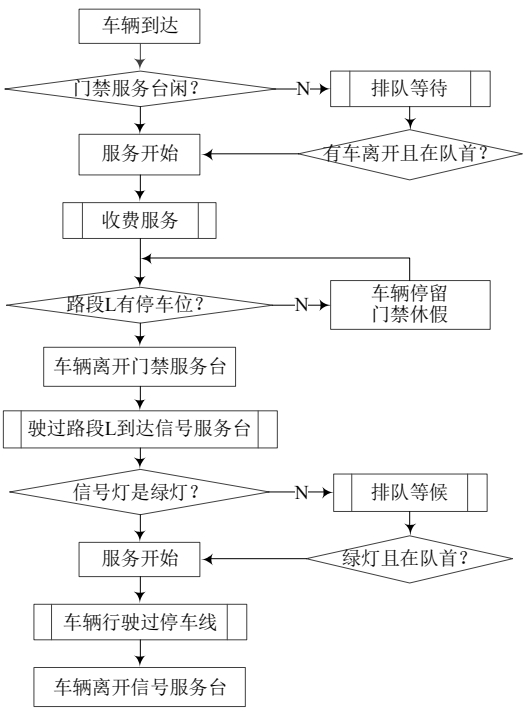


Figure 3. Flow chart of vehicle queuing system on community entrance under signal and access controlled
图 3. 小区出入口车辆排队系统实体流程图

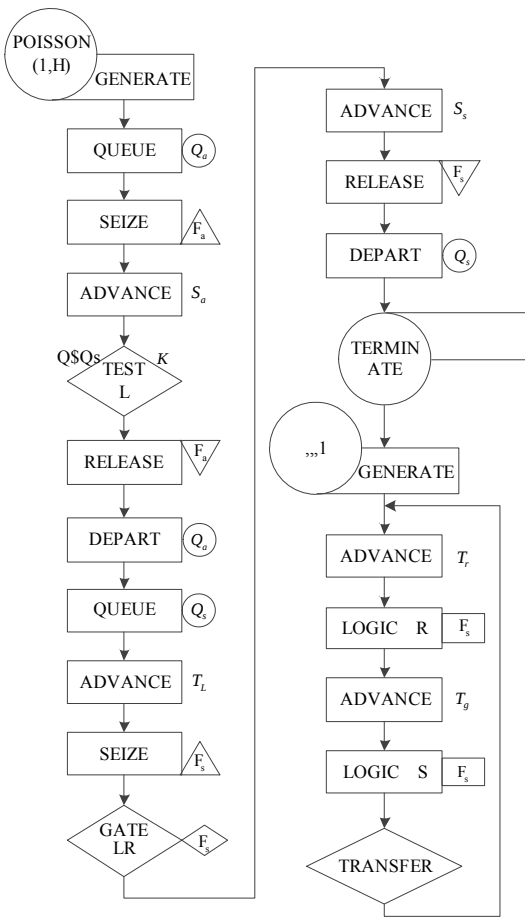


Figure 4. Block diagram of vehicle queuing system on community entrance with GPSS language
图 4. 小区出入口车辆排队系统 GPSS 程序块图

2.4. 阻塞度评价标准

交通阻塞的标准取决于出行者对阻塞的心理认识，在出行过程中，出行者往往根据出行的心理时间来做出交通决策，因此采用出行者的出行心理时间作为交通评价的指标^[15]。由于大部分出行者在开向城市主干道的小区出入口的等待心理时间与在城市交叉口的等待心理时间相类似，本文借鉴《道路交通阻塞度及评价方法》规定，提出信号和门禁控制小区出入口阻塞度评价标准，根据车辆在小区出入口逗留时间 T_p 将交通分为三种状态，其中定义 T 为信号灯周期时间：

- 1) 通畅状态： $T_p \leq 2T$ ；
- 2) 阻塞状态： $2T < T_p \leq 4T$ ；
- 3) 严重阻塞状态： $4T < T_p$ 。

3. 应用案例

选取中山大学南校区南门出入口(下文简称南门出入口)为应用案例，根据实测的交通组织及信号控制方案，运用车辆排队的 GPSS 仿真模型对南门出入口进行分析，并根据仿真结果优化门禁系统的效率与位置，以缓解南门出入口的阻塞。

3.1. 问题概述

南门出入口道路为双向两车道，新港西路为双向八车道，南门出入口道路与新港西路直接交叉，道路级别落差过大，缺乏足够的缓冲区。新港西路为广州市主干道，平峰时段流量约为 3000 辆/小时，高峰时段流量约为 5500 辆/小时。南门出入口高峰、低峰交通流变化较大，现行固定信号周期配时信号配时方案难以提高交叉口的运行效率，在南门出入口高峰出行时，往往影响新港西路的交通运行。基于上述情况，南门门禁系统直接制约着出入口的通行能力，成为交通瓶颈点之一。中山大学南校区南门道路与新港西路成交叉口，而对瑞康路实施交通管制后，可将车流运行简化为如图 5 所示。

3.2. 仿真分析

根据交通调查得到，南门出入口车辆平均行驶速度为 15 km/h，平峰、高峰及大型活动时刻车辆到达平均时距分别为 20 s、14 s、10 s；门禁控制系统平均服务时间为 15 s；路段 L 长度为 65 m，则 K 为 9 个

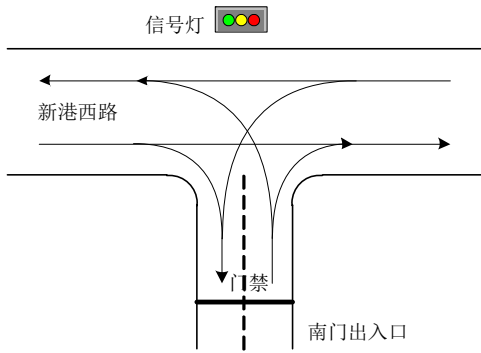


Figure 5. Diagrammatic drawing of the vehicle flow on the south gate entrance
图 5. 南门出入口车流运行示意图

安全停车位；信号控制系统的周期 T 为 120 s，红灯 90 s，绿灯 30 s；信号控制系统平均服务时间为 2.5 s。基于信号和门禁控制小区出入口车辆运行排队论模型，结合上述数据，利用 GPSS 语言编写程序仿真分析保持原有信号控制前提下，分析门禁控制系统的效率和位置对小区出入口车辆运行状态的影响。

3.2.1. 现状分析

由于南门出入口出行主要集中于上下班时刻，交通量变化剧烈，对南门出入口平峰、高峰、大型活动时刻车辆运行状态仿真半小时分析。如表 1 所示，南门出入口信号控制周期为 120 s，则南门出入口车辆逗留时间 $T_p \leq 240$ s 时为通畅， 240 s $< T_p \leq 480$ s 时为拥挤， $T_p \geq 480$ s 时为严重拥挤。仿真结果表明，南门出入口平峰时刻和高峰时刻通畅，大型活动时刻严重阻塞。大型活动时刻和高峰时刻，车辆通过门禁系统时间 T_a 分别占南门出入口逗留时间 T_p 的 84.9%、71.9%，即门禁服务台对出入口阻塞度的影响较大；平峰时刻，车辆通过信号系统时间 T_s 占南门出入口逗留时间 T_p 的 76%，即信号服务台对出入口阻塞度的影响较大。因此，在南门出入口车辆高峰场景下，更侧重于优化门禁系统的平均服务时间，即门禁系统的效率，从而达到缓解出入口阻塞度的目的。

Table 1. Simulation result of current situation for the south gate entrance (s)
表 1. 南门出入口现状仿真结果(单位: s)

H	平峰	高峰	大型活动
T_a	15.4(24.0%)	120.6(71.9%)	307.8(84.9%)
T_s	48.8(76%)	47.2(28.1%)	54.8(15.1%)
T_p	64.2(100%)	167.8(100%)	362.6(100%)

3.2.2. 门禁影响分析

由信号和门禁控制小区出入口车辆排队模型可知, 门禁系统影响小区出入口车辆运行状态的因素主要为门禁系统的位置 L 和门禁系统的效率 S_a 。根据公式, 门禁系统的位置 L 限制了信号服务台的安全停车容量 K , 从而影响车辆在出入口系统运行, 因此采用安全停车容量 K 表征门禁系统的位置 L 。不同门禁系统位置、效率的情况下, 仿真分析在南门出入口大型活动时刻运行状态。仿真时长为 0.5 小时, 仿真范围 $K \in [1, 15]$, $S_a \in [5, 20]$ 。图 6~图 7 分别为大型活动情况下不同门禁系统位置和效率对车辆在南门出入口的平均逗留时间(即阻塞度)影响仿真结果图。

从图6~图7可以看出门禁系统的效率对南门出入口阻塞度影响的较敏感, 在大型活动时刻单一改变门禁位置无法达到出入口通畅水平, 还需优化门禁系统

效率。门禁位置和效率都对南门出入口阻塞度的影响存在突变现象, 门禁系统位置较小时, 出入口阻塞度急剧增大; 门禁系统效率较低时, 出入口阻塞度急剧增大。在工程实践中应避免门禁系统位置过小、门禁系统效率过低引起小区出入口严重阻塞的现象。

3.3. 优化方案及评价

根据上述中山大学南校区南门出入口现状交通仿真分析和门禁系统影响分析, 从优化门禁系统效率、门禁系统位置及出入口管理策略的角度分别提出以下优化方案:

- 1) 方案一为门禁系统效率提高到 10 s;
- 2) 方案二为门禁系统效率提高到 10 s, 门禁系统位置设置 84 m;
- 3) 方案三为临时开放门禁系统。

从表 2 可以看出, 南门出入口阻塞可以缓解, 优化方案具有较好的健壮性。方案一在南门出入口高峰时刻的优化效果一般, 在高峰时刻、大型活动时刻的优化效果明显, 南门出入口车辆平均逗留时间分别为 60.3 s、155.6 s, 使得南门出入口处于通畅水平。方案二在方案一的基础上, 优化了门禁系统的位置, 南门出入口车辆在大型活动时刻的平均逗留时间为 108.0 s, 与原方案相比降低了 254.6 s。方案三的效果在平峰、高峰及大型活动的场景下都得到最好的优化效果。因此, 在平峰场景下, 南门出入口门禁系统维持现有措施, 即可保障车辆通畅运行水平; 在高峰场景下, 不改变门禁位置时采取方案一, 改变门禁系统位置时采取方案二; 在大型活动场景下, 由于车辆流量过大, 只能临时开放门禁系统, 采取方案三。

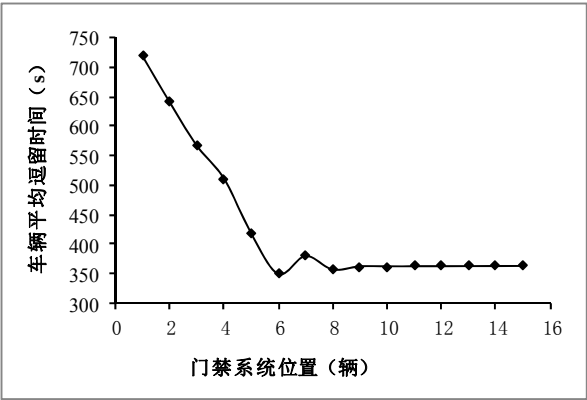


Figure 6. Simulation result for different access control system position of large activity time
图 6. 大型活动时刻不同门禁系统位置仿真结果图

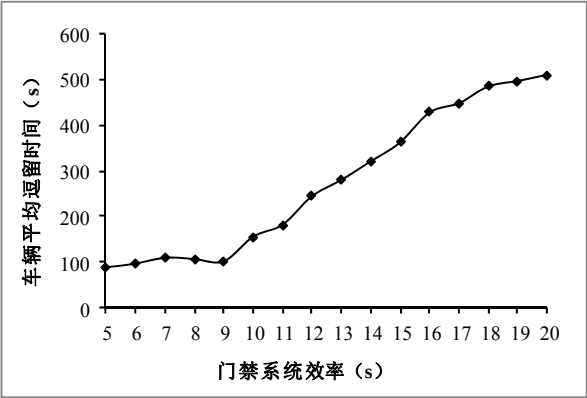


Figure 7. Simulation result for different access control system efficiency of large activity time
图 7. 大型活动时刻不同门禁系统效率仿真结果图

Table 2. Optimization degree of optimization schemes comparison with the original scheme (s)
表 2. 优化方案与原方案对比优化程度(单位: s)

T_p (s)	平峰	高峰	大型活动
原方案	64.2	167.8	362.6
方案一	59.4	60.3	155.6
优化率	7.5%	64.1%	57.1%
方案二	61.0	63.9	108.0
优化率	5.0%	61.9%	70.2%
方案三	39.5	42.3	57.0
优化率	38.5%	74.8%	84.3%

4. 总结

对开向城市主干道的小区出入口车辆排队现象进行仿真,能完整、全面地预测出车辆在信号服务台和门禁服务台排队的各种参数,为门禁系统设计方案的评价与优化提供科学依据。以中山大学南校区南校门为案例,对门禁系统的位置与效率进行重新设计,仿真结果表明方案具有较好的优化效果。论文建立的信号和门禁控制下小区出入口车辆排队模型,尚未考虑行人的影响,在下一步研究中分析行人对信号控制的影响,以提高模型的实用性,有效改善交通拥堵现状。

参考文献 (References)

- [1] GB 50220-95. 城市道路交通规划设计规范[S], 1995.
- [2] 王莹, 黄炜, 李文权. 城市居民小区出入口与道路的安全衔接[J]. 交通标准化, 2005, 7: 136-138.
- [3] 孟娟, 韩印. 特殊 T 型交叉口信号控制优化研究[J]. 道路交通与安全, 2011, 4: 20-23.
- [4] 张萌萌. 单点交叉口鲁棒优化信号配时研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(1): 107-111.
- [5] 李明利, 赵祥模, 张利川. 基于排队状态的单点交叉口动态信号配时算法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(5): 100-103.
- [6] 杨红平. 城市门禁社区兴起的深层机理[J]. 城市问题, 2011, 12: 98-102.
- [7] 杭文, 黄臻. 基于仿真的公路收费站通行能力研究[J]. 交通与计算机, 2008, 25(6): 60-62.
- [8] 潘红, 郭建锋. 高速公路 ETC 收费站仿真模型研究[J]. 公路交通科技, 2007, 5: 151-154.
- [9] 张佃中, 谭小红. 收费广场内车辆排队系统的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 1065-1066.
- [10] R. C. Crain. Simulation using GPSS/H. IEEE: Computer Society, 1997, 1: 182-187.
- [11] 顾昌耀, 王振烈. GPSS 语言及其在运输系统仿真中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1985, 5(1): 27-32.
- [12] 覃煜, 晏克非. 高架道路上匝道连接区车辆运行 GPSS 仿真分析模型[J]. 交通与计算机, 2001, 19(3): 6-10.
- [13] Y. C. Hong. Modeling and simulation of tandem tollbooth operations with max-algebra approach. Future Generation Information Technology, 2009: 138-150.
- [14] 饶激云. 公共交通运营系统 GPSS 仿真研究[D]. 中南大学, 2011.
- [15] K. M. Varadarajan. Transport psychology based cognitive architecture for traffic behavior prediction. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington DC, 5-7 October 2011: 644-649.