

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.08.023

# 自动发卡条件下公路收费车道的通行能力

孙德强, 刘伟铭

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为了详细分析自动发卡条件下影响车辆通过收费车道花费时间的因素, 采用视频录像法对车辆通过过程进行了数据收集, 对车辆通过收费车道过程进行了划分。通过数据拟合方法建立了自动发卡条件下的收费车道驾驶员取卡模型。定量对比了5类车型的驾驶员取卡标准时长, 推导了自动发卡条件下公路收费车道通行能力的计算模型, 给出了自动发卡车条件下各类车型通行能力的换算关系。模型的建立为计算自动发卡车道通行能力提供了依据, 为收费站道路设计和交通标线设计提供了理论基础。

**关键词:** 交通工程; 通行能力; 数据拟合; 公路收费站; 自动发卡机

中图分类号: U491.1<sup>+</sup>14

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2013)08-0129-05

## Capacity of Highway Tollgates under Automatic Card Sender Condition

SUN De-qiang, LIU Wei-ming

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** For detailed analysis of the influencing factors of time length of vehicle passing through toll station under automatic card condition, video recording method is used to collect the data of the process of vehicle passing through the toll lane and to divide this process. The toll lane driver taking card model using the data fitting method is established. Then, based on data fitting method, the model of drivers taking card in toll lane under automatic card condition is established. Based on quantitative comparison of the standard time lengths of five types of vehicle drivers taking cards, the calculation model of highway toll lane capacity under automatic card sender condition is derived, and the conversion relations of capacities of different vehicle types under automatic card condition are given. The established model provided a basis to calculate the capacity of the toll lane with automatic card sender and provided a theoretical basis for toll road design and traffic marking design.

**Key words:** traffic engineering; capacity; data fitting; highway tollgate; automatic card sender

## 0 引言

收费站通行能力一直是交通领域研究的热点问题, 其结论的可靠性直接影响到公路配备收费站数量的合理性和收费站运营管理的科学性。目前设置有自动发卡机<sup>[1]</sup>的收费车道已作为一种重要的收费形式广泛应用在全国很多公路上, 因此, 在我国道路交通快速发展的背景下, 探索自动发卡条件下公路收费站的通行能力具有重要意义。公路收费站通

行能力是指在良好的天气条件、线性通畅的道路条件、交通条件和收费手段下, 车辆排队而收费员始终处于繁忙状况时, 单位时间内所有收费车道所能处理的最大车辆数的总和。美国、日本等国部分学者以等候理论为基础, 将高峰小时流量依车种分配到各收费口, 将收费口的通过流量视为车辆平均到达率, 将通过收费口的时间视为服务时间, 经过等候理论模型推导, 求出了收费口处平均每车等候时间与平均车辆的等候长度, 从而评估收费站的服务

收稿日期: 2012-12-11

作者简介: 孙德强(1990-), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生. (adderway@yeah.net)

水平<sup>[2]</sup>。邓卫等通过建立车辆到达模型和车辆延误模型,给出了收费站的通行能力公式并进行了收费站服务水平分级<sup>[3]</sup>。周刚等将收费站服务率定义为标准车服务时间与标准车离开时间的倒数,进而对人工发车道通行能力进行了分析研究<sup>[4]</sup>。陶鹏飞讨论了车辆行驶侧向净空对驾驶行为的影响<sup>[5]</sup>。但这些研究均未涉及到自动发卡条件下收费站通行能力的研究,同时也未建立车辆通过收费站时长的影响因素与通行能力之间的关系模型。

随着全国公路联网收费的实施和联网收费里程的不断发展,集先进计算机技术、光学技术和图像处理技术于一体的无人值守自动发卡系统在公路入口发卡系统中的应用能有效降低收费站入口车道的运营成本,加快车辆通行速度,为解决当前收费站所存在的普遍问题提供了一个合理可行、行之有效的技术方案。

为详细分析自动发卡条件下影响车辆通过收费车道的因素与收费车道通行能力之间的关系,本文以自动发卡条件下的公路收费站为研究对象,详细分析车辆通过收费站的过程。将整个服务过程分为车辆进站、取卡服务、车辆驶离3个阶段,分别建立车辆进入收费站服务过程中每个阶段的时间模型,将驾驶员取卡位置与自动发卡机的横向距离按一定间隔进行区域划分,进而提出取卡服务时长与横向距离之间的关系模型,同时提出车辆驶离时长与车身长度之间的关系模型,并结合不同车型最小服务时长得到相对标准车的最小服务时长当量系数,最终根据车辆跟驰动力学模型提出自动发卡条件下的公路收费站多车型微观通行能力模型。

## 1 数据获取

为详细了解自动发卡服务的每个过程,采用视频录像法对高速公路收费站3条自动发车道内的车辆通行过程进行数据收集。在纵向位置标定高度 $y$ 值标记,在地面位置绘制横向距离 $x$ 值标记,如图1所示。并分车型统计车辆到达停稳时间、车辆取卡服务时间、车辆驶离时间。统计得到有效样本数据1381例。

本次调查地点位于广清高速公路庆丰收费站,对其设置有自动发卡机的车道进行视频录像。文中所示车辆类型共有5类,其分类标准如表1所示。

根据调查,车道自动发卡机安装高度为0.3 m,其2个卡口和按键到地面的垂直距离分别为1.2 m和2.0 m。车辆类型、驾驶员取卡纵向位置和各类车型的车身长度统计如表2所示。



图1 数据测试区域说明

Fig. 1 Illustration of data collection area

表1 车型分类标准

Tab. 1 Vehicle type classification criterion

车型分类	车型分类标准				主要车型车种
	轴数	轮数	车头高度/m	轴距/m	
1	2	4	<1.3	<3.2	小轿车、吉普车
2	2	4	≥1.3	≥3.2	面包车、小型货车、轻型货车、小型客车
3	2	6	≥1.3	≥3.2	中型客车、大型客车、中型货车
4	3	6-10	≥1.3	≥3.2	大型豪华客车、双层大客车、大型货车、大型拖车
5	>3	>10	≥1.3	≥3.2	重型货车、重型拖车

表2 车辆信息参数

Tab. 2 Vehicle information parameters

车辆信息参数	1类车	2类车	3类车	4类车	5类车
车型比例/%	77.55	14.19	6.23	0.72	1.23
驾驶员肩膀高度均值/m	1.1	1.40	1.9	2.1	2.2
平均车辆长度/m	6	6	10	12	18

对获得的服务时长和离开时长数据进行统计分析,最终得到各类车型的参数均值,如表3所示。

表3 车辆服务时间及离开时间均值统计

Tab. 3 Statistics of average service time and average leaving time of vehicles

参数	1类车	2类车	3类车	4类车	5类车
取卡时长/s	6.2	5.43	6.28	6.83	9.5
离开时长/s	3.42	3.35	4.83	5.22	7.71

通过对比分析发现,1类车型、2类车型、3类车型、4类车型的取卡时长基本相同且明显区别于5类车型,这是由于车辆取卡时长与驾驶员和卡机的相对位置有紧密联系,而自动发卡机的2个卡口设计并未充分满足5类车型的需求,故产生了取卡时间过长的现象。离开时长则随着车型的变化明显不同,这是由于不同车型的车辆长度不同造成的。

同时发现,车辆停车位置对取卡时长也存在影

响。通过现场标记参数设置, 然后对视频中每辆车所处位置及其各阶段花费的时间进行统计, 得到车辆取卡标准时长与自动发卡机之间横向间距及对应取卡时长的统计, 如表 4 所示。

表 4 车辆取卡标准时长与侧向距离统计

Tab. 4 Statistics of standard time lengths of vehicles taking cards and lateral distances

侧向距离 $x/cm$	样本数量	时间均值/s
15	81	5.63
20	103	5.04
25	217	6.02
30	130	6.45
35	127	7.57
40	40	10.41
45	21	13.53
50	18	17.56
55	9	20
60	4	24.25

## 2 模型建立

车辆驶入自动发车道经过减速停车、取卡服务、加速驶离 3 个过程。所研究的收费站通行能力可定义为最小车头时距的倒数。在整个服务过程中, 以自动发卡机前端口作与道路前进方向的垂线为参考线, 当车头到达参考线即认为其已完成停车准备取卡, 车辆取卡服务过程如图 2 所示。

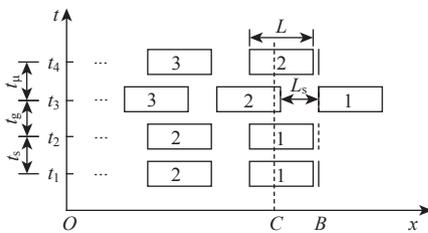


图 2 车辆取卡服务过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of service process of vehicles taking cards

图 2 中, C 为自动发卡机所在位置, B 为自动栏杆机所在位置 (实线代表拦截状态, 虚线表示放行状态), 矩形块内 1、2、3 为车辆编号, L 为车辆长度,  $L_s$  为车辆跟驰安全间距,  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  分别为车辆停稳时刻、车辆取卡结束准备出发时刻、车辆驶离自动栏杆机时刻、下一辆车停稳时刻。 $t_s$ 、 $t_g$ 、 $t_u$  分别为驾驶员取卡服务时间、车辆驶离时间、车头间距损失时间。

### 2.1 驾驶员取卡模型

在自动发车道通行能力计算中, 车辆取卡时

间是影响车辆通过收费站速率的主要因素之一。理想的驾驶员取卡过程包括车辆停稳、按键、取卡、车辆启动几个部分, 其中驾驶员将车辆停稳后准备按键和取卡后准备启动车辆是一个随机过程, 其时间大小与驾驶员对环境的熟悉程度、驾驶员性别及个人偏好有密切关系。按键和取卡时间的影响因素主要为车辆与自动发卡机之间的侧向距离和车辆类型。由于各类车型取卡服务过程具有相似性, 故以 1 类车型数据为基础推导取卡服务时长与车辆取卡位置之间的关系模型。对 1 类车型取卡参数进行处理并绘制散点图, 如图 3 所示。

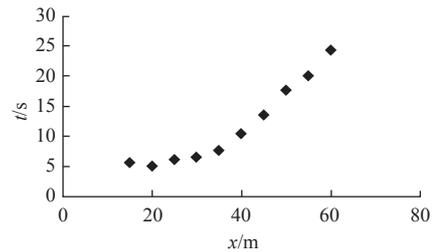


图 3 侧向距离与取卡服务时长实测数据的关系

Fig. 3 Relation between measured lateral distance and service time

由图 3 可以看出, 取卡服务时长与侧向距离存在一定关系。当  $x$  在一定范围内变化时, 服务时间  $t$  会在某一范围值内小幅波动, 当  $x$  大于某一范围时, 服务时间  $t$  会随着  $x$  的增加呈现线性相关关系。临界值  $x_b$  取决于驾驶员所能自由取卡的范围限制, 一旦停车距离  $x$  大于这个限制, 服务时间就会突变为与取卡距离呈线性相关的特性。通过分析取卡距离与服务时间之间的关系, 车辆取卡服务时间可表示为:

$$t_{s,i} = \begin{cases} t_i + \Delta, & x_{\min} \leq x \leq x_b \\ \alpha(x - x_b) + t_i + \Delta, & x \geq x_b, \alpha > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $t_{s,i}$  为自动发卡系统中  $i$  类车辆的服务时间;  $\alpha$  为待定参数;  $x$  为车辆取卡时与自动发卡机的侧向距离;  $x_{\min}$  为车辆与自动发卡机的最小侧向距离;  $x_b$  为驾驶员自由取卡的限制距离;  $\Delta$  为驾驶员取卡时长的随机系数。

车辆类型是影响车辆通过收费站时间长短的重要因素, 主要表现为车辆在驶离过程中, 车身长度占据了比标准小汽车更大的空间, 它在驶离自动发车道自动栏杆机位置时用了比标准小汽车更多的时间。根据车辆动力学模型, 车辆在启动加速过程中, 速度由 0 逐步变为最大, 则有:

$$L_i = \frac{1}{2} a_i t_g^2, \quad (2)$$

式中,  $L_i$  为第  $i$  类车型的车身长度;  $a_i$  为车辆加速驶离过程中的加速度值;  $t_g$  为车辆取卡结束后驶离自动发车道 (即车辆尾部通过自动栏杆机) 所花费的时间。

对式 (2) 进行变换, 则有:

$$t_g = \sqrt{\frac{2L_i}{a_i}} \quad (3)$$

前车顺利通过收费站后, 跟驰车辆需要经过一段距离才能够停稳取卡, 这个过程为车辆安全间距损失时间, 是由前后 2 辆车之间的安全距离决定的。设车辆之间的安全距离为  $L_s$ , 车辆经历了先加速后减速的过程, 其加速度大小为  $a_i$ , 车辆安全间距损失时间为  $t_1$ , 则有下列关系:

$$\frac{1}{2}L_s = \frac{1}{2}a_i \left(\frac{1}{2}t_1\right)^2 \quad (4)$$

对式 (4) 进行变换, 则有:

$$t_1 = 2\sqrt{\frac{L_s}{a_i}} \quad (5)$$

## 2.2 基于最小服务时间的实际通行能力微观模型

由式 (1)、(3)、(4) 得到了取卡服务时长、车辆驶离时长、损失时间时长。因此, 第  $i$  类车的最低服务时间  $T_i$  可表示为:

$$T_i = t_{s,i}(x, \tau_i) + t_g(\delta_i) + t_1 \quad (6)$$

式中,  $t_s(x, \tau_i)$  为取卡服务时间函数;  $x$  为车辆驾驶员一侧边缘到自动发卡机按钮的侧向距离;  $\tau_i$  为第  $i$  车型对取卡时间的影响因子;  $t_g(\delta_i)$  为车辆驶离时间函数, 其中  $\delta_i$  为第  $i$  类车型对车辆驶离时间的影响因子;  $t_1$  为车辆安全间距损失时间。

根据最短服务时间与通行能力之间的关系, 可得:

$$C_f \sum_{i=1}^n \xi_i T_i \leq 3600 \quad (7)$$

式中,  $C_f$  为实际通行能力;  $n$  为车型种类的数量;  $\xi_i$  为第  $i$  类车型在车队中所占的比例。

将式 (1)、(3)、(5)、(6) 代入式 (7), 自动发卡条件下的车道实际通行能力可表达为:

$$C_f = \begin{cases} \frac{3600}{\sum_i^n \xi_i \left( t_i + \Delta + \sqrt{\frac{2L_i}{a_i}} + 2\sqrt{\frac{L_s}{a_i}} \right)}, & x_{\min} \leq x < x_b \\ \frac{3600}{\sum_i^n \xi_i \left[ \alpha(x - x_b) + t_i + \Delta + \sqrt{\frac{2L_i}{a_i}} + 2\sqrt{\frac{L_s}{a_i}} \right]}, & x \geq x_b \end{cases} \quad (8)$$

收费站的通行能力是由车辆通行收费站所占用的有效时间决定的, 因而对于不同的车型其所占用的有效时间是不同的。根据通行能力的计算方法和不同类型车辆所占用的有效时间, 可得不同车辆类型的通行能力转化为标准车通行能力的转化率  $\eta_i$  的表达式:

$$\eta_i = \frac{T_i}{T_0} \quad (9)$$

## 3 模型应用

### 3.1 取卡服务模型中参数的取值

#### (1) 取卡服务过程

对于收费站通行能力微观模型中所涉及到的参数, 主要影响因素为车辆车身长度、安全距离长度和系数  $\alpha$  的标定。而  $t_i$  可认为是常数项。利用表 4 中的统计数据进行数据拟合, 得到式 (1) 中所示的参数  $\alpha = 0.722$ 、 $x_b = 35$ 、 $t_i = 6.2$ 。计算得到标准车的取卡时间模型为:

$$t_{s,i} = \begin{cases} 6.2 + \Delta, & 10 \leq x \leq 35 \\ 0.722(x - 35) + 6.2 + \Delta, & x \geq 35 \end{cases} \quad (10)$$

对于不同车型, 其  $a$  与的  $x_b$  值也会略有不同。

#### (2) 车辆驶离过程

根据表 2 和表 3 中数据, 分车型分别代入式 (2), 求得 5 类车型离开过程的启动平均加速度分别为  $a_1 = 1.03 \text{ m/s}^2$ 、 $a_2 = 1.07 \text{ m/s}^2$ 、 $a_3 = 0.86 \text{ m/s}^2$ 、 $a_4 = 0.88 \text{ m/s}^2$ 、 $a_5 = 0.61 \text{ m/s}^2$ 。由此可见, 1 类车、2 类车的启动加速度较大, 而 3 类车、4 类车和 5 类车则启动加速度偏小, 这也是影响车辆通过车道花费时间的重要因素之一。

### 3.2 各类车型通行能力的换算系数

理想条件下车辆通过服务时间的取值可定义为: 当车辆停靠位置到自动发卡机的横向距离小于  $x_b$ , 即处于稳定区域内; 车辆车头间距损失时间为 2 s, 则分别可以得到  $T_1 = 11.62 \text{ s}$ 、 $T_2 = 10.78 \text{ s}$ 、 $T_3 = 13.11 \text{ s}$ 、 $T_4 = 14.05 \text{ s}$ 、 $T_5 = 19.21 \text{ s}$ 。每类车型在自动发卡条件下的车道理想通行能力分别为  $C_1 = 310 \text{ pcu/h}$ 、 $C_2 = 334 \text{ pcu/h}$ 、 $C_3 = 275 \text{ pcu/h}$ 、 $C_4 = 256 \text{ pcu/h}$ 、 $C_5 = 187 \text{ pcu/h}$ , 则可得到 5 类车型通行能力的换算系数  $\eta_1 = 1$ 、 $\eta_2 = 0.93$ 、 $\eta_3 = 1.13$ 、 $\eta_4 = 1.21$ 、 $\eta_5 = 1.66$ 。将表 2 中车型比例与上文的最小服务时间带入式 (7), 得到在该车型比例条件下通过收费车道的实际通行能力  $C_f = 308 \text{ pcu/h}$ 。

## 4 结论

本文研究了自动发卡条件下完成取卡服务的整

个过程。将侧向距离因素引入通行能力模型计算中,结合各车型的特点,阐述了车型对通行能力影响的主要因素,并提出了结合车型变化的自动发卡条件下的公路收费车道通行能力计算模型,计算得到了自动发卡车道的通行能力。模型应用表明,在自动发卡机的设置位置满足安全的前提下,应能使驾驶员方便地停靠在距离其 35 cm 以内的位置。同时得出了在理想侧向距离条件下车辆驶离过程中所花费时间的主要影响因素为车身长度,并给出了不同车型通行能力的换算系数。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 曹德洪,顾汉庭,胡晓,等. 新型多功能自动发卡机收费技术在高速公路的应用 [J]. 公路, 2010 (9): 232 - 235.  
CAO De-hong, GU Han-ting, HU Xiao, et al. A New Multi-functional Automatic Card Sender Technology Used for Expressway Toll Collection [J]. Highway, 2010 (9): 232 - 235.
- [2] 刘伟铭. 道路收费系统的优化模型及算法: 路网收费费率、收费道路网及收费系统的优化 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
LIU Wei-ming. Optimization Model and Algorithm of Road Pricing System: Optimization of Road Network Toll Rate, Tolling Highway Network and Charge System [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [3] 邓卫,吴海翔,王炜. 公路收费口通行能力研究 [J]. 中国公路学报, 2000, 13 (2): 87 - 90.  
DENG Wei, WU Hai-xiang, WANG Wei. Research on the Capacity of Highway Tollgates [J], China Journal of Highway and Transport, 2000, 13 (2): 87 - 90.
- [4] 周刚,常成利. 公路收费站通行能力研究 [J]. 公路交通科技, 2001, 18 (3): 56 - 59.  
ZHOU Gang, CHANG Cheng-li. Expressway Tollgate Capacity Study [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18 (3): 56 - 59.
- [5] 陶鹏飞. 考虑侧向车影响的跟驰行为分析与建模 [D]. 吉林: 吉林大学, 2009.  
TAO Peng-fei. Analysis and Modeling on Car-following Behavior Considering Impact of Lateral Vehicles [D]. Jilin: Jilin University, 2009.
- [6] 潘全如,朱翼隽. 排队论在收费站设计与管理中应用 [J]. 运筹学学报, 2009, 13 (3): 95 - 102.  
PAN Quan-ru, ZHU Yi-jun. The Application of Queuing Theory in Toll Station Design and Management [J]. Operations Research Transactions, 2009, 13 (3): 95 - 102.
- [7] 王殿海,金盛. 车辆跟驰行为建模的回顾与展望 [J]. 中国公路学报, 2012, 25 (1): 115 - 127.  
WANG Dian-hai, JIN Sheng. Review and Outlook of Modeling of Car Following Behavior [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (1): 115 - 127.
- [8] 刘斌,潘红,陆小波. ETC 车道数对收费站服务水平的影响仿真研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (1): 120 - 123, 150.  
LIU Bin, PAN Hong, LU Xiao-bo. Simulation of Effect of Lane Number on Service Level of ETC Toll Station [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (1): 120 - 123, 150.
- [9] BRACKSTONE M, MCDONALD M. Car-following: A Historical Review [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 1999, 2 (4): 181 - 196.
- [10] WANG Dian-hai, YANG Shao-hui, CHU Lian-yu. Modeling Car-following Dynamic During the Starting and Stopping Process Based on a Spring System Model [J]. Tsinghua Science and Technology, 2004, 9 (6): 643 - 652.
- [11] 黄海鸥,张玮. 内河航道交通流分析中最小统计间隔时间的选定 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2007, 31 (4): 573 - 576.  
HUANG Hai-ou, ZHANG Wei. Measurement for Inland Waterway Transport Traffic Analysis [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2007, 31 (4): 573 - 576.
- [12] 黄海鸥,张玮,李骁春. 基于排队理论的京杭运河船闸通过能力研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33 (3): 604 - 607.  
HUANG Hai-ou, ZHANG Wei, LI Xiao-chun. Research on Capacity of Locks on the Grand Canal with Queuing Theory [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2009, 33 (3): 604 - 607.
- [13] 胡红,刘小明,杨孝宽. 基于最小安全间距的应急交通疏散车辆跟驰模型 [J]. 北京工业大学学报, 2007, 33 (10): 1070 - 1074.  
HU Hong, LIU Xiao-ming, YANG Xiao-kuan. A Car-following Model of Emergency Evacuation Based on Minimum Safety Distance [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33 (10): 1070 - 1074.