

文章编号:1671-8879(2015)06-0117-05

枢纽离站出租车休假排队系统服务台数优化模型

云 亮^{1,2}, 罗孝玲¹, 蒋阳升^{1,3}, 陈 坚^{3,4}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 成都市市政工程设计研究院, 四川 成都 610023;
3. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031;
4. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

摘 要: 现有基于排队的枢纽离站出租车系统研究大多基于单服务台, 与实际情况有较大差距。首先把系统抽象成异步单重休假 M/M/C (ASV) 排队系统, 并得到系统在服务台全忙条件下的稳态指标; 然后建立考虑服务水平的枢纽离站出租车排队系统服务台数双层优化模型, 并设计了基于 Matlab 软件的算法程序; 最后给出算例, 并对优化计算结果、系统仿真与实际方案进行了对比分析。对比分析表明, 该优化模型是可行的, 在充分考虑服务水平因素的情况下是有效的。

关键词: 交通工程; 枢纽离站出租车排队系统; 异步单重休假排队模型; 服务水平; 双层优化
中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A

Service-desk number optimization model for passenger transport hub taxi off-site vacation queuing system

YUN Liang^{1,2}, LUO Xiao-ling¹, JIANG Yang-sheng^{1,3}, CHEN Jian^{3,4}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. Chengdu Municipal Engineering Design and Research Institute, Chengdu 610023, Sichuan, China;
3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. School of Traffic and
Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Existing queuing theory based researches of hub taxi off-site system are mostly for single-desk issue, where is a wide gap with the actual situation. In order to solve this problem, we first abstracted the system into an asynchronous single vacation M/M/C (ASV) queuing system, and got the steady state indicators of system under the condition of all busy service desk; then we created a bi-layer service-desk number optimization model for hub taxi off-site queuing system considering the level of service, and wrote the computer program based on Matlab software; finally we gave a numerical example, and did comparative analysis of results of optimization, simulation and actual situation. It shows that the optimization model is feasible, and also effective in full consideration of level of service. 3 tabs, 1 fig, 10 refs.

Key words: traffic engineering; hub taxi off-site queuing system; asynchronous single vacation queuing system; level of service; bi-layer optimization

收稿日期: 2015-07-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(50678153, 61170041, 51308569)

作者简介: 云 亮(1985-), 男, 山东淄博人, 成都市市政工程设计研究院工程师, 西南交通大学工学博士, E-mail: leonyin830@163.com。

0 引言

铁路客运枢纽作为铁路客运网络和城市交通网络的重要锚固节点,承担着城市对外旅客长途运输和城市内部客运交通转换的职能,枢纽运营效率的高低直接影响着城市内外交通转换能否安全高效地完成。而出租车方式因其机动灵活的出行特性,已经成为保证枢纽离站交通效率的重要交通方式。因此,从优化枢纽离站交通系统配置、提升交通效率和服务水平的角度出发,有必要对如何合理设计离站出租车排队系统服务台数的问题进行研究。

目前国内外学者在枢纽离站出租车交通系统优化问题方面的研究成果仍较局限,主要集中在基于排队模型与基于仿真模拟 2 个方向。基于排队论的研究中,有学者将出租车离站区抽象为双端排队模型^[1-4],由于多服务台双端排队系统非常复杂,因此目前此类研究仅集中在只有一个服务台的系统。但是铁路客运枢纽出租车离站区通常有多条车道供出租车停靠和上客,单服务台系统显然不能对其准确描述。出租车排队系统的特征符合多服务台异步单重休假排队系统模型(asynchronous single vacation, $M/M/C(ASV)$),并且已有学者推导得出了异步休假 $M/M/C$ 排队的稳态队长、等待时间分布等^[5-6]。为此,本文考虑采用异步单重休假排队系统,研究枢纽离站出租车服务台数优化问题。首先对铁路枢纽离站出租车系统高峰时段的运行模式进行分析描述,由此抽象成异步单重休假排队系统,并推导出稳态队长、等待时间等服务水平指标;然后建立考虑服务水平的离站出租车排队系统服务台数优化模型,并编制计算机求解程序;最后给出验证算例。

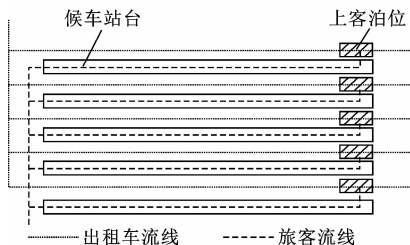
1 出租车离站区异步单重休假排队系统

1.1 $M/M/C(ASV)$ 排队系统描述

铁路综合客运枢纽的离站出租车排队系统通常如图 1 所示。其运行模式为:到达旅客与出租车在各自的等候空间形成排队,当旅客多于出租车时旅客在候车站台形成队列,当出租车多于旅客时出租车在车道边形成队列;在排队过程中,有些旅客对服务水平因素的要求可能会中途退出。按照上述运行模式,旅客和出租车分别按照一定到达规律进入系统。假设旅客能够获得排队长度等信息而出租车不能,则旅客会选择队长最短的服务台进行排队,出租车则随机选择服务台进入系统。



(a) 典型的枢纽离站出租车排队系统



(b) 枢纽离站出租车排队系统示意图

图 1 常见的枢纽离站出租车排队系统
Fig. 1 Common hub off-site taxi queuing system and its schematic

将上客泊位看作服务台,旅客看作顾客,出租车看作服务员。服务员状态可以分为忙期、闲期和假期 3 种。当系统中有可用的出租车且有乘客候车时,认为服务员处于忙期;当系统中有可用的出租车但是没有乘客候车时,认为服务员处于闲期;当系统中没有可用的出租车时,认为服务员处于假期,当有车辆到达时假期马上结束^[5]。因此,该系统为单重休假系统,休假时间为车辆到达间隔时间减去服务时间,休假开始时间间隔为出租车队列长度为 0 的时间间隔。

多服务台休假模型中,所有服务台同时进入和终止休假,称同步(synchronous)休假;各服务台单个地进入和终止休假,称异步(asynchronous)休假^[5]。由于出租车随机选择服务台进入系统,因此根据上述分析,可认为每个服务台出现出租车队列为 0 是独立同分布的,即该系统为异步休假系统。

综上所述,铁路综合客运枢纽的离站出租车系统可以描述为 $M/M/C(ASV)$ 排队系统。

1.2 排队系统参数

(1) 旅客和出租车的到达分布

现有出租车系统的设计一般都假设客流到达与车流到达服从泊松分布,这主要是因为泊松分布的平稳性、无后效性和普遍性与实际情况非常吻合。为取得实例验证,本文选取成都东客站东广场和西广场出租车上客点分别进行调查,采用 χ^2 检验方法,得出客流与车流到达规律在一般的抽样调查中

广泛采用的显著性水平 α 为 0.01 下均服从泊松分布。因此,选取单位时间内旅客的到达分布为 $P(\lambda)$, λ 为平均到达率;单位时间内车流的到达分布为 $P(\mu)$, μ 相当于服务台的平均服务率。根据铁路枢纽的运营情况,可以合理假设高峰时段内旅客不间断地到达枢纽,因此可以认为高峰时段内顾客数量为无限。

(2) 服务时间分布

系统服务时间,即旅客上车时间,受到旅客年龄、性别、携带行李、同行人数、出行特征因素的影响。本文借鉴文献[7]的研究,认为旅客上车时间分布服从泊松分布。

(3) 休假时间分布

目前暂时没有以休假排队系统描述枢纽离站出租车交通系统的研究成果,本文参考文献[5,7]的研究,假设休假时间服从参数为 θ 的指数分布。

(4) 排队规则

按照上述枢纽离站出租车系统的运行方式,每个服务台前顾客形成一个队列,且无法插队,因此采用的是先到先服务的排队规则。

1.3 系统稳态指标

根据上述分析,该系统可描述为到达率 λ 、服务率 μ 的 M/M/C(ASV) 排队系统,休假时间服从参数为 θ 的指数分布。该系统在服务台全忙条件下,系统中等待顾客数、等待时间被分解成 2 个独立随机变量之和;一个是无休假系统中对应的条件指标;另一个是休假引出的附加变量^[5]。

对枢纽离站出租车排队系统服务台数设计,应根据最不利原则在高峰时期系统状态下进行研究。按照常识,可以认为高峰期系统处于服务台全忙状态,因此系统稳态指标推导如下所述^[5]。

记 $X(t)$ 为时间 t 在系统中的旅客数, $J(t)$ 为时刻 t 非空的出租车道数,则 $\{X(t), J(t)\}$ 是二维状态空间的 Markov 过程;已知出租车道全忙,当服务强度 $\rho = \lambda/\mu < 1$ 时,记休假系统的全忙条件排队等待顾客数为 X^C ,全忙条件等待时间为 W^C ,其均值分别为

$$E(X^C) = \frac{\rho}{1-\rho} + \frac{\delta}{\sigma} (\mathbf{I} - H)^{-2} \eta \quad (1)$$

$$E(W^C) = \frac{1}{C\mu} \left[\frac{\rho}{1-\rho} + \frac{\delta}{\sigma} (\mathbf{I} - H)^{-2} \eta \right] \quad (2)$$

式中: ρ 为服务强度 $\rho = \lambda/\mu$; C 为系统服务台; H 、 η 满足 $\{X(t), J(t)\}$ 的率阵 $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} H & \eta \\ 0 & \rho \end{pmatrix}$; σ 为常数 $\sigma =$

$\beta_{cc} + (\beta_{c0}, \dots, \beta_{c,c-1}) (\mathbf{I} - H)^{-1} \eta$; \mathbf{I} 为单位阵; $\beta = (\beta_{c0}, \dots, \beta_{c,c-1}, \beta_{cc}) = (\delta, \beta_{cc})$, 满足 $\beta (\mathbf{I} - R)^{-1} e = 1$; $\delta = (\beta_{c0}, \dots, \beta_{c,c-1})$ 。

2 考虑服务水平的离站出租车系统优化模型

2.1 优化原理

出租车系统服务台数优化过程中,管理部门决定如何设计科学合理的配置方案,以使整个交通系统拥挤程度最小或社会经济效益最大,但是并不能控制出行者的出行选择行为;而出行者会随着各交通方式服务水平指标的改变及时调整自己的出行方式,以使自己的出行费用最小。因此,出租车系统车道数配置优化的目标需兼顾建设成本与旅客使用成本的平衡。

这是一个典型的领导者-追随者对策问题,因此可以采用双层模型进行系统优化。由于系统服务水平影响旅客的选择行为^[8],进而影响离站交通方式的分担率和需求;而在一定的系统服务台数条件下,需求量又决定了系统的服务水平。因此,系统优化过程是动态的。以枢纽客流量预测结果为基础,设定旅客离站出租车系统初始车道数配置方案和出租车方式初始分担率,计算得到系统服务水平指标值;将其作为约束,预测该服务水平条件下到达旅客离站交通结构,进而得到该服务水平条件下出租车方式的需求量;以预测需求量为输入,对车道数配置方案进行优化,并重新计算新配置方案条件下的服务水平指标值;如此循环计算直到:①达到预设的迭代次数或计算时间,②服务水平指标达到初始设定的要求。

因此本文构建的双层优化模型中,上层模型以系统总成本最小为优化目标,下层模型以一定服务水平条件下旅客离站交通方式分担率达到预期结果为优化目标。由此可见,上层模型与下层模型通过离站交通方式分担率实现循环优化。

2.2 优化模型

以一个简单的到达旅客离站交通系统为例,系统由常规公交、城市轨道交通、出租车和小汽车 4 种交通方式组成,即有 4 个选择枝。为了便于处理,本文将常规公交和城市轨道交通归为公共交通系统,将出租车和小汽车归为个体交通系统。实际情况中出租车也具有某些公共交通的服务水平属性。

2.2.1 上层决策模型

上层决策模型以系统建设成本与旅客离站成本

加权和 Z 最小为目标,如式(3)所示。其中,系统建设成本为一次性投入的成本,以资金形式进行量化,为系统控制变量(服务台数量,即出租车车道边数)的线性函数;旅客离站成本为旅客的使用成本,以时间形式进行量化,为高峰时段内排队系统中顾客的总候车时间成本。

$$\begin{aligned} \min Z &= \gamma_1 C + \gamma_2 P_t M_T W^C \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \mu CT \geq P_t M_T \\ W^C \leq E_t(X^w) \\ C \in N \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: γ_1 为每条出租车道及候车站台的建设成本; γ_2 为离站旅客总候车时间的权重系数,根据城市交通发展策略、经济发展水平等因素综合确定; C 为系统服务台数; T 为枢纽高峰运营时段时长; P_t 为出租车方式的离站交通分担率; M_T 为高峰时段铁路枢纽的到达旅客数; $E_t(x^w)$ 为候车时间服务水平期望(计算方法见文献[8]);其余变量同上。

其中,第 1 个约束条件为系统供需约束,出租车运力不能小于预测的需求;第 2、第 3 约束条件为服务水平约束,系统的顾客等待数与等待时间不能大于乘客的服务水平期望;第 4 约束条件为决策变量属性约束,系统优化得到的车道数必须为自然数。

2.2.2 下层约束模型

下层约束模型为离站交通方式分担率预测模型^[9],有

$$\left. \begin{aligned} P_c &= \frac{\exp(b_1 V_c) m^{(\lambda_c - b_1)/b_1}}{m^{\lambda/b_1} + n^{\lambda/b_2}} \\ P_t &= \frac{\exp(b_1 V_t) m^{(\lambda_c - b_1)/b_1}}{m^{\lambda/b_1} + n^{\lambda/b_2}} \\ P_b &= \frac{\exp(b_2 V_b) n^{(\lambda_c - b_2)/b_2}}{m^{\lambda/b_1} + n^{\lambda/b_2}} \\ P_r &= \frac{\exp(b_2 V_r) n^{(\lambda_c - b_2)/b_2}}{m^{\lambda/b_1} + n^{\lambda/b_2}} \\ m &= \exp(b_1 V_c) + \exp(b_1 V_t) \\ n &= \exp(b_2 V_b) + \exp(b_2 V_r) \\ b_1 &= \frac{\pi}{\sqrt{6\sigma_1^2}} \\ b_2 &= \frac{\pi}{\sqrt{6\sigma_2^2}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: λ_c, b_1, b_2 分别为上下层的参数,且满足 $\lambda_c \leq b_1$, $\lambda_c \leq b_2$; P_j 为交通方式 j 的分担率, $j=b, r, t, c$ 时分别表示常规公交、地铁、出租车和小汽车方式; V_j 为选择枝 j 的改进效用函数,计算公式可以表示为

$$V_j = \theta_{j1} X_{j1} + \theta_{j2} X_{j2} + \theta_{jc} \max[0, E_j(X^C) -$$

$$X_{jc}] + \theta_{jw} \max[0, E_j(X^W) - X_{jw}] \quad (5)$$

式中: $E_j(X^k)$ 为服务水平期望, $k=C, W$ 分别表示排队长度和候车时间; X_{j1}, X_{j2} 分别为出行费用和出行时耗特征变量; X_{jc}, X_{jw} 分别为排队长度和候车时间特征变量,对出租车方式则分别为 X^C 和 W^C ; $\theta_{j1}, \theta_{j2}, \theta_{jc}$ 和 θ_{jw} 分别为出行费用、出行时耗、排队长度和候车时间指标的未知参数。

2.3 求解算法

由于服务水平指标同时受到运力配置结果和旅客离站交通方式选择结果的影响,因此离站交通系统配置优化过程可以看作是一个动态循环优化过程。为简化计算,假设出租车方式外的离站方式服务水平期望不变。本文采用如下的启发式算法对整体模型进行求解。

Step1: 令 $k=0$, 设定变量和参数基本输入, 包括初始解 C^0 、服务水平目标值 X^{tgt} 和 W^{tgt} 、时间上限 t_{\max} 。

Step2: 计算 C^k 条件下的初始服务水平指标值 X^k 和 W^k 。

Step3: 将 X^k, W^k 代入下层模型, 计算出租车方式离站交通分担率 P_t^k 及需求量 $M_t^k = P_t^k M$; 下层模型由于模型结构较为复杂, 参数估计比较困难, 因此本文采用适应性强且易操作的极大似然估计法进行参数估计, 最后得到的非线性方程采用 Newton-Raphson 法求解。

Step4: 将 M^k 代入上层模型, 求解运力配置优化方案 C^k 。

Step5: 计算方案 C^k 条件下的服务水平指标值 X^k 和 W^k , 并进行判断:

① 如果 $X^k < X^{\text{tgt}}$ 且 $W^k < W^{\text{tgt}}$, 则优化结束, 否则令 $k=k+1$, 转 Step3;

② 如果 $t \geq t_{\max}$, 则优化结束, 否则令 $k=k+1$, 转 Step3。

3 算例分析

按照成都东客站相关规划资料提供的 2015 年枢纽换乘客流量数据, 并结合现场调查数据标定相关参数, 进行模型计算。其中旅客离站交通方式服务水平期望取 $\eta=75\%$; 假设旅客离站行为不随时间变化, 则排队系统参数和下层约束模型参数根据现场调查数据进行标定。参考相关规划, 高峰小时枢纽客流量为 5 535 人/h。假设主要参数取值为 $\gamma_1=100, \gamma_2=0.02$, 经过迭代循环, 得到最优解 $C=4$ 。模型计算结果如表 1 所示。

表 1 规划条件下成都东客站离站出租车系统优化模型计算结果

Tab. 1 Chengdu east railway station taxi off-site system optimization model calculations on planning conditions

变量与参数	C^0	X^{igt}	W^{igt}/s	T/h	$\mu/(人 \cdot h^{-1})$	$M_T/(人 \cdot h^{-1})$	$P_{00}/\%$	$P_i/\%$	C	X^C	W^C/s	$E_i(X^C)$	$E_i(X^W)/s$
计算结果	7	5	300	2	144	5 535	20	16.3	4	7	411	10	600

注: P_{00} 为出租车方式初始分担率; X^C 、 $E_i(X^C)$ 均为取整结果。

同时,根据调查数据采用 Monte Carlo 方法进行仿真^[10]。利用 MATLAB 软件进行编程,仿真时间为 7 200 s。采用同样的优化目标函数,当车道数为 4 时得到最优解。仿真结果如表 2 所示。

表 2 调查数据条件下成都东客站离站出租车系统仿真结果

Tab. 2 Chengdu east railway station taxi off-site system simulation results based on survey data conditions

C/道	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
旅客平均等待时间/s	603	551	426	420	418	411	406	395	389	376
旅客平均排队长度/人	9	8	6	6	5	4	4	3	2	2
旅客损失率/%	12.1	10.0	8.1	7.4	6.8	6.2	6.0	6.0	5.9	5.8

注:假定每个队列排队长度超过 20 人则新到的乘客放弃排队。

根据结果对比(表 3),优化模型和软件仿真分别得到的最优车道数为 $C=4$ 。成都东客站目前使用车道数为 3 条(共 7 条)。通过系统优化目标函数值、系统服务水平指标的比较,本文优化模型能够得到系统综合成本最小的方案,且服务水平高于实际情况。因此,可以认为优化模型是可行的,在充分考虑服务水平因素的条件下来是有效的。

表 3 优化结果与实际情况对比

Tab. 3 Comparison between optimization results and results of the actual situation

种 类	C	X^C	W^C	Z
优化模型	4	7	6.8	522.700
软件仿真	4	6	7.1	541.475
实际情况	3	11	15.0	632.100

注:实际调查选择的是 9:30~10:30 和 15:00~16:00 时段,数据取算术平均值。

4 结 语

(1)在假设的排队系统参数条件下,在服务水平期望值范围内优化模型能够降低系统的运营成本。

(2)在假设的排队系统参数条件下,在服务水平期望值范围内优化模型能够减少旅客排队长度和旅客候车时间指标。

(3)通过与软件仿真结果的对比表明,按假设条件确定的排队系统参数建立的模型能够降低乘客的排队时间和排队长度的。因此可以认为,本文提出

的优化模型是可行的,在充分考虑服务水平因素的条件下来是有效的。然而该优化模型是在假设其他离站交通方式的配置和服务水平不变的情况下构建的,这与实际情况中各种交通方式之间的合作与竞争关系不符,因此下一步工作应在枢纽离站交通大系统中研究租车排队系统服务台数的优化问题。

参考文献:

References:

[1] Kendall D G. Some problems in the theory of queues [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1951, 13 (2): 151-185.

[2] Kashyap B R K. A double-ended queueing system with limited waiting space[J]. Proceedings of the National Institute of Science of India, 1965, 31A: 559-570.

[3] 袁长伟,吴群琪,韦达利,等. 考虑拒载的出租车市场平衡机制与优化模型[J]. 中国公路学报, 2014, 27 (6): 91-97.

YUAN Chang-wei, WU Qun-qi, WEI Da-li, et al. Optimal modeling and equilibrium mechanism of taxi market with consideration of service refusal[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (6): 91-97. (in Chinese)

[4] 尹小玲,苏 健. 带有负顾客的双端排队系统[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2004, 4(43): 14-18.

YIN Xiao-ling, SU Jian. Double-ended queue system with negative customers[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni. 2004, 4 (43): 14-18. (in Chinese).

[5] 田乃硕,高作峰,张忠君. 异步休假 M/M/C 排队的稳态理论[J]. 应用数学学报, 2001, 2(24): 185-194.

TIAN Nai-shuo, GAO Zuo-feng, ZHANG Zhong-jun. The equilibrium theory for queueing system M/M/C with asynchronous vacations[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica. 2001, 2(34): 185-194. (in Chinese)

[6] 田乃硕. 休假随机服务系统[J]. 运筹学杂志, 1990, 1 (9): 17-31.

TIAN Nai-shuo. The queueing system with vacations [J]. Chinese Journal of Operations Research. 1990, 1 (9): 17-31. (in Chinese)

[7] 柳伍生,谭 倩. 交通枢纽出租车车道边通行能力仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 4(29): 357-361.

LIU Wu-sheng, TAN Qian. Simulation of capacity of taxi arrival curbside parking in traffic hub[J]. Computer Simulation. 2012, 4(29): 357-361. (in Chinese)

[8] 陈大伟. 大城市对外客运枢纽规划与设计理论研究 [D]. 南京:东南大学, 2006.