

# 高速公路收费广场收费车道配置研究

吴春雷, 常玉林

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

[摘 要] 为建设合理规模的高速公路收费车道提供科学的理论依据, 运用流体力学模拟理论和排队论建立了车辆通过收费广场的延误时间模型。以车辆通过收费广场的总延误时间作为目标函数, 总延误时间最小即收费车道个数最优。在进入过渡段和离开过渡段将车流比拟为流体, 通过交通流量、交通流速、交通流密度三者间关系宏观描述车流聚集和消散的过程。对应于第 2 阶段, 依据排队论的基本原理, 建立关于收费车道个数的模型。然后建立总延误时间关于收费车道个数  $n$  的函数, 通过表格和图形直观地得到最优的收费车道设置个数。流体力学理论建立的延误时间模型为收费广场收费车道配置提供了计算依据。

[关键词] 交通工程; 车道配置; 流体力学; 收费广场; 收费站设计

[中图分类号] U412.36+6.1 [文献标识码] A [文章编号] 1002-1205(2008)05-0172-04

## Configuration Research of Tollgate on Freeway

WU Chunlei, CHANG Yulin

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

[Abstract] For the sake of providing scientific theoretical basis for establishing appropriate counts of toll booth on freeway, a delay time model is established by hydromechanics theory and queuing theory. The objective function of the model is the average total delay time required for a vehicle to pass the toll plaza. When the average total delay time is minimized, then the number of toll booths is optimized. In the fan-in transition stage and fan-out transition stage, traffic flow is compared to fluid, making use of the relationship between traffic volume, traffic density and traffic speed to discuss how the traffic disperses and gathers at the transition area. For the second stage, getting help from queuing theory, build certain equations. Then, building up the objective function of average total delay time concerning about the number of toll booths. The last, with the aid of table and figure, we get the optimized numbers of toll booth. Thereby, this delay time model established by hydromechanics theory will provide an academic basis for determining the number of toll booths.

[Key words] traffic engineering; tollbooth configuration; hydromechanics; toll plaza; tollbooth design

根据国际经验, 在有效经营的情况下, 数量适中、设备较为简单的收费设施的运营成本与收入比为: 5%~10%, 如果收费设施的数量大于所需数量时, 运营成本与收入比增加到 10%~15%, 如果经营不善, 则可能高达 30%以上。而收费广场的规模及所需的车道数是由交通量(平均来车间隔)、每个收费车道的通行能力和服务水平 3 个因素决定的。通过对收费通行能力及服务水平研究, 可以为建设合理规模的高速公路收费站提供科学的理论依据, 为有效利用有限的公路建设资金奠定基础。

我国关于收费站通行能力的研究尚处于起步阶段, 并且研究基本上都集中在服务时间的研究上<sup>[1-3]</sup>, 运用排队论, 以收费车道处的平均排队长度作为指标来设计收费站的通行能力。但是对于收费广场则研究较少, 车辆经过收费广场的过程并不仅仅是经过收费站的过程, 还应包括进入收费站前的过渡段以及离开收费站后的过渡段。因此车辆通过收费广场的过程可以划分为 3 个阶段: 进入过渡段、等候服务段、离开过渡段。包括 2 个过渡段的收费广场见图 1。

[收稿日期] 2008-04-22

[作者简介] 吴春雷(1984-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事交通规划与管理方面研究。

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

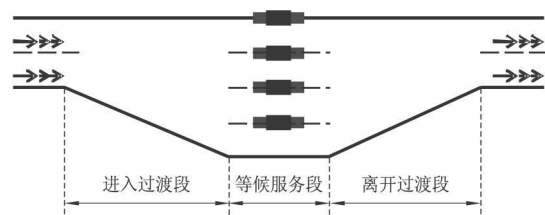


图 1 收费广场(单方向)  
Figure 1 the layout of toll plaza(unilateral direction)

图 1 显示了单方向收费广场的布局及阶段划分, 另一方向与图 1 对称。当车辆进入收费广场时, 进入第一阶段——进入过渡段, 在进入过渡区域由于收费车道数的增加, 范围变的宽阔。接着, 进入等候服务段, 进行排队和缴费。最后, 通过离开过渡区域进入高速公路继续行驶。由于 3 个阶段车辆行为是不同的, 因此需要用 3 个子模型分别计算各段消耗的时间。

总模型可以划分为 3 个子模型, 每个子模型之间通过交通流量  $q$  和流速  $v$  相互联系。交通流通过第 1 个阶段和第 3 个阶段, 流量是不变的。但是在第 2 阶段, 由于收费站的存在, 在某一瞬时,  $q$  有可能是小于  $q_0$  的。每一阶段对应一个时间, 因此总时间为:

$$T = T_n + T_w + T_u \tag{1}$$

式中:  $T_n$  为车流在进入过渡段消耗的平均时间,  $h$   $T_w$  为车流在等候服务段消耗的平均时间,  $h$   $T_u$  为车流在离开过渡段消耗的平均时间,  $h$   $T$  为车流通过收费广场消耗的总平均时间,  $h$

1 模型建立

对进入段子模型、等候服务段子模型、离开段子模型分别描述。

1.1 进入段子模型 (见图 2)

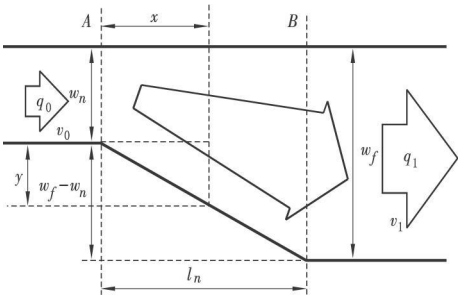


图 2 进入段子模型(单方向)  
Figure 2 the layout of fan in submodel(unilateral direction)

严格控制出入; ② 汽车专用, 限速行驶; ③ 设中央分隔带, 分道行驶。因此, 高速公路交通流在一定程度上具有流动、波动、激波、压缩及扩散等流体属性。由于考虑的是主线带收费广场的大型收费站, 交通流密度较大, 因此使用流体力学模拟理论近似将高速公路交通流视为连续流进行研究。流体力学模拟理论运用流体力学的基本原理, 模拟流体的连续性方程, 建立车流的连续性方程。把车流密度的疏密变化比拟成水波的起伏而抽象为车流波。假设交通流为自由流, 交通流以初始交通流量  $q_0$  和初始交通流速  $v_0$  进入收费广场, 根据交通流理论<sup>[4-9]</sup>, 有:

$$q = v \cdot k \tag{2}$$

当交通流在过渡段中某点时, 交通流量、交通流速、交通流密度关系为:

$$q = v(x) \cdot k(x) \tag{3}$$

式中:  $v(x)$  为关于  $x$  的交通流速,  $km/h$   $k(x)$  为关于  $x$  的交通流密度,  $pcu/km$

因为交通流量是不变的, 在  $x$  处的交通流密度和过渡区域宽度关系为:

$$k \cdot w_n = k(x) \cdot w(x) \tag{4}$$

式中:  $w(x)$  为在  $x$  处的过渡区域宽度,  $km$

根据几何知识, 可以建立方程:

$$\frac{y}{x} = \frac{w_f - w_n}{h} \tag{5}$$

$$w(x) = w_n + y \tag{6}$$

过渡区域总宽度和过渡段长度与收费站个数  $n$  的关系为:

$$w_f = n \cdot d \tag{7}$$

$$h = n \cdot a_1 \tag{8}$$

式中:  $a_1$  为用于计算  $h$  的系数, 一般取  $0.01 \sim 0.025$ , 此处取  $0.02$   $d$  为单方向收费车道数目, 个。

根据上面的等式可以求出  $v(x)$ , 那么可以求出  $T_n$

$$dT = \frac{dx}{v(x)} \tag{9}$$

$$T_n = \int_0^{l_n} dT \tag{10}$$

根据式 (2) ~ 式 (10), 可以得出  $T_n$  的最终表达式为:

$$T_n = \frac{n \cdot w_n \cdot a_1}{v_0 \cdot (n \cdot d - w_n)} \left[ \ln \frac{n \cdot d}{w_n} \right] \tag{11}$$

1.2 等候服务段子模型

图 3 中变量的意义与图 2 中一样, 车流量  $q$  平

均分配到各个收费路口,然后经过排队缴费,以车流量  $q$  离开收费路口,进入离开过渡段。因为在一定时间通过第 1 阶段的交通流量是不变的,因此,  $q = q_0$ 。根据流体力学模型,车流量平均分配到每个收费路口,因此每个收费路口交通流量为  $q/n$ 。根据排队论,每个收费路口服从 M/M/1 系统,则第 2 阶段就是多个 M/M/1 系统。如果知道了平均到达率  $\lambda$  和平均服务率  $\mu$ ,就可以算出车辆在第 2 阶段消耗的平均时间,其公式为<sup>[6]</sup>:

$$T_w = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

(12)

由于  $\lambda = q/n$  因此可以得出车辆在第 2 阶段消耗的平均时间,为:

$$T_w = \frac{n}{n\mu - q}$$

(13)

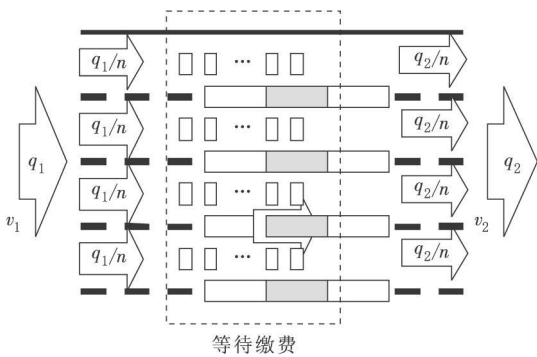


图 3 等候服务段(单方向)

Figure 3 sketch map of wait and serve submodel (unilateral direction)

考虑到系统状态必须稳定,需要假设平均到达率  $\lambda$  总是小于平均服务率  $\mu$  的,否则排队系统是不稳定的,排队将会越来越长,此阶段消耗的时间将无限大。上面已经给出  $\lambda = q/n$  那么收费亭个数  $n$  的约束条件为<sup>[7,8]</sup>:

$$n > q/\mu$$

(14)

为了简化起见,假设车辆离开收费车道进入离

开过渡段时有一个初始速度  $v_0$ 。

1.3 离开段子模型

图 4 中,车流量以  $q_2$  离开缴费服务段,在离开过渡区域道路变得宽阔,然后以车流量  $q_3$  进入主线。此阶段与第 1 阶段是类似的,因此省略中间推导过程,直接给出最后的计算结果为:

$$T_u = -\frac{n da_1}{\gamma (nd - w_u)} \ln \left( \frac{w_u}{nd} \right)$$

(15)

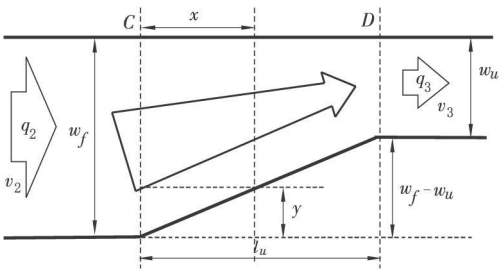


图 4 离开段子模型(单方向)

Figure 4 the layout of exit submodel (unilateral direction)

2 模型求解

根据前面的计算,以车辆经过收费广场的总时间作为目标函数,为:

$$T = T_n + T_w + T_u = \frac{n w_n a_1}{\gamma (nd - w_n)} \ln \left( \frac{nd}{w_n} \right) + \frac{n}{n\mu - q} - \frac{n da_1}{\gamma (nd - w_u)} \ln \left( \frac{w_u}{nd} \right)$$

(16)

假设高速公路为标准横断面,则单车道宽度为 3.75 m,则对于单方向两车道的高速公路  $w_n$  和  $w_u$  都为 7.5 m。每个收费站(包括收费亭和收费车道)的宽度为 5 m。假设平均服务率为 600 pcu/h 而收费广场的平均到达率为 3400 pcu/h。车辆进入收费广场的初始速度假设为 40 km/h 而离开收费段时初始车速假设为 20 km/h。各参数具体数值见表 1。

表 1 各参数设置值  
Table 1 value of Parameter

$w_n/\text{km}$	$w_u/\text{km}$	$d/\text{km}$	$E(\mu)/(Pcu \cdot h^{-1})$	$E(q_0)/(Pcu \cdot h^{-1})$	$v_0/(km \cdot h^{-1})$	$\gamma/(km \cdot h^{-1})$
0.0075	0.0075	0.005	600	3400	40	20

如果收费站个数  $n$  确定了,则依据式 (16) 车辆通过收费广场的总时间也就确定了。由于模型只有一个变量  $n$  并且由于  $n$  不可能很大且为整数,因此只需要变化  $n$  就可以得到对应每一个  $n$  的通过收费广场的各段时间和总时间,从而能够确定最优的收

费站个数  $n$ 。为了保证系统状态必须是稳定的,即  $n > q/\mu$  因此变化  $n$  从 6 到 15 可得到对应于每个  $n$  的  $T_n$   $T_w$   $T_u$   $T$  见表 2。

从表 2 可以直观地看出当  $n=8$  时,车辆通过收费广场的总平均时间  $T$  最小,因此,此时的  $n$  就是最

优值。通过收费广场的各段时间与  $n$  的关系见图 5<sup>[9-10]</sup>。

表 2 对应每个  $n$  的通过收费广场的各段时间和总时间  
Figure 2 the segment time and total time corresponding to each  $n$

$n$	$T_n/h$	$T_w/h$	$T_u/h$	$T/h$
6	0.001 4	0.03	0.011 1	0.042 5
7	0.001 5	0.008 8	0.013 7	0.024 0
8	0.001 5	0.005 7	0.016 5	0.023 7
9	0.001 6	0.004 5	0.019 3	0.025 4
10	0.001 7	0.003 8	0.022 3	0.027 8
11	0.001 7	0.003 4	0.025 4	0.030 5
12	0.001 8	0.003 2	0.028 5	0.033 5
13	0.001 8	0.003 0	0.031 8	0.036 6
14	0.001 9	0.002 8	0.035 0	0.039 7
15	0.001 9	0.002 7	0.038 4	0.043 0

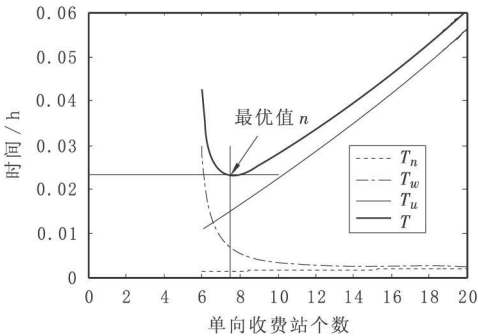


图 5 车辆通过收费广场的各段时间和总时间与收费站个数  $n$  的关系  
Figure 5 segment time and total time relation of  $n$

图 5 中从最优值处从下至上, 各条线分别代表车辆在进入过渡段消耗的平均时间与  $n$  的关系线, 车辆在等候服务段消耗的平均时间与  $n$  的关系线, 车辆在离开过渡段消耗的平均时间与  $n$  的关系线, 车辆通过收费广场的总平均时间与  $n$  的关系线。通过图 5 可以直观地看出, 当收费站个数在 7~8 之间时, 车辆通过收费广场的总平均时间最少。求整后, 得到最优的收费站个数  $n=8$ 。

3 结论

流体力学模拟理论从宏观上对车辆通过收费广场过渡段的过程进行了描述, 再运用排队论, 计算出最优的收费站个数为  $n=8$ 。当  $n=8$  时, 车辆在收费路口时, 排队系统中顾客的平均数为  $\bar{n}=24$ 。排队系统中的平均消耗时间为  $d=21$  s。通过流体力学理论和排队论建立的延误时间模型为收费广场收费车道配置提供了计算依据。

[参考文献]

[1] 曾 胜, 甘先永. 高速公路收费广场服务水平分析方法的探讨 [J]. 长沙交通学院学报, 2000 16(2): 73~76.  
[2] 丁柏群, 杨会梅, 王雪梅. 道路收费广场通行能力设计 [J]. 黑龙江交通科技, 2000 (6): 19~21.  
[3] 刘伟铭, 管丽萍, 尹湘源. 基于神经网络的 ETC 收费广场服务水平分类方法 [J]. 交通运输工程学报, 2003 3(3): 93~95.  
[4] 任福田, 刘小明, 荣 建, 等. 交通工程学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
[5] 马荣国, 杨立波. 交通工程设计理论与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
[6] 梁之舜, 邓集贤. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.  
[7] 刘伟铭, 王 倩. 仿真理论在 ETC 车道设置研究中的应用 [J]. 广西交通科技, 2003 (1): 16~19.  
[8] 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 (4): 1065~1069.  
[9] 刘运通, 石建军, 熊 辉. 交通系统仿真技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
[10] 苏金明, 阮沈勇. MATLAB 6 实用指南 (下册) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.  
[11] 詹 燕, 李 硕. 高速公路收费费率与交通量关系研究 [J]. 湖南交通科技, 2002 28(1): 76~77.

重申发布入编声明

为适应我国信息化建设, 扩大本刊及作者知识信息交流渠道, 本刊已被《中国学术期刊网络出版总库》及 CNK 系列数据库收录, 其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。免费提供作者文章引用统计资料。如作者不同意文章被收录, 请在来稿时向本刊声明, 本刊将做适当处理。