

高速公路收费广场通行能力优化模型

宋太华

(山西省太谷公路管理段, 山西 晋中 030800)

摘要: 对高速公路收费广场的通行能力进行优化。基于 M/M/c 排队系统, 将车辆通过收费广场的过程分为进站系统和出站系统两部分, 考虑到公路交通流量逐年增加的情况, 提出两种优化模型, 模型 1 通过最小化平均等待时间来获得最大通行能力, 模型 2 通过确定快速路径和正常路径的最佳比例来最大化系统流量。结果表明, 随着收费站数量的增加, 收费站前的平均等候队伍呈现下降趋势, 而收费站后的平均等候队伍呈现上升趋势, 在收费站数量为 12 个时出现交叉现象, 说明高速公路收费广场在给定条件下达到了最佳效率或最大通行能力; 每个收费站的平均交通负载不超过 0.7, 仍有可用资源用于响应额外的输入交通流增加。

关键词: 公路交通; 高速公路收费广场; 通行能力; 优化模型

中图分类号: U491.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0032-03

随着经济的快速发展和城市化进程的加快, 高速公路车流量逐年增加, 收费广场的通行压力增大。如何提高收费广场的通行能力, 减少交通拥堵对提高交通系统的运行效率、改善用户体验具有重要意义。通过优化资源配置和排队系统设计, 可以提高收费广场的效率和运营成本^[1-3]。建立合理的数学模型和优化方法, 可以提高交通系统的效率, 减少交通拥堵和排队时间, 提供更好的用户服务体验, 并降低系统成本。

高速公路收费广场的车辆通过过程可以分为进站系统和出站系统两部分。进站系统涉及车辆从减速区进入收费站并完成支付的过程, 出站系统涉及车辆从支付完成到从加速场离开的过程。为提高高速公路收费广场的通行能力, 本文基于 M/M/c 排队系统, 提出两种优化模型, 其中模型 1 通过最小化平均等待时间获得最大通行能力, 模型 2 通过确定快速路径和正常路径的最佳比例来最大化系统流量^[4-5]。

1 模型构建

收费站是高速公路系统的组成部分, 用户(即司机)必须为其享受的服务(如使用高速公路、桥梁、隧道等)支付通行费。分析高速公路上交通过程, 收费广场由于减缓了正常交通流的速度, 会给正常交通流带来干扰, 如降低平均行驶速度、增加队列的平均等待时间、增加平均队列长度等。准确的容量分配

可以降低收费站的负面影响和经济成本。

与大多数排队系统一样, 收费广场的交通过程具有以下特征: 1) 系统容量由在给定时刻活跃的多个收费站 m 确定。2) 每个单独的收费站在一定时间段内只为一个用户服务, 可用以秒为单位测算的平均服务时间 T_s 来描述。3) 根据输入交通流特性定义用户进入排队系统的强度(以每小时车辆数为单位)。4) 如果没有可用的免费收费站, 用户将形成一个队列。

收费广场是一个具有交通流向的系统, 将其作为一个排队系统进行建模。车辆从道路的一侧进入收费广场, 在收费站缴费后从另一侧继续行驶。采用排队系统中的 M/M/c 模型进行建模, 模型假设如下: 1) 进站交通负荷平均分配到所有收费站。2) 在短时间内, 收费广场区域的交通流可以描述为静止的。3) 车辆到达时间呈指数分布。4) 服务时间呈指数分布。5) 有足够的空间让所有的车辆都排队。6) 收费站一次只为一辆车服务。7) 服务纪律是先到先得。8) 传出队列不影响收费站服务时间。传出队列是指车辆完成缴费后, 在收费广场外等待离开的队列。在收费广场内, 车辆按照先到先得的服务纪律进行排队等待服务。当一辆车完成缴费后, 它将进入传出队列, 等待其他车辆完成缴费并离开收费站, 它也随着离开收费广场。

M/M/c 排队系统是一种常见的排队论模型, 用于描述具有指数分布(M)的到达间隔时间和服务

时间且具有固定数量(c)的服务器的排队系统。基于 M/M/c 排队系统,提出如下优化模型:

$$\begin{cases} \max \frac{3600}{W_{qi} + W_{qo} + \mu^{-1}} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \rho_i < 1 \\ \rho_o < 1 \\ L_{qi} < 1 \\ L_{qo} < 1 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_{qi} 为 FQS(Free-flow Queue Service,自由流队列服务)在正常路径上的平均等待时间; W_{qo} 为 SQS(Stable Queue Service,稳定队列服务)在快速车道上的平均等待时间; μ 为每个收费站的平均服务车辆数; ρ_i 为 FQS 服务比例; ρ_o 为 SQS 服务比例; L_{qi} 为 FQS 平均等待线长度; L_{qo} 为 SQS 平均等待线长度。

本文以式(1)作为基本模型,构建 2 个优化模型,以获得高速公路收费广场的最大通行能力。

1.1 模型 1

收费站数量比车道数量大得多。所有车辆都可以自由选择收费站。模型 1 通过优化收费站数量和平均服务时间等参数最小化等待队列的平均长度,获得最大通行能力(见图 1)。

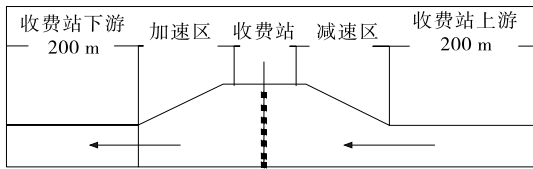


图 1 模型 1 收费广场

从图 1 可以看出:收费广场系统由减速区、收费站和加速区组成,收费站数量远大于车道数量。进入减速区的车辆是 FQS 的客户,系统变量为 $\lambda = N\lambda$ 、 $c = M$ (λ 为来车平均数; N 为车道数量; c 、 M 为收费站数量),用来描述进入收费广场的车辆到达率。每个收费站的平均服务车辆数 μ 由实际数据确定。从收费站出来的车辆是 SQS 的客户,系统变量为 $\lambda = M\mu$ 、 $\mu = \lambda_{\max}$ 、 $c = N$ (λ_{\max} 为 SQS 平均服务时间),用来描述离开收费广场的车辆到达率。模型 1 通过最小化平均等待时间获得最大通行能力,模型表达式如下:

$$T = \frac{3600}{W_{qi} + \min W_{qo} + \mu^{-1}} \quad (2)$$

式中: T 为系统通行能力。

当平均等待时间达到最小值时,收费广场获得

最大通行能力。

1.2 模型 2

为了使车辆尽快通过收费广场,车辆在收费广场中的平均使用时间必须非常短。模型 2 将一些收费车道设置为使用电子不停车收费系统(ETC)的快速车道,并假设快速车道的平均服务时间比正常车道短得多。通过快速车道的车辆使用 ETC 自动支付通行费,其他通过正常车道的车辆使用现金支付。模型 2 的通行能力由通过快速车道和正常车道的车辆通行效率组成,目标是确定快速路径与正常路径的最佳比率,以最大化系统流量(见图 2)。

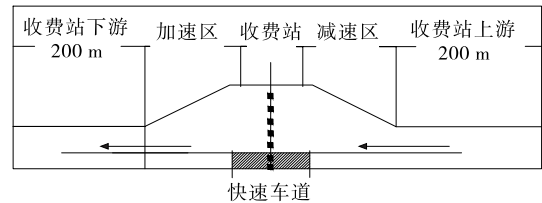


图 2 模型 2 收费广场

模型 2 与模型 1 的区别是模型 2 设置了快速路径,使车辆在很短的时间内通过收费站。模型 2 排队系统中的变量为 $\lambda = aN$ 、 $\mu = r\mu$ 、 $c = bM$ (a 、 b 分别为快速路径和正常路径的数量比例; μ 为整个系统的服务率,指单位时间内完成服务的车辆数量; r 为快速车道与正常车道的服务时间比)。 r 用来调整快速路径的服务效率, $r = 1$ 时,快速路径的服务率与整个系统的服务率相同; $r > 1$ 时,快速路径的服务率比整个系统的服务率高; $r < 1$ 时,快速路径的服务率低于整个系统的服务率。由于快速路径下收费站的通行能力有很大提高,必须提高 SQS 的平均服务时间以增大车流量。设快速车道中 SQS 的平均服务率 $\mu = \lambda_{\max q}$ ($\lambda_{\max q}$ 为 SQS 快速车道的平均服务时间),模型 2 通过确定快速路径与正常路径的最佳比例,以最大化系统流量,模型表达式如下:

$$T = T_q + T_n = \frac{3600}{W_{qin} + W_{qon} + \mu^{-1}} + \frac{3600}{W_{qiq} + W_{qoq} + \mu^{-1}} \quad (3)$$

式中: T_q 、 T_n 分别为快速车道和正常车道中每辆车的平均服务时间; W_{qin} 为正常路径中车辆前进到收费广场前的等待时间; W_{qon} 为快速路径中车辆前进到收费广场前的等待时间; W_{qiq} 为正常路径中车辆在收费广场排队等待的时间; W_{qoq} 为快速路径中车辆在收费广场排队等待的时间。

模型 2 中收费站数量与模型 1 相同,正常路径中的变量为 $\lambda = (1-a)N$ 、 $\mu = \mu$ (μ 代表整个系统的服务率,表示单位时间内完成服务的车辆数量。 r 是一个系数,用来调整快速路径的服务效率。当 $r=1$ 时,快速路径的服务率与整个系统的服务率相同,即 $\mu = \mu$)、 $c = (1-b)M$ 。

2 结果分析

在模型 1 中,当 $\lambda_{\max}=1$ 、 $\lambda=0.4$ 、 $\mu=0.33$ 、 $N=6$ 时,收费站数量为 12 个时高速公路收费广场的通行能力最大,平均等待时间为 2.086 s,最大通行能力为 5 辆/s。收费广场中等待的平均线路长度见图 3,最大通行能力见图 4。从图 3、图 4 可以看出:模型 1 中,随着收费站数量的增加,收费站前的平均等候队伍呈下降趋势,收费站后的平均等候队伍呈上升趋势,收费站数量为 12 个时出现交叉现象,表明收费广场在给定条件下达到了最佳效率或最大通行能力;每个收费站的平均交通负荷不超过 0.7,控制在较低的水平,表明收费站的资源和服务能力得到了有效管理和分配,每个收费站能够在流量高峰期保持相对低的负荷,不至于出现拥堵或服务效率下降的情况,仍然有可用资源用于响应额外的输入交通流增加。

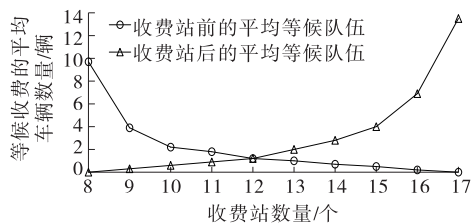


图3 模型1收费广场中等待的平均线路长度

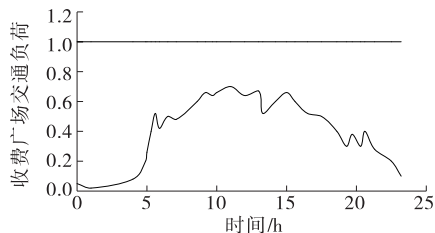


图4 模型1收费广场的交通负荷

在模型 2 中,当快速路径和正常路径的最佳比

例为 3 : 1、收费站数量为 12 个或 13 个时,高速公路收费广场达到最大通行能力(见图 5)。

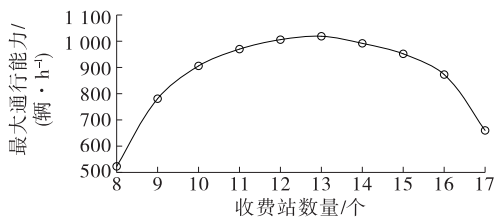


图5 模型2不同收费站数量时的最大通行能力

3 结论

本文研究高速公路收费广场通行能力优化模型。将收费广场排队系统分解为 FQS、SQS 两个子系统,针对不同工况提出两种优化模型。模型 1 通过优化收费站数量和平均服务时间等参数,最小化平均等待时间,获得最大通行能力;模型 2 通过确定快速路径和正常路径的最佳比例,最大化系统流量,获得最大通行能力。模型 2 将一些收费通道设为快速通道,服务时间显著缩短,通过合理调整路径比例和排队系统的服务时间提高交通容量,其通行能力大于模型 1。当快速路径和正常路径的比例为 3 : 1、收费站数量为 12 个或 13 个时,高速公路收费广场的通行能力最大。

参考文献:

- [1] 王大为,黄晓斌,唐杨.交通量临界区设计速度、车道数和服务水平协同研究[J].公路与汽运,2023(2):17-21.
- [2] 詹昌汾.高速公路 ETC 联网收费系统现状分析[J].公路与汽运,2022(5):139-141.
- [3] 王凯,李美玲,张新,等.基于双层规划模型的改扩建高速公路收费站保通方案研究[J].公路与汽运,2021(3):30-34.
- [4] 廖固.高速公路收费站通行能力分析[J].公路工程,2010,35(3):153-155+172.
- [5] 杨源,刘正东,戴连贵.高速公路收费站 ETC 车道通行能力分析[J].计算机与数字工程,2011,39(7):54-56+139.

收稿日期:2023-03-24