

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

陈欣¹, 张珍¹, 邱瑞², 盛寅³

(1. 南京财经大学管理科学与工程学院, 南京 210023; 2. 四川大学商学院, 成都 610065;
3. 空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 南京 210014)

摘要: 为探讨不同补贴模式对机场群航线网络结构的影响, 本文构建了关于机场、航空公司和乘客之间的动态博弈模型, 通过逆向归纳法得到了纳什均衡条件. 研究结果发现: (1) 不同的补贴模式对多机场航线网络结构产生重要影响, 低补贴模式促使机场群倾向于形成点对点航线网络结构, 反之, 在高补贴模式下机场群易于形成枢纽辐射航线网络; (2) 在较低的空铁联运总运营成本环境下, 补贴竞争使得航空公司倾向于选择系统内的大型机场作为枢纽机场; 反之, 如果空铁联运总运营成本相对较高, 补贴竞争使得航空公司倾向于选择小机场作为枢纽节点; (3) 随航班固定成本和空铁联运总运营成本的增大, 大型机场作为枢纽节点的概率逐渐减少, 而小机场被选为枢纽节点的概率将逐渐增大. 随着机场群内大型机场腹地服务人口比例的增大, 航空公司选择点对点航线网络的概率在减小. 研究结论能够为民航管理部门科学制定和应用航线补贴政策提供决策依据.

关键词: 机场群; 补贴模式; 动态博弈; 点对点网络; 枢纽辐射网络

中图分类号: V351.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.057002

Research on the impact of subsidization on the airline networks of multi-airport systems based on dynamic game theory

CHEN Xin¹, ZHANG Zhen¹, QIU Rui², SHENG Yin³

(1. School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China;
2. Business School, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
3. State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing 210014, China)

Abstract: To discuss the influence of different subsidy modes on the airline networks of multi-airport systems, this paper constructs a dynamic game model between airports, airlines, and passengers. The Nash equilibrium is obtained by analyzing the payoff matrix. The result shows: (1) Different subsidy modes have an important impact on the multi-airport airline network, and the low subsidy promotes the multi-airport system to form a point-to-point network; on the contrary, in the high subsidy mode, the multi-airport system is easy to form a hub-spoke network. (2) If the total operating costs of air-HSR cooperation are relatively low, subsidy competition makes carriers choose large airports in the system as the hub; conversely, if the total operating costs of air-HSR cooperation are relatively high, subsidy competition makes carriers choose small airports as the hub. (3) With the increase in fixed flight costs

收稿日期: 2022-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61903346, 71901157); 教育部人文社科项目(18YJC630013); 江苏省社会科学基金(19GLD008)

作者简介: 陈欣(1979—), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 研究方向为航空运输系统优化和政策设计. E-mail: njuechx@163.com

通讯作者: 邱瑞. E-mail: qiuroid@scu.edu.cn

and total operating costs of air-HSR cooperation, the probability of large airports as hub nodes will gradually decrease, while the probability of small airports being selected as hub nodes will gradually increase. At the same time, as the proportion of the population in large airports increases, the probability of carriers choosing a point-to-point network decreases. The research conclusions can provide a decision-making basis for the industry management department to scientifically formulate and apply the route subsidy policy.

Keywords: Multi-airport system; Subsidization; Dynamic game; Point-to-point network; Hub-spoke network

1 引言

机场群(Multi-Airport System, MAS)是指在城市群或大都市圈地区内提供商业航空运输服务的两个及两个以上的民用运输机场的组合,也就是多个机场共同服务于区域航空市场^[1-5]。机场群在提升区域航空运输服务水平,支撑国家新型城镇化战略和区域一体化战略高质量发展等方面具有不可替代的重要作用^[3]。因此,国家和地方政府非常重视机场的发展。其中,对航线进行补贴已成为各机场管理部门推动本地机场发展的重要举措之一^[6,7]。然而,由于缺乏统一规划和协调,机场群内各机场的航线补贴策略也引致了对区域航空资源的无序竞争,并进一步加剧了航线网络同构性问题^[5,8],这显然不利于机场群内各机场的合理分工和差异化定位的实现,也难以形成发展合力。因此,研究和分析补贴模式对于机场群航线网络结构的影响机理能够为民航管理部门出台科学的补贴政策,提高补贴效率提供可靠的决策依据,从而有助于推动区域机场群形成布局合理、协同高效的航线网络体系。

从现有文献来看,关于航空补贴和航线网络的研究较为丰富。其中,在航空补贴方面:Gössling 等^[6]提供了对航空各种补贴形式的概念性阐述,分析了补贴对航空运输部门整体可持续性的影响。Hou 等^[9]讨论了政府对小型机场的补贴,发现机场航班时刻自由化导致维持小机场生存的最低补贴水平的降低。Chow 等^[10]讨论了机场补贴在促进国内旅游业发展方面的影响。此外,部分学者开展了关于机票补贴的研究。例如,Minato 等^[11]研究发现机票补贴与提高非航空收入的措施相结合能够确保支线机场的生存能力。徐爱庆等^[5]利用 Multinomial Logit 模型考察了航线补贴对机场及航空公司的市场份额、利润水平及社会总收益的影响。高泰帆等^[12]讨论了政府补贴和交叉补贴对小

机场可持续发展的影响,分析了机场网络中交叉补贴的可行性。在多机场航线网络方面:Liao 等^[13]以粤港澳大湾区为例,基于航线层级探讨了该机场群内机场之间的竞争及其影响。Wong 等^[14]通过调查全球航空网络,讨论了机场群内枢纽机场和二级机场之间的乘客竞争。杨新涅等^[15]针对我国多机场航空网络整体规划混乱的问题,构建了不同层次的航线网络优化模型。

综上所述,已有文献为本研究的顺利开展奠定了良好基础,但既有文献中尚缺少从机场群角度出发将补贴模式和航线网络问题相结合起来的研究,对于不同补贴模式对机场群航线网络结构的影响机理尚不清晰。为填补这一空白,本文尝试建立动态博弈模型来研究不同补贴模式对机场群航线网络结构的影响。在该模型中首先由机场群内各机场设定收费和补贴模式,其次再由航空公司选择航线网络结构。通过逆向归纳法求解该博弈模型,得到了不同机场补贴模式和航空公司网络选择策略的相互影响关系和纳什均衡条件。最后进行了算例分析。

2 模型

2.1 假设和基本设置

本文首先构建由机场群、航空公司和旅客三方组成的动态博弈模型^[16]。不失一般性,假设机场群 A 由两种类型不同的机场组成,大型机场 A_1 和小型机场 A_2 。机场群 A 范围内与机场 B 的航空需求遵循就近原则且通过这两个机场能够得以满足。 A 和 B 之间的航线服务由一家航空公司 E 提供,该航空公司的航线网络结构有点对点(P)和枢纽辐射(H)两种模式,如图 1 所示。其中, H_i 表示以机场 A_i 为枢纽中心的网络结构。 A_1 和 A_2 之间有高铁连通。 l_{12} 表示 A_1 和 A_2 之间的地面距离, l_{iB} 表示机场 A_i 到机场 B 的航线距离,设 $l_{12} < l_{iB}$ 。

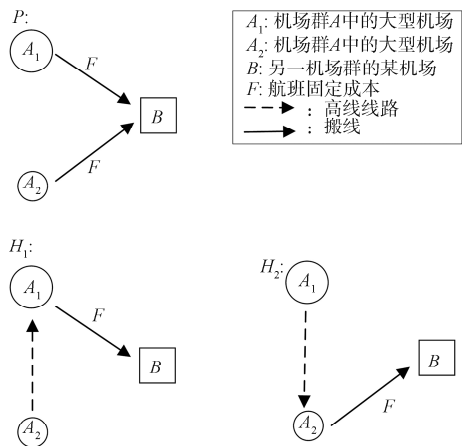


图 1 机场群的航线网络结构示意图
Fig. 1 The airline network structure of MAS

模型中共有 3 种类型的参与者:机场群 A 中的两个机场 A_1 和 A_2 、航空公司 E 和旅客. 动态博弈的时间顺序为: $T=1$: A_1 和 A_2 同时设定各自的机场收费 t_i 和机场补贴 $s_i, i=\{1,2\}$; $T=2$: 在给定补贴策略下, 航空公司 E 确定其网络结构 N 和两个机场的机票价格 $p_i, i=\{1,2\}$; $T=3$: 旅客决定是否选择从附近的机场(A_1 或者 A_2) 前往机场 B . 决策过程如图 2 所示.

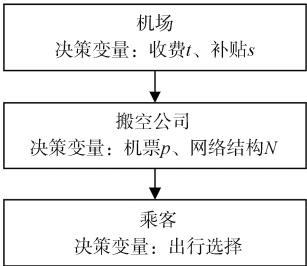


图 2 动态博弈决策过程
Fig. 2 Dynamic game decision-making process

假设机场 A_i 的航空出行需求是非弹性的^[17], 并将每位旅客的保留票价标准化为 1, 则到机场 B 的累计需求为

$$d(p_i)=\begin{cases} n_i, & \text{if } p_i\leq 1, i=\{1,2\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{1}$$

其中, n_i 是机场 A_i 的腹地服务人口总数. 为方便讨论, 将机场群 A 的腹地服务总人口 $n=n_1+n_2$ 进行归一化, 并设 A_1 的腹地服务总人口数大于 A_2 , 即: $n_1>n_2$. 显然, $1>n_1>1/2$.

2.2 航空公司的利润函数

在点对点网络结构(P)下, 航空公司 E 的成本费用包括: 航班运营变动成本 c_A 、航班固定成本 F 和机场费用支付 t_i . 在枢纽辐射网络结构下(H_1 或 H_2), E 的成本费用包括: 航班运营变动成本 c_A 、航

班固定成本 F 、机场费用支付 t_i 和高铁运营成本 c_{HSR} ^[18]. 机场收费一般按照民航局相关规定收取, 本研究中用常数 b 代替, 即 $t_i=b$. 航空公司的收入包括机票 p_i 和机场补贴 s_i 两部分. 由于市场处于垄断状态, 航空公司设定的机票价格 $p_i=1$. 航空公司的运营成本与乘客公里数和乘客数成正比, 机票价格、机场收费和机场补贴按每位乘客计算. 因此, 在给定机场补贴策略 $s=(s_1, s_2)$ 下, 航空公司通过选择其航线网络结构 $N(N=P, H_1, H_2)$ 来实现利润最大化 $\pi(N;s)$, 即 $N(s)=\arg\max_N \pi(N;s)$. 航空公司选择 P 模式时的利润为

$$\pi(P;s)=\sum_{i=1}^2[(1+s_i-b-c_A l_{iB})n_i-F] \tag{2}$$

航空公司选择 H 模式时的利润为

$$\pi(H_i;s)=(1+s_i-b-c_A l_{iB})n_i-F+(1+s_i-b-c_A l_{iB}-c_{HSR} l_{12})n_j \tag{3}$$

此外, 为确保两种航线网络的可选性, 假设以机场 A_i 作为枢纽时, 不论空铁联运路段上的利润是否非负, 航空公司都必须提供机场 A_j 到 A_i 的空铁联运服务. 同时, 航空公司在机场 A_i 的利润 π_i 也应满足 $\pi_i(P;s)=\pi_i(H_i;s)\geq 0$.

2.3 机场利润函数

机场收费和机场补贴按照旅客数计算, 则机场利润与旅客数量成正比. 机场 A_i 的旅客数量 m_i 随着航线网络模式 N 的变化而变化. 在 P 网络模式下, 机场 A_i 的旅客数量等于其腹地人口数, 即 $m_i(P)=n_i$; 在 H_i 网络模式下时, 机场 A_j 腹地的旅客需要通过空铁联运方式在机场 A_i 中转, 此时机场 A_i 旅客总数等于机场群腹地人口之和, 即 $m_i(H_i)=n_i+n_j=1$, 机场 A_j 的乘客为 0, 即 $m_j(H_i)=0$. 基于不同的航线网络模式 $N(s)$, 则机场 i 的利润函数为

$$\Pi_i(s_i,s_j)=\Pi_i(N(s))=(b-s_i)m_i(N(s)) \tag{4}$$

3 博弈模型求解

基于以上博弈模型, 本部分运用逆向归纳法对航空公司航线网络选择策略和机场补贴策略分别进行求解.

3.1 航空公司的航线网络选择策略

在给定的机场补贴策略下, 航空公司需要考虑如何选取其网络结构 $N(s)$ 以尽可能实现利润最大化, 并保证每个机场利润为非负, 即 $\pi_i(N;s)\geq 0$.

此时航空公司的利润函数满足下式.

$$\begin{aligned}\pi_i(P; s) &= \pi_i(H_i; s) = (1 + s_i - b - c_A l_{iB}) n_i - \\ F &\geq 0 \Leftrightarrow s_i \geq -1 + b + c_A l_{iB} + \frac{F}{n_i} \equiv \underline{s}_i(P) \equiv \underline{s}_i(H_i)\end{aligned}\quad (5)$$

式(5)确定了航空公司在三种网络结构(P, H_1 和 H_2)下的机场补贴下限. 即在 P 网络结构下, 如果每个机场都选择补贴 $s_i \geq \underline{s}_i(P)$, 则航空公司就会选择在机场 A_1 和 A_2 分别提供到机场 B 的直飞航线. 引理 1 给出航空公司的航线网络选择策略.

引理 1 航空公司的航线网络选择策略 $N(s)$ 如下.

$$N(s) = \begin{cases} P: \underline{s}_i(P) \leq s_i \leq \hat{s}_i(s_j) \\ H_1: s_1 \geq \max\{\underline{s}_1(H_1), \hat{s}_1(s_2), \bar{s}_1(s_2)\} \\ H_2: s_2 \geq \max\{\underline{s}_2(H_2), \hat{s}_2(s_1), \bar{s}_2(s_1)\} \end{cases}\quad (6)$$

其中, $\underline{s}_i(P) = \underline{s}_i(H_i) = -1 + b + c_A l_{iB} + \frac{F}{n_i}$, $\hat{s}_i(s_j) = s_j + c_A(l_{iB} - l_{jB}) + c_{HSR} l_{12} - \frac{F}{n_j}$, $\bar{s}_i(s_j) = s_j + c_A(l_{iB} - l_{jB}) - c_{HSR} l_{12}(n_i - n_j)$.

证明 航线网络结构 $N(s)$ 通过比较三种备选网络下的利润所得. 如果航空公司选择点对点航线网络结构($N(s) = P$), 即表明 $\pi(P; s) > \pi(H_1; s)$ 且 $\pi(P; s) > \pi(H_2; s)$, 因此有: $\pi(P; s) - \pi(H_i; s) = \sum_{i=1}^2 (1 + s_i - b - c_A l_{iB}) n_i - 2F - [(1 + s_i - b - c_A l_{iB}) n_i - F + (1 + s_i - b - c_A l_{iB} - c_{HSR} l_{12}) n_j] = [s_j - s_i + c_A(l_{iB} - l_{jB}) + c_{HSR} l_{12}] n_j - F > 0 \Leftrightarrow s_i < s_j + c_A(l_{iB} - l_{jB}) + c_{HSR} l_{12} - \frac{F}{n_j} \equiv \hat{s}_i(s_j)$ 进而可以得到补贴的取值范围 $\underline{s}_i(P) \leq s_i \leq \hat{s}_i(s_j)$. 同理按照 $\pi(H_i; s) - \pi(P; s) \geq 0 \Leftrightarrow s_i \geq \hat{s}_i(s_j)$ 可得 $N(s) = H_1$ 和 $N(s) = H_2$ 情况下的补贴取值范围. 引理 1 证毕.

由上可知, 对于足够小的机场补贴, 即 $s_1 < \hat{s}_1(s_2)$ 和 $s_2 < \hat{s}_2(s_1)$, 航空公司将选择航线网络模式 P . 如果机场群中的某个机场提供了较高的机场补贴或所有机场均提供足够高的补贴, 则航空公司选择航线网络模式 H_i . 如果 A_1 将其补贴设置在 $s_1 \geq \underline{s}_1(H_1)$ 和 $s_1 \geq \hat{s}_1(s_2)$ 的范围内, 则航空公司将选择 H_1 为航线网络结构. 同理, 如果 A_1 将其补贴设置在 $s_2 \geq \underline{s}_2(H_2)$ 和 $s_2 \geq \hat{s}_2(s_1)$ 的范围内, 则航空公司将选择 H_2 为航线网络结构. 航空公司的航线网络策略选择区间如图 3 所示.

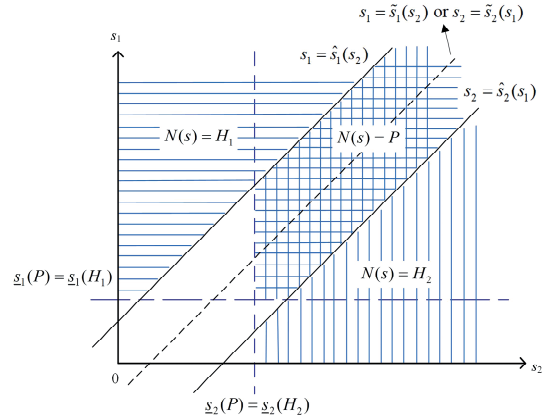


图 3 航空公司的航线网络策略选择区间
Fig. 3 The selection range of airline network strategy

3.2 机场的补贴策略

机场群中的两个机场 A_1 和 A_2 同时设置机场收费和机场补贴, 以实现机场利润的最大化. 为了保证三种航线网络模式 ($N = P, H_1, H_2$) 的可行性, 本研究假定直线 $s_1 = \hat{s}_1(s_2)$ 位于 $s_2 = \hat{s}_2(s_1)$ 上方, 也即

$$c_{HSR} l_{12} - \frac{F}{n_2} > \frac{F}{n_1} - c_{HSR} l_{12} \Leftrightarrow F < 2n_1 n_2 c_{HSR} l_{12} \equiv \bar{F} \quad (7)$$

同时, 每个机场都有两种补贴策略: 低补贴和高补贴. 在低补贴策略下, 航空公司倾向于在各机场开辟直飞航线, 此时任意机场 A_i 的补贴应使航空公司利润函数满足 $\pi_i(P; s) = 0$. 用 s_i^l 表示该策略下的机场补贴额度, 可以得到

$$s_i^l = \underline{s}_i(P) = -1 + b + c_A l_{iB} + \frac{F}{n_i} \quad (8)$$

在高补贴策略下, 每个机场旨在通过加大补贴力度以吸引航空公司将本场设为枢纽, 但这并不意味着各机场会无限地提高航线补贴额度. 由于在低补贴策略时, 各机场可以获取 $(b - s_i^l) n_i$ 的利润. 因此, 高补贴情况下机场的利润应至少不低于低补贴策略下的利润. 也就是说, 机场补贴力度的上限应满足如下关系式.

$$(b - \bar{s}_i)(n_i + n_j) = (b - s_i^l) n_i \Leftrightarrow \bar{s}_i = b - (1 - c_A l) n_i + F \quad (9)$$

若航空公司选择的航线网络模式为 H_i (以 A_i 作为枢纽), 则机场 A_i 的高补贴策略还应满足 $s_i \geq \max\{\underline{s}_i(H_i), \hat{s}_i(s_j), \bar{s}_i(s_j)\}$. 由图 3 知, $\hat{s}_i(s_j) > \bar{s}_i(s_j)$, 而 $\hat{s}_i(s_j)$ 取决于机场群内其他竞争机场的补贴力度. 因此, 机场 A_i 的补贴策略应确保该机场成为枢纽, 即 $s_i \geq \hat{s}_i(s_j) = \hat{s}_i(\bar{s}_j)$. 由于 $\hat{s}_i(\bar{s}_j) > \underline{s}_i(H_i)$, 则高补贴策略下的机场补贴策略为

$$s_i^h = \hat{s}_i(\bar{s}_j) = b - (1 - c_{Al})n_j + F + c_{HSR}l_{12} - \frac{F}{n_j} \quad (10)$$

3.3 纳什均衡分析

首先给出航空公司在不同的机场补贴策略下的航线网络选择策略. 在 $s = (s_1^l, s_2^l)$ 的情况下, 由于 $s_i^l < \hat{s}_i(\bar{s}_j)$, 所以 $N(s_1^l, s_2^l) = P$. 当 $s = (s_1^h, s_2^l)$ 或 $s = (s_1^l, s_2^h)$ 时, 由式(6)、式(8)和式(10)可知, 航线网络选择策略应为 $N(s_i^h, s_j^l) = H_i$. 当 $s = (s_1^h, s_2^h)$ 时, 航线网络选择策略可能是 H_1 也可能是 H_2 , 具体分析见引理 2.

引理 2 如果机场群内各机场均选择高补贴策略, 即 $s = (s_1^h, s_2^h)$, 则航空公司的航线网络选择策略为

$$N(s_1^h, s_2^h) = \begin{cases} H_1, & \text{if } \bar{F}_1 < F < \bar{F} \\ H_2, & \text{if } \bar{F}_2 < F < \bar{F} \end{cases} \quad (11)$$

表 1 机场群的收益矩阵
Tab. 1 Payoff matrix of MAS

机场补贴类型	机场 A ₂ 低补贴 s_2^l	机场 A ₂ 高补贴 s_2^h
机场 A ₁ 低补贴 s_1^l	$\Pi_1(s_1^l, s_2^l), \Pi_2(s_1^l, s_2^l)$	$\Pi_1(s_1^l, s_2^h), \Pi_2(s_1^l, s_2^h)$
机场 A ₁ 高补贴 s_1^h	$\Pi_1(s_1^h, s_2^l), \Pi_2(s_1^h, s_2^l)$	$\Pi_1(s_1^h, s_2^h), \Pi_2(s_1^h, s_2^h)$

命题 1 给出了本文博弈模型的纳什均衡条件.

命题 1 纳什均衡 (s_1^*, s_2^*, N^*) 条件如下:

$$(s_1^*, s_2^*, N^*) = \begin{cases} (s_1^l, s_2^l, P), & \text{if } F \leq \min\{\bar{F}_1, \bar{F}_2, \bar{F}\} \\ (s_1^h, s_2^h, H_1), & \text{if } \bar{F}_1 \leq F < \bar{F} \\ (s_1^h, s_2^h, H_2), & \text{if } \bar{F}_2 \leq F < \bar{F} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\bar{F} \equiv 2n_1n_2c_{HSR}l_{12}$, $\bar{F}_1 \equiv [c_{HSR}l_{12} - (1 - c_{Al})(n_1 - n_2)]n_1$, $\bar{F}_2 \equiv [c_{HSR}l_{12} + (1 - c_{Al})(n_1 - n_2)]n_2$.

证明 如果机场群内其他机场均选择高补贴策略, 由于 $\Pi_i(s_i^h, s_j^h) - \Pi_i(s_i^l, s_j^h) \geq 0$, 则该机场的最佳反应策略为高补贴. 如果机场群内其他机场均选择低补贴策略, 则该机场的最佳反应是: $\Pi_i(s_i^h, s_j^l) - \Pi_i(s_i^l, s_j^l) = (b - s_i^h) - (b - s_i^l)n_i = (b - s_i^h) - (b - \bar{s}_i) = \bar{s}_i - s_i^h = -(1 - c_{Al})(n_i - n_j) - c_{HSR}l_{12} + \frac{F}{n_j} > 0 \Leftrightarrow F > [c_{HSR}l_{12} + (1 - c_{Al})(n_i - n_j)]n_j \equiv \bar{F}_j$. 于是得到:

$$s_1^* = \begin{cases} s_1^h, & \text{if } F > \bar{F}_2, F < \bar{F} \\ s_1^l, & \text{if } F \leq \bar{F}_2, F < \bar{F} \end{cases}$$

其中, $\bar{F} \equiv 2n_1n_2c_{HSR}l_{12}$, $\bar{F}_1 \equiv [c_{HSR}l_{12} - (1 - c_{Al})(n_1 - n_2)]n_1$, $\bar{F}_2 \equiv [c_{HSR}l_{12} + (1 - c_{Al})(n_1 - n_2)]n_2$.

证明 由式(10)可知: $s_1^h = \hat{s}_1(\bar{s}_2)$, $s_2^h = \hat{s}_2(\bar{s}_1)$. 若 $N(s) = H_1$, 应满足条件: $\hat{s}_1(\bar{s}_2) \geq \max\{\underline{s}_1(H_1), \hat{s}_1(s_2), \bar{s}_1(s_2)\}$. 又因为 $\hat{s}_1(\bar{s}_2) \geq \underline{s}_1(H_1)$ 成立且 $\hat{s}_1(\bar{s}_2) > \bar{s}_1(s_2)$, 所以比较不等式 $\hat{s}_1(\bar{s}_2) \geq \hat{s}_1(s_2(\bar{s}_1))$, 可得: $F \geq [c_{HSR}l_{12} - (1 - c_{Al})(n_1 - n_2)]n_1 \equiv \bar{F}_1$. 同理, 若 $N(s) = H_2$, 可得: $F \geq [c_{HSR}l_{12} + (1 - c_{Al})(n_1 - n_2)]n_2 \equiv \bar{F}_2$. 引理 2 证毕.

将不同策略下的机场补贴表达式式(8)和式(10)代入机场利润函数式(4)中, 得到机场群的收益矩阵, 见表 1.

$$s_2^* = \begin{cases} s_2^h, & \text{if } F > \bar{F}_1, F < \bar{F} \\ s_2^l, & \text{if } F \leq \bar{F}_1, F < \bar{F} \end{cases}$$

通过划线法即可求得纳什均衡. 命题 1 证毕.

由命题 1 易知, 机场群内各机场采取低补贴策略 $s = (s_1^l, s_2^l)$ 时, 航空公司会在机场群实施 P 网络结构; 当机场群内部机场通过加大补贴力度进行竞争时, 也就是都采取高补贴策略 $s = (s_1^h, s_2^h)$ 时, 航空公司会在机场群形成枢纽辐射网络 H_1 或 H_2 . 具体来看, 通过比较空铁联运成本和航班固定成本的阈值 \bar{F} , \bar{F}_1 和 \bar{F}_2 , 可以得到以下结论.

- (1) 当 $c_{Al} + c_{HSR}l_{12} < 1$, 即空铁联运的总运营成本小于 1 时, $\bar{F}_1 < \bar{F} < \bar{F}_2$ 成立. 此时的均衡结果有两种情况: ① 机场群内每个机场的均衡策略均是采取低补贴策略, 即 $F < \bar{F}_1$ 条件成立, 航空公司将选择点对点网络结构; ② 当两个机场进行补贴竞争而采取高补贴策略时, 满足 $\bar{F}_1 < F < \bar{F}$, 此时航空公司将选择枢纽辐射网络结构, 并以机场群中的大机场作为枢纽中心.
- (2) 当 $c_{Al} + c_{HSR}l_{12} \geq 1$, 即空铁联运的总运营成本大于 1 时, $\bar{F}_2 < \bar{F} < \bar{F}_1$ 成立. 此时的均衡条件为: ① 两个机场的均衡策略均是采用低补贴时, 即 $F < \bar{F}_2$ 条件成立, 航空公司将选择点对点网络结

构;②当两个机场进行补贴竞争而采取高补贴策略时,满足 $\bar{F}_2 < F < \bar{F}$,此时航空公司将选择枢纽辐射网络结构,并以机场群中的小机场作为枢纽中心。

4 算例分析

本节对该模型中相关变量进行赋值,进行算例分析验证以上结论。由于大机场的腹地服务人口总数大于小机场,取 A_1 的人口比例 $n_1=0.55$,小机场 A_2 的人口比例 $n_2=0.45$ 。该情景条件下的纳什均衡结果,如图 4 所示。其他参数取值情况在图 5 中列出。图中横坐标表示空铁联运总运营成本(包括高铁单位运营成本和单位航班运营成本),纵坐标表示航班固定成本。由图可知,不同补贴策略下,航空公司选择航线网络结构也不同。当空铁联运总运营成本小于 1 时,随着航班固定成本的增大,航空公司选择枢纽辐射网络 H_1 的概率在减小;反之,当空铁联运总运营成本大于 1 时,随着航班固定成本的增大,航空公司选择枢纽辐射网络 H_2 的概率在增大。

图 5 显示了不同机场腹地服务人口比例对于纳什均衡结果的影响,共有 4 种情况:(a) $n_1=0.6, n_2=0.4$;(b) $n_1=0.7, n_2=0.3$;(c) $n_1=0.8, n_2=0.2$;(d) $n_1=0.9, n_2=0.1$ 。

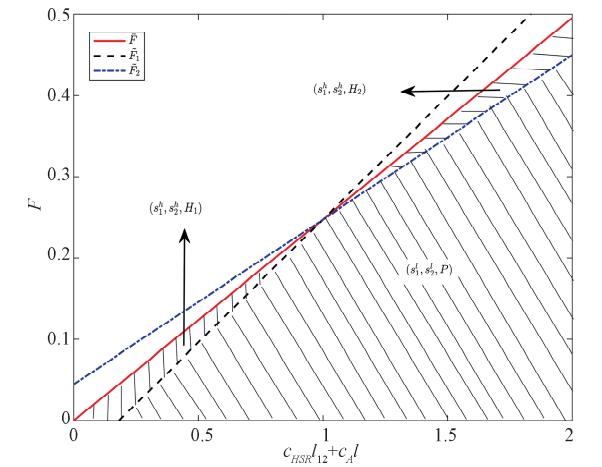


图 4 纳什均衡条件($n_1=0.55, n_2=0.45$)
Fig. 4 Nash equilibrium conditions

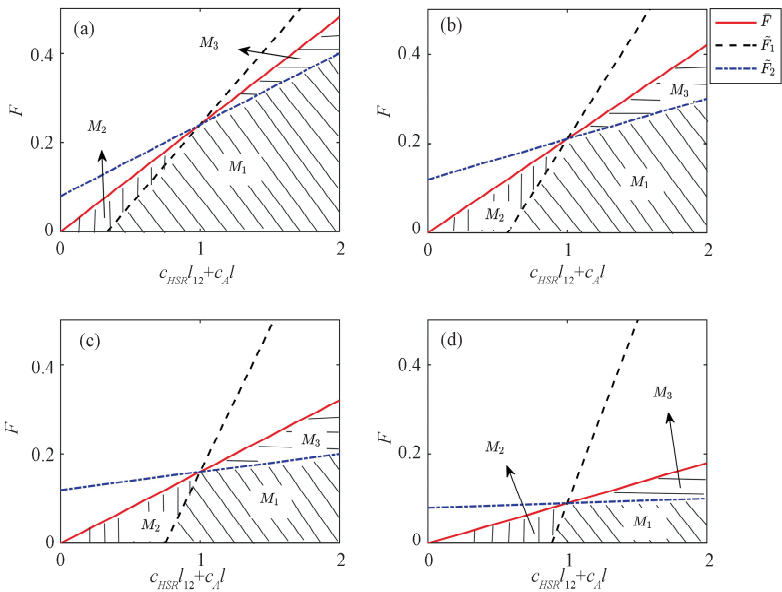


图 5 机场腹地服务人口比例对纳什均衡结果的影响

Fig. 5 Effect of the proportion of population served in the hinterland of the airport on the outcome of the Nash equilibrium

由图 5 知,随着大机场腹地服务人口比例的增加,如果各机场均采用低补贴策略,则航空公司选择在机场群布局点对点网络的概率也在不断降低。当小机场采取高补贴策略与大机场进行竞争时,如果空铁联运总运营成本大于 1,航班固定成本越大,航空公司选择 H_2 航线网络结构的概率将逐渐增加。这能在一定程度上可以解释当前很多小机场选择不断加大国际远程航线(航班固定成本较高)的补贴力度以吸引航空公司进驻本机场的

现象^[19]。

图 5 中, M_1 表示网络 P 的服务范围; M_2 表示网络 H_1 的服务范围; M_3 表示网络 H_2 的服务范围。

5 结 论

本文针对机场群航线网络结构问题,围绕不同补贴模式这一关键影响因素,构建了机场群、航空公司和旅客的动态博弈模型并运用逆向归纳法进行了求解,研究了不同补贴模式对于机场群航线网

络结构的影响. 研究结果发现,若机场间不进行补贴竞争,即均采用低补贴策略,此时航空公司选择点对点式航线网络;若各机场增加补贴力度来吸引航空公司进驻本场以成为枢纽节点,即机场群内机场均采用高补贴,此时航空公司会选择枢纽辐射网络. 然而,哪个机场可以成为机场群航线网络的枢纽中心还要取决于航班固定成本和空铁联运总成本. 具体得到以下结论:(1) 当空铁联运总成本小于 1 时,随着航班固定运营成本的提高,高补贴策略促使航空公司选择机场群内的大机场作为枢纽中心的倾向性变小;(2) 当空铁联运总成本大于 1 时,若航班固定运营成本越高,机场间的高补贴策略会促使航空公司更愿意选择机场群内的小机场作为枢纽中心;(3) 在低补贴策略下,随着大机场腹地服务人口比例的增加,航空公司选择在机场群选择点对点航线网络结构的倾向性也在不断降低.

研究结论对厘清不同补贴模式对机场群航线网络结构的影响机理具有重要理论价值,对提升民航综合竞争力、减少系统内耗具有重要现实意义,也可为民航管理部门出台科学的航线补贴政策提供可靠依据.

参考文献:

[1] Bonnefoy P A, de Neufville R, Hansman R J. Evolution and development of multi-airport systems: worldwide perspective [J]. J Transp Eng, 2010, 136: 1021.

[2] de Neufville R. Management of multi-airport systems: A development strategy [J]. J Air Transp Manag, 1995, 2: 99.

[3] 陈欣,李心茹,戴靓,等. 基于复杂网络的机场群航线网络动态特征分析[J]. 交通科技与经济, 2020, 22: 5.

[4] 徐爱庆,陈欣,朱金福. 基于累积前景理论的机场群旅客出行决策行为分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18: 14.

[5] 徐爱庆,陈欣,朱金福. 基于 Multi-Logit 模型的多机场系统航线补贴研究[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47: 32.

[6] Gössling S, Fichert F, Forsyth P. Subsidies in avia-

tion [J]. Sustainability, 2017, 9: 1295.

[7] 顾梦君,陈磊,党晓文,等. 地方政府航线补贴现状分析与优化研究[J]. 民航管理, 2020(2): 16.

[8] 蒋永雷,杨忠振,王璐,等. 区域机场同质化发展特征分析——以长三角地区机场群为例[J]. 经济地理, 2013, 33: 122.

[9] Hou M, Wang K, Yang H. 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]. J Air Transp Manag, 2021, 93: 102047.

[10] Chow C K W, Tsui W H K, Wu H. Airport subsidies and domestic inbound tourism in China [J]. Ann Tourism Res, 2021, 90: 103275.

[11] Minato N, Morimoto R. Designing the commercial sustainability of unprofitable regional airports using system dynamics analysis [J]. Res Transp Bus Manag, 2011, 1: 80.

[12] 高泰帆,张瑾玮,庞东亮. 小机场发展、交叉补贴与差异化收费研究[J]. 中国物价, 2020(4): 84.

[13] Liao W, Cao X, Li S. 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: 2958.

[14] Wong W H, Cheung T, Zhang A, et al. Is spatial dispersal the dominant trend in air transport development? A global analysis for 2006 – 2015 [J]. J Air Transp Manag, 2019, 74: 1.

[15] 杨新涅,徐睿阳. 基于功能定位的区域多机场航线网络优化[J]. 航空计算技术, 2020, 50: 1.

[16] Gibbons R. A primer in game theory [M]. New York: Harvester Wheatsheaf, 1992.

[17] Teraji Y, Morimoto Y. Price competition of airports and its effect on the airline network [J]. Econ Transp, 2014, 3: 45.

[18] Li Z-C, Tu N, Fu X, et al. Modeling the effects of airline and high-speed rail cooperation on multi-airport systems: The implications on congestion, competition and social welfare [J]. Transport Res B-Meth, 2022, 155: 448.

[19] 顾梦君,陈磊,党晓文,等. 地方政府航线补贴现状分析与优化研究[J]. 民航管理, 2020(2): 16.

引用本文格式:

中文: 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: 057002.

英文: 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]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 057002.

《四川大学学报(自然科学版)》

征 稿 简 则

《四川大学学报(自然科学版)》是由国家教育部主管、四川大学主办的自然科学综合性学术期刊,双月刊,国内外公开发刊。主要刊登在基础应用学科和高新技术科学领域具有创造性的学术论文,促进国内外学术交流,对国家和省部级基金项目成果给予优先发表。

1. 开设栏目

1.1 研究论文:透彻、完整、清晰地报导具有学术价值的新的实验、理论结果和进展。研究论文一般分引言、理论或实验方法、结果与讨论、结论等部分,不超过 8000 字。要求在引言及相关部分对该研究内容相关的背景及现状、本工作所解决的问题及意义有清楚、简洁、完整和客观的叙述。

1.2 快报:快速、简要地报道新的实验和理论结果。快报正文内容不分章节,一般不超过 6000 字。一旦被接受,将在 4 个月之内发表,作者可将其更为详细的内容投往国内外其它期刊。

1.3 综合评述:对变化较快的各相关领域的研究进展做出评述。综合评述一般不超过 10000 字,必须有作者对该领域的较为独到的和具有个人特色的批评性意见和展望。

2. 稿件要求

2.1 标题、作者、单位、摘要及关键词要求用中英双语表示。题目应以简明、确切的词语反映文中最重要的内容,避免使用非标准的缩略语以及结构式和公式。中国作者姓名采用汉语拼音。单位必须写出全称,所在城市和邮政编码。摘要应体现稿件的研究目的,方法,主要结果和结论等,不使用图表、公式,不采用非标准术语、缩写词等。应精选出反映稿件内容的中、英文关键词各 3~6 个,按其重要性排列,分别列于中、英文摘要后。另外,请注明中图分类号代码。

2.2 中文标准基金全称及批准号、作者简介、通讯作者信息一律在首页用中文脚注标注。作者简介内容包括:姓名、出生年、性别、民族(汉族可省)、籍贯、职称、最高学历(可省,但在读研究生需标注)、研究方向和 E-mail 地址等。通讯作者应标注其 E-mail 地址。

2.3 使用国际标准的缩略词、符号和计量单位系统时,全文要一致。摘要和正文中的缩略词在首次出现时须写出全称,后附缩略词,并用圆括号括起,此后可直接引用。应严格执行 GB3100~3102-93 有关法定计量和单位的规定。单位符号一律用正体,变量的符号(包括下标)需用斜体。

2.4 插图(照片)、表具有自明性,并按出现的先后次序顺序编号。在论述中应先文后图、表。中文稿件中,插图(照片)、表标题应同时采用中英文双语表示。插图(照片)、表头的量或用来标记图形轴线的量,用“量符号/单位标准化符号”形式标记。表应置于正文相应位置处,用三线表,必要时可加辅助线。若有表注,可写在表底线左下侧。插图曲线要求墨色均匀、粗细均匀,照片要求清晰,黑白反差大。彩色插图(照片)需转化为灰度图。插图(照片)要精选,切忌与表及文中表达重复。

2.5 应引用与本工作有关的、近年的主要文献,未公开发表的资料请勿引用。引用时,参考文献序号须加[],一般置于右上角;若写成“文献[]”,则与正文平排。参考文献应按正文中引文出现的先后顺序列出。参考文献中,作者应以姓在前、名缩写在内的形式列出

(不加缩写点)。文献作者 3 名以内全部列出,4 名以上只列前 3 名,后加“,等”或“,et al”。英文稿件中的中文参考文献需在其后注明“(in Chinese)”。专著、期刊等文献格式按 GB/T 7714-2015 的规则执行,说明如下(详细说明请参考本刊网站投稿指南):

+ 专著(包括各种图书,学位论文,技术报告,文集,丛书等)

主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志]. 其他责任者. 版本项(初版不写). 出版地:出版者,出版年:起始页码。

+ 专著中的析出文献

析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标志]. 析出文献其他责任者//主要责任者. 专著题名:其他题名信息. 版本项(初版不写). 出版地:出版者,出版年:起始页码。

+ 连续出版物(包括期刊,报纸等)

主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志]. 年,卷(期)-年,卷(期). 出版地:出版者,出版年:起始页码。

+ 连续出版物中的析出文献

析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标志]. 连续出版物题名:其他题名信息,年,卷(期):起始页码。

+ 专利文献

申请专利者或所有者. 专利题名:专利国别,专利号[文献类型标志]. 公告日期或公开日期。

+ 电子文献

主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志/文献载体标志]. 出版地:出版者,出版年(更新或修改日期)[引用日期]. 获取或访问路径(其中文献类型标志/文献载体标志包括:[DB/OL]表示联机网上数据库,[DB/MT]表示磁带数据库,[M/CD]表示光盘图书,[CP/DK]表示磁盘软件,[J/OL]表示网上期刊,[EB/OL]表示网上电子公告)

3. 其 它

3.1 自 2007 年起,作者须通过网站投稿系统投稿。来稿刊登与否由编辑部根据专家审稿意见和编委会决议最后审定。拟刊登的稿件,作者需提供其最后定稿的方正或 Word 等电子文档;不拟刊登的来稿,编辑部将及时函告作者,但稿件不退还,请自留底稿。

3.2 稿件文责自负(包括政治、学术、保密等),编辑部有权进行技术性和文字性的修改。来稿一经排版,作者对清样稿不能再作大量的文字改动。编辑部对在本刊发表论文者,收取适量的发表费。稿件刊登后向作者寄送本期样刊 1 份,并为作者提供该文的 PDF 文档。

3.3 作者须同意将该文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权力在全世界范围内转让给编辑部。

3.4 清样稿的 PDF 文档将通过 E-mail 发给通讯作者作最后的阅读和校对。编辑部在收到校对后的清样稿和发表费后再安排付印。

3.5 凡与编辑部的通讯,请注明稿件编号。来函请寄:610064 四川省成都市四川大学学报(自然科学版)编辑部。电话:(028) 85410393, E-mail:scdx@scu.edu.cn, 网址: <http://science.ijournals.cn>

弘扬 科学家精神

袁隆平

杂交水稻研究的开创者

袁隆平（1930年9月—2021年5月），杂交水稻专家，中国工程院院士。主要从事杂交水稻研究，其科研成果使我国在杂交水稻和超级杂交稻育种上一直处于世界领先水平。荣获国内国际奖项20余项，2001年获国家最高科学技术奖，2019年获“共和国勋章”。

袁隆平说，他有两大梦想，第一是禾下乘凉梦；第二是杂交水稻覆盖全球梦。从事杂交水稻研究50多年来，为实现这两大梦想，袁隆平躬耕陇亩，创新不止，成功地演奏了实现三系杂交稻、攻克两系杂交稻、冲刺超级稻、攻关“耐盐碱水稻”的创新四部曲，曲曲大气磅礴，曲曲高亢激扬！

本刊被下列国内外重要检索系统列为刊源：

- +

中国综合性科技类核心期刊(北大核心)
- +

中国科学引文数据库(CSCD)
- +

中国科技论文与引文数据库
- +

中国学术期刊综合评价数据库
- +

中国学术期刊(光盘版)数据库
- +

万方数据系统科技期刊群数据库
- +

维普中文科技期刊数据库

+

中国知网数据库

+

美国 EBSCO 数据库(EP)

+

美国《化学文摘》(CA)

+

俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)

+

英国《动物学记录》(ZR)

+

美国《生物学文摘》(BA)

+

德国《数学文摘》(Zbl Math)

四川 大 学 学 报 (自 然 科 学 版)
Sichuan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)
(双月刊 1955 年创刊)
第 59 卷 第 5 期

Journal of Sichuan University
(Natural Science Edition)
(Bimonthly, Started in 1955)
Vol. 59 No. 5

主 办 单 位	四川大学	Sponsored by	Sichuan University
主 管 单 位	国家教育部	Managed by	National Education Ministry
编 辑 出 版	四川大学学报(自然科学版)编辑部 (四川省成都市武侯区望江路 29 号, 邮编: 610064) E-mail: scdx@scu.edu.cn	Edited by	Editorial Department of Journal of Sichuan University (Natural Science Edition) http://science.scu.edu.cn http://science.ijournals.cn
主 编	王玉忠 院士	Editor	Academician WANG Yu-Zhong
常务副主编	邹方东 教授	Administrative Vice Editor	Professor ZOU Fang-Dong
印 刷	成都市富生实业有限公司	Printed by	Chengdu Fusheng Co., Ltd
国 内 发 行	四川省报刊发行局	Distributed by	Sichuan Newspaper&Journal Publishing Bureau
国 内 订 购	全国各地邮政局		Domestic All Local Post Offices
国 外 发 行	中国国际图书贸易总公司		China International Book Trading Corporation
出 版 日 期	2022 年 9 月 28 日	Publishing Date	Sep. 28, 2022