

仿蜂窝式新型收费站

目录

| | |
|--|----|
| 仿蜂窝式新型收费站..... | 1 |
| 一、引言..... | 2 |
| 1.1 问题背景..... | 2 |
| 1.2 符号描述..... | 3 |
| 1.3 我们的工作..... | 3 |
| 二、问题假设..... | 4 |
| 三、仿蜂窝式收费站设计方案..... | 4 |
| 四、模型设计..... | 5 |
| 4.1 收费站建设成本评估（以土地和公路建设费用为主）..... | 5 |
| 4.1.1 面积的节省..... | 5 |
| 4.2 理论衡量蜂窝式收费站的吞吐量..... | 6 |
| 4.2.1 排队论的简单介绍..... | 6 |
| 4.2.2 收费口排队子系统..... | 6 |
| 4.2.3 合并点排队子系统..... | 7 |
| 4.3 计算..... | 8 |
| 4.3.1 参量赋值..... | 8 |
| 4.3.2 在收费亭中耗费的时间..... | 8 |
| 4.3.3 在合并点耗费的时间..... | 9 |
| 4.3.4 耗费时间合计..... | 10 |
| 4.4 提高蜂窝式收费站事故预防能力..... | 11 |
| 4.4.1 分层 Merge 模式..... | 11 |
| 4.4.2 过渡段平缓设计..... | 12 |
| 4.4.3 根据不同收费站的排列顺序提高收费站安全性..... | 13 |
| 4.5 自动驾驶车辆的影响..... | 13 |
| 4.5.1 分析自动驾驶交通工具的特点..... | 13 |
| 4.5.2 我们的解决方案..... | 14 |
| 五、模型分析..... | 15 |
| 5.1 VISSIM 仿真验证在实际情况下蜂窝式收费站与原有收费站的吞吐量差距..... | 15 |

5.1.1 仿真基础数据..... 15

5.1.2 仿真结论..... 16

5.1.3 仿真样例..... 19

5.2 不同收费站比例的影响..... 19

5.2.1 模型简化..... 19

5.2.2 结论分析..... 20

5.3 有点和缺点分析..... 21

5.3.1 优点..... 21

5.3.2 缺点..... 21

六、结论.....21

七、参考文献.....22

一、引言

1.1 问题背景

近年来，随着经济的发展，车辆增多，高速公路流量呈现快速的增长趋势，高速公路收费站拥堵问题日益突出，收费站设计不合理、节假日车流量过大等原因均会导致高速公路收费站附近道路行车速度降低和延误增大。相关研究发现，车辆在高速公路停车收费而造成的延误时间占总行程时间的 36% [1]。同时，高速公路收费站作为车辆密集地段，因驾驶员操作不当或疲劳驾驶也成为事故多发路段[2]。

ETC and E-ZPass 等技术的广泛使用，有效提高了人工收费效率，缓解了收费站车流拥堵的状况，使用 ETC 技术，汽车在驶过收费站的速度高于传统的收费方式，因此在车流汇聚时产生冲突的概率较大。综合以上诸多因素，需要对传统的收费站进行改进，以提高收费站的运作效率，降低收费站的建设运维成本。

为解决上述传统收费站诸多问题，我们设计了基于仿生学的收费站模型，该模型将收费站模拟成蜂巢的正六边形排布结构（图 1），将汽车经过收费站缴费的行为模拟为汽车在蜂巢中沿边行进的过程。蜂窝式结构在生活的许多方面均有广泛的应用，例如：蜂窝网络，因为蜂窝结构是覆盖二维平面的最佳拓扑结构。

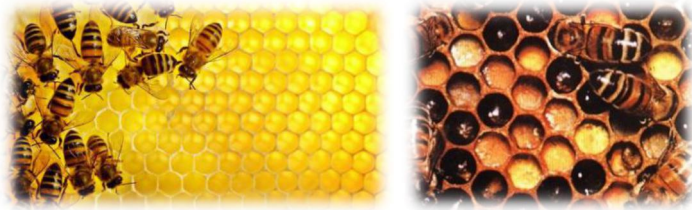


图 1 蜂巢例图

1.2 符号描述

总时间成本:车辆从检测区域起点到检测区域终点的平均时间间隔为总时间成本。

理论时间成本:如果系统中只有一辆车,且该车不受控制信号的限制,则该车从检测区域的起点到检测区域的终点的时间间隔为理论时间成本。

延迟时间:总时间成本与理论时间成本之差即为延迟时间。

l :公路每个方向的车道数。

b :每个方向的收费站总数。

1.3 我们的工作

随着 ETC 设备和自动驾驶车辆的普及,未来每个收费站的车辆通行能力将大幅提升,降低出行时间成本。

目前,传统的收费站设计占地面积大,建设成本高。随着车速的提高,合流点会出现拥堵,增加事故发生的可能性。

- 设计了一个移动收费站模型,对其形状、尺寸和汇聚方式进行了设计。为了使收费站更适应实际应用,我们从面积、吞吐量、事故预防、混合车道和 ETC 车道、自动驾驶等方面进行了考虑。
- 通过对收费站面积模型的分析,量化了可以减少多少收费站面积。
- 利用 VISSIM 软件模拟移动收费站是否可以有效的分散交通流量,减少车辆合并的平均行驶时间和平均延误时间。
- 采用 VISSIM 软件对收费站在大流量和小流量两种情况下的通行能力进行了分析。
- 从 3 个方面改进了设计。
- 分析了交通流量对收费站通行能力的影响。
- 分析收费站是否能满足自动驾驶车辆的需要。

图 2 显示了我们的工作过程。

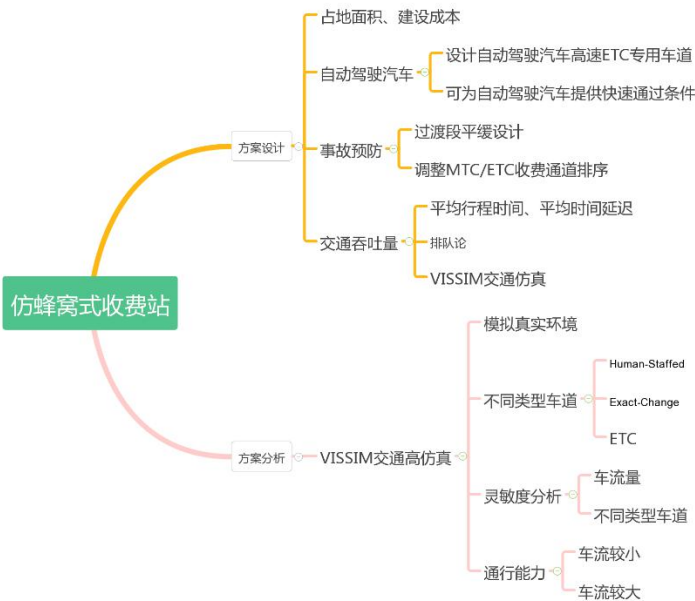


图 2 工作框架

二、问题假设

- 车辆到达收费系统服从泊松分布。
- 一般来讲，ETC 的收费站通行量应该远远高于混合式收费站的通行量。
- 所有的收费站都有 ETC 或 E-ZPass，除非有特殊说明。
- 收费站附近没有斜坡或出口。我们不考虑额外车辆进入的可能性，只考虑已经在主道路上的车辆。
- 收费站的服务程序和收费站后的车辆合并程序均为排队系统。且它们遵循先来先服务的原则。

三、仿蜂窝式收费站设计方案

传统收费站设计中，收费站的数目往往比进入收费站的车道数要多，所以需要将公路的少量车道分流为较多车道。收费广场由收费障碍前的扇形区域、收费障碍本身以及收费障碍后的扇形区域组成。收费障碍与交通流方向垂直，收费广场占地面积也非常大。为了减小收费广场的占地面积，进一步节省建设成本，我们设计了一个基于蜂窝结构的新型收费广场。此外，通过将车流合并的程序分为两个阶段，我们设计的收费广场可以降低碰撞的概率。我们设计的收费站演变图如图 3 所示，我们采用平滑的过度来防止车辆急转弯造成的危险，并在中间设置直行的 ETC 车道和自动驾驶车道。

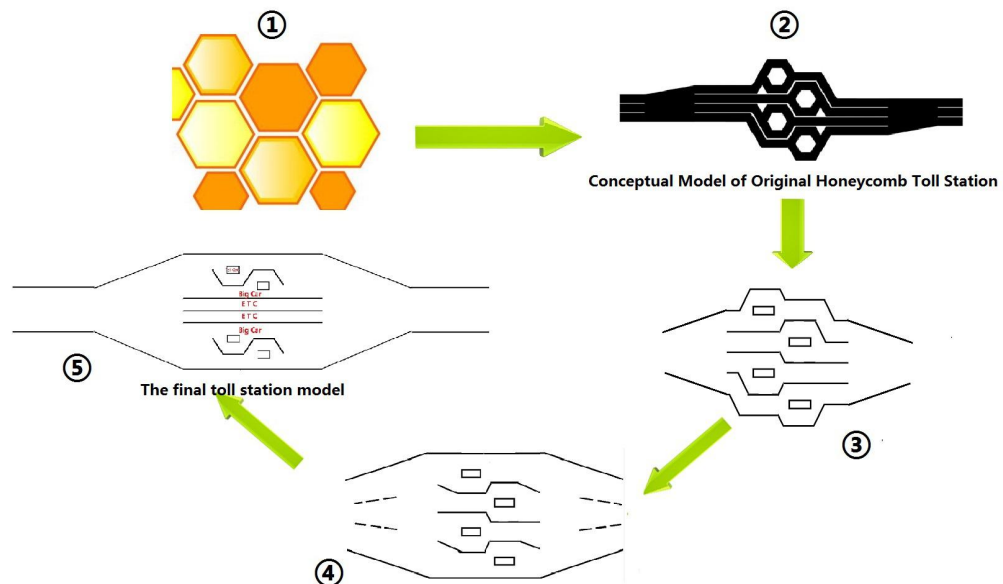


图 3 收费站演化过程

四、模型设计

4.1 收费站建设成本评估（以土地和公路建设费用为主）

收费站建设成本主要包括路面建设成本和收费站建设成本。我们评估它的面积并尽量减少它。收费亭总面积 S 可分为过渡区面积和收费区面积。

我们假设收费站的数量是 n_t ，公路的车道数是 n_l ，车道的宽度是 w_l ，切向偏移宽度是 w_o ，速度是 v ，过渡区的长度是 l_t ，收费站的宽度是 w_t ，传统收费站的面积分别是 S_{T1} 和 S_{C1} ，过渡区的面积分别是 S_{T2} 和 S_{C2} 。

收费广场的总面积可以分为如图所示的区域在图 4 中。

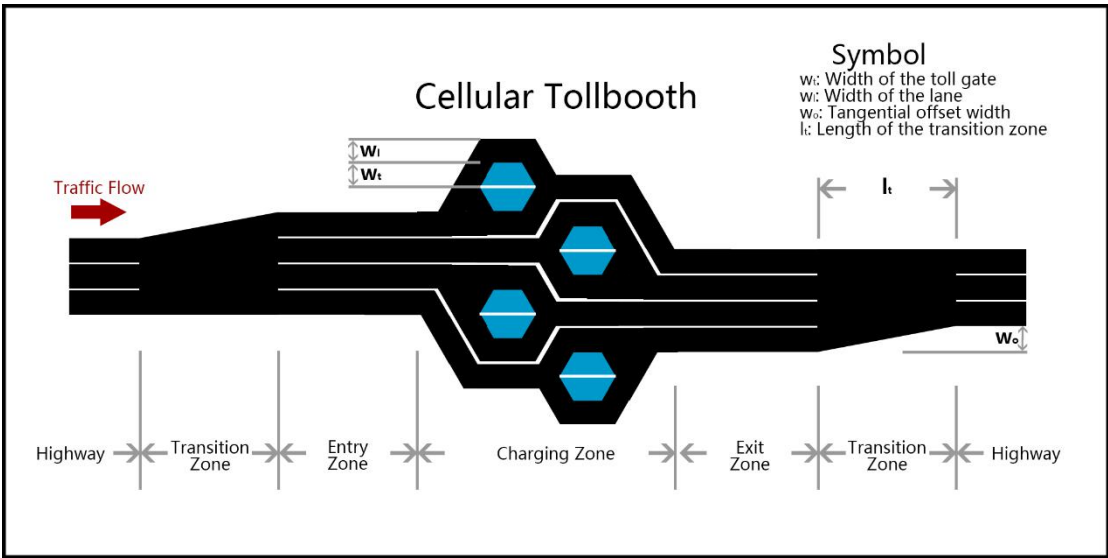


图 4 蜂窝式收费站设计和相关参数图

4.1.1 面积的节省

[编者注：我们省略了作者对传统收费广场和蜂窝收费广场几何区域的计算。图 5 很好地说明了他们的观点。]

与传统的收费广场相比，蜂窝收费广场可以显著节省空间。效果可以在图 5 中看到。

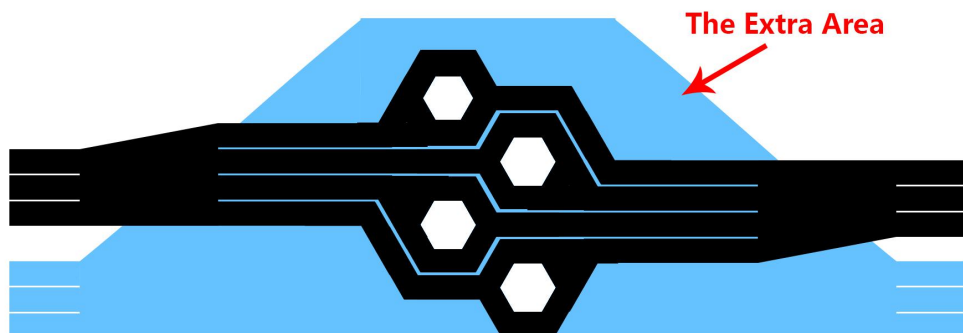


图 5 收费站占地面积比较

4.2 理论衡量蜂窝式收费站的吞吐量

在我们的模型中，我们将经过收费站的整个过程看作是一个整体排队系统中两个子排队系统的串联运作，首先是将车辆经过每个收费亭，以及在收费亭前排队过程视为一个子排队系统，然后将每辆车经过收费站出口到车道合流点处的过程视为一个子排队系统，下面将从排队论开始对我们的模型进行简要介绍

4.2.1 排队论的简单介绍

排队论是队列中的数学研究。在排队论中，构建模型以便可以预测队列长度和等待时间。排队论通常被认为是运筹学研究的一个分支，因为结果通常用于在提供服务所需资源的业务决策时使用[1]。

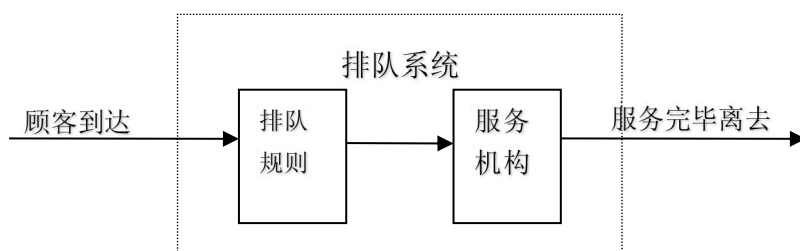


图 6 排队系统基本组成

4.2.2 收费口排队子系统

现实中，车辆在进入收费站入口时，司机会根据一定的原则确定将要驶向哪个收费口，比如距离，正在排队的车辆数等，而在我们的模型假设下，每个收费口前车辆到达的间隔将

服从指数分布。同时，每个收费口对过往车辆收费的耗时也服从指数分布，即便当下电子收费系统的普及使得收费速度相比以往人工收费时有了极大提升，但为了使我们的模型更具有—般性，同时也是为了简化第二个子模型的处理，我们依然认为收费口的服务耗时遵循指数分布，即——泊松过程。此外，显然每个收费口只能同时处理一条车道的车辆，这样虽然收费站有多个收费口，但是对于每个收费口仍然只有一套收费设施，虽然在我们的模型中将会采用一个收费岛上建设两个收费亭的策略，但这并不与前述原理违背。

综上，我们认为，对于每个收费口，可以将其视为一个 M/M/1 排队模型

4.2.3 合并点排队子系统

根据 Burke 的理论，如果一个 M/M/1 排队模型的到达时间和服务时间都是一个参数为 λ 的泊松过程，则该排队模型的离开过程也是一个参数为 λ 的泊松过程[5]。这里收费口的输出是一个泊松过程，则与之串联的车道合并点的到达时间也将是同样的泊松分布。

现行的道路设计指南规定，车道合并只能从车辆行驶方向的右侧开始合并，并且每次只能合并一个车道[6]。根据这条规定，同时也为了简化模型，我们可以将驶出收费口的车辆划分为两类，一类车驶出收费口后可以不经过任何车道合并点直接驶向公路，另一类则需要经过车道合并点才能驶向公路，值得注意的是，如果有 L 条公路车道，则属于第一类的只有 $L-1$ 条，因为靠近右侧的那一条需要和其右侧的车道进行合并，也就是说这条车道需要经过一个车道合并点。

对于第一类车道，车辆可以直接驶过，我们认为其在合并点排队子系统—中的总耗时为 $(B-L) * (1/u_0) = (B-L)/\mu_0$ 和 $(B/2-L) * (1/u_0) = (B-2L)/2\mu_0$ ，其中 B 为收费口数， L 为公路车道数， μ_0 为经过一个合并点时没有发生两车汇聚现象时的车辆通过速率。这些车道被选中的概率对于传统收费站是 $(L-1)/B$ ，对于蜂巢型收费站是 $(L-1)/(B/2)$ 。

而对于第二类车道，车辆驶入之的概率对传统和蜂巢型收费站分别为 $(B-L+1)/B$ 和 $(B-2L+2)/B$ ，其中 B 和 L 的定义同前述。此外，对于第 k 个合并点，其到达概率应为单条车道的概率与第 $k-1$ 个合并点概率之和 $(k+1)/B$ 和 $2(k+1)/B$ ，以图 7 所示的传统收费站出口过渡区为例，到达 Merging Point 1 的概率和 Line 1+Line 2 的概率相等为 $1/B + 1/B = 2/B$ ，而 Merging Point 2 和 Line 3+Merging Point 1 相等，为 $1/B + 2/B = 3/B$ 。而对于交通流量，第 k 个合并点也类似的有 $(k+1)\Phi/B$ ，其中 Φ 为整体的交通流量。

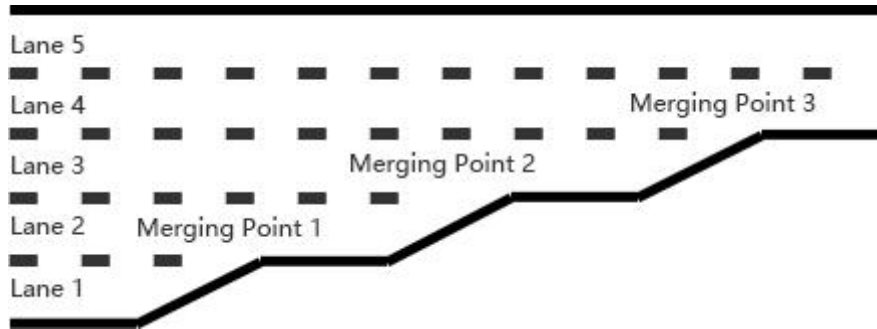


图 7 车道合并示意图

为了简化模型，我们不区分一个合并点连结的两个车道，即车辆通过单一合并点的时间与其所处车道无关，仅与另一车道状态有关，如果另一条车道没有车或有车但另一车停车让道，则该车可以不减速直接完成合并，耗时为 $1/\mu_0$ ，否则，该车需暂时停车，等待另一车完成车道合并后才能继续行驶，这个耗时定义为 $1/\mu_1$ 。

综上，合并点排队子系统的车辆到达率遵循指数分布（即一个泊松过程），而合并点的服务率为一般函数，故其为 M/G/1 排队模型。

4.3 计算

从上一节中，我们已经得到了对应于整个设计的排队模型，下面，我们将其中的参量代入具体数值，以求得经过传统收费站和蜂巢型收费站的平均合计用时，并以此对比两种收费站的吞吐量。

4.3.1 参量赋值

● B: 收费站数目

现实中，收费站中收费口的数量应当由经过该处的车流量，车型等因素决定，这里我们暂定为 8。需要注意的是，虽然蜂巢型收费站采用一个收费岛上设置两个收费口（收费亭）的策略，和提前合流的策略，使得进入合流过渡区的车道数减半，但这并不影响收费亭的数目，即最大可同时服务的车辆数。

● L: 高速公路道路数

收费站出口合流过渡区直接与公路相连，为了在面对蜂巢型收费站时，合流过渡区也能有其存在意义，我们取 L 的值为 3。

● μ_T : 收费站服务率

目前，电子收费系统在不断普及，为了使我们的系统能够适应电子收费系统，我们取其服务率 1200 辆/h[1]。

[1] Manual H C. Highway capacity manual[J]. Washington, DC, 2000.

● μ_0 : 在合并点处未发生合并冲突时的服务率

μ_0 为在合并点未发生合并冲突，或发生合并冲突但另一车停车等待时的服务率，同时我们也将之作为车辆从收费站出口没有经过任何合并点的情况下服务率，公路上车辆的平均速度为 60mph[7]，合并点的大小应当为一普通车辆的长度加一段安全距离，这里安全距离应为 6 倍车长[7]，故合并点长度为 $15\text{ft} + 6 \times 15\text{ft} = 105\text{ft}$ ，这样车辆经过合并点的平均用时为合并点长度除以车速，即 $105\text{ft} \div 60\text{mph} = 1.1932\text{s}$ ，取其倒数值并折算为一个小时作为 μ_0 的值，即 $3600(\text{s/h}) \div 1.1932\text{s} = 3017.1\text{veh/h}$ 。

● μ_1 : 在合并点处发生合并冲突时的服务率

适用于两辆车同时到达合并点时停车避让的车辆，避让的车辆将暂时停车，等待前车经过合并点，之后才再次加速使车辆继续前进，再次启动时，车辆初速将从 0 开始，这时车辆安全距离仅为 1 倍车距，同时根据位移公式 $s = 0.5at^2$ ，可以推出 $t = \sqrt{2s/a}$ ，一般车辆的平均加速度为 6.5ft/s^2 [7]，代入参数得 $\sqrt{2(15\text{ft} + 15\text{ft}) \div 6.5(\text{ft/s}^2)} = 3.0382\text{s}$ ，同样取其倒数并折算为一小时作为 μ_1 的值，即 $3600(\text{s/h})/3.0382\text{s} = 1184.9\text{veh/h}$ 。

4.3.2 在收费亭中耗费的时间

根据上文中给出的每条车道的车辆到达率计算公式，我们可以根据公式算出每辆车在收费亭中耗费的时间的平均值[8]，对于传统收费站，下式是显然的，对于蜂巢式收费站，由于进入每个收费亭之前会进行一次车道分流，因而每个收费亭旁的车道所面对的交通流量和传统收费站的一条车道是相同的，公式如下：

$$W_T = \frac{1}{\mu_T - \frac{\Phi}{B}}$$

- W_T =经过收费亭耗费时间
- μ_T =收费站服务率(service rate of the tollbooth)
- Φ =车流量(traffic flow)
- B =收费亭数量(the number of tollbooths)

4.3.3 在合并点耗费的时间

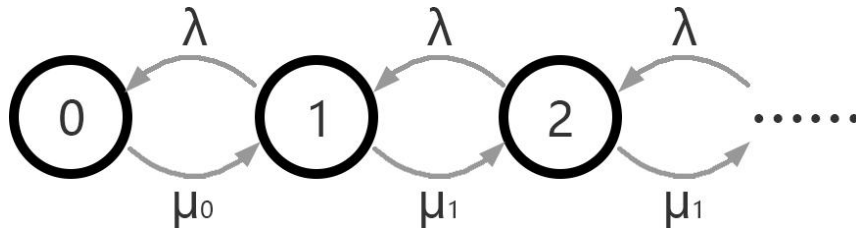


图 8 生灭过程状态转移示意图

在各个合并点的合并过程实质上是一个 Birth-Death Process，图 8 以马尔可夫链形式描述了这个过程的状态转移，在此，每个状态都遵循转入概率之和等于转出概率之和[5]，同时，所有事件的概率和为 1，由此，我们可以得到如下方程组：

$$\begin{cases} \lambda P_0 = \mu_0 P_1 \\ \lambda P_1 + \mu_0 P_1 = \lambda P_0 + \mu_1 P_2 \\ \lambda P_n + \mu_1 P_n = \lambda P_{n-1} + \mu_1 P_{n+1}, n \geq 2 \\ \sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1 \end{cases}$$

其中：

- $P_n, n \in N$ ，为系统中有 n 辆车的概率
- λ =车辆到达合并点的到达率
- μ_0 =没有发生合并时的合并点服务率
- μ_1 =发生合并时的合并点服务率

解上述方程组，我们得到如下的一组等式：

$$\begin{cases} P_0 = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu_0} + \frac{2\lambda\mu_1}{\mu_0^2\mu_1 - \lambda\mu_0^2 + \lambda\mu_0\mu_1 - \lambda^2\mu_0} \right)^{-1} \\ P_1 = \frac{\lambda}{\mu_0} P_0 \\ P_n = \frac{2\lambda^2}{\mu_0^2 + \lambda\mu_0} \left(\frac{\lambda}{\mu_1} \right)^{n-2} P_0, n \geq 2 \end{cases}$$

根据上面得到的概率，我们可以算出整个排队系统中车辆的期望值：

$$L_s(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} iP_i = \frac{\lambda}{\mu_1 - \lambda} + \frac{\lambda\mu_1 - \lambda\mu_0}{\lambda\mu_1 - \lambda\mu_0 + \mu_0\mu_1}$$

其中：

- $L_s(\lambda)$ =系统中车辆的期望值，也称平均队长。

根据 Little's Law[1]

[1] Gross D. Fundamentals of queueing theory[M]. John Wiley & Sons, 2008.

$$L_s = \lambda W_s$$

我们可以得到排队系统中车辆的平均逗留时间

$$W_s(\lambda) = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{1}{\mu_1 - \lambda} + \frac{\mu_1 - \mu_0}{\lambda \mu_1 - \lambda \mu_0 + \mu_0 \mu_1}$$

其中:

- $W_s(\lambda)$ =系统中车辆的在一个合并点的平均等待时间。

4.3.4 耗费时间合计

按照我们之前的假设, 传统收费站的第 k 个合并点处的交通流量为:

$$\frac{(k+1)\Phi}{B}, k = 1, 2, \dots, B-L+1$$

对应的第 k 个合并点有车到达的概率为:

$$\frac{k+1}{B}, k = 1, 2, \dots, B-L+1$$

这样根据前面提出的公式, 在合并点花费的时间合计为:

$$W_{MT} = \frac{L-1}{B} \cdot \frac{B-L}{\mu_0} + \frac{B-L+1}{B} \sum_{k=1}^{B-L} \frac{k+1}{B} W_s\left(\frac{k+1}{B} \Phi\right)$$

- W_{MT} =传统收费站中每辆车在合并点耗费的时间合计的平均值

- L =公路车道数($B>L$, 对蜂巢式则 $B/2>L$)

加上上文中得到的经过收费亭的耗时 W_T , 便得到传统收费站每辆车经过整个收费站的平均耗时 W_{AT} :

$$W_{AT} = W_T + W_{MT} = \frac{1}{\mu_T - \frac{\Phi}{B}} + \frac{L-1}{B} \cdot \frac{B-L}{\mu_0} + \frac{B-L+1}{B} \sum_{k=1}^{B-L} \frac{k+1}{B} W_s\left(\frac{k+1}{B} \Phi\right)$$

- W_{AT} =每辆车经过整个收费站耗时平均值

而我们的设计中, 由于车流提前完成了一次合并, 故每条车道的车流量变为一条车道两倍, 而车道数减少一半, 为便于计算, 我们不妨假设 B 总是偶数, 这样第 k 个合并点处的交通流量为:

$$\frac{2(k+1)\Phi}{B}, k = 1, 2, \dots, \frac{B}{2} - L + 1$$

对应的第 k 个合并点有车到达的概率为:

$$\frac{2(k+1)}{B}, k = 1, 2, \dots, \frac{B}{2} - L + 1$$

则时间合计为:

$$W_{MI} = \frac{2L-2}{B} \cdot \frac{B-2L}{2\mu_0} + \frac{B-2L+2}{B} \sum_{k=1}^{\frac{B}{2}-L} \frac{2(k+1)}{B} W_s\left(\frac{2(k+1)}{B} \Phi\right)$$

- W_{MI} =蜂巢型收费站中每辆车在合并点耗费的时间合计的平均值(单位小时)

对于蜂巢型收费站, 所有车道都将进行提前合并, 还应加上提前进行车道合并时的用时 W_{Ex} ,

$$W_{Ex} = W\left(\frac{2\Phi}{B}\right)$$

同样，加上上文中得到的收费亭耗时，得到蜂巢型收费站每辆车经过整个收费站的平均耗时 W_{AI}

$$W_{AI} = W_T + W_{MI} + W_{Ex}$$

即

$$W_{AI} = \frac{1}{\mu_T - \frac{\Phi}{B}} + \frac{2L-2}{B} \cdot \frac{B-2L}{2\mu_0} + \frac{B-2L+2}{B} \sum_{k=1}^{\frac{B-L}{2}} \frac{2(k+1)}{B} W_s\left(\frac{2(k+1)}{B}\Phi\right) + W_s\left(\frac{2\Phi}{B}\right)$$

将上述 W_{MI} 和 W_{AI} 中代入具体参数计算，并作图，对比结果如图 9 所示：

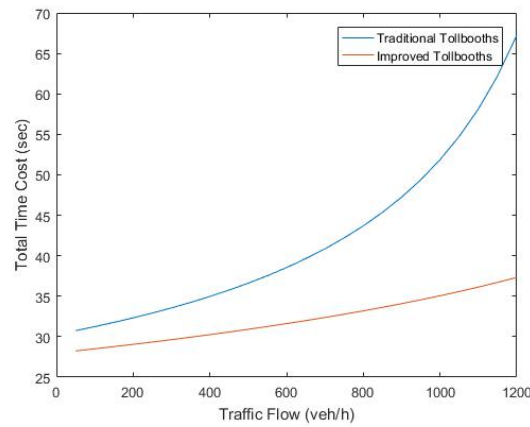


图 9 不同流量下合计等待时间对比

4.4 提高蜂窝式收费站事故预防能力

4.4.1 分层 Merge 模式

因车辆在缴费过程中大多数时间在蜂巢式收费站的内部，存在弯道，车速较慢，并在“蜂巢”内部分批次完成合并，避免了原有收费站的两种交通事故：

- 车速过快导致的交通事故；
- 合并时过于拥堵导致的交通事故。

下图显示了我们的预合并模式和传统的单一合并模式。

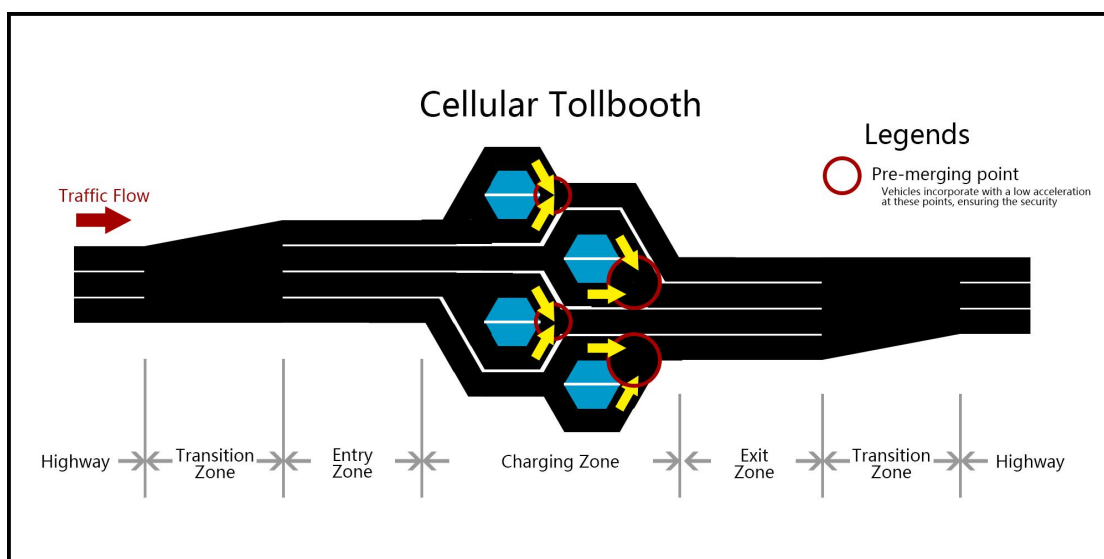


图 10 这种汇合方式安全性更高

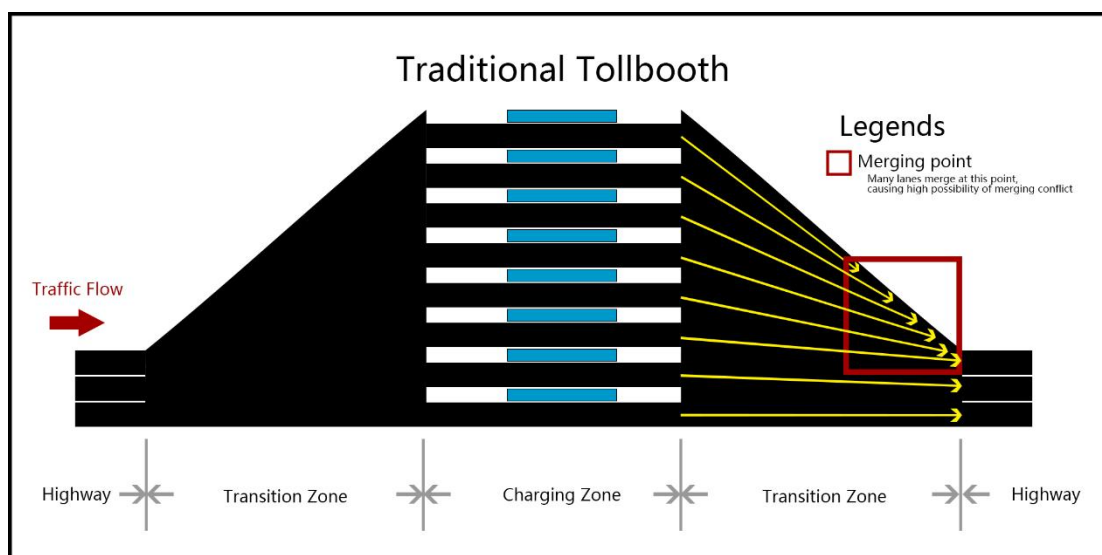


图 11 有较高发生冲突的可能性

4.4.2 过渡段平缓设计

收费广场设计，封闭式收费广场一般均设在互通立交匝道上，即车辆驶入和驶出收费站的区段。车辆进入区段到达收费亭之前进行减速和离开收费亭后为车辆提供的过度段，匝道宽度到收费站断面的渐变率长度（1：n）不能太大，美国推荐最大为 1:20，最小 1:8 [9]。

因此我们进一步改进模型，通过改变进出收费站的断面渐变率，以提高安全性，改进后的模型如下：

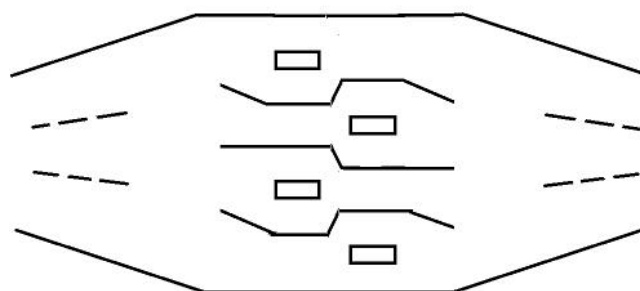


图 12 改进模型 I

4.4.3 根据不同收费站的排列顺序提高收费站安全性

高速公路收费站一般包括一组不同类型的收费模式:题干中提到有 conventional (human-staffed) tollbooths, exact-change (automated) tollbooths, and electronic toll collection booths 这几种.接近收费广场的车辆经常会因选择不同的通道遇到交通事故,不同类型的收费站的位置对于安全也是至关重要的。

由于 ETC 技术的大规模推广,车辆进出收费站的方式和经过收费站的速度与传统的收费模式有很大的不同,这很容易造成冲突。计算实验表明,与更高风险的交通流相关的关口,例如 ETC 通道,其速度显著高于平均值,应该将其设置在中间位置。[14]. 因此我们在新的收费站中间加入两个 ETC 通道,如图 13 所示。

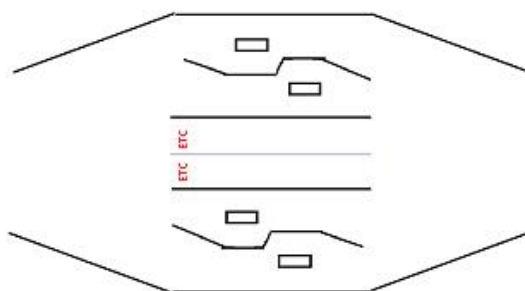


图 13 改进模型 II

4.5 自动驾驶车辆的影响

由于智能车都是非现金缴费,相较于传统收费站,蜂窝式收费站更能贴合智能车的需求。在本节我们先了分析智能车的原理和特点,然后根据智能车的原理和特点优化了蜂窝式收费站模型。

4.5.1 分析自动驾驶交通工具的特点

(1) 由于自动驾驶车辆是无人控制的,在车的配置上,必须配备自动缴费系统,也就是 ETC 车载器,采用电子收费的方式,能够以较快的速度通过收费站。

(2) 自动驾驶车辆可以提高道路交通的安全系数。自动驾驶车辆配备车载传感系统，感知道路环境，根据所获得的道路、车辆位置和障碍物信息控制车辆的转向和速度，保留一定的车间距，减少突然刹车次数，比正常人驾驶习惯要好很多，可以减少在蜂巢式中收费站交通事故的发生。自动驾驶车不需要人的控制，开车者自身因素（如不良情绪、与收费站服务人员发生争执等）不会影响到车辆的行驶[11]。

(3) 在蜂窝式收费站的汇合路口能够更加有序，避免拥堵的发生，最大程度上提高蜂窝式收费站的效率。

4.5.2 我们的解决方案

(1) 在未来，有更多自动驾驶车辆时，因无人交通工具均装有 ETC 装置，蜂窝式收费站必须增加自动收费通道的数目，减少人工收费通道数目，最大程度提高效率。我们设计了为无人交通工具提供完美服务的下一代蜂窝式收费站（见图 14），该设计中，将人工收费置于收费站的最两端，并且在中间设置专用于大型车辆的直行通道，减少大型车辆转弯所带来的不便，同时由于自动驾驶车辆转弯方便，不会给人带来麻烦，剩余车道均为 ETC 车道。

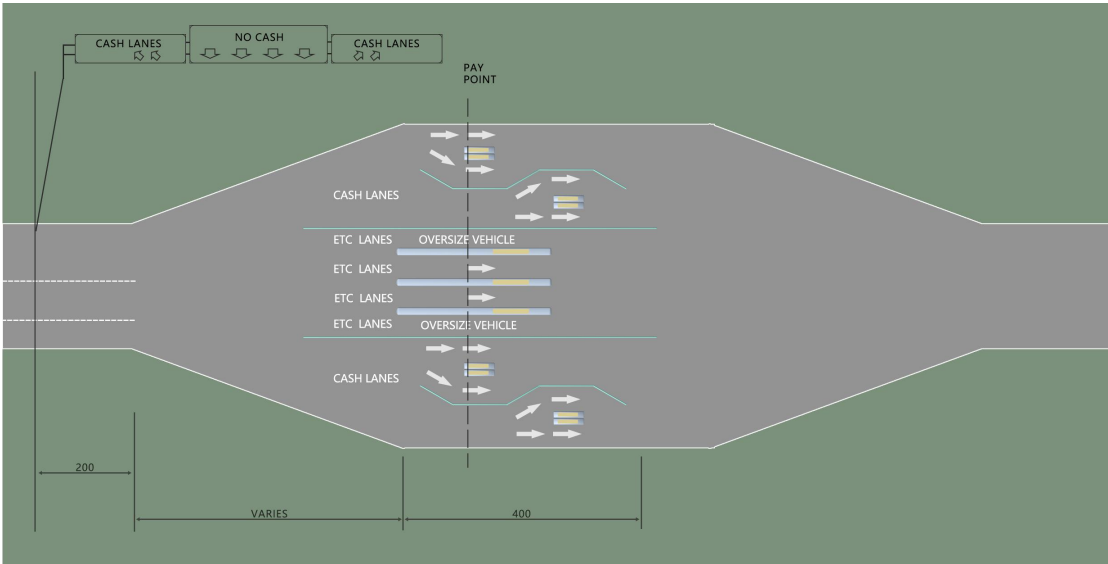


图 14 下一代 Autonomous Vehicle 蜂窝式收费站

(2) 根据排队模型和 VISSIM 仿真结果，蜂窝式收费站 ETC 车道越多，现金收费车道越少，蜂窝式收费站的吞吐量越大。由于自动驾驶车辆都是非现金支付，相较于传统收费站，蜂窝式收费站更能贴合智能车的需求。

五、模型分析

5.1 VISSIM 仿真验证在实际情况下蜂窝式收费站与原有收费站的吞吐量差距

5.1.1 仿真基础数据

此次仿真使用 4.3 版本的 VISSIM 软件，由于其他交通仿真设计（如道路连线、汽车路线选择、减速带、收费站设计）均无特殊配置，所以不再详叙述，详情参见[12]。在设置汽车通过 ETC 减速带时的车速为 24km/h，减速过程的加速度为 2m/s^2 ，根据参考文献[13]所述：“The vehicles’ speed reduces to 24km/h when passing ETC lane.”。

(1) 建立 VISSIM 底板

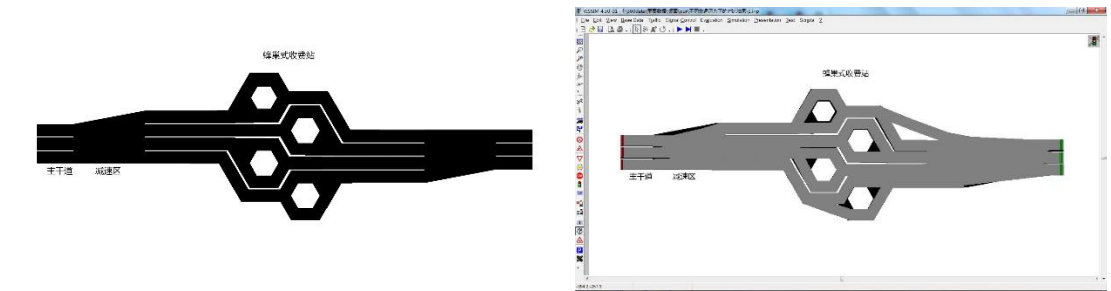


图 14 概念收费站设计模型和仿真路径

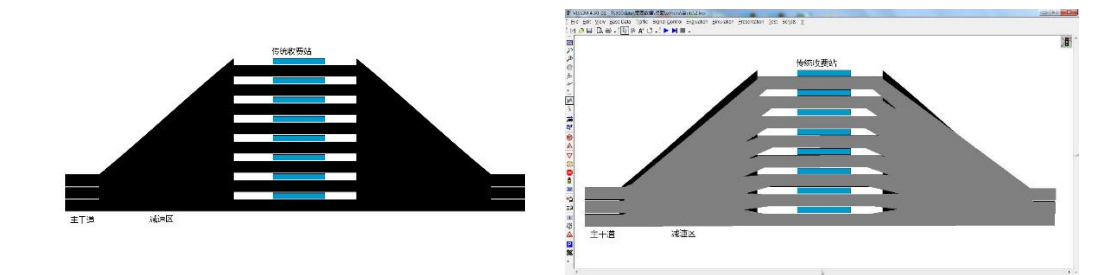


图 15 现有收费站设计模型和仿真路径

(2) 设计交通组成及比例

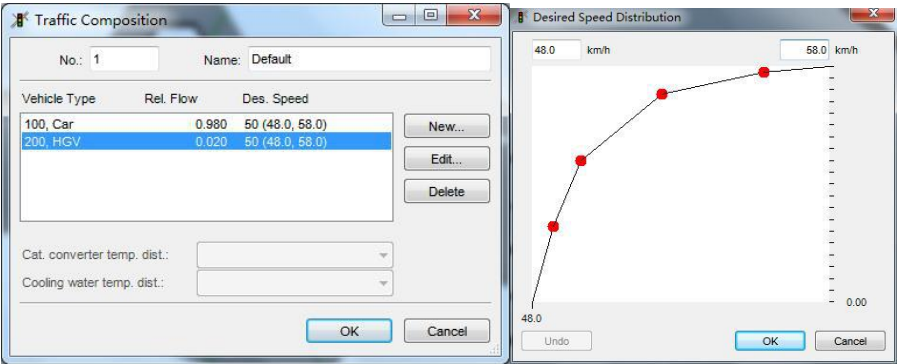


图 16 交通组成和车辆速度分布

(3) 其他重要说明

共进行两次交通仿真，具体细节见下表。

表 1 仿真内容

| 仿真次数 | 第一次仿真 | | 第二次仿真 | |
|------------|---------|---------|-------|--------|
| 收费站类型 | 普通收费站 | 蜂巢式收费站 | 普通收费站 | 蜂巢式收费站 |
| 主干道数 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 收费车道 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| ETC 自动收费数目 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| ETC 车道位置 | 最下方两个车道 | 最中心两个车道 | 0 | 0 |

Q: 为什么在仿真中仅仅考虑 ETC 和人工收费，但不考虑投币收费情况？

A: 根据文献[17]所述，“美国各种类型收费占系统中一条收费车道的通行能力：人工收费（只收预售票）车道的道路通行能力为 500veh/h，硬币收费机（收部分硬币）车道的道路通行能力为 500veh/h。”本次仅仿真该情况，若考虑全部收费系统的收费模式过于复杂。具体讨论参考本文 5.2 节。

Q: 为什么不考虑自动车？

A: 因自动汽车无驾驶员，目前主要解决方案为在自动汽车上加装可透支的 ETC 装置，则该车在通过收费站与驾驶员操作差距较小，故在仿真中忽略，具体无人驾驶汽车对本收费站的影响参考本文 4.5 节。

Q: 如何解释该模型的结果与 VISSIM 仿真结果之间的巨大差异？

A: VISSIM 软件考虑了非常多的因素。因此，与纯理论推导相比，VISSIM 更实用。

Q: 如何解释交通流量的巨大变化——2000veh /小时。

A: 这两种收费站都有最大容量。因此，总的时间成本和时间延迟会有很大的变化。我们不能消除 VISSIM 和现实之间的误差，但这不会影响我们的分析。

5.1.2 仿真结论

(1)蜂窝式收费站对车流量的灵敏度分析

根据图 17 可知，相较于传统收费站，蜂窝式收费站在[0,2000]区间的车流量（单位：Veh/h）之间的吞吐量和平均通行时间基本不会变化，说明该模型对车流量变化不敏感，具有极强鲁棒性，适合实际建设。

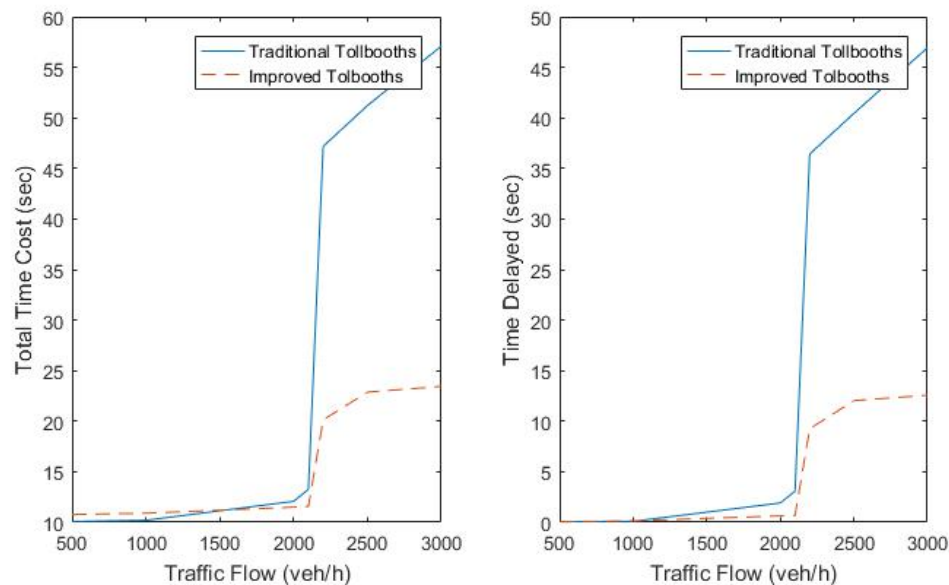


图 17 全 ETC 的蜂窝式收费站和传统收费站随车流量增大通行能力的变化图。

表 2 蜂窝式收费站只有 ETC 车道

| 每车道车流量 (单位 veh/h) | 该路段单车平 均行程时间(单 位 s) | 平均每车道通 行数量 (单位 Veh) | 平均每车道延误 时间 | 平均每车停车时 间 | 平均每车停车次 数 |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|--------------|--------------|
| 500 | 10.778 | 42.778 | 0.056 | 0.000 | 0.000 |
| 1000 | 10.900 | 88.222 | 0.144 | 0.000 | 0.000 |
| 2000 | 11.500 | 180.111 | 0.633 | 0.000 | 0.006 |
| 2100 | 11.567 | 189.556 | 0.667 | 0.000 | 0.001 |
| 2200 | 20.133 | 173.778 | 9.256 | 2.700 | 0.541 |
| 2500 | 22.878 | 184.556 | 12.033 | 3.933 | 0.621 |
| 3000 | 23.444 | 177.000 | 12.578 | 4.522 | 0.723 |

表 3 原收费站-只有 ETC 车道

| 每车道车流量 (单 位 veh/h) | 该路段单车平均行 程时间 (单位 s) | 平均每车道通行车 数量 (单位 Veh) | 平均每车道延误时 间 | 平均每车停车时间 | 平均每车停车次数 |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|---------------|----------|----------|
| 500 | 10.078 | 43.000 | 0.056 | 0.000 | 0.000 |
| 1000 | 10.200 | 88.444 | 0.100 | 0.000 | 0.000 |
| 2000 | 12.078 | 174.556 | 1.911 | 0.767 | 0.173 |
| 2100 | 13.267 | 179.667 | 3.078 | 1.378 | 0.283 |
| 2200 | 47.178 | 146.889 | 36.422 | 22.567 | 1.944 |
| 2500 | 51.222 | 145.000 | 40.444 | 24.367 | 2.331 |
| 3000 | 57.100 | 151.333 | 46.933 | 30.878 | 2.201 |

(2) 当收费站配置为全 ETC 车道时，根据分析上图发现：

- ①车流量较小时两种收费站的吞吐量几乎完全相同。
- ②当车流量较大时蜂窝式明显优于传统收费站。当车流量为 2500veh/h 时，VISSIM

显示仿蜂窝式收费站比原收费站吞吐量大 55%，时间延迟低 70%。

③此仿真完全符合排队论的模型结果。

说明排队论模型是用于衡量仿蜂巢式收费站的吞吐量非常合理。

(3) 当收费站配置为 2ETC 和 6 人工收费车道时，根据分析下图发现：

①混合在较小车流 (<400veh/h) 的情况下，蜂窝式的通行能力与普通的收费站几乎没有差别。

②当车流较大 (>900veh/h) 时，混合蜂窝式的通行能力将大大降低，传统收费站会出现长时间拥堵现象，通过平均时间和平均时延也极高。

③在车流量为 400veh/h 到 900veh/h 之间时，仿蜂窝式收费站的通行能力强于原收费站。

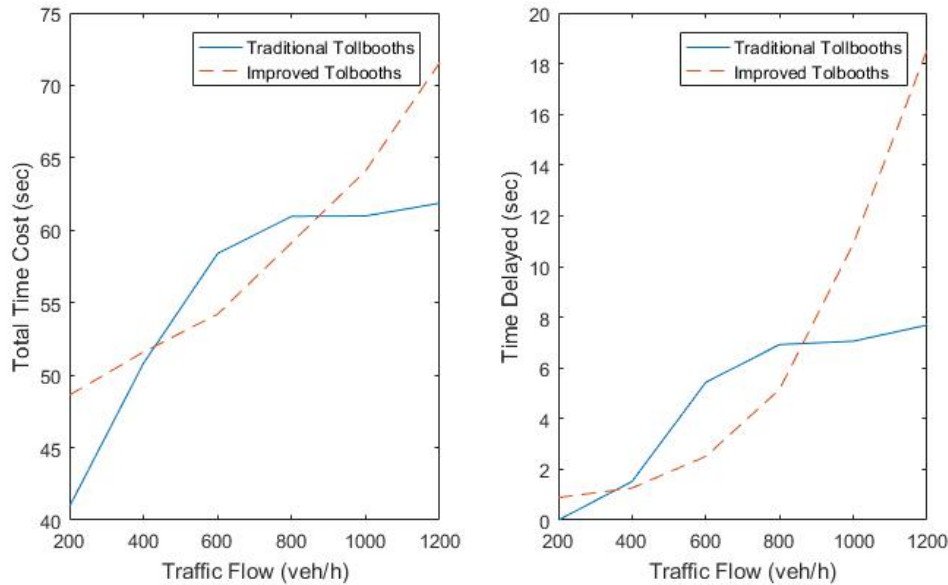


图 18 有 2 个 ETC-6 个人工收费站平均行程时间和平均时间延误

表 4 蜂窝式收费站（2ETC-6 人工）

| 每车道车流量（单位 veh/h） | 该路段单车平均行程时间（单位 s） | 平均每车道通行车数量（单位 Veh） | 平均每车道延误时间 | 平均每车停车时间 | 平均每车停车次数 |
|------------------|-------------------|--------------------|-----------|----------|----------|
| 200.000 | 48.622 | 16.444 | 0.889 | 0.100 | 0.031 |
| 400.000 | 51.600 | 32.000 | 1.267 | 0.178 | 0.058 |
| 600.000 | 54.211 | 48.667 | 2.511 | 0.411 | 0.108 |
| 800.000 | 59.144 | 65.222 | 5.156 | 1.144 | 0.259 |
| 1000.000 | 64.111 | 78.778 | 10.900 | 2.922 | 0.573 |
| 1200.000 | 71.567 | 84.889 | 18.556 | 5.644 | 0.986 |

表 5 原有收费站（2ETC-6 人工）

| 每车道车流量（单位 veh/h） | 该路段单车平均行程时间（单位 s） | 平均每车道通行车数量（单位 Veh） | 平均每车道延误时间 | 平均每车停车时间 | 平均每车停车次数 |
|------------------|-------------------|--------------------|-----------|----------|----------|
| 200.000 | 40.922 | 16.111 | 0.000 | 0.056 | 0.042 |
| 400.000 | 50.822 | 32.111 | 1.522 | 0.322 | 0.159 |
| 600.000 | 58.389 | 44.000 | 5.433 | 0.600 | 0.220 |
| 800.000 | 60.967 | 43.889 | 6.922 | 0.422 | 0.176 |

| | | | | | |
|----------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1000.000 | 60.989 | 43.778 | 7.056 | 0.367 | 0.148 |
| 1200.000 | 61.867 | 43.889 | 7.689 | 0.456 | 0.169 |

5.1.3 仿真样例

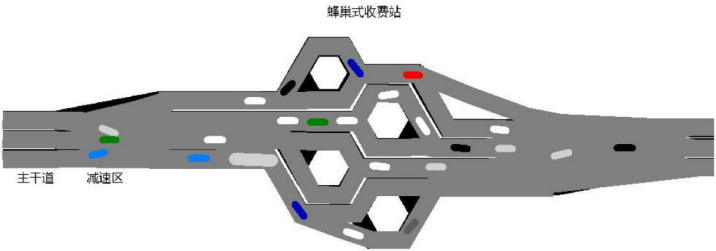


图 19 蜂巢式收费站交通流畅

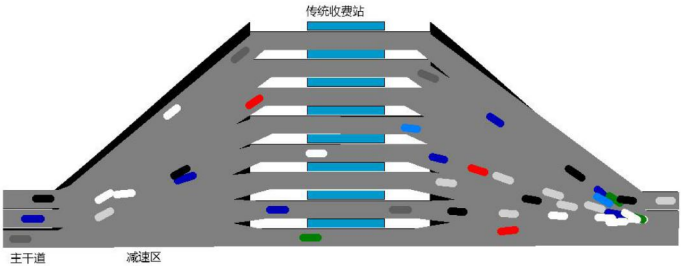


图 20 传统式收费站在 merging 处发生拥堵

5.2 不同收费站比例的影响

5.2.1 模型简化

根据文献[14]中的数据可知，人工收费与硬币收费机这两种收费方式对于该车道的通行能力影响差距较小，在实际研究中可忽略该差距。因此，本篇文章将“人工收费、零钱收费和 ETC 收费对于蜂窝式收费站的影响”简化为“现金收费和 ETC 收费对于蜂窝式收费站的影响”，合理简化数学模型。

表 6 美国各类型收费系统中一条收费车道的通行能力[11]

| 收费系统类型 | 每条收费车道的通行能力（辆/h） |
|-----------------|------------------|
| 人工收费（找零钱+只收预售票） | 425 |
| 硬币收费机 | 500 |
| 低速自动车辆辨认收费系统 | 1200 |
| 高速自动车辆辨认收费系统 | 1800 |

5.2.2 结论分析

(1) 蜂窝式收费站对 ETC 所占比例对通行能力影响的灵敏度分析

蜂窝式收费站的通行能力对于 ETC 车道的所占比例较敏感，可能会出现较多 ETC 时不易拥堵，当减少 ETC 时就会出现大量拥堵的情况。

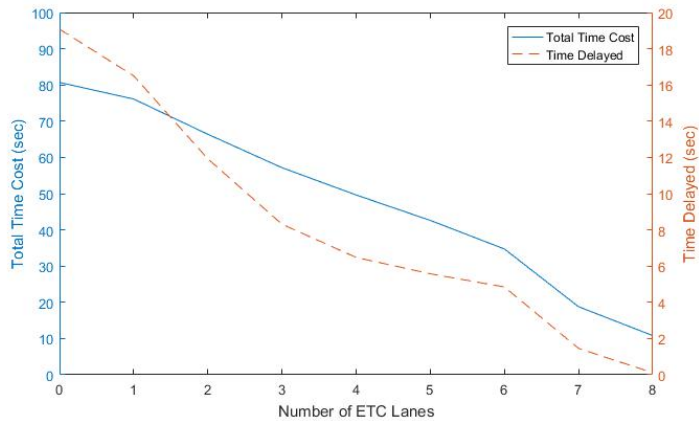


图 21 随自动车辆辨认收费系统所占比例增大对于蜂窝式收费站吞吐量

表 7 不同 ETC 数目的比较

| ETC/现金收费 | 该路段单车平均行程时间(单位 s) | 平均每车道通行车数量(单位 Veh) | 平均每车道延误时间 | 平均每车停车时间 | 平均每车停车次数 |
|----------|-------------------|--------------------|-----------|----------|----------|
| 0\8 | 80.689 | 276.111 | 19.078 | 4.089 | 0.712 |
| 1\7 | 76.111 | 283.556 | 16.500 | 4.622 | 0.744 |
| 2\6 | 66.378 | 286.667 | 11.922 | 3.344 | 0.586 |
| 3\5 | 57.167 | 288.889 | 8.311 | 2.011 | 0.386 |
| 4\4 | 49.633 | 289.333 | 6.478 | 1.544 | 0.308 |
| 5\3 | 42.611 | 290.111 | 5.578 | 1.278 | 0.259 |
| 6\2 | 34.722 | 290.667 | 4.844 | 0.633 | 0.111 |
| 7\1 | 18.778 | 292.111 | 1.456 | 0.467 | 0.071 |
| 8\0 | 10.822 | 292.667 | 0.111 | 0.000 | 0.000 |

- (2) 现金收费所占比例越低，平均通行时间和平均时延越小，也即是吞吐量越高。
- (3) 随着 ETC 车道的增多，每条车道平均通行车的数量同时增多，提高了道路利用率。
- (4) 当开放 8 个 ETC 通道时，蜂巢式收费站可以使在该车道上通行的全部汽车无需停车等待直接驶过。
- (5) 全 ETC 车道比全现金收费车道行驶时间缩短 8 倍。

5.3 有点和缺点分析

5.3.1 优点

- ①蜂窝式收费站极大节约土地面积，并减少建造费用。
- ②蜂窝式收费站提前分流和合流，防止出现传统收费站一个窄口同时合流。
- ③蜂窝式收费站可以强制减速，防止 ETC 车速过快与在收费站附近的较慢的人工缴费汽车发生事故。
- ④通过大量的 VISSIM 交通仿真数据，得到仿真结果，其结果与排队论理论分析的结果是一致的。仿真结果表明，理想的蜂窝式收费站与传统收费站相比，效果更好，尤其是交通流量较大时，平均出行时间减少约 55%，每条车道平均延误时间减少约 70%。
- ⑤通过 VISSIM 仿真，我们得到了不能从理论模型中直接得到的结果，例如当收费站全部是 ETC 或 MTC 的时候。

5.3.2 缺点

- ①如果想使用仿蜂窝收费站设计，必须得严格考虑车辆长度选择道路，因为过长的汽车无法通过蜂窝式收费站的内部。
- ②由于 VISSIM 4.3 中没有收费站模型，我们查阅参考大量文献，确定车辆通过收费站时的平均速度，通过减速带模型模拟该过程，存在一定的误差。
- ③因为确切的交通组成比例、实际数据、速度和加速度等不容易获得，导致交通仿真可能不够贴近现实。
- ④在仿真中忽略了零钱收费车道和人工收费车道的区别。

六、结论

随着 ETC 设备和自动驾驶车辆的普及，未来 20 年，ETC 车道将完全取代 ETC 车道，提高每一辆通过收费站的通行能力，降低车辆的时间成本。

目前，传统收费站设计占地面积大，建设成本高。随着车辆行驶速度的提高，会有点拥挤的合并，这会增加发生事故的可能性。

为了解决这些问题，我们提出了一种新的蜂窝式收费站的设计方案。这个设计灵感来源于蜂巢。该收费站位于每个蜂巢正六边形的中心。由于这种特殊的结构，可以大大降低建筑成本。同时，通过在收费站内部对车辆进行预合并，可以大大减少合并过程中车辆所需的时间成本。此外，通过适当的设计，可以减少在合并点处发生碰撞的概率。

七、参考文献

- [1]王殿海主编. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社.2002.
- [2]吴晓武. 高速公路收费站交通安全研究[D].长安大学,2004.
- [3]Honeycomb. <https://en.wikipedia.org/wiki/Honeycomb>
- [4] Queueing theory. https://en.wikipedia.org/wiki/Queueing_theory.
- [5]Gross D. Fundamentals of queueing theory[M]. John Wiley & Sons, 2008.
- [6]The Washington State Department of Transportation design manual, chapter 1210, Geometric Plan Elements.
- [7]Manual H C. Highway capacity manual[J]. Washington, DC, 2000.
- [8]Hock, Ng Chee, Queueing Modeling Fundamentals, Wiley, New York, 1996.
- [9]Cheng J, Jiang P. Design of Toll Collection Station for Quanzhou to Xiamen Freeway[J]. Journal of Highway & Transportation Research Andk Development, 1995.
- [10] Pratelli A, Schoen F. Multi-Toll-Type Motorway Stations Optimal Layout[C]// Urban Transport XII. Urban Transport and the Environment in the 21st Century. 2006.
- [11] Sivak M, Schoettle B. Road safety with self-driving vehicles: General limitations and road sharing with conventional vehicles[J]. 2015.
- [12]PTV Vissim. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>.
- [13] Liu L, Weng J, Rong J. Simulation Based Mixed ETC/MTC Freeway Toll Station Capacity[C]// 19th ITS World Congress. 2012.
- [14]丁创新.高等级公路收费站通行能力研究[D].昆明理工大学,2005.