

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0477

同质竞争下补贴策略对多机场航线网络演化博弈

吴维^{1,*}, 林芷伊², 王兴隆¹

(1. 中国民航大学 民航飞联网重点实验室, 天津 300300; 2. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为实现区域内多机场基于差异化定位的高质量协同发展, 研究机场差异化补贴策略对多机场航线网络演化影响, 进而确定最佳补贴策略。基于旅客、航司、机场间的竞争博弈关系, 构建了双层演化博弈模型。在上层博弈模型中, 考虑旅客自学能力对票价的影响, 构建融合自学习机制的 Logit 旅客选择模型, 利用 Hotelling 定价模型分析同一航线航司间票价竞争对旅客选择行为的影响, 进而确定在竞争条件下航司最佳定价策略; 在下层博弈模型中, 基于复制动态方程分析各机场补贴与航司间竞争性选择航线优化过程, 确定机场间协同补贴策略与航线网络协同效果。结果表明: 对于转移航线的航司, 吸引“渗流”旅客的优势票价折扣区间为 0.6~0.75; 同航线竞争的航司票价折扣集中在 0.6~0.85 之间, 可避免出现低价竞争带来的收益共损; 通过机场差异化补贴实现航线网络优化, 不同机场均存在基于差异化功能定位的最佳补贴区间。

关键词: 航空运输; 差异化补贴策略; 航线网络优化; 双层演化博弈; 复制动态方程

中图分类号: V355.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)10-3392-13

城市规模扩大与区域经济发展, 使得机场也出现了聚集, 机场群孕育而生。由于机场间长期存在隐形壁垒, 强大的“虹吸效用”使机场群出现了国际枢纽机场资源紧张、航线主骨干通道容量不足, 而机场群内的国内枢纽机场、区域机场资源过剩、航线次骨干通道有待利用的现象。为此, 研究多机场的协同发展成为很多学者研究重点。

1) 研究旅客出行行为与航线网络演变关系。文献[1]考虑高铁和航空运输竞争下构建旅客出行选择偏好模型, 探讨不同竞争策略下路网/航线间的竞争关系。文献[2]基于多家航司间的竞争, 构建航司航线选择收益模型, 分析在竞争视角下机场收费标准对航司建立航线网络的影响。文献[3]利用旅客出行数据, 实证分析航司选择不同等级机场对其机场航线网络演化的影响。文献[4]分析票价定价策略与航线网络组合之间的关系, 并设计了航司定价算法。文献[5]考虑在同质化竞争日益激烈情

况下, 分析航空联盟与航线网络之间的关系, 并构建指标体系评价其紧密程度。文献[6]考虑不断加剧的高铁与民航竞争关系, 采用博弈理论构建竞争与合作的模型。文献[7]研究了多机场内旅客在不同机场间的选择行为, 阐述不同条件下旅客的“渗流”现象。文献[8]统计分析多机场内各机场航线网络特征, 基于重叠度、频次等指标构建了评价模型, 分析旅客选择的可替代性及机场间的竞争程度。文献[9]针对中距离旅客选择行为特征建立博弈模型, 分析在中距范围内高铁与航空的竞争关系, 并用逆向归纳法求解双方博弈策略。

2) 针对机场、航司 2 个航线网络演变推动主体, 研究两者相互作用对旅客出行和航线网络规划的影响。文献[10]围绕机场发展策略对航司制定票价策略的影响, 构建了机场与航线的选择偏好模型, 采用二维策略图进行求解, 为优化双方策略提供基础。文献[11]系统分析了航司、机场与旅客之

收稿日期: 2024-06-21; 录用日期: 2024-08-16; 网络出版时间: 2024-09-13 10:00

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240912.1744.004

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金中国民航大学专项 (3122025098)

*通信作者. E-mail: www@cauc.edu.cn

引用格式: 吴维, 林芷伊, 王兴隆. 同质竞争下补贴策略对多机场航线网络演化博弈[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(10): 3392-3404.
WU W, LIN Z Y, WANG X L. Evolutionary game of subsidy strategy on multi-airport route network under homogeneous competition[J].
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(10): 3392-3404 (in Chinese).

间的共生关系,从生态视角建立动力学方程,探讨三者之间关系,并制定协同发展最优策略。文献[12]针对新冠疫情影响后的航线恢复问题,研究不同类型机场采取不同补贴策略对彼此航线网络的影响,为制定机场不同补贴策略提供基础。文献[13-14]考虑多利益主体影响下航司构建航线网络模式,利用博弈论和逆向归纳法进行求解,确定不同利益相关策略及最佳航线网络模式。

综上,现有研究主要针对航线网络结构特征、旅客出行行为选择、航司发展战略等角度分析航线网络演变特征及各因素间的相互影响,主要采用数据统计分析、出行行为建模、动力学建模等方法,为研究航线网络优化提供了思路和方法。但随着区域内多机场的发展及航司间的竞争加剧,航线网络演化面临新的挑战,需要对影响因素和研究方法进一步完善,主要问题包括:①多机场同质化竞争日益严重,降低竞争增强协作的关键是差异化的航线网络调整(即航司航线网络构建要匹配机场的功能定位),而针对基于多机场协同定位的主动引导式航线网络优化研究不足;②研究多机场旅客出行行为对航线网络的影响时主要基于票价因素决定旅客选择行为,而实质上旅客作为决策主体具有智能学习决策特征,其会根据其他旅客收益、历史决策经验、航司特征等动态修正出行行为,而现有研究弱化了旅客自身选择特征的影响;③研究航司航线优化时,主要从补贴、自身发展战略出发,对多机场协同补贴策略及航司同质化竞争对航线网络构

建的影响考虑不足。

为此,本文针对多机场、多航司同质化竞争下,分析补贴策略对多机场航线网络优化引导效能,以最佳补贴策略引导航司构建匹配机场功能定位的航线网络,实现多机场协同发展。综合考虑旅客、航司和机场间的同质竞争、异质博弈,构建了双方、双层演化博弈模型。

1 问题描述与建模思路

随着城市群的发展,机场也呈现出了聚集现象,出现了相距比较近的多机场,由于航司间竞争造成机场航线网络趋同,叠加距离较近使得机场间差异化定位执行效果不佳,造成多机场发展不均衡、资源浪费、运营效率低等问题。引导机场按照差异化功能定位实现协同发展,就成为多机场发展的必由之路。例如,多机场内可按照机场特点分为国际枢纽机场、国内枢纽机场和区域机场,进而打造差异化航线网络。国际枢纽机场重点打造国际航线,疏解与自身定位不符的航线;国内枢纽机场重点打造国内干线网络;区域机场主要打造区域内支线。但多数机场都在开航相同的航线,造成各机场航线网络趋同,同质化严重。航线网络构建是市场行为,需要通过补贴策略引导航司以差异化机场定位为基础优化航线布局。针对已具备机场群特征的现有航线网络,通过补贴引导航司调整其在不同机场的航线网络,打造出协同化的航线网络,该过程如图 1 所示。

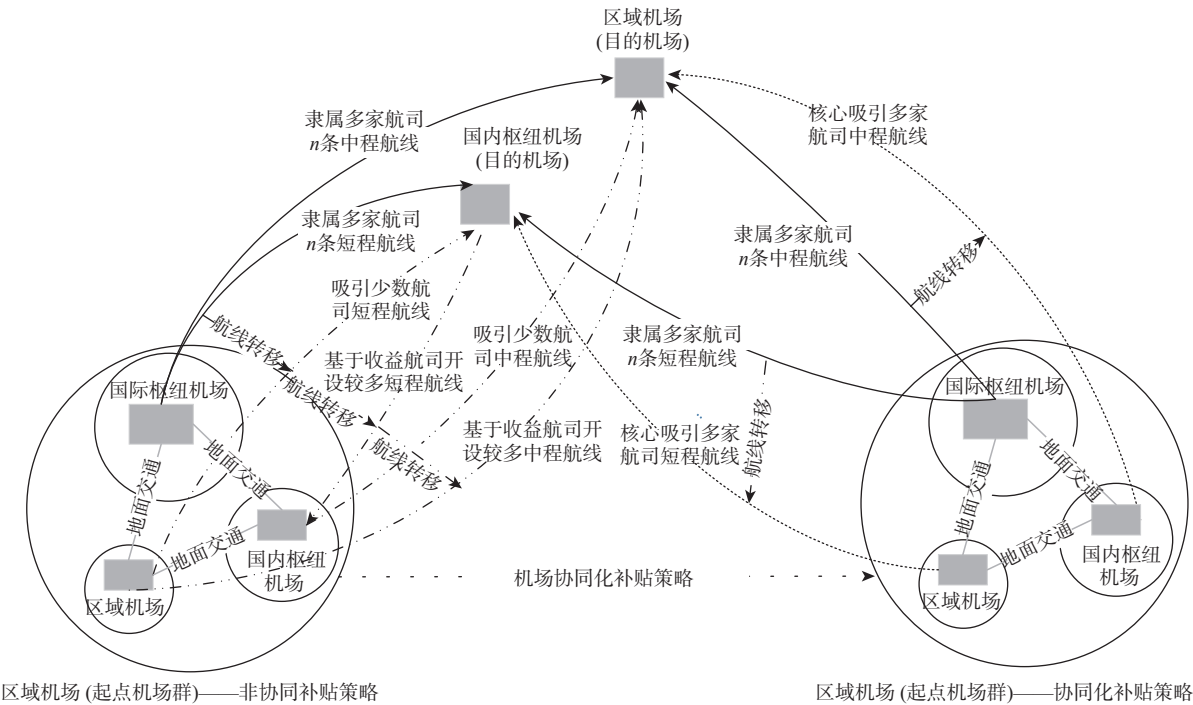


图 1 机场间航线网络协同演化示意图

Fig. 1 Collaborative evolution diagram of route network between airports

图 1 左侧表示现有机场群航线网络特点, 机场群中有不同定位的机场, 由于航司为争夺热门航线和航线补贴, 造成机场间航线重叠度高, 机场差异化定位没有体现(如国际枢纽机场开辟很多中短程航线, 国内枢纽机场开辟很多远程航线), 为此, 通过以机场差异化功能实现为目标构建机场间协同化航线补贴策略, 使得航司在追求收益的同时打造了机场差异化航线网络, 降低同质化竞争, 提升机场协同性, 国际枢纽机场以远程航线为主, 国内枢纽机场以中程航线为主, 区域机场以短程航线为主的差异化共赢航线网络。

上述演变过程是基于多机场功能已经明确下, 由机场主导完成航线网络布局, 为此, 机场通过制定补贴策略, 引导航司开辟、调整航线实现其定位。因此, 上述市场行为的核心是航司, 而航司调整航线网络的关键是收益, 收益主要由客票收入和补贴收入构成, 其值大小受 2 方面博弈影响。一方面, 客票收益本质是旅客与航司间的博弈, 不同票价叠加航司间竞争造成吸引旅客数量不同形成不同收益曲线, 航司会通过票价折扣不断扩大腹地旅客和“渗流”旅客人数; 另一方面, 机场为实现自身功能定位制定最小补贴策略吸引航司开辟航线, 而航司希望通过调整航线获取最大补贴收益, 两者之间产生了博弈, 为此, 本文构建了双层演化博弈模型。

2 上层博弈模型

上层博弈模型在考虑旅客选择不同公司航线折扣收益、旅客间相互学习及同一航线不同航司间竞争下, 分析航司定价策略对旅客选择概率的影响, 以确定航司在最佳收益时的定价策略。

2.1 融合自学习改进 Logit 旅客选择模型

该博弈过程的博弈主体是非腹地旅客与航司。机场在建设时有主要服务的行政范围旅客, 不在其服务行政范围而选择该机场起降的为非腹地旅客。非腹地旅客对价格比较敏感, 会受到航司折扣票价的影响, 根据价格作出每次出行是否为渗流旅客的决策。

该演化博弈过程的基本假设如下:

H1: 在固定航线下, 旅客总人数为选择民航出行旅客且为可估算值, 所有旅客均可掌握航司的票价信息作出是否渗流的决策, 并根据收益进行策略调整。

H2: 假设旅客在未转移前享受的机票价格为 A^* , 并且各航司会根据实际情况制定折扣票价吸引旅客实现由非腹地旅客向“渗流”旅客的身份转

变。由于旅客在选择是否成为“渗流”旅客的出行策略时, 更多关注新交通起止点(origin-destination, OD)航线市场的总体票价情况, 选取新市场各航司的折扣票价均值作为旅客转移后所享受的折扣票价 $\bar{A}$ 。

H3: 旅客在实现由非腹地旅客向“渗流”旅客的身份转变时, 会产生额外的交通成本 G , 包括 2 个机场间的货币成本 G_M 及时间成本 G_T 。货币成本 G_M 主要考虑交通出行所需的现金成本, 包括城际间出行成本(如以高铁出行成本计算)及市内出行成本(如以网约车和公共交通占比计算平均成本或最低交通成本); 时间成本 G_T 是旅客到非腹地机场增加的额外出行成本, 在对其量化时考虑旅客对时长敏感性, 即设定时间阈值, 超过该阈值设置较大时间成本, 在阈值内可按当地平均小时工资作为参考。

H4: 航司对航线调整后, 腹地旅客会增加中转或候机成本 Q 。

根据 H1~H4, 构建旅客出行选择的成本矩阵, 如表 1 所示, 表中每种选择策略对应 2 行成本, 第 1 行为旅客 i 成本, 第 2 行为旅客 j 成本。

表 1 基于出行策略的旅客效益矩阵
Table 1 Passenger benefit matrix based on travel strategy

策略种类	旅客 i 效益	旅客 j 效益
渗流与渗流	$\bar{A}(t)+G$	$\bar{A}(t)+G$
渗流与非渗流	$\bar{A}(t)+G$	A^*+Q
非渗流与渗流	A^*+Q	$\bar{A}(t)+G$
非渗流与非渗流	A^*+Q	A^*+Q

通过购票软件, 旅客可以全面掌握票价价格, 叠加其他旅客经验分享及自身经验提升, 都会影响其出行行为决策, 为更加客观表征旅客学习行为, 引入经验加权吸引力模型(experience-weighted attraction, EWA)学习算法^[15]。该算法具有高效率、低误差的特点, 可计算旅客的出行选择概率, 能将旅客经验有效传递给下一期决策, 有效表征学习经验价值。

EWA 学习算法通过吸引力指数 B 来更新旅客选择策略 k 的概率, 策略对应的吸引力指数值越大, 则该策略被选择的可能性越高。计算仿真周期第 t 期旅客 i 选择策略 k 时的吸引力指数 $B_i^k(t)$ 为

$$B_i^k(t)=\frac{\varphi\cdot N(t-1)\cdot B_i^k(t-1)+\pi_i^k(t)}{N(t)}$$

(1)

式中: k 为旅客选择策略, 取值 0 或 1, 1 表示旅客决策为渗流旅客, 0 表示决策为非渗流旅客; φ 为上一期吸引力指数对下一期决策的影响程度; $N(t)$ 为第 t 期的经验权重, 其更新方式为

$$N(t)=\rho \cdot N(t-1)+1 \tag{2}$$

其中: ρ 为旅客经验对下期决策的影响程度。

$\pi_i^k(t)$ 为第 t 期旅客 i 选择策略 k 的收益函数, 表示为

$$\pi_i^k(t)=\begin{cases} A^*-\bar{A}-G & k=1 \\ -Q & k=0 \end{cases} \tag{3}$$

通过融合吸引力指数对 Logit 模型进行改进, 计算旅客在不同策略下的选择概率 $P_i^k(t+1)$ 为

$$P_i^k(t+1)=\frac{1}{1+\sum_{k=0}^1\theta^k}\cdot\frac{e^{\lambda B_i^k(t)}}{\sum_{k=0}^1e^{\lambda B_i^k(t)}}+\frac{\theta^k}{1+\sum_{k=0}^1\theta^k} \tag{4}$$

式中: θ^k 为旅客对不同策略的依赖程度, 取值增加表示旅客对于选择相应航司的信念越强; 在博弈过程中, 旅客还会将本期航司提供的折扣票价 $\bar{A}(t)$ 与心理价格 $\tilde{A}(t)$ 比较后作决策, λ 反映了旅客的理性程度, 若折扣票价高于预期价格, 随差值增大, 旅客对吸引力指数的敏感程度越弱, 旅客理性程度越弱, 若折扣票价低于预期价格, 随差值增大, 旅客对吸引力指数的敏感程度越强, 旅客理性程度越强, 其更新公式为

$$\lambda=\frac{A^*-\bar{A}(t)}{A^*-\tilde{A}(t)}\lambda_0 \tag{5}$$

其中: λ_0 为旅客理性程度初值。

旅客会根据本期折扣票价及心理价格预测下一期的预期价格, 同时, $\tilde{A}(t)$ 会受到季节、旅客出行需求变化、燃油波动等影响, 其更新公式为

$$\tilde{A}(t+1)=\alpha \cdot \bar{A}(t)+(1-\alpha) \cdot \tilde{A}(t) \tag{6}$$

式中: α 为平滑系数, $0<\alpha<1$, 取值越大, 表明旅客受折扣票价的影响越大, 航司更容易通过票价折扣促使旅客实现由腹地旅客向渗流旅客的身份转变, 反之, 旅客对心理价格的信念越强, 航司需要付出更大的票价折扣来实现旅客转移。

由于旅客由原航线转移至新航线时会增加货币成本、时间成本等交通成本, 转移后其愿意支付的最高价格将会有所降低, 即旅客的预期价格必然会小于未转移前的机票价格; 同时, 所有旅客理性独立且根据自身利益最大化原则决策, 航司会通过折扣票价满足旅客利益不变或增加的目的, 促使其实现转移, 故而排除 $A^* \geq \tilde{A}$ 及 $A^* \geq \bar{A}$ 。

2.2 基于航司竞争的 Hotelling 定价模型

当一条航线面临多家航司竞争时, 航司定价策略会受到彼此竞争的影响, 为此, 研究在相互竞争下航司定价策略。

博弈过程的假设如下:

H5: 基于 Hotelling 定价模型, 假定在长度为 1 的线性航空运输市场内, 相同的起点与终点间存在由不同航司运营的相同航线, R_0 为既有航司, R_1 为转移航司, R_0 、 R_1 分别位于点 0、1 处。

H6: 航空运输市场内存在不同出行选择偏好的“渗流”旅客, 分别均匀分布在 $[0, 1]$ 区间内, “渗流”旅客 i 所在位置为 x_i , 代表对不同航司航线的偏好程度, “渗流”旅客与航司之间的距离差代表损失效用, 反映了 2 类航司由于准点率、市场响应速度、品牌效应等潜在因素差异造成对旅客吸引能力不同的情况, 从而反映 Hotelling 定价模型中的“距离”因素。

H7: 假设市场内任何位置的“渗流”旅客均能掌握各航司的票价信息, 从而选择不同航司开设的航线出行。

H8: 对于既有航司而言, 其在该 OD 对航线内存在一定数量的腹地旅客 N_0 。

H9: “渗流”旅客在决策时, 航司间无定价差异, 如航司常旅客计划等。

“渗流”旅客选择不同航司的效用 $U_0(t)$ 、 $U_1(t)$ 分别为

$$U_0(t)=A_0(t)+E_0-(E_1-E_0)x \tag{7}$$

$$U_1(t)=A_1(t)+E_1-(E_1-E_0)(1-x) \tag{8}$$

式中: $A_0(t)$ 和 $A_1(t)$ 分别为仿真第 t 期既有航司和转移航司的折扣票价; E_0 和 E_1 分别为既有航司和转移航司可为旅客带来的相对潜在效用; x 为旅客在既有航司与转移航司形成的 $[0, 1]$ 效用分布区间相对既有航司的效用距离。

E_0 和 E_1 为综合考虑准点率、市场响应速度、品牌效应、旅客服务质量等为指标, 采用熵权法修正的 TOPSIS 模型计算, 每项指标 y 对应的信息熵 e_y 为

$$e_y=-\frac{1}{\ln m}\sum_{y=1}^m\frac{Z_{\bar{x}y}}{\sum_{\bar{x}=1}^mZ_{\bar{x}y}}\ln\left(\frac{Z_{\bar{x}y}}{\sum_{\bar{x}=1}^mZ_{\bar{x}y}}\right) \tag{9}$$

式中: $Z_{\bar{x}y}$ 为由指标数据建立原始指标体系矩阵经标准化至非负区间所得的标准化矩阵; $\bar{x}=1, 2, \cdots, m$, $y=1, 2, \cdots, n$, m 为评价目标总数, n 为指标总数。

由信息熵得指标 y 的权重 W_y 为

$$W_y=\frac{1-e_y}{n-\sum_{y=1}^ne_y} \tag{10}$$

加权规范化矩阵 H_{mn} 为

$$H_{mn}=[h_{\bar{x}y}]_{m \times n}=W_y \times Z_{\bar{x}y} \tag{11}$$

根据加权规范化矩阵中每个指标的最大值

$h_y^{\max}$ 及最小值 $h_y^{\min}$ 计算各节点航司的相对潜在效用值 E_x , $0 \leq E_x \leq 1$, 值越大, 相应的航司可为旅客提供更高的潜在效用。

$$E_x = \frac{\sqrt{\sum_{y=1}^n (h_{xy} - h_y^{\min})^2}}{\sqrt{\sum_{y=1}^n (h_{xy} - h_y^{\min})^2} + \sqrt{\sum_{y=1}^n (h_{xy} - h_y^{\max})^2}} \quad (12)$$

如图2所示, 存在位置 x_m 表示旅客选择开辟新航线的航司和既有航司出行的无差异效用点, 即 $U_0 = U_1$:

$$x_m(t) = \frac{A_0(t) - A_1(t)}{2(E_1 - E_0)} \quad (13)$$

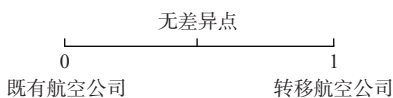


图2 Hotelling 定价模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the Hotelling model

当旅客位于 $(0, x_m)$ 时, 将会选择既有航司出行; 当旅客位于 $(x_m, 1)$ 时, 将会选择转移航司出行。因此, 既有航司和转移航司在该 OD 段航线的“渗流”旅客市场份额分别为

$$n_0 = \int_0^{x_m} (N^* \cdot P_i^{k=1}(t)) dx = N^* \cdot P_i^{k=1}(t) \cdot x_m \quad (14)$$

$$n_1 = \int_{x_m}^1 (N^* \cdot P_i^{k=1}(t)) dx = N^* \cdot P_i^{k=1}(t) \cdot (1 - x_m) \quad (15)$$

式中: N^* 为原航线旅客总人数。

因此, 根据旅客的策略选择, 既有航司收益 Π_0 和转移航司收益 Π_1 分别为

$$\Pi_0 = A_0(t) \cdot (n_0 + N_0) = A_0(t) \cdot [(N^* \cdot P_i^{k=1}(t) \cdot x_m) + N_0] \quad (16)$$

$$\Pi_1 = A_1(t) \cdot n_1 = A_1(t) \cdot N^* \cdot P_i^{k=1}(t) \cdot (1 - x_m) \quad (17)$$

式中: N_0 为同一航线内既有航司的腹地旅客总人数。

在博弈过程中, 航司会根据旅客转移情况及其与既有航司竞争的情况, 综合评估下一期的降价策略。因此, 票价调整策略为

$$A_0(t+1) = A_0(t) + \beta \cdot f^0(t) \left[(A^* - A_0(t)) \cdot (1 + f^0(t)) + (A_0(t) - A_{\min}) (1 - f^0(t)) \right] \quad (18)$$

$$f^0(t) = \frac{P_0^{k=1}(t) - \tilde{P}_0^{k=1}(t)}{P_0^{k=1}(t) - \tilde{P}_0^{k=1}(t)} \quad P_0^{k=1}(t) \neq \tilde{P}_0^{k=1}(t) \quad (19)$$

$$A_1(t+1) = A_1(t) + \beta \cdot f^1(t) \left[(A^* - A_1(t)) \cdot (1 + f^1(t)) + (A_1(t) - A_{\min}) (1 - f^1(t)) \right] \quad (20)$$

$$f^1(t) = \frac{P_1^{k=1}(t) - \tilde{P}_1^{k=1}(t)}{P_1^{k=1}(t) - \tilde{P}_1^{k=1}(t)} \quad P_1^{k=1}(t) \neq \tilde{P}_1^{k=1}(t) \quad (21)$$

式中: β 为票价变化幅度; $A_{\min}$ 为航司可接受的票价底线; $f^0(t)$ 和 $f^1(t)$ 分别为涨价和降价判别函数, 取值为 1 或 -1; $P_0^{k=1}(t)$ 和 $P_1^{k=1}(t)$ 分别为第 t 期选择既有航司和转移航司的“渗流”旅客概率, 两者相等时票价维持不变; $\tilde{P}_0^{k=1}(t)$ 和 $\tilde{P}_1^{k=1}(t)$ 分别为第 t 期既有航司和转移航司预期吸引的“渗流”旅客概率, 更新公式为

$$A_0(t) \cdot (\tilde{P}_0^{k=1}(t) \cdot N^* + N_0) = C_0 A^* \gamma \quad (22)$$

$$A_1(t) \cdot \tilde{P}_1^{k=1}(t) N^* = C_1 A^* \gamma \quad (23)$$

其中: γ 为成本比例系数; C_0 和 C_1 分别为既有航司和新入驻航司的载客能力。

3 下层博弈模型

该层是基于上层博弈模型航司最佳收益票价下, 分析机场间协同补贴策略与航司航线调整情况的博弈过程。

3.1 模型假设

该演化博弈过程作出如下假设:

H10: 由于是以研究航线网络优化(即航线转移)为目的, 该层航线所属的航司均为上层的转移航司, 且将上层最佳收益票价作为输入。 Π_R^g 表示航司 R 转移中程航线至机场 g 的最佳客票收益, $\tilde{\Pi}_R^g$ 表示航司 R 转移短程航线至机场 g 的最佳客票收益, 其中, $g = 1, 2$, $g = 1$ 表示中小型机场, $g = 2$ 表示大型机场。

H11: 基于市场行为, 航司会比较不同规模机场设置的机场补贴金额, 自愿性选择转移中程航线和短程航线至大型机场或中小型机场, 采取“转移中程航线至中小型机场”策略的概率为 p , 采取“转移中程航线至大型机场”策略的概率为 $1 - p$ ($0 \leq p \leq 1$), 采取“转移短程航线至中小型机场”策略的概率为 q , 采取“转移短程航线至大型机场”策略的概率为 $1 - q$ ($0 \leq q \leq 1$)。

H12: 航司 R 将不同航线转移至机场 g 的主要成本包括转移成本 D_R^g (转移中程航线)、 $\tilde{D}_R^g$ (转移短程航线), 机场收费 I^g , 航线运行成本 L_R (运营中程航线)、 $\tilde{L}_R$ (运营短程航线)。

H13: 多家航司转移航线选择相同的机场时会共享机场补贴 S , 为避免航线过度聚集阻碍多机场协同化发展, 机场补贴总额会随航线聚集减少至 δS , δ 为待转移航线系数, $0 < \delta < 1$ 。 S_R^g 为机场 g 对航司 R 中程航线补贴, $\tilde{S}_R^g$ 为机场 g 对航司 R 短程航

线补贴。

H14: 机场间协同补贴经费主要来自政府和机场自筹, 经调研, 机场自筹经费不会超过其收入的 40%, 计算式为

$$S^g \leqslant 0.4I^g + \omega V^g \tag{24}$$

表 2 航司转移策略效用矩阵

Table 2 Utility matrix of airline transfer strategies

策略种类	航司R优化中程航线	航司R优化短程航线
中小机场至中小机场	$\Pi_R^{g=1} + \delta S_R^{g=1} - D_R^{g=1} - L_R - I^{g=1}$	$\tilde{\Pi}_R^{g=1} + \delta \tilde{S}_R^{g=1} - \tilde{D}_R^{g=1} - \tilde{L}_R - I^{g=1}$
中小机场至大型机场	$\Pi_R^{g=1} + S_R^{g=1} - D_R^{g=1} - L_R - I^{g=1}$	$\tilde{\Pi}_R^{g=2} + \tilde{S}_R^{g=2} - \tilde{D}_R^{g=2} - \tilde{L}_R - I^{g=2}$
大型机场至中小机场	$\Pi_R^{g=2} + S_R^{g=2} - D_R^{g=2} - L_R - I^{g=2}$	$\tilde{\Pi}_R^{g=1} + \tilde{S}_R^{g=1} - \tilde{D}_R^{g=1} - \tilde{L}_R - I^{g=1}$
大型机场至大型机场	$\Pi_R^{g=2} + \delta S_R^{g=2} - D_R^{g=2} - L_R - I^{g=2}$	$\tilde{\Pi}_R^{g=2} + \delta \tilde{S}_R^{g=2} - \tilde{D}_R^{g=2} - \tilde{L}_R - I^{g=2}$

航司R选择转移中程航线至中小机场或大型机场的期望收益 U_{R_1} 、 U_{R_2} 及平均期望收益 $\overline{U}_R$ 分别为

$$\begin{cases} U_{R_1} = \Pi_R^{g=1} + [q(\delta - 1) + 1] S_R^{g=1} - D_R^{g=1} - L_R - I^{g=1} \\ U_{R_2} = \Pi_R^{g=2} + [q(1 - \delta) + \delta] S_R^{g=2} - D_R^{g=2} - L_R - I^{g=2} \\ \overline{U}_R = pU_{R_1} + (1 - p)U_{R_2} \end{cases} \tag{25}$$

航司R转移中程航线的策略选择的复制动态方程为

$$F(p) = dp/dt = p(U_{R_1} - \overline{U}_R) = p(p - 1)(U_{R_2} - U_{R_1}) \tag{26}$$

p 的一阶导数为

$$F'(p) = (2p - 1)(U_{R_2} - U_{R_1}) \tag{27}$$

根据微分方程稳定性定理, 航司R选择转移中程航线至中小机场的策略处于稳定状态必须满足: $F(p) = 0$ 且 $F'(p) < 0$, 此时求得阈值 q^* 为

$$q^* = \frac{\Delta \Pi_R - \Delta D_R - \Delta I + S_R^{g=1} - \delta S_R^{g=2}}{(1 - \delta)(S_R^{g=1} + S_R^{g=2})} \tag{28}$$

$$\Delta \Pi_R = \Pi_R^{g=1} - \Pi_R^{g=2} \tag{29}$$

$$\Delta D_R = D_R^{g=1} - D_R^{g=2} \tag{30}$$

$$\Delta I = I^{g=1} - I^{g=2} \tag{31}$$

定理 1 当 $q < q^*$ 时, 航司R转移中程航线的稳定策略是转移至中小型机场; 当 $q > q^*$ 时, 航司R转移中程航线的稳定策略是转移至大型机场; 当 $q = q^*$ 时, 不能确定航司R转移中程航线的稳定策略。

证明 令

$$K(q) = U_{R_2} - U_{R_1} = \Delta D_R + \Delta I - \Delta \Pi_R + \delta S_R^{g=2} - S_R^{g=1} + q(1 - \delta)(S_R^{g=1} + S_R^{g=2}) \tag{32}$$

故 $K(q)$ 为关于 q 的增函数, 当 $q < q^*$ 时, $K(q) < 0$, $F(p)|_{p=1} = 0$ 且 $F'(p)|_{p=1} < 0$, 则 $p = 1$ 具有稳定性;

式中: I^g 为航线业务收入; V^g 为机场航线网络优化潜在收入与政府航线补贴; ω 为差异化航线达成率。

3.2 构建效用函数与复制动态方程

根据 H10~H14, 航司不同转移策略对应的效益矩阵如表 2 所示。

当 $q > q^*$ 时, $K(q) > 0$, $F(p)|_{p=0} = 0$ 且 $F'(p)|_{p=0} < 0$, 则 $p = 0$ 具有稳定性; 当 $q = q^*$ 时, $K(q) = 0$, $F(p) = 0$ 且 $F'(p) = 0$, 此时无法确定航司R转移中程航线的稳定策略。

证毕

航司R选择转移短程航线至中小型机场或大型机场的期望收益 $U_{R'_1}$ 、 $U_{R'_2}$ 及平均期望收益 $\overline{U}_{R'}$ 分别为

$$\begin{cases} U_{R'_1} = \tilde{\Pi}_R^{g=1} + [p(\delta - 1) + 1] \tilde{S}_R^{g=1} - \tilde{D}_R^{g=1} - \tilde{L}_R - I^{g=1} \\ U_{R'_2} = \tilde{\Pi}_R^{g=2} + [p(1 - \delta) + \delta] \tilde{S}_R^{g=2} - \tilde{D}_R^{g=2} - \tilde{L}_R - I^{g=2} \\ \overline{U}_{R'} = qU_{R'_1} + (1 - q)U_{R'_2} \end{cases} \tag{33}$$

航司R转移短程航线的策略选择的复制动态方程为

$$F(q) = dq/dt = q(U_{R'_1} - \overline{U}_{R'}) = q(q - 1)(U_{R'_2} - U_{R'_1}) \tag{34}$$

q 的一阶导数为

$$F'(q) = (2q - 1)(U_{R'_2} - U_{R'_1}) \tag{35}$$

根据微分方程稳定性定理, 航司R选择转移短程航线至中小机场的策略处于稳定状态必须满足: $F(q) = 0$ 且 $F'(q) < 0$, 此时求得阈值 p^* 为

$$p^* = \frac{\Delta \tilde{\Pi}_R - \Delta \tilde{D}_R - \Delta I + \tilde{S}_R^{g=1} - \delta \tilde{S}_R^{g=2}}{(1 - \delta)(\tilde{S}_R^{g=1} + \tilde{S}_R^{g=2})} \tag{36}$$

$$\Delta \tilde{\Pi}_R = \tilde{\Pi}_R^{g=1} - \tilde{\Pi}_R^{g=2} \tag{37}$$

$$\Delta \tilde{D}_R = \tilde{D}_R^{g=1} - \tilde{D}_R^{g=2} \tag{38}$$

定理 2 当 $p < p^*$ 时, 航司R转移短程航线的稳定策略为转移至中小机场; 当 $p > p^*$ 时, 航司R转移短程航线的稳定策略为转移至大型机场; 当 $p = p^*$ 时, 不能确定航司R转移短程航线的稳定策略。

证明 令

$$K(p)=U_{R_2}-U_{R_1}=\Delta\tilde{D}_R+\Delta I-\Delta\tilde{I}_R+\delta\tilde{S}_R^{g=2}-\tilde{S}_R^{g=1}+p(1-\delta)(\tilde{S}_R^{g=1}+\tilde{S}_R^{g=2})$$

(39)

故 $K(p)$ 为关于 p 的增函数, 当 $p < p^*$ 时, $K(p) < 0$, $F(q)|_{q=1} = 0$ 且 $F'(q)|_{q=1} < 0$, 则 $q = 1$ 具有稳定性; 当 $p > p^*$ 时, $K(p) > 0$, $F(q)|_{q=0} = 0$ 且 $F'(q)|_{q=0} < 0$, 则 $q = 0$ 具有稳定性; 当 $p = p^*$ 时, $K(p) = 0$, $F(q) = 0$ 且

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\frac{\partial F(p)}{p}&\frac{\partial F(p)}{q}\\\frac{\partial F(q)}{p}&\frac{\partial F(q)}{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(2p-1)(U_{R_2}-U_{R_1})&p(p-1)(1-\delta)(S_R^{g=1}+S_R^{g=2})\\q(q-1)(1-\delta)(S_{R'}^{g=1}+S_{R'}^{g=2})&(2q-1)(U_{R_2}-U_{R_1})\end{bmatrix}$$

(40)

各均衡点的稳定性分析如表 3 所示, 根据稳定性分析确定博弈双方可采用的方案。

表 3 均衡点的稳定性分析
Table 3 Stability analysis of equilibrium points

均衡解	特征值	稳定性
(0,0)	$\Delta\varPi_R-\Delta D_R-\Delta I+S_R^{g=1}-\delta S_R^{g=2}$ $\Delta\tilde{I}_R-\Delta\tilde{D}_R-\Delta I+\tilde{S}_R^{g=1}-\delta\tilde{S}_R^{g=2}$	不确定
(0,1)	$\Delta\varPi_R-\Delta D_R-\Delta I-S_R^{g=2}+\delta S_R^{g=1}$ $-\Delta\tilde{I}_R+\Delta\tilde{D}_R+\Delta I+\tilde{S}_R^{g=2}-\delta\tilde{S}_R^{g=1}$	不确定
(1,0)	$-\Delta\varPi_R+\Delta D_R+\Delta I-S_R^{g=1}+\delta S_R^{g=2}$ $\Delta\tilde{I}_R-\Delta\tilde{D}_R-\Delta I+\tilde{S}_R^{g=1}-\delta\tilde{S}_R^{g=2}$	不确定
(1,1)	$-\Delta\varPi_R+\Delta D_R+\Delta I+S_R^{g=2}-\delta S_R^{g=1}$ $-\Delta\tilde{I}_R+\Delta\tilde{D}_R+\Delta I+\tilde{S}_R^{g=2}-\delta\tilde{S}_R^{g=1}$	不确定
(p^*,q^*)	Ω_1 Ω_2	不确定

4 博弈模型仿真分析

上层博弈模型中, 旅客会根据当期航司提供的折扣票价分析不同策略的收益情况, 并根据预期价格及往期经验完成策略更新, 同时航司会根据旅客的策略选择优化折扣票价, 从而实现在收益最大化情况下的最佳定价策略; 下层博弈模型中, 在航司获得最佳客票收益时分析机场提供不同补贴金额的均衡点, 从而确定机场间协同补贴策略与航线网络优化的最佳效果。

4.1 仿真案例

京津冀协同发展已上升为国家重大战略, 以京津冀机场群为研究背景, 根据城市发展定位及综合

$F'(q) = 0$, 此时无法确定航司 R 转移短程航线的稳定策略。

证毕

通过解复制动态方程可得博弈的 5 个均衡点, 分别为 $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$ 、 (p^*,q^*) , 根据 Lyapunov 第一法则判别均衡点状态。根据复制动态方程构造的雅可比矩阵为

性分析确定博弈双方可采用的方案。

交通的整体发展情况, 对京津冀机场群的航线网络进行优化调整。通过采取差异化补贴引导符合机场功能定位的航线转移, 实现机场群航线的最优配置。仿真以津冀 2 地机场承接北京 2 场的溢出航线为目标, 溢出航线分属 2 家不同规模的航司, 中程航线与短程航线比例分为 2:1、2:3, 其中, 中程航线 24 条, 短程航线 24 条, 共计航线 48 条。仿真以天津滨海国际机场为国内枢纽机场代表, 石家庄正定国际机场为区域机场代表, 将 48 条溢出航线转移至天津滨海国际机场与石家庄正定国际机场。天津滨海国际机场致力于吸引中程航线, 石家庄正定国际机场致力于吸引短程航线。上下层仿真模型初始参数及敏感度如表 4 和表 5 所示。

根据中国铁路 12306 官方网站查询城际铁路出

表 4 上层博弈模型初值设置
Table 4 Initial value setting of upper level game model

参数	参数基准值	变化后参数	参数变化率/%	旅客选择概率变化率/%		初值敏感指数/%	
				转移航司	既有航司	转移航司	既有航司
φ	0.5	0.75	50	-2.66	6.86	-5.32	13.72
ρ	0.5	0.25	-50	-1.16	3.14	2.32	-6.28
θ^k	25	50	100	-0.60	-1.01	-0.60	-1.01
α	0.5	0.75	50	0	0	0	0

行成本与高德地图 APP 计算城内网约车出行成本, 按天津、河北 2 地的平均工资水平确定时间成本, 具体参数如表 6 所示。

表 5 下层博弈模型初值设置

Table 5 Initial value settings for lower level game models

φ	ρ	θ^k	α
0.5	0.5	25	0.5

表 6 渗流旅客转移成本参数

Table 6 Passenger transfer cost parameters

渗流路线	城际出行 成本/元	城际出行 时间/min	城内出行 成本/元	城内出行 时间/min	时间成本/ (元·h ⁻¹)
北京—天津	20~180	30~60	60	90	60
北京—石家庄	40~230	60~130	40	70	60

4.2 上层博弈模型求解

4.2.1 票价折扣及出行成本对旅客选择行为的影响

图 3(a)、图 3(c)为在全票价为 1 500 元(国内航线代表性票价)时, 既有航司与转移航司在不同票价折扣和旅客不同出行成本下的收益曲线。2 类航司在初始票价折扣为 0.75~0.85 之间均存在收益峰值, 其票价折扣为 0.75, 小于该值(即高票价折扣、低折扣票价)时, 由于高票价折扣导致 2 类航司的收益在不同旅客出行成本下都出现了下降。从

旅客出行成本看, 较低出行成本有利于提升航司收益, 且票价折扣与旅客出行成本成反比, 即较低的票价折扣对出行成本增加影响较小; 当票价折扣为 0.75~0.85 之间时, 旅客出行成本控制在 400 元以内有利于航司收益增加。

图 3(b)、图 3(d)为在全票价为 1 500 元时, 初始票价折扣、旅客出行成本对旅客选择既有航司、转移航司的概率曲线。可知, 从旅客选择概率波动程度看, 转移航司的波动幅度为 0.24~0.35, 既有航司的波动幅度为 0.15~0.26; 0.75 以上的低票价折扣区间为既有航司吸引“渗流”旅客的优势区间, 相较于 0.35~0.60 的高票价折扣区间旅客选择概率较高; 0.60 以下的高票价折扣区间为转移航司吸引“渗流”旅客的优势区间, 相较于 0.65~0.85 的折扣区间对旅客的吸引力更强。整体来看, 2 类航司的旅客选择概率波动幅度相同, 转移航司和既有航司分别在高票价折扣区间和低票价折扣区间具有吸引“渗流”旅客优势, 两者形成“跷跷板”效应。

综合航司收益和旅客选择概率可知, 对于转移航司而言, 维持高收益的主要因素为高折扣票价, 较高的售价可有效弥补旅客人数减少所带来的损失, 并对收益产生显著作用, 但同时转移航司在高票价折扣区间内凭借着旅客资源的竞争优势也

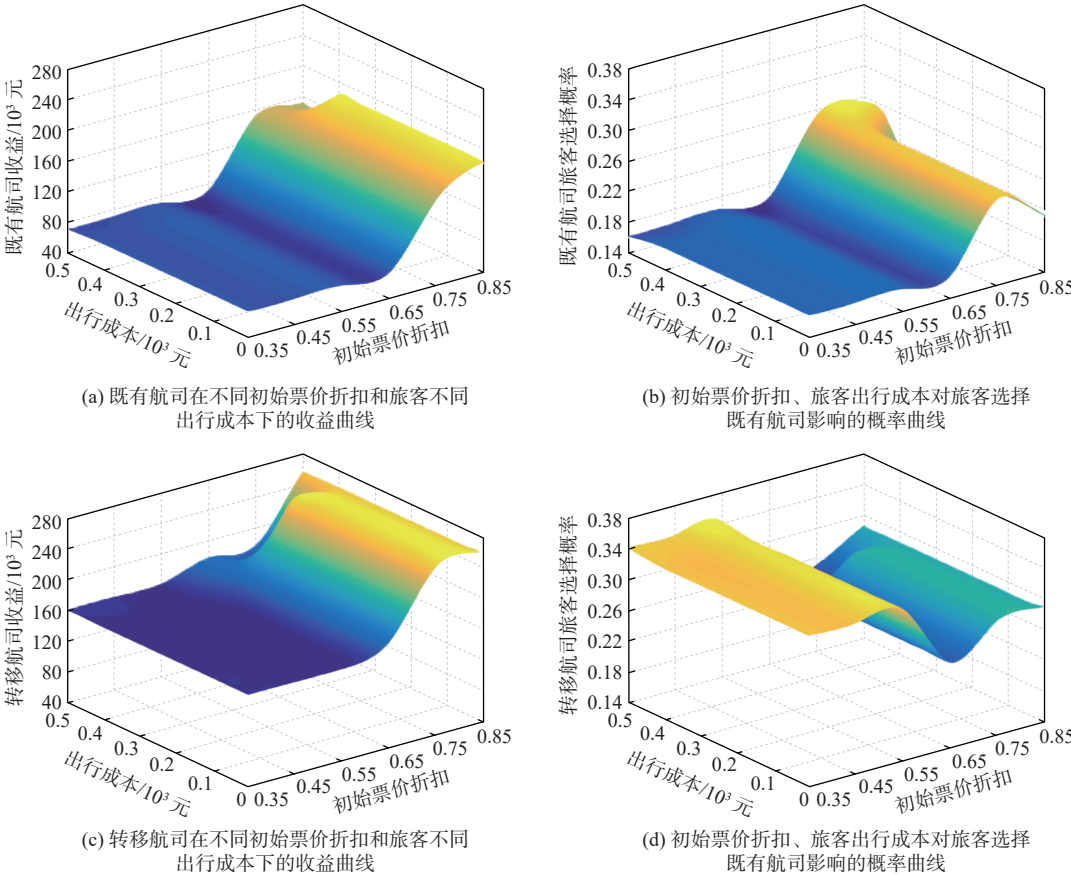


图 3 航司初始票价折扣与收益、旅客选择概率关系

Fig. 3 The relationship between initial ticket price discount and revenue, passenger selection probability of airlines

获得了较为可观的收益;对于既有航司,维持高收益的主要影响因素为航司可为旅客提供的较高潜在效用,较高的潜在效用可在票价折扣较低的情况下吸引旅客选择,显著的价格优势及旅客资源的竞争优势为既有航司带来了较高的收益。对比 2 类航司的收益可知,在 0.6~0.7 折扣区间内,既有航司和转移航司出现了明显的收益增长,因此,为实现航司间收益最佳,转移航司与既有航司票价折扣要维持在 0.6~0.85 之间,以避免出现低价竞争带来的收益共损。

4.2.2 不同折扣金额与出行成本对旅客选择行为的影响

图 4 表示在不同的初始票价下转移航司和既有航司初始折扣分别为 0.5 和 0.6 时,票价与出行成本、旅客选择概率间关系。在固定折扣时,航程越长,机票价格越高,相同折扣的对应优惠金额就越大。由图 4(a)、图 4(c)可知,初始票价对应的折扣金额在 400~700 元(即初始票价较低)、航程较短时,转移航司的收益与航程成负相关,即航程越短,收益越高,而既有航司收益基本保持不变,对于非腹地旅客的吸引力微弱,仅靠腹地旅客来维持较低的收益;当初始票价对应折扣金额为 800 元时,2 类航司的收益都出现了明显的峰值,且在 700~

800 元的折扣金额区间内,转移航司的收益增长率要明显高于既有航司;当初始票价对应折扣金额在 800 元以上(即初始票价较高)、属于长航程航线时,2 类航司收益均存在下降趋势,随着航程增长,收益减少。

由图 4(b)、图 4(d)可知,既有航司初始折扣金额在 900 元以上(即长航程航线)时,对非腹地旅客具有较强吸引力,而转移航司初始折扣金额在 400~800 元区间(对应中短程航线)时,对非腹地旅客吸引能力最强,可知,在优惠折扣固定的情况下,随着航程的增长,非腹地旅客在选择航司出行时会更注重航司可为其提供的潜在效用为较长航程提供保障;对于既有航司,航司的收益和旅客选择概率变化趋势相反,说明机票售价对于维持既有航司的高收益至关重要,即使初始折扣金额增大吸引了更多的腹地旅客选择,但过大的折扣金额对于航司仍有不可忽视且难以抵消的削减作用;对于转移航司,航司的收益和旅客选择概率呈现了类似的变化趋势,说明非腹地旅客的转移情况是影响收益的关键因素。整体来看,在转移航司和既有航司初始折扣分别为 0.5 和 0.6 的情况下,二者对非腹地旅客的吸引优势形成了“跷跷板”效应,既有航司和转移航司分别在长航程和短航程时存在吸引非腹地旅

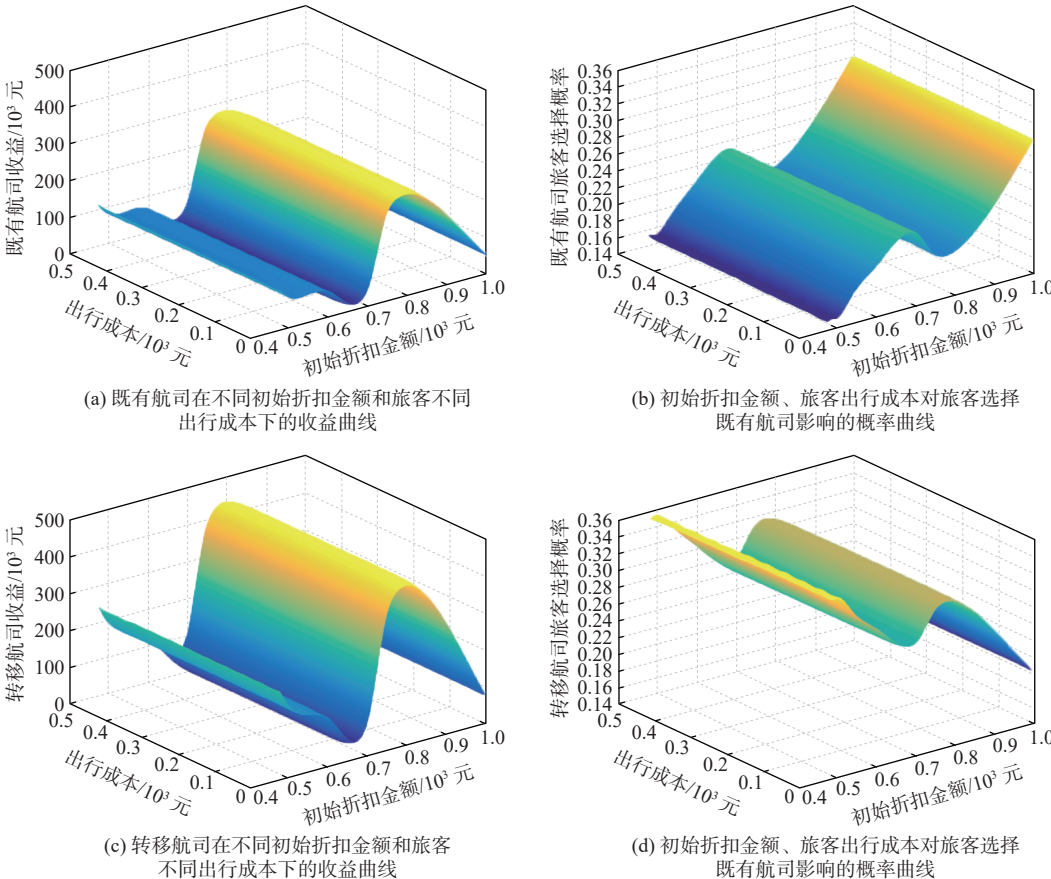


图 4 航司初始折扣金额与收益、旅客选择概率关系

Fig. 4 The relationship between initial discount amount of airlines and revenue, passenger selection probability

客的竞争优势。

进一步表明航司对市场的熟悉程度是影响航司收益变化情况的关键因素,也是航司根据不同航线特征选择折扣比例的依据,既有航司在市场内已存在部分腹地旅客的支撑,故其对票价金额的敏感性更强,而转移航司在增加了航线转移成本的压力下,为维持公司的可持续发展对旅客选择概率变化更敏感。同时,曲线的波动体现旅客对 2 类航司的选择概率与票价之间的矛盾,只有实现航司的航线开设、票价折扣与航司自身实际情况之间的最佳匹配才能达到航司收益的峰值。

根据京津冀协同发展战略部署对京津冀“三地四场”的定位,北京大兴国际机场和北京首都国际

机场进行航线网络优化,按照国内航线里程分类标准:短程航线为小于 1 000 km,中程航线为 3 000 km 左右,长程航线为 11 000 km 左右。其中,长程航线一般用于国际航线且起止机场相对固定,故不考虑其在机场群内的航线转移,短程航线和中程航线相应初始票价主要为 1 000 元和 2 000 元,作为下层博弈模型航司的中短程航线在机场采取不同补贴策略下转移的输入参数。

由图 5 可知,初始票价为 1 000 元、票价折扣为 0.90,以及初始票价为 2 000 元、票价折扣为 0.80 时,既有航司收益较高;初始票价为 1 000 元、票价折扣为 0.80,以及初始票价为 2 000 元、票价折扣为 0.67 时,转移航司收益较高。

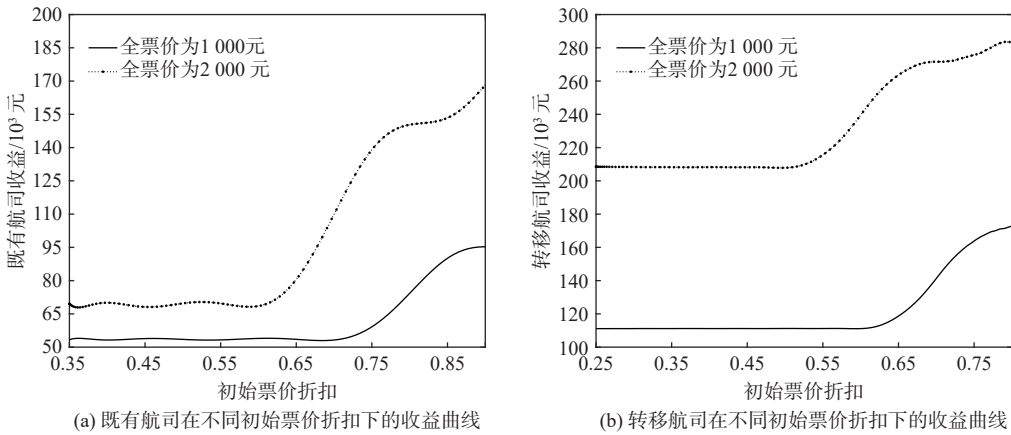


图 5 航司最佳定价策略
Fig. 5 Best pricing strategy for airlines

4.3 下层博弈模型求解

为验证各均衡点的稳定性,现结合实际情况对模型进行赋值,并利用 MATLAB 2016b 进行数值仿真。航班运营成本包括固定成本及变动成本,以每年飞行 650 h 计算,A320 的运营成本为 7 416 美元/h (约 53 618 元/h),取中小机场航线变动成本为运营成本的 19%,大型机场航线变动成本为运营成本的 21%,即 $D_R^{g=1} = D_R^{g=1} = 10\,187.42/\text{h}$, $D_R^{g=2} = D_R^{g=2} = 11\,259.78\text{元}/\text{h}$;根据民航发[2017]18号《关于印发民用机场收费标准调整方案的通知》,以 A320 最大起飞重量 73.5 t、容纳乘客 150 人、业载 12 t 计算,一类一级机场(北京首都国际机场、上海浦东国际机场、广州白云国际机场 3 个机场)的内地航司内地航班航空性业务收费项目的机场收费为 8 900 元/架次,二级机场的内地航司内地航班航空性业务收费项目的机场收费为 10 655 元/架次。因此,可以判断 $(\Pi_R^{g=2} - \Pi_R^{g=1}) + (D_R^{g=1} - D_R^{g=2}) + (I^{g=1} - I^{g=2}) < 0$, $(\Pi_R^{g=2} - \Pi_R^{g=1}) + (D_R^{g=1} - D_R^{g=2}) + (I^{g=1} - I^{g=2}) < 0$ 。

4.3.1 策略选择的初始概率对博弈均衡的影响

为分析博弈双方策略选择的初始概率对演化

博弈过程及结果的影响,取 $S^{g=1} = 10\,000\text{元}$ ($S_R^{g=1} = S_R^{g=1} = 5\,000\text{元}$), $S^{g=2} = 6\,000\text{元}$ ($S_R^{g=2} = S_R^{g=2} = 3\,000\text{元}$), $\delta = 0.7$,复制动态方程组随时间演化 30 次。由图 6 可知,若博弈初始短程航线转移至中小型机场的倾向程度强于中程航线($q > p$),则博弈的稳定点为 $E_{SS}(0, 1)$;若博弈初始中程航线转移至中小型机场的倾向程度强于短程航线($p > q$),则博弈的稳定点为 $E_{SS}(1, 0)$;若博弈初始中程航线与短程航线的策略选择概率相同($p = q$),则博弈的稳定点为 $E_{SS}(0.92, 0.92)$ 。因此,在 2 类航线转移策略初始选择概率不同时,若竞争对手对策略的倾向程度高于博弈者本身时,博弈者会放弃该策略采取其他航线转移策略。因此,为实现航线网络内的航线优化,机场需根据自身功能定位判断不同航程航线的补贴需求,理性设置机场补贴以吸引相应的航线转移。

4.3.2 待转移航线系数 δ 对演化博弈的影响

为分析待转移航线系数 δ 的变化对演化博弈过程及结果的影响,对 δ 分别赋值为 0.5、0.7、0.9,取 $p = 0.5$ (即中程航线)随机选择航线转移策略时,复制动态方程组随时间演化 30 次结果如图 7 所示。

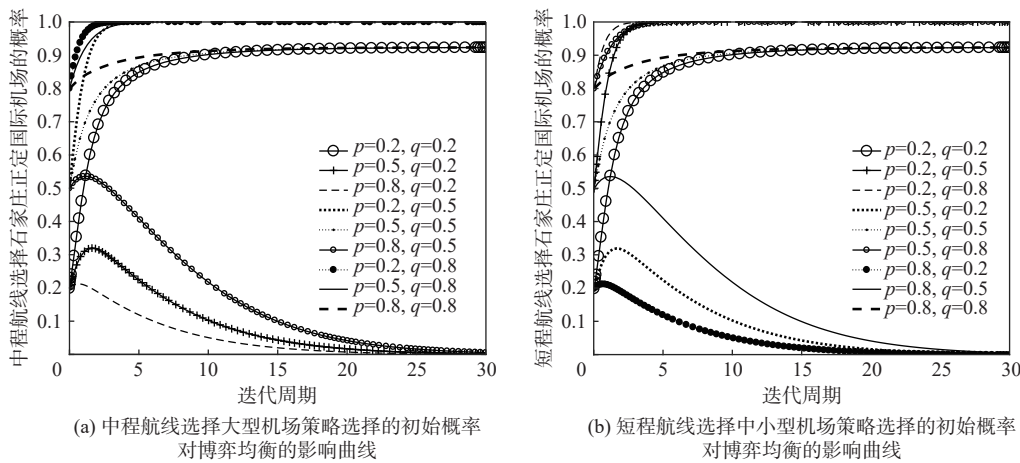


图 6 策略选择的初始概率对演化博弈的影响

Fig. 6 The impact of initial probability of strategy selection on evolutionary games

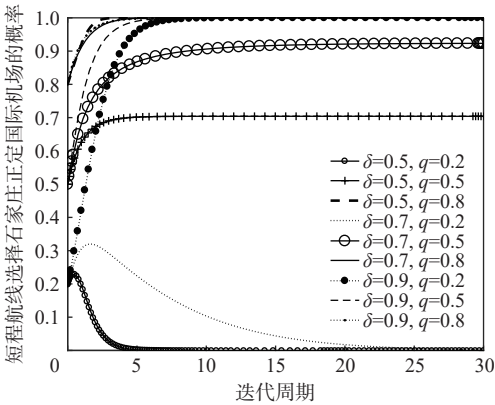


图 7 待转移航线系数对演化博弈的影响

Fig. 7 The impact of pending transfer route coefficient on evolutionary games

可知,当短程航线转移至中小型机场倾向程度较高时($q > 0.8$),待转移航线系数对演化速度影响微弱且不会影响演化博弈的结果;当短程航线随机选择航线转移策略时($q = 0.5$),随待转移航线系数增加,短程航线转移至中小型机场的混合策略选择概率值明显提升,直至最终由混合策略变为纯策略选择;当短程航线博弈初始倾向转移至大型机场时

($q < 0.5$),待转移航线系数的增加有利于减缓短程航线向大型机场转移的演化速度,甚至改变演化博弈结果。因此,为疏解大型机场的非核心功能,实现机场群航线网络的优化,可适当提升待转移航线系数、放宽机场补贴对短程航线的限制程度,以吸引短程航线转移至中小型机场。

4.3.3 机场补贴策略对演化博弈的影响

为分析 2 类机场不同补贴策略对演化博弈结果的影响,针对不同机场补贴策略,利用复制动态方程组随时间演化 100 次,结果如图 8 所示。图 8(a) 为大型机场以吸引中程航线为目标,在中小型机场不同机场补贴金额的情况下,大型机场不同机场补贴金额对中程航线的吸引情况。可知,当中小型机场及大型机场的补贴范围位于 $S_R^{g=2} = 1.02S_R^{g=1} - 0.9$ 与 $S_R^{g=2} = 1.36S_R^{g=1} - 0.81$ 这 2 条平面之间时,中程航线的策略选择为混合策略,且曲面处于陡增范围,2 类机场的竞争激烈;当 $S_R^{g=2} > 1.4S_R^{g=1} - 1.19$ 时,大型机场补贴处于绝对优势区间,可根据机场自身功能定位吸引中程航线转移;而 $S_R^{g=2} = 1.02S_R^{g=1} - 0.9$ 时,大型机场对中程航线的吸引力微弱,几乎不存

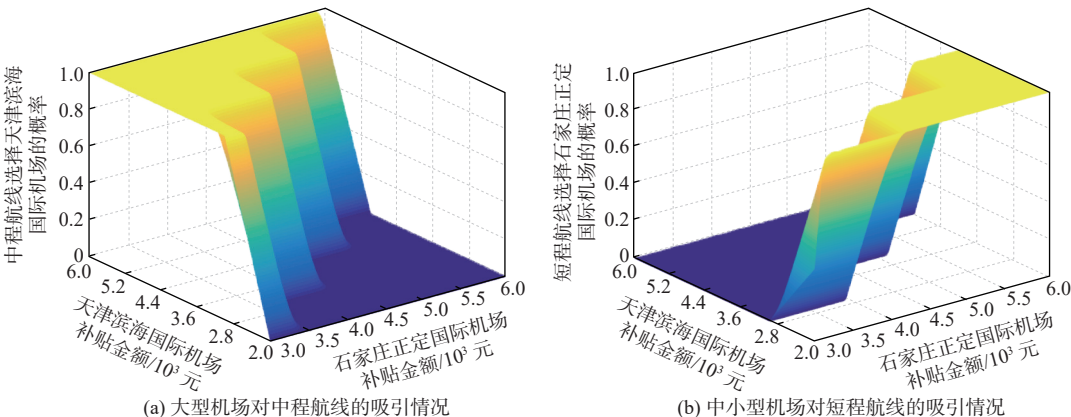


图 8 机场补贴对演化博弈的影响

Fig. 8 The impact of airport subsidies on evolutionary games

在竞争力。为此,考虑中小机场补贴策略的影响,大型机场的最佳补贴策略应在 $S_R^{g=2} > 1.4S_R^{g=1} - 1.19$ 范围内,且根据中小型机场具体补贴金额进行调整,以较低的机场补贴实现符合自身功能定位航线的高效转移。

图 8(b)为中小机场以吸引短程航线为目标,在大型机场不同机场补贴金额的情况下,中小机场不同机场补贴金额对短程航线的吸引情况。可知,在吸引短程航线时,中小机场与大型机场的竞争激烈区间在 $S_R^{g=2} > 0.82S_R^{g=1} - 0.46$ 与 $S_R^{g=2} < 1.06S_R^{g=1} - 2.33$ 这 2 个平面之间的补贴范围内。当 $S_R^{g=2} > 0.82S_R^{g=1} - 0.46$ 时,大型机场对于短程航线的吸引力更强,具有绝对优势;而 $S_R^{g=2} < 1.06S_R^{g=1} - 2.33$ 时,中小机场处于吸引短程航线的绝对优势区间,吸引的航线符合自身的功能定位。因此,考虑到大型机场补贴策略的影响,中小机场的最佳补贴策略应在 $S_R^{g=2} > 0.82S_R^{g=1} - 0.46$ 范围内,且根据大型机场的具体补贴金额进行灵活调整,通过较低的机场补贴实现符合自身功能定位航线的高效转移。

5 结 论

本文通过构建双层博弈模型,以旅客、航司及机场三方分别作为上下层演化博弈的主体,研究旅客与航司、航司与机场之间的演化稳定策略,得到以下结论:

1) 航司在转移航线时,通过折扣票价来吸引非腹地旅客,在相同航线(认为全票价相同)与既有航司进行票价折扣竞争时,应避免打“价格战”,理性的高折扣票价可以使其通过较高的售价有效弥补旅客人数减少所带来的损失,并对收益产生显著提升,0.75 以下的低票价折扣区间是其吸引“渗流”旅客的优势区间。

2) 针对同一航线,航司间在通过票价争夺旅客时,为实现航司间收益最佳,转移航司与既有航司票价折扣要维持在 0.6~0.85 之间,以避免出现低价竞争带来的收益共损。

3) 不同机场间的机场补贴策略位差优势明显,在以吸引中程航线为目标时,大型机场的最佳补贴策略应在 $S_R^{g=2} > 1.4S_R^{g=1} - 1.19$ 范围内;在以吸引短程航线为目标时,中小机场的最佳补贴策略应在 $S_R^{g=2} < 1.06S_R^{g=1} - 2.33$ 范围内,同时,机场在进行机场补贴策略选择时,应考虑到自身功能定位兼顾竞争对手的补贴金额情况灵活调整,以较低的机场补贴促进多机场航线网络优化,实现协同发展。

参考文献 (References)

[1] SU M, LUAN W X, YUAN L Y, et al. Sustainability development

of high-speed rail and airline: understanding passengers' preferences: a case study of the Beijing-Shanghai corridor[J]. *Sustainability*, 2019, 11(5): 1352.

[2] TERAJI Y, MORIMOTO Y. Price competition of airports and its effect on the airline network[J]. *Economics of Transportation*, 2014, 3(1): 45-57.

[3] DOBRUSZKES F, GIVONI M, VOWLES T. Hello major airports, goodbye regional airports? recent changes in European and US low-cost airline airport choice[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2017, 59: 50-62.

[4] 周蕾, 王忠群, 龚本刚. 基于航线网络的定价、超售与舱位控制策略研究[J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2016, 52(1): 126-134.

ZHOU Q, WANG Z Q, GONG B G. Strategy research on the pricing, overbooking and cabin inventory control of airline network[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2016, 52(1): 126-134(in Chinese).

[5] PENG I C, LU H A. Coopetition effects among global airline alliances for selected Asian airports[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2022, 101: 102193.

[6] 骆嘉琪, 匡海波, 冯涛, 等. 基于两阶段博弈模型的高铁民航竞合关系研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(1): 150-164.

LUO J Q, KUANG H B, FENG T, et al. Research on the co-opetition between high speed rail and civil aviation based on two stage game model[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2019, 39(1): 150-164(in Chinese).

[7] KIM A M, RYERSON M S. A long drive: Interregional airport passenger “leakage” in the U. S[J]. *Tourism Management*, 2018, 65: 237-244.

[8] LIAO W, CAO X S, LI S C. Competition and sustainability development of a multi-airport region: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Sustainability*, 2019, 11(10): 2958.

[9] 卞骞, 宋丽英, 毛保华, 等. 基于市场进入博弈的高速铁路与航空竞争分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(5): 20-27.

BIAN Q, SONG L Y, MAO B H, et al. High speed rail and air transport competition: a market-entry game approach[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(5): 20-27(in Chinese).

[10] YANG C W, LU J L, HSU C Y. Modeling joint airport and route choice behavior for international and metropolitan airports[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 39: 89-95.

[11] MINATO N, MORIMOTO R. Designing the commercial sustainability of unprofitable regional airports using system dynamics analysis [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2011, 1(1): 80-90.

[12] HOU M, WANG K, YANG H J. Hub airport slot re-allocation and subsidy policy to speed up air traffic recovery amid COVID-19 pandemic-case on the Chinese airline market[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2021, 93: 102047.

[13] 陈欣, 张珍, 邱瑞, 等. 基于动态博弈的补贴模式对机场群航线网络结构的影响研究[J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2022, 59(5): 201-207.

CHEN X, ZHANG Z, QIU R, et al. Research on the impact of subsidization on the airline networks of multi-airport systems based on dynamic game theory[J]. *Journal of Sichuan University (Natural*

Science Edition), 2022, 59(5): 201-207(in Chinese).

[14] 张珍. 基于博弈论的机场群管理模式和航线网络选择策略研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2023.

ZHANG Z. Research on airport group management mode and route network selection strategy based on game theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2023(in Chinese).

[15] 魏夕凯, 马本. 农村生活垃圾分类治理的奖惩激励机制: 基于复杂网络演化博弈模型[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3822-3831.

WEI X K, MA B. Reward and punishment incentive mechanism of domestic waste classification in rural China: based on complex network evolutionary game model[J]. China Environmental Science, 2022, 42(8): 3822-3831(in Chinese).

Evolutionary game of subsidy strategy on multi-airport route network under homogeneous competition

WU Wei¹*, LIN Zhiyi², WANG Xinglong¹

(1. Key Laboratory of Internet of Aircraft, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To enhance the high-quality collaborative development of multiple airports in the region based on differentiated positioning, the impact of airport subsidy strategies on the evolution of the multi-airport route network was studied, and the optimal subsidy strategy was determined. A double-layer evolutionary game model was constructed based on the competitive game relationships among passengers, airlines, and airports. In the upper-level model, the influence of passengers' self-learning ability on fares was considered, and a passenger Logit choice model incorporating a self-learning mechanism was constructed. The Hotelling model was then used to analyze the impact of fare competition among airlines on the same route on passenger choice behavior, thereby determining the optimal pricing strategy for airlines under competitive conditions. In the lower-level model, the evolutionary game process of competitive choices between airport subsidies and airlines was analyzed based on the replicator dynamic equation. The synergistic effect of the inter-airport collaborative subsidy strategy and the route network was determined. The results show that for airlines transferring routes, the advantageous discount range for attracting leakage passengers is between 0.6 and 0.75. The fare discounts for airlines competing on the same route should be concentrated between 0.6 and 0.85 to avoid the loss of revenue caused by low price competition. Additionally, the optimization of the route network through airport subsidies reveals that each airport has an optimal subsidy range based on its functional positioning.

Keywords: air transportation; differentiated subsidy strategy; route network optimization; double-layer evolutionary game; replicated dynamic equation