

# 高速公路收费站通行能力分析

廖 固

(湖南省高速公路管理局, 湖南 长沙 410001)

[摘 要] 高等级公路收费站的通行能力直接影响着路段通行能力, 从而在总体上制约着公路的交通运行状况。因此提高高等级公路收费站的通行能力和服务水平, 是改善高等级公路通行能力及服务水平的有效方法。本文根据高等级公路收费站交通流特性的分析, 建立了收费站的排队模型, 计算出了同一条车道在不同比例下的 ETC车辆条件下和多车道情况下不同条数 ETC车道的收费站的通行能力。

[关键词] 高速公路; 收费站; 通行能力

[中图分类号] U 491.1<sup>+</sup>14

[文献标识码] B

[文章编号] 1674-0610(2010)03-0153-03

## Analysis of Expressway Tollgate Capacity

LIAO Gu

(Hunan Expressway Administration Bureau, Changsha, Hunan 410001, China)

[Key words] expressway; tollgate; capacity

### 0 引言

公路收费站是公路交通流的瓶颈, 收费站的通行能力直接影响着路段通行能力, 从而在总体上制约着收费公路的交通运行状况。因此研究收费站的通行能力是解决道路通畅的保证, 是规划建设收费站的依是进行收费站设计和经济评价的基础, 也是研究各种收费系统的依据。传统的人工收费方式使得车辆在经过收费站的时候必须停车交费在路段上产生了瓶颈, 使得路段的通行能力降低并产生车辆经过收费站的延误。

目前采用 ETC(Electric Toll Collection)收费系统不仅大大降低了车辆的延误, 同时也提高了收费站的通行能力减少车辆在排队等候中的尾气排放从而改善了环境。如果在全部收费车道实行 ETC收费, 收费站的通行能力就与路段的通行能力相当驾驶员几乎感觉不到延误, 但是鉴于我国的经济水平还难以实现全车道 ETC收费。因此在一个收费站内将某些收费车道的传统收费方式改变为现在的 ETC收费方式才是最有效的方法。

ETC使用率指配备 ETC电子设备的车辆占总车辆的百分比。本文主要研究 ETC车道数量对收费站服务水平的影响, 对不同 ETC使用率情况下的收费站平均延误进行计算, 得出 ETC使用率对收费

站整体服务水平的影响分析, 为高速公路 ETC车道布设提供参考依据。

### 1 高速公路收费站的交通特性

高速公路收费站通行能力研究的基础与前提是利用数学方法来描述交通流的具体特征, 在研究上最早采用的是概率论, 其后出现了跟驰理论、流体力学理论和车队排队理论。在高速公路收费站通行能力研究中, 主要采用概率论和车队排队理论。

#### 1.1 车辆到达分布

根据交通流理论, 交通量较小的路段上车辆的到达分布符合泊松分布(Poisson), 即一定时间间隔内到达收费站的车辆分布符合泊松流。公路路段上的交通量一般较城市道路路段交通量小, 可以用泊松分布描述车辆的到达。

$\Delta$  时间间隔内到达收费站的车辆数为  $n$  的概率为:

$$P(n) = \frac{(\lambda \Delta t)^n e^{-\lambda \Delta t}}{n!} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为车辆的单位时间平均到达率, 辆 / h

通过现场观测, 可以发现车辆到达收费站(某时段)符合以下条件: ① 车辆到达是随机的; ② 在任意小的时间段内车辆到达率与时间的长度成正比; ③ 任意小的时间段中车辆到达的概率不受以

前到达的影响。

当车辆到达比较拥挤,自由行驶机会不多时,采用二项分布来描述车辆到达规律。

$$P_k = C_k^n \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} \quad (k=0, 1, 2, \dots, n)$$

(2)

式中:  $P_k$ 为在计数间隔  $t$  内到达  $k$  辆车的概率;  $\lambda$  为平均车辆到达率 (辆 / s);  $t$  为每个计数间隔持续时间;  $n$  为正整数。

1.2 车辆服务时间分布

据有关文献分析,公路收费口车辆服务时间的分布假设服从负指数分布,但该假设应考虑:从收费员的角度研究服务时间;对车型未加考虑;认为收费员对服务时间的影响大于车型对服务时间的影响。这种假设虽有一定道理,但其局限性亦很明显,这是由于:

① 从现场调查数据的统计结果可以发现服务时间的分布并不完全服从负指数分布。图 1 为某收费站一条收费车道小汽车服务时间分布统计图。

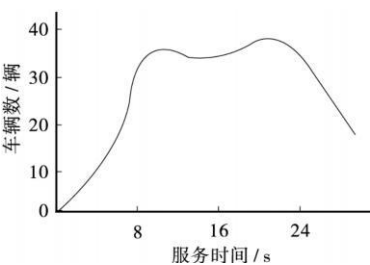


图 1 服务时间分布

(2) 车型之间的差异对服务时间的影响在公式中未能体现,表 1 为某收费站一条收费道各种车型服务时间的调查统计结果,此处将服务时间相近的车型归为一类,简单分为三种车型。从表中可以看出不同车型的服务时间之间存在较大差异。

表 1 分车型服务时间

车型	服务时间值 / s
小型车	8 10
中型车	10 47
大型车	58

1.3 车辆离开时间

根据离开时间定义,不同车型的离开时间明显存在差异,鉴于交通流中特大型车比例很小,调查中得到的样本数据太少,不能说明一般情况,因此表 2 仅列出了小型车和大中型车两种车型的离开时间均值和方差。

表 2 不同车型离开时间统计参数

车型	平均收费时间 / s	平均收费方差
小型车	5.5	1.83
大中型车	8.3	5.5

2 公路收费站车辆延误分析

车辆通过收费站的延误时间是进行收费站车辆折算系数研究和评价收费站服务水平研究的重要依据之一。当车辆通过收费站时,其延误主要包括以下几个部分。

① 车辆进入收费站的减速时间:

$$t = \frac{v}{3.6a}$$

(3)

② 车辆在收费站的平均逗留时间:

$$W = E\{S\} + W_q$$

(4)

③ 车辆驶离收费站的加速时间:

$$t = \frac{v}{3.6a}$$

(5)

以上式中:  $v$  为正常车流车速, km / h;  $a$  为车辆的减速度, m / s<sup>2</sup>;  $a$  为车辆的加速度, m / s<sup>2</sup>;  $W_q$  为平均排队时间,  $E\{S\}$  为服务时间期望值,  $s$  平均延误时间主要通过调查车辆通过收费站上下游两个观测断面的时间差获取,在实际应用中,式 (3)、式 (5) 的计算时间在不同交通量条件下一般无大的差异,但不同交通量会导致平均逗留时间明显不同,式 (4) 是延误计算的重点。

3 收费站通行能力计算

3.1 收费站车辆折算系数

收费站的通行能力分析需要度量不同车型对收费通道通行能力的影响程度,通常以车辆折算度量其影响程度。根据调查得知,主线收费站的交通组成与路段一致,小型车在交通流中的比例远高于其他车辆 (约 70%)。因此,收费站的车辆折算系数标准车型选用小型车。

从前面的研究可知,不同车型对收费站通行能力的影响程度主要表现为离开时间 (因为不再区分不同车型的服务时间分布差异性) 的不同。因此,在收费站通行能力研究中,车辆折算系数的计算标准为收费时间,根据收费时间的不同,计算得到适合某收费站通行能力分析的车辆折算系数,如表 3 所示,其中特大型车的折算系数为外推计算而得。

表 3 收费站车辆折算系数

车型	折算系数
小型车	1 0
大中型车	1 3
特大型车	1 7

3.2 单通道基本通行能力

① 通过的车全部为人工收费车辆 (即不是 ETC 收费车辆)。

收费车道的基本通行能力是指道路与交通处于理想情况下, 每一条收费车道在单位时间内能够通过的最大交通量。按下面公式计算

$$C_b=\frac{3\,600}{T_s+T_g}$$
 (6)

式中,  $C_b$ 为收费车道的基本通行能力;  $T$ 为标准车服务时间;  $T_g$ 为标准车离开时间。

收费站的理想道路条件是指收费车道宽度不小于 3 m; 收费岛的宽度不小于 2.2 m; 收费岛的长度不小于 30 m; 收费广场具有开阔的视野, 良好的平面线形和路面情况。理想的交通条件是指车辆组成为单一的标准车, 即小型车, 车辆之间保持适当的最小车头时距, 且无任何方向的干扰。实际观测的收费车道一般均能满足理想的道路条件。利用小型车的服务时间和离开时间可以计算出不同类型收费站收费车道的基本通行能力。由公式可知: 收费车道的基本通行能力与收费时间成反比。

② 通过的车辆全部为 ETC 车辆。

如果通过收费站的车辆全部为 ETC 车辆, 那么车辆通过收费站时就没有停留, 既没有服务时间, 那么此时所用的时间即为车辆正常通过收费站的时间, 此时收费站的通行能力为:

$$C=\frac{3\,600}{t}$$
 (7)

③ 通过的车辆中有一定比例的 ETC 车。

在实际情况下, 并不是所有的情况都是理想情况, 即全部为普通车辆和全部为 ETC 车辆。往往是 2 种车辆以一定的比例存在。

那么, 根据上面的公式可得: 假设 ETC 车辆所占的比例为  $w$  那么普通车辆为  $(1-w)$ 。由此可得一般情况下收费站的通行能力为:

$$C_c=C*w+C_b*(1-w)$$
 (8)

3.3 多通道通行能力

从以上分析可知: 在具有多通道情况下, 选择 M/G/K 排队模型可较好地描述收费站的实际运行状态, 下面是 M/G/K 模型的统计参数计算公式。

平均排队时间:

$$w_q=\frac{D[S+G]+[E[S+G]]^2}{2E[S+G]+[K-\lambda E[S+G]]}\cdot\left[1+\sum_{i=0}^{K-1}\frac{(K-1)! [K-\lambda E[S+G]]}{i! [\lambda E[S+G]]^{K-1}}\right]$$
 (9)

平均逗留时间:  $W=E[S+G]+W_q$

平均排队长度:

$$l_q=\frac{\lambda D[S+G]+\lambda [E[S+G]]^2}{2E[S+G]+[K-\lambda E[S+G]]}\cdot\left[1+\sum_{i=0}^{K-1}\frac{(K-1)! [K-\lambda E[S+G]]}{i! [\lambda E[S+G]]^{K-1}}\right]$$
 (10)

由于服务时间和离开时间均服从正态分布, 因此下面公式成立:

$$E[S+G]=E[S]+E[G]$$
$$E[S+G]=E[S]+E[G]$$

式中:  $\lambda$  为平均来车强度;  $K$  为收费车道数;  $E[S]$  为服务时间期望值;  $E[G]$  为离开时间期望值;  $E[S]$  为服务时间的方差;  $E[G]$  为离开时间的方差;

根据 M/G/K 排队论模型, 利用收费站服务时间和离开时间的期望和方差, 可以计算出各种收费站在不同收费车道数以及不同排队程度下可以处理的最大车辆数。表 4 是根据某高等级公路某收费站的调查结果所得的计算值。

从表 4 和的结果可以看出, 随着收费通道数的

表 4 主线收费站可以服务的最大小时流量 (辆 / h)

车道 K	平均排队车辆数 / 辆							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	160	171	180	187	195	201	205	208
2	326	346	357	365	372	378	383	386
3	489	516	537	552	563	572	579	583
4	662	697	721	739	751	759	765	769
5	845	881	912	930	944	953	958	961
6	1 031	1 089	1 132	1 168	1 189	1 208	1 219	1 226

(下转第 172 页)

要根据实际应用路段的交通特性及安全防护要求,对碰撞试验条件进行研究确定。

[参考文献]

[ 1 ] JTG/T F83- 01- 2004 高速公路护栏安全性能评价标准[ S].  
[ 2 ] JTG D81- 2006 公路交通安全设施设计规范[ S].  
[ 3 ] JTG/T D81- 2006 公路交通安全设施设计细则[ S].  
[ 4 ] 交通部公路科学研究院. 高速公路护栏实车碰撞试验方法研究[ R]. 北京, 2002  
[ 5 ] 于树平, 乔希永. 高速公路安全护栏试验方法及评价标准的分析研究[ A]. 中国汽车工程学会第七届汽车安全技术会议论

文集[ C]. 大连, 2002

[ 6 ] 余志生. 汽车理论[ M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
[ 7 ] 张京明, 江浩斌. 汽车工程概论[ M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.  
[ 8 ] 刘少源. 高速公路汽车与护栏碰撞的动力特性研究[ D]. 清华大学, 1994.  
[ 9 ] 罗 恒. 常德高速公路新型砼护栏研究数值模拟分析[ J]. 公路工程, 2008 33(4): 25—28  
[ 10 ] 方坚宇, 丛银霞, 冯雄辉, 等. 常吉混凝土桥梁防侧翻景观护栏设计[ J]. 公路工程, 2008 33(6): 75—78  
[ 11 ] 方坚宇, 张 颖, 刘小勇, 等. 凤凰型美观混凝土护栏开发研究[ J]. 公路工程, 2008 33(6): 126—129

(上接第 155 页)

成倍增加,可以服务的车辆数并不呈相同比例地增加,而是要稍微偏大一些,这是由于车辆到达后在有多个通道时,车辆的分配不是简单地按通道数平均分配,因此用 M/G/K模型更能表现收费通道车辆分配的实际情况。同时研究表明,在不同类型的收费站中,在相同的收费车道数下,排队车辆数不同导致收费站能处理的车辆数也不同,随着排队车辆数的增加,收费站能够处理的车辆数也在不断增加。平均排队车辆数从 1辆增加到 4辆时,收费站的通行能力增加幅度较大;从 4辆到 6辆时,收费站的通行能力增加幅度趋缓;从 6辆到 8辆时,收费站的通行能力增加幅度进一步减缓。

4 收费站服务水平等级的确定

收费站的服务水平是描述收费站内部交通流的运行条件对司机与乘客感受的一种质量标准。一般评价收费站服务水平的标准有:收费时间的长短、车辆在收费站延误时间的长短、排队长度的长短。研究表明:收费时间的长短受收费制式、收费设备以及收费人员素质等的影响较大。车辆在收费站的延误时间的长短虽然可以较好地评价收费站的交通条件质量,但易造成在相同的延误下,不同类型收费站的服务水平不一致且延误数据不易获得、精度低。目前我国高等级公路收费站的服务水平可以采用车辆的平均排队等候时间来划分服务水平。

服务水平 A 车辆到达,可随时进入收费通道接受服务,无须排队等候;

服务水平 B 收费站前短时间内有车队形成,少部分车辆需停等,大部分车辆可无须停等进入收费站接受服务;

服务水平 C 收费站前逐渐形成车队,平均每个收费通道前有一辆车排队等候,驾驶员有延滞感;

服务水平 D 收费站前平均有三辆车排队等候,到达车辆须排队缓慢驶入收费站;

服务水平 E 收费站前平均有十辆车排队等候,驾驶员逐渐难以忍受长时间地等候;

服务水平 F 收费站前车辆排成长队,且后续车辆不断到达,服务率有限。

在公路收费站的规划、设计或评价时,根据标准延误流量曲线,通过各级服务水平的修正得到服务通行能力。在实际应用过程中,通常采用高峰小时的 C级服务通行能力作为设计依据, D级服务通行能力作为评价依据。

5 结语

本文通过某高等级公路收费站的实地调查数据的分析,给出了收费站在不同的 ETC使用率情况下的收费站的通行能力。并通过实际数据得到了在不同的 ETC车道数情况下收费站的通行能力。在公路收费站的规划、设计或评价时,还可以结合收费站的受阻车辆、延误时间、排队长度、设计交通量、车种组成、ETC使用率、ETC收费道数等因素综合考虑,通过分析以得到符合实际的服务通行能力。

[参考文献]

[ 1 ] weme rbrilon traffic flow analysis beyond traditional methods[ C]. Fourth international symposium on highway capacity 2000 26—40.  
[ 2 ] 陈宽民. 道路通行能力分析[ M]. 北京: 人民交通出版社, 2003  
[ 3 ] 谢 军. 高速公路通行能力分析与服务评价研究[ D]. 西安: 长安大学, 2007.  
[ 4 ] 张智勇, 荣 建, 郑 弘, 等. 基于 M/G/K排队模型的北京地区高速公路收费站通行能力研究[ J]. 公路, 2001 (7).  
[ 5 ] 曹园园. 高速公路收费站的通行能力和服务水平[ J]. 北京公路, 2004 6