http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.1019

基于双价值驱动的到港旅客动力学模型

邢志伟[1,*]，阚犇[1]，朱书杰[1]，刘子硕[1]，李彪[1]，罗谦[2]

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300；2. 中国民航局 第二研究所工程技术研究中心，成都 610041)

摘 要：为优化综合交通枢纽服务流程，分析了到港旅客聚集行为动力学特性，研究了到港旅客聚集行为在逆伽马分布、伽马分布与卡方分布时间维度间的转变机制，揭示了聚集行为受航班运行时间与换乘方式效用共同影响，并分别转化为到港旅客时间价值与效用价值。在此基础上，基于逆伽马分布、伽马分布与卡方分布建立了双价值驱动的到港旅客动力学模型，输出为参数可调的到港旅客分布。结果表明：参数可调的仿真输出与真实分布相吻合，为枢纽机场到港旅客分布态势的精准预测提供了方法和依据。

关 键 词：人类动力学；到港旅客；伽马分布；时间价值函数；效用价值函数

中图分类号：TP391.9

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2024)12-3645-09

航空旅客运输量增长迅猛带来的旅客地面保障需求与机场地面服务保障能力存在巨大差距，因此需要探索枢纽机场陆侧综合交通智能与协调运行的新机制[1]。目前，国内枢纽机场中转率相较于国外枢纽机场偏低，到港旅客的庞大数量对陆侧综合交通资源的合理调配提出了重大挑战。预测到港旅客的流动态势是合理调配资源的先决条件，其中到达口作为到港旅客进入综合交通区的重要节点对于整体分析流程十分重要，因此分析其流动态势是空港综合交通区服务流程优化、提高大型机场服务效率与运行水平的基础。

因机场作为独特的交通枢纽，故机场旅客复杂性与随机性导致的聚散行为是研究的热点。研究者统计航站楼内到达旅客流动数据，发现根据间隔时间绘制的平均到达率曲线服从重尾分布特性[2]。针对重尾分布特性，文献 [3] 建立以航班时刻主导参数变化的对数正态分布旅客模型，从而为提供旅客航站楼实时动态提供了参考。文献 [4] 则增加考虑航站楼乘客会不断更新对时间管理和机场环境的认识，将旅客时间成本考虑在内进行量化，从而建立旅客行为模型，实现离港旅客航站楼聚集状态动态分析并为其出行行为的选择提供依据。但以上模型只考虑单一元素对旅客聚散造成的影响，忽略了旅客自身与航班运行等综合因素对旅客流的影响，从而与现实相比存在误差。文献 [5] 基于泊松分布去构建候机大厅旅客流离散事件仿真，设定旅客流程的定性参数从而为机场工作人员提供合理的管理建议。但目前仿真以理想分布为基准的设定，主观舍弃了其他影响旅客聚散的特征。文献 [6] 选取航空旅客的出行特征建立互信息支持向量回归 (mutual information-support vector regression, MI-SVR) 模型，使用机器学习的方法实现对旅客出行指数的预测。也可参考其他场景旅客。文献 [7] 针对非均匀分布旅客数据建立高斯混合模型进行局部聚类，从而对各区域的旅客分布进行了很好的预测效果。但航站楼的客流量易受到航班延误、天气等不确定因素影响较大，具有复杂的非线性特点，且目前到港旅客的特征体系仍处于建立阶段，因此根据输入特征而进行预测的黑箱模型存在预测误差。

收稿日期：2022-12-29；**录用日期**：2023-04-07；**网络出版时间**：2023-05-08 11:16
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230506.1501.002
基金项目：国家重点研发计划 (2018YFB1601200)
* **通信作者**. E-mail：cauc_xzw@163.com

引用格式：邢志伟，阚犇，朱书杰，等. 基于双价值驱动的到港旅客动力学模型 [J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（12）：3645-3653.
XING Z W，KAN B，ZHU S J，et al. A dynamic model of arriving passengers based on dual value driving [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50（12）：3645-3653 （in Chinese）.

为实现机场陆侧综合交通资源的合理调配，需要对港旅客流动态势进行精准预测。本文将由航班运行决定的到港、上轮挡、开舱门及提取行李时间定义为航班信息时间，运用前景理论的思想[8-9]转换为旅客时间价值感知。同时从到港旅客选择交通方式所需时间、费用等主观因素出发，转化为效用价值。最终以到港旅客实时统计数据，建立受时间与效用价值参数可调的到港旅客拟合分布，从而实现到港旅客客流预测。

1 数据统计与分析

1.1 影响旅客到港聚散的主要因素

到港旅客聚散直接受港航班时间的影响驱动[3]，在此基础上以自身步行速度、所选择交通换乘方式对其位于到达口的聚散时间产生影响。

机场不同时段内到港航班架次不同，相应的进入机场旅客流态势也存在差异。当机场到港航班架次较多时，因摆渡车与廊桥等资源受限影响到港旅客下机时间，同时大量旅客涌进机场陆侧，会导致旅客在到达口出现周期性波动。使用单位时间内飞机起降架次与停机位供应能力的比例[10]刻画到港航班架次变化态势。统计国内某枢纽机场全年的到港航班数据，计算每个小时平均到达班次与可供应停机位数量的比值如图1所示。

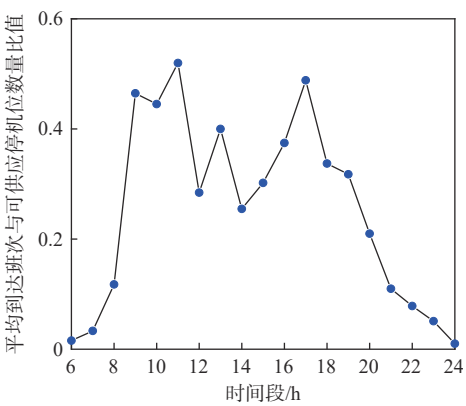


图1 航班平均到达班次与可供应停机位数量的比值

Fig. 1 Ratio of average flight arrivals to the number of available parking spaces

由图1可知，港航班的密集程度在一天内可以划分成3个时段分别为6:00-9:59，10:00-17:59，18:00-23:59。3个时段到港航班密集程度变化导致到达口旅客流发生变化，故以此3个时段对该机场到达口到港旅客数据进行数据统计。

在上述时段内旅客所乘坐航班到达后需要经历上轮挡、开舱门以及提取行李时间，远机位还需考虑摆渡车时间，这些时间直接影响旅客的换乘心理[11]，进而影响换乘过程中步行速度，从而造成到达口旅客聚散情况。当旅客位于到达口后由离开飞机转移到交通换乘，各交通方式的价格、舒适度以及时间等因素均对聚集状态产生整体影响。因此到达口旅客的聚散状态受到航班时刻驱动的换乘心理与方式等多因素约束。

分析影响旅客到港聚散的主要因素后，首先，以实际数据得到旅客到港间隔拟合分布规律，然后，以影响因素为基础建立到港旅客动力学模型并开展数值模拟，验证模型的准确性，并估计到港旅客单位时间内的流动态势。

1.2 分布拟合

本文基于国内某大型繁忙机场2019年实际运行的到港信息开展分析，包含航班信息时间、到港人数、行李总数等数据，部分数据样例如表1所示；到达口某日某时段到港旅客人数样例如表2所示。

表1 到港航班信息

Table 1 Arrival flight information

航班	到港时间	上轮挡时间	开舱门时间	机位	到港人数	总行李数
1	9:00:00	9:04:00	9:12:20	202	110	52
2	9:07:00	9:10:00	9:13:52	206	173	59
3	9:10:00	9:15:00	9:16:40	202	70	28
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表2 到达口旅客人数

Table 2 Number of passengers at the arrival gate

调查点位		人数	
时刻	时段	旅客出口A	旅客出口C
8:10	0～5 min	151	41
	5～10 min	183	68
	10～15 min	68	114
16:30	0～5 min	121	76
	5～10 min	273	132
	10～15 min	179	37
18:00	0～5 min	25	116
	5～10 min	63	92
	10～15 min	100	40

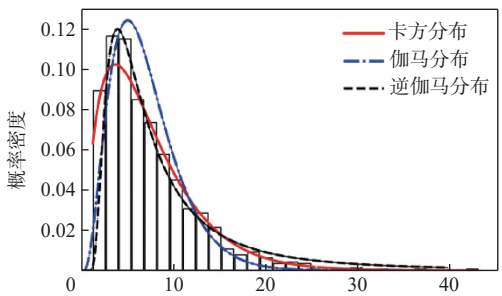
以3个时段对数据分组，并计算所有数据的均值并以组为单位统计到港旅客频数。根据人类动力学的现有研究可知人类诸多行为呈现重尾分布[12-14]。以重尾分布族中的对数正态分布、伽马分布、卡方分布等最为常见，因而开展到港旅客持续过程分布拟合过程。

在绘制频率分布直方图时，为了能更好地展示到港旅客的分布规律以Freedman-Diaconis规则为基准确定组距：[11]

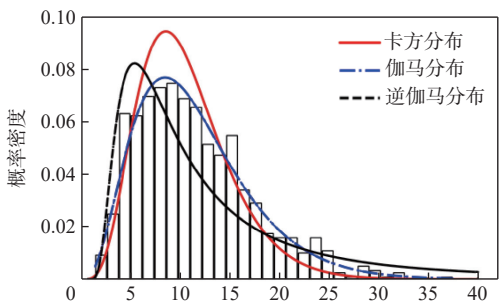
$$l=2\frac{r(x)}{\sqrt[3]{\upsilon}} \tag{1}$$

式中: l为组距; $r(x)$为样本数据x的四分位距离; υ为样本x的观测数。

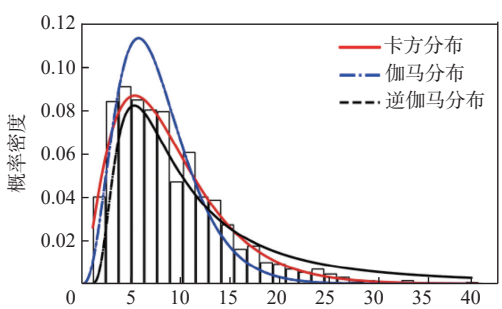
对 3 个时段进行分布拟合时发现, 虽然 3 个时段的到港旅客有着相似的规律, 但重尾分布族的逆伽马分布、伽马分布、卡方分布分别对 6:00-9:59, 10:00-17:59, 18:00-23:59 三个时段拟合效果最优, 具体情况如图 2 所示。



(a) 6:00~9:59时段内



(b) 10:00~17:59时段



(c) 18:00~23:59时段

图 2　不同时段内某区间统计到达口旅客分布

Fig. 2　Distribution of passengers at arrival gate in a certain interval from different time

获取到达口旅客分布拟合情况后, 采用决定系数 R^2 验证以上到达口旅客分布的拟合优度, 决定系数 R^2 的计算式为

$$R^2=\frac{\sum_{d=1}^{q}(\hat{z}_d-\bar{z}_d)^2}{\sum_{d=1}^{q}(z_d-\bar{z}_d)^2} \tag{2}$$

式中: $\hat{z}_d$为旅客密度分布预测值; z_d为旅客密度实际观测值; $\bar{z}_d$为旅客密度平均值。

分别计算每一时段的 3 种分布的拟合优度, 结果显示在 6:00-9:59 时段逆伽马分布拟合最好, 10:00-17:59 时段则更加符合伽马分布以及 18:00-23:59 时段符合卡方分布。各分布拟合参数以及确定系数如表 3 所示, 卡方分布中ν为自由度, 伽马分布与逆伽马分布中α为形状参数, β为尺度参数。

根据航班平均到达班次与可供应停机位数量的比值走势, 结合 3 个时段分布的对应分析可以发现, 当处于 6:00-9:59 时段, 此时到港班次较少并在 8:00-9:59 时段出现到港航班上升的趋势, 故在此时段的到港旅客会在到达口有短暂的聚集行为出现。当处在 10:00-17:59 时段时, 此时到港航班量达到一定数值且稳定在一定水平, 故到港旅客会在很长一段时间持续在到达口出现聚集行为。18:00 之后到港航班数量开始缓慢下降, 与 8:00-9:59 时段到港航班迅速上升不同, 因此到达口旅客的聚集行为出现图 2(c) 所示的分布趋势。通过分析影响旅客到港聚散状态的主要因素, 到港航班班次影响了机场进入不同批次数量的旅客。虽各时段内不同批次旅客大致符合重尾分布, 但在具体各时段内旅客到港后受上轮挡、开舱门及提取行李等时间约束的心理与换乘交通方式的选择对其到达口分布的影响, 因此出现了逆伽马分布、伽马分布、卡方分布不同时段的分布转换。将旅客到港后受上轮挡、开舱门及提取行李等时间约束的心理转换为旅客时间感知价值, 换乘交通方式的舒适度、价钱、时间等转换为旅客的效用价值, 建立基于时间与效用双价值的到港旅客动力学模型。从时间价值与效用价值入手来模拟实现不同时段的分布转换。

表 3　到港旅客分布拟合参数及拟合度检验

Table 3　Arriving passenger distribution fitting parameters and fit test

时段	卡方分布		伽马分布			逆伽马分布		
	ν	R^2	α	β	R^2	α	β	R^2
6:00-9:59	5.544	0.680	1.985	3.644	0.672	1.981	10.102	0.869
10:00-17:59	10.136	0.527	3.564	3.192	0.810	1.746	16.273	0.499
18:00-23:59	7.882	0.786	2.708	3.346	0.676	1.873	12.524	0.637

2 基于时间与效用双价值的到港旅客动力学模型

分析旅客下机后至空港综合客运枢纽换乘离开的流程，将下机至到达口定义为下机距离，到达口至综合交通换乘区定义为换乘距离。当到港旅客位于下机距离时因其离开飞机意愿强烈，且位于到达口后意愿转移到交通换乘，以上轮挡、开舱门及提取行李时间等定义的航班信息时间约束减弱，符合航班信息时间价值函数，因此受时间感知影响大。到港旅客开始换乘位于换乘距离时，此时受到陆侧综合交通方式所需时间，出行费用以及便捷舒适度的影响，故由时间价值影响聚集状态到由效用价值转变。因此到港旅客的流动态势是受时间与效用双价值约束的动力学模型。

2.1 时间价值驱动

将航班信息时间对旅客的影响转移至旅客自身感知进行量化，得到旅客从飞机落地至到达口下机距离的整体时间感知数值V_{APTV}。因到港下机旅客以快速步行至到达口为目的，旅客自身对整体时间的感知影响了其步行速度，从而约束了聚集状态的分布趋势。同时提取行李是到港旅客区别于其他交通方式到达旅客的一个关键特征，因此到达口旅客的分布趋势亦受到了提取行李时间影响。

定义1 到港旅客时间价值B。到港旅客自身对时间感知来自诸多时刻，假设将一天分成n段并满足$T=\{T_1,T_2,\cdots,T_i,\cdots,T_n\}$，定义$v(T_i)$为旅客的时间价值函数，其表达式为

$$v(T_i)=\begin{cases}\varepsilon_i(T_i-T)^{\psi} & T_i\geqslant T\\ -\varepsilon_i(T-T_i)^{\varphi} & T_i<T\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_i>1$表示损失规避系数；$\psi,\varphi\in(0,1)$为面对收益或损失时对价值的风险态度系数。

旅客整体时间感知数值$V(T_i)$为其正感知数值$V_+(T_i)$与负感知数值$V_-(T_i)$的累加：

$$V(T_i)=V_+(T_i)+V_-(T_i) \tag{4}$$

$$\begin{cases}V_+(T_i)=\sum\lambda_i^+v(T_i)=\\ \quad\displaystyle\sum_{i=1}^{n-1}\lambda_i^+\int_{T_i}^{T_{i+1}}\varepsilon_i(T_i-T)^{\psi}\mathrm{d}T \quad T_i\geqslant T\\ V_-(T_i)=\sum\lambda_i^-v(T_i)=\\ \quad\displaystyle\sum_{i=1}^{n-1}\lambda_i^-\int_{T_i}^{T_{i+1}}-\varepsilon_i(T-T_i)^{\varphi}\mathrm{d}T \quad T_i<T\end{cases} \tag{5}$$

式中：λ_i^+、λ_i^-分别为旅客正负感知所对应的主观权重。

旅客自身在每段时间内的感知受损失规避程度影响，最终得到正感知与负感知时间价值的实现。以时间价值理论为基础[15]，当飞机落地后至开舱门前，旅客离开飞机的意愿与此时自身不具有主动权相冲突，此段时间越长旅客的时间负感知越大，开舱门后自身受限减小带来了正感知的增加。因此整体感知以开舱门时间为节点，整体感知数值越大对应旅客内心对时间的感知越满足，导致步行速度相较于整体感知数值小的旅客要慢。旅客步行速度的快慢对其分布的陡峭程度产生直接影响，因此时间价值对位于下机距离的旅客进行了很好的诠释。同时考虑其他影响旅客步行速度的特征从而刻画出到达口旅客分布陡峭程度。

$$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2\theta_1+\cdots+b_{e+1}\theta_e \tag{6}$$

式中：$b_1,b_2,\cdots,b_e,b_{e+1}$为影响分布陡峭程度的特征权重；$\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_e$为其他特征。

2.2 效用价值驱动

在交通方式的选择方面到港旅客与离港旅客类似，所需时间、费用、舒适度等众多因素均会对其在换乘距离过程产生影响，使得各交通方式到达区旅客的分布整体受非单一因素约束，符合人类行为动力学的复杂特性[16]。到港旅客乘坐不同交通方式会计算得到不同效用价值，乘坐轿车离开的到港人群，只考虑便捷舒适度因此效用价值简单，而乘坐地铁离开的旅客将时间、费用均考虑在内使得效用价值较大。

定义2 到港旅客效用价值A。到港旅客无论选择何种交通工具均将各种特征因素考虑在内。假设各特征因素权重为a_w，所需时间、费用、舒适度等特征定义为ω_w。效用价值A即为特征因素的均衡考虑。

$$A=a_1\omega_1+a_2\omega_2+\cdots+a_w\omega_w \tag{7}$$

在得到受效用价值影响的各交通候车区到港旅客概况后，已知到港旅客位于换乘距离时已由时间价值影响到交通换乘转变，再根据统计得到的到达口至各交通候车区的步行平均时间，可知到达口旅客整体分布也受到效用价值约束。因此，可以把到港旅客在到达口的流动态势分布定义为基于时间与效用双价值驱动的人类动力学模型。

2.3 模型描述

将观测数据转换为(τ_i,δ_i)，τ_i为T_i时段中某时间间隔，δ_i为该时间间隔内的到达率。根据2.2节对时间价值影响旅客步行速度快慢从而约束到达口旅客分布的陡峭程度，以及效用价值影响到达口旅客整体分布，可推导得到时间与效用双价值之间的

关系为

$$B=\frac{A\sum_{i=1}^{n}\delta_i}{\sum_{i=1}^{n}\delta_i\tau_i} \tag{8}$$

假设出行费用为M, 时间为T, 舒适度为C和随机因素为ξ, 则效用价值为$A=a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1$[16]。在除航班信息时间感知价值对到港旅客产生步行速度影响外, 将提取行李时间特征影响以行李总数L表示, 得到时间价值为$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$, L为行李总数, σ_1,σ_2为抵达强度系数, 推导可得

$$b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2=\frac{(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)\sum_{i=1}^{n}\delta_i}{\sum_{i=1}^{n}\delta_i\tau_i} \tag{9}$$

推论 1　到港旅客位于到达口的分布, 其聚集时间间隔服从伽马分布, 其中形状参数α服从效用价值$A=a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1$, 尺度参数$\beta$服从时间价值$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$。

在推导得到时间与效用双价值之间的关系即式 (9) 的基础上, 可得

$$\sum_{i=1}^{n}\delta(i)\left(\frac{(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)}{b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2}-\tau_i\right)=0 \tag{10}$$

记式 (10) 为关于$b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$的方程, 对$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$积分得到式 (11)。已知式 (11) 为关于$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$的方程, 改写为关于$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$的函数为式 (12), 将关于$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$的函数去对数化得到函数为式 (13)。符合连续函数分布为式 (14)。

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n}\delta_i\Big[&(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)\ln(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)-\\&\ln\Gamma(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)+\\&(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1-1)\ln\tau_i-\\&(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)\tau_i\Big]=0\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}\ln F(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)=&\\\sum_{i=1}^{n}\delta_i\Big[&(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)\cdot\\&\ln(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)-\\&\ln\Gamma(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)+\\&(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1-1)\ln\tau_i-\\&(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)\tau_i\Big]\end{aligned} \tag{12}$$

$$F(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)=\prod_{i=1}^{n}\left(\frac{(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)^{a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1}}{\Gamma(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)}\tau_i^{(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)-1}\mathrm{e}^{(-b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)\tau_i}\right)^{\delta_i} \tag{13}$$

$$F\left[\tau_i;(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2),(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)\right]=\frac{(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)^{a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1}}{\Gamma(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)}\tau_i^{(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)-1}\mathrm{e}^{(-b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)\tau_i} \tag{14}$$

由理论推导可知, 基于双价值驱动的到港旅客动力学模型使得到达口旅客的分布服从参数$\alpha=a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1$、$\beta=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$的伽马分布。

由于到达口旅客分布是商务、休闲等不同出行目的旅客的综合分布结果, 因此伽马分布的整体分布参数α随各时段旅客主要出行目的发生变化。且不同时段内到港旅客总人数波动较大从而影响旅客时间感知, 因此分布陡峭程度参数b发生变化。

由于一天被分成n段且$T=\{T_1,T_2,\cdots,T_i,\cdots,T_n\}$, 故$T_i$时段的旅客满足此时段内的参数$\beta$不变, 参数$\alpha$微调的伽马分布。

当处于T_i时段时, 满足$\beta=b_1$此时由伽马分布转换为卡方分布。因卡方分布习惯描述为$X\sim\chi^2(\nu)$故此时自由度ν满足$\nu=2\alpha=2(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)$。因此调节参数$\alpha$可得到此时段拟合度更为精确的卡方分布。

$$F\left[\tau_i;b_1,\frac{\nu}{2}\right]=\frac{b_1^{\nu/2}}{\Gamma\left(\nu/2\right)}\tau_i^{\nu/2-1}\mathrm{e}^{-b_1\tau_i} \tag{15}$$

或处于T_i时段时, 改变旅客到达时间间隔τ_i的表示方法从而改变原始伽马分布形式, 使得在此时段的拟合效果相较于原始伽马分布更为精确。

假设$Y=f(\tau_i)=1/\tau_i$, 根据伽马分布$\tau_i\sim F\left[(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2),(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)\right]$, 推导出关于$1/\tau_i$ 的分布即逆伽马分布。

$$F_Y(y)=F_{\tau_i}\left(f^{-1}(y)\left|\frac{d}{\mathrm{d}y}f^{-1}(y)\right|\right) \tag{16}$$

从而将式(16)转换为

$$F_Y(y)=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\left(\frac{1}{y}\right)^{\alpha+1}\mathrm{e}^{\frac{-\beta}{y}}=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}y^{-\alpha-1}\mathrm{e}^{\frac{-\beta}{y}} \tag{17}$$

即关于旅客到达时间间隔τ_i的逆伽马分布：

$$F(\tau_i)=\frac{b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2{}^{a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1}}{\Gamma(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)}\cdot \left(\frac{1}{\tau_i}\right)^{a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1+1}\exp\left(\frac{-(b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2)}{\tau_i}\right) \tag{18}$$

在已知某时段T_i服从伽马分布或由伽马分布推导得到的其他分布后，则在τ_i时间间隔旅客到达比例满足以下关系。

设T_i时段μ时间间隔内的到达口人数为Q，此时段到港航班的运载人数为S，则在μ时间间隔内旅客在到达口聚集的人数为

$$Q=S\int_0^{\mu}F(\tau_i)\mathrm{d}\tau_i \tag{19}$$

3 模型模拟与验证

以高峰时段2019年下半年的10:00-17:59期间旅客平均值为例开展验证分析。已知关于到达口旅客的效用价值驱动为$A=a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1$。不考虑机场到港旅客整体差异以及个人行为，因此将参数设定为1，从而求得抵达系数σ_1。同理，旅客的时间价值驱动$B=b_1V_{\mathrm{APTV}}+b_2L/\sigma_2$也进行相同转换。得到$A=a_1+a_2+a_3/\sigma_1$，$B=b_1+b_2/\sigma_2$，由之前的拟合分析可知高峰时段10:00-17:59到达口旅客符合$\alpha=3.564$，$\beta=3.192$的伽马分布，因此得到抵达系数$\sigma_1=0.28$，$\sigma_2=0.31$。

由分析可知旅客时间价值感知受航班信息时间约束，将飞机到港时间定义为t_{a}，上轮挡时间定义为t_{s}，开舱门时间定义为t_{o}，第一位旅客步行至到达口时间定义为t_{f}，飞机到港至上轮挡时间间隔定义为t_1，上轮挡至开舱门时间间隔定义为t_2，开舱门至旅客到达出口时间间隔定义为t_3。t_3根据该国内某机场CAD平面图计算的旅客步行距离以及步行平均速度1.2 m/s决定。

已知t_1时间内旅客离开飞机的状态受到约束因此为负感知，t_2时间内飞机停下旅客出现下机倾向带来正感知的上升，t_3时间内旅客注意力由下机转为换乘，于是正感知趋向于0。将式(4)和式(5)更加详细化，可得到旅客时间价值感知变化为

$$V(t)=\lambda_1^{-}\int_{t_{\mathrm{a}}}^{t_{\mathrm{s}}}-\varepsilon_1t_1{}^{\varphi}\mathrm{d}t+\lambda_2^{+}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{o}}}\varepsilon_2t_2{}^{\psi}\mathrm{d}t+\lambda_3^{+}\int_{t_{\mathrm{o}}}^{t_{\mathrm{f}}}\varepsilon_3t_3{}^{\psi}\mathrm{d}t \tag{20}$$

由于旅客下机后注意力由迫切下机逐步转为考虑换乘方式，$\varepsilon_1>\varepsilon_2>\varepsilon_3$；$\lambda_1^{-}$、$\lambda_2^{+}$、$\lambda_3^{+}$分别对应了与总感知的比值。

为了探究感知数值V_{APTV}与行李总数L的权重b_1、b_2，可以根据各到港航班的停机位号对应于该机场的CAD图求得不同航班的t_3时间，从而计算各航班到港旅客感知数值V_{APTV}^{j}。结合各航班的行李数值L^j，对以上数值进行量纲化处理后可求得b_1、b_2为

$$b_e=\frac{P^j}{\sum_{j=1}^{m}P^j}\quad e=1,2 \tag{21}$$

$$P^j=\mathrm{mean}\left(V_{\mathrm{APTV}}^{j},L^j\right) \tag{22}$$

式中：j表示第j班次航班；m表示共m班次航班；P^j为各航班到港旅客感知数值V_{APTV}^{j}与各航班的行李数值L^j的平均值。由上述公式可以求得高峰时段10:00-17:59期间的时间价值驱动参数，各参数值如表4所示(V_{APTV}与L均为量纲化处理后均值)。

表4 时间价值驱动的各参数

Table 4 Parameter driven by the time value

时间感知数值		行李总数均值		B
V_{APTV}	b_1	L	b_2	
0.916 3	0.860 2	1.099 8	0.634 4	3.039

旅客效用价值驱动受到了各交通方式所需时间、费用、舒适度等因素的影响，因此各交通方式具有不同的效用价值。为得到到达口的到港旅客选择各交通方式的综合效用价值，将到港旅客分为商务出行与休闲出行旅客2大类。与休闲旅客有较为充裕的出行时间而注重出行费用相反，商务出行旅客对出行时间与舒适度更为看重。所以休闲旅客更倾向于公交、地铁等公共交通方式而商务旅客更倾向于网约车、私家车等私人交通方式。根据目前国内机场各交通方式分担的比例显示包括网约车、私家车在内的小汽车占比65.5%，公交占比18.6%，地铁为15.9%，因此商务旅客与休闲旅客效用价值分别占比$p_1=65.5\%$，$p_2=34.5\%$，可得到港旅客在位于到达口时综合效用价值为

$$\begin{cases}A=p_1(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)_{\mathrm{BT}}+\\ \qquad p_2(a_1M+a_2T+a_3C+\xi/\sigma_1)_{\mathrm{LT}}\\ 0.5\leqslant M,T,C,\xi\leqslant 1\\ 0.1\leqslant a_1,a_2,a_3\leqslant 1\\ a_1+a_2+a_3=1\end{cases} \tag{23}$$

因各交通方式的考虑因素各有优劣，因此设定

出行费用 M, 时间 T, 舒适度 C 和随机因素 ξ 最高上限为 1, 且各种因素在对比中不存在最低下限因此设定其为 0.5。小汽车的费用与舒适度最高, 因此设定 $M=1$, $C=1$, 但其所用时间相较于公共交通要短, 可将 T 设定为下限 0.5。由于商务旅客选择私人交通时同等看重舒适度与时间, 而不看重出行费用, 因此将 a_1 设定为下限 0.1, a_2 与 a_3 相等为 0.45。考虑堵车等随机因素, 因为公交有专用车道且地铁不存在堵车, 相较而言小汽车更易堵车, 因此公共交通与私人交通的随机因素 ξ 分别取上、下限。公共交通的费用最低因此 $M=0.5$, 但其相对于私人交通所花时间长且舒适度低, 可令 $T=1$, $C=0.5$。休闲旅客出行看更看重于出行费用, 不在意时间与舒适度, 因此 a_2, a_3 均取下限 0.1, 进而 $a_1=0.8$。从而求得 10:00-17:59 期间的效用价值驱动的各参数如表 5 所示。

表 5　效用价值驱动的各参数

Table 5　Parameter driven by the utility value

出行方式	费用		时间		舒适度		ξ	A
	a_1	M	a_2	T	a_3	C		
私人交通	0.1	1	0.45	0.5	0.45	1	1	3.653
公共交通	0.8	0.5	0.1	1	0.1	0.5	0.5	

同理采用以上验证方法对 6:00-9:59 时段的逆伽马分布以及 18:00-23:59 的卡方分布进行验证。为了验证模型的有效性, 对到达口的到港旅客聚集行为使用以上参数进行模拟如图 3(a) 所示。高峰时段 10:00-17:59 期间符合伽马分布的参数 $\alpha=3.564$, $\beta=3.192$, 与根据基于时间与效用双价值的到港旅客动力学模型推导得到的仿真伽马拟合参数 $\alpha=A=3.653$, $\beta=B=3.039$ 基本吻合, 对以上推导模型进行了验证。

根据不同时段旅客时间价值感知不同以及各交通方式具有不同的效用价值, 根据上述推导过程, 以 2019 下半年的平均数据为验证值, 求得 6:00-9:59, 18:00-23:59 此 2 个时段内某区间统计到达口旅客仿真输出如图 3(b) 和图 3(c) 所示。

为验证参数可调仿真分布拟合与实际数据分布拟合的准确度, 分别计算 3 种分布拟合与实际拟合的相对熵 (Kullback–Leibler divergence, KLD), 从而在差异程度上实现拟合验证, 具体情况如表 6 所示。结果表明仿真拟合与实际拟合差异程度很小, 因此双价值驱动的到港旅客动力学模型可以提供良好的预测效果。

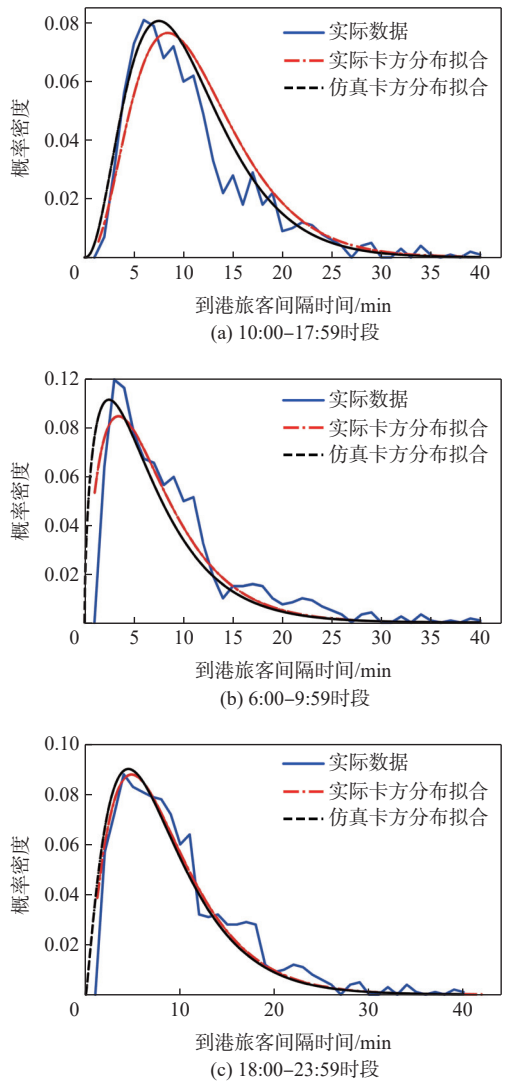


图 3　不同时段内某区间统计到达口旅客仿真输出

Fig. 3　Simulation output of passengers at arrival gate in a certain interval from different time

表 6　不同分布的仿真拟合与实际拟合的差异程度

Table 6　Degree of difference between simulation fitting and distribution actual fitting of different distributions

评价指标	伽马分布	逆伽马分布	卡方分布
KLD	0.337	0.443	0.257

4　结　论

本文通过对某大型繁忙机场到达口到港旅客的一天内的聚散行为进行分析, 展开了对到港旅客流动态势的拟合以及仿真探究, 得到以下结论:

1) 全天内机场到达口旅客的聚集时间间隔分布根据到港航班的密集程度符合由逆伽马分布到伽马分布再到卡方分布的转换。

2) 旅客自身特性可转化为时间价值与效用价值, 从而建立双价值驱动的到港旅客动力学模型, 进一步推理可得到港旅客分布的参数变化。

3）所得到港旅客动力学模型能够生成全天内逆伽马分布、伽马分布以及卡方分布的可调参数 $\alpha = a_1 M + a_2 T + a_3 C + \xi/\sigma_1$，$\beta = b_1 V_{\mathrm{APTV}} + b_2 L/\sigma_2$。实验证明与实际拟合分布相比仿真输出结果相差不大。

双价值驱动的到港旅客动力学模型虽然能够提供良好的预测效果，但是影响旅客到达口聚散的因素有很多，如节假日带来的到港航班密集差异等。且目前仍存在缺少特征数据等问题，未来，随着机场的陆侧综合交通结构的完善带来的数据补充，可进一步提高模型的精准性与普适性。

参考文献（References）

[1] 中国民用航空局. 新时代民航强国建设行动纲要[R]. 北京: 中国民用航空局, 2018: 1-20.
Civil Aviation Administration of China. Action plan for building a powerful civil aviation country in the new era[R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2018: 1-20(in Chinese).

[2] 周涛, 韩筱璞, 闫小勇, 等. 人类行为时空特性的统计力学[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(4): 481-540.
ZHOU T, HAN X P, YAN X Y, et al. Statistical mechanics of the spatiotemporal characteristics of human behavior[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(4): 481-540(in Chinese).

[3] 邢志伟, 冯文星, 罗谦, 等. 基于航班离港时刻主导的单航班离港旅客聚集模型[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(5): 719-724.
XING Z W, FENG W X, LUO Q, et al. Arrived passenger model in single flight based on the time of departure[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(5): 719-724 (in Chinese).

[4] BAO D W, ZHANG T X, TIAN S J, et al. Joint choice model for airport passengers' travel mode and departure time based on agent theory[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(6): 177-187.

[5] FONSECA I CASAS P, CASANOVAS J, FERRAN X. Passenger flow simulation in a hub airport: An application to the Barcelona International Airport[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 44: 78-94.

[6] 熊红林, 朱人杰, 冀和, 等. 基于MI-SVR模型的航空旅客出行指数预测方法研究[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1619-1626.
XIONG H L, ZHU R J, JI H, et al. Air passenger index prediction method based on MI-SVR mode[J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1619-1626 (in Chinese).

[7] 李晓璐, 于昕明, 郗艳红, 等. 基于DBSCAN算法的城轨车站乘客聚集特征分析[J]. 控制与决策, 2019, 34(1): 18-24.
LI X L, YU X M, XI Y H, et al. Analysis of passenger aggregation characteristics of urban rail stations based on DBSCAN algorithm[J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 18-24 (in Chinese).

[8] CHEN J M, DE GROOTE J, PETRICK J F, et al. Travellers' willingness to pay and perceived value of time in ride-sharing: an experiment on China[J]. Current Issues in Tourism, 2020, 23(23): 2972-2985.

[9] 刘艳芳. 基于乘客感知价值的可变站点式柔性公交调度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019: 9-34.
LIU Y F. Research on flexible bus scheduling with variable stops based on passengers' perceived value[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019: 9-34 (in Chinese).

[10] 冯霞, 张鑫, 陈锋. 飞机过站上客过程持续时间分布[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(2): 98-105.
FENG X, ZHANG X, CHEN F. Boarding duration distribution of aircraft turnaround[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(2): 98-105 (in Chinese).

[11] 白雪莲. 航空旅客通达机场时间可靠性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 22-38.
BAI X L. Reliability analysis of air passengers' arrival time at airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 22-38 (in Chinese).

[12] BARABÁSI A L. The origin of bursts and heavy tails in human dynamics[J]. Nature, 2005, 435: 207-211.

[13] YU K. Empirical analysis on human dynamics of sharing-bicycles' user behavior[J]. Measurement and Control, 2020, 53(3): 1791-1799.

[14] YI M, LU Y Y, DENG W H, et al. Understanding verified users' posting behavior from the perspective of human dynamics: a case study of Sina micro-blog[J]. Aslib Journal of Information Management, 2020, 73(2): 221-239.

[15] 田丽君, 吕成锐, 黄文彬. 基于累积前景理论的合乘行为建模与研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(6): 1576-1584.
TIAN L J, LYU C R, HUANG W B. Modelling carpooling behavior based on cumulative prospect theory[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(6): 1576-1584 (in Chinese).

[16] 邢志伟, 文涛, 罗谦, 等. 基于效用价值驱动的旅客出行动力学研究与建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(2): 250-256.
XING Z W, WEN T, LUO Q, et al. Utility value driven passenger travel dynamic study and modeling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(2): 250-256 (in Chinese).

A dynamic model of arriving passengers based on dual value driving

XING Zhiwei[1,*], KAN Ben[1], ZHU Shujie[1], LIU Zishuo[1], LI Biao[1], LUO Qian[2]

(1. School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Engineering Technology Research Centre, The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to optimize the service process of the integrated transportation hub, the dynamic characteristics of the aggregation behavior of arriving passengers were analyzed. The transition mechanism of arriving passenger aggregation behavior between inverse gamma distribution, gamma distribution, and chi-square distribution was studied. It revealed that this aggregation behavior was affected by the flight operation time and transfer mode utility, which was converted into the time value and utility value of arriving passengers, respectively. On this basis, a dynamic model of arriving passengers driven by the dual values was established based on these three distributions, and the output was the distribution of arriving passengers with adjustable parameters. The results show that the simulation output with adjustable parameters is consistent with the real distribution, which provides a method and basis for accurate prediction of the distribution situation of arriving passengers at the airport.

Keywords: human dynamics; arriving passengers; gamma distribution; time value function; utility value function

Received: 2022-12-29; **Accepted**: 2023-04-07; **Published Online**: 2023-05-08 11:16
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230506.1501.002
Foundation item: National Key R&D Program of China (2018YFB1601200)
* **Corresponding author**. E-mail: cauc_xzw@163.com