

基于演化博弈的民航干支线联合运营策略研究

景崇毅, 杨亚茹, 杜文峰

(中国民用航空飞行学院经济与管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:为实现我国“干支通, 全网联”航空运输服务网络建设, 促进我国干支线航空公司协同发展, 给人们的出行创造便利条件, 基于演化博弈理论, 通过构建干线航空公司和支线航空公司两方之间的演化博弈模型, 分别对干线航空公司、支线航空公司、干支联运系统的稳定条件和稳定性进行讨论, 研究博弈双方在演化过程中的策略选择。研究发现, 系统合作策略的选择与鞍点的位置有关。当鞍点的位置越接近合作策略时, 博弈双方选择不合作的概率越大, 则博弈双方更倾向于选择不合作策略; 当鞍点的位置越接近不合作策略时, 博弈双方选择合作的概率越大, 博弈双方则更倾向于选择合作策略。

关键词: 干线航空公司; 支线航空公司; 演化博弈

中图分类号: F562 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0045-05

近年来, 我国航线网络日益完善, 但是干支比例严重失衡。我国三四线城市居民和一些偏远地区的居民还未能享受到干线城市居民同等的航空服务, 人们的出行仍然是一个问题。目前我国的干线航线网络已经趋于稳定, 但还未形成全面覆盖的航线网络, 干线航空公司大多是国际和国内主要城市之间的航空运输, 中小城市与大城市之间、中小城市与中小城市之间的航线连接还需要借助支线航空公司来实现。同时由于短途支线航线具有“小机型、短航线、小航程”的特点, 可以作为干支航线网络的重要补充和“毛细血管”。因此加强干线航空公司和支线航空公司协同发展, 充分发挥各自的优势, 在服务社会的同时, 也能提升双方的经济效益。

1 文献综述

目前关于干支航空运营的研究中, Forbes 和 Lederman^[1]分析了支线航空在美国航空运输业的作用以及干线航空和支线航空之间的组织关系。Gillen 等^[2]对干线航空公司与支线航空公司之间的纵向战略关系进行分析, 发现市场规模、航空公司之间的成本差是航空公司选择哪种合作模式的主要决定因素。景崇毅等^[3]通过对不同模式下支线航空公司的均衡利润分析, 发现成本的大小和旅客密

度都会影响干线航空公司合作模式的选择。Oum 和 Zhang^[4]探讨了航空联盟对合作伙伴生产力、定价和盈利能力、产出、航班频率和福利的影响。Brueckner^[5]提供实证证据显示国际旅客支付联程票价时, 航空公司在票价制定过程中的合作为国际联运乘客带来了巨大的利益。Brueckner 和 Whalen^[6]发现国际航线联盟票价比非联盟承运人收取的票价大约低 25%。王海茏等^[7]对目前国内航线网络进行分类, 提出新型航线网络结构, 并为我国发展干支联运提供建议。王琨等^[8]运用 BERTRAND(伯特兰德)博弈模型对点对点型和枢纽辐射型航线网络下, 支线航线市场达到的均衡利润进行对比, 结果显示无论是在单一航线网络还是复合航线网络上, 干支合作均提高了共同利润; 徐慧^[9]通过建立了两干两支的“枢纽-支线”网络结构, 从博弈论的角度分析了 6 种不同的航空公司竞争、合作博弈模型, 得出支线航空公司无论在任何情况下都倾向于与干线航空公司形成支—干—支联盟, 并且在该联盟下, 社会福利达到最大化。罗彤^[10]分析国内支线航空的发展现状, 为未来支线航空网络化运营提出了建议。汤劲和张洁^[11]、岳鹏飞^[12]分析了当前支线航空所面临的问题, 通过借鉴美国支

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2033213); 民航局科教项目(MHJY2023008); 四川省科技厅项目(2022YFG0196); 中国民用航空飞行学院大学生创新训练计划项目(S202310624181)

作者简介: 景崇毅(1981—), 男, 四川射洪人, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向为民航运输管理; 杨亚茹(1997—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为民航运输管理; 杜文峰(1997—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为民航运输管理。

线航空的发展历程,来为中国干支线航空联运模式提供建议。

通过以上文献分析发现,对干支线航空研究主要是对干支线航空公司合作运营的模式选择以及干支线航空公司合作提高合作双方的共同利润和增加社会福利的研究,对干支线航空公司合作研究已经取得较多成果,但很少有对干支线航空公司合作的动态演化进行研究。基于此,运用演化博弈方法^[13-15]分析干支线航空公司之间博弈演化过程,研究博弈双方在演化过程中的策略选择,为我国干支线航空公司运营提供理论依据。

2 演化博弈模型构建与分析

2.1 模型基本假设

在干线航空公司和支线航空公司博弈的阶段,在双方均处于有限理性的情况下,其各自博弈策略组合为{合作,不合作}。建立如下假设。

假设1:干线航空公司选择合作的概率为 x ,则其选择不合作的概率为 $(1-x)$;支线航空公司选择合作的概率为 y ,则其选择不合作的概率为 $(1-y)$,其中 $x, y \in [0, 1]$;

假设2:在干线航空公司和支线航空公司均不选择合作时,双方相互独立运营,相互竞争。则运营干线航空公司和运营支线航空公司各自可获得的利润为 R_a 和 R_b ,其中 $R_a > 0$ 和 $R_b > 0$;

假设3:干线航空公司单独运营时的票价为 p ,支线航空公司单独运营时的票价 r ,民航干线航空公司选择合作时票价折扣 s_1 ,支线航空公司选择合作时票价折扣 s_2 ;

假设4:在干线航空公司和支线航空公司均选择合作时,票价会有 s_1, s_2 的折扣,与乘客选择单独购买的机票价格相比较,联程票价更低,中转比较方便,即会带来新增联运客流 $q, q > 0$;

假设5:干支联运需要投入的总成本为 c ,干线航空公司分担比例为 b ,支线航空公司分担比例为 $(1-b)$;如果一方选择合作,另一方无论是选择合作还是选择不合作,选择合作的一方都会为了达成合作而进行一定的前期成本投入,且 $c > 0$ 。

假设6:当一方选择合作另一方选择不合作时,选择不合作方给选择合作方造成了损失 Q ,需要支付违约金 m 给被违约方,同时会获得超额收益 h ,且 $h > m$ 。由于政府为了促成民航干支联运,方便人们出行,促进整体经济增长,会给选择合作方进行补贴 g 。

2.2 模型构建

基于以上基本假设,可得干线航空公司和支线航空公司策略演化博弈的支付矩阵,具体见表1。

根据支付矩阵,当干线航空公司合作时,支线航空公司可以选择合作也可以选择合作。同理,当支线航空公司选择合作时,干线航空公司也可选择合作或者不合作。根据表1可得,当干线航空公司选择“合作”策略时的期望收益为

$$U_{11} = y[(p-s_1)q - m + Q] + R_a + g + m - Q - bc \quad (1)$$

当干线航空公司选择“不合作”策略时的期望收益 U_{12} 为

$$U_{12} = y(h - m) + R_a \quad (2)$$

则可得干线航空公司的平均期望收益为

$$\bar{U}_1 = x\{y[(p-s_1)q + Q - h] + g + m - Q - bc\} + y(h - m) + R_a \quad (3)$$

根据相关演化博弈理论,由式(1)~式(3)可知干线航空公司选择“合作”策略时的复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{11} - \bar{U}_1) = x(1-x)\{y[(p-s_1)q + Q - h] + g + m - Q - bc\} \quad (4)$$

同理可得支线航空公司选择“合作”策略时期望收益 U_{21} 、选择“不合作”策略时期望收益 U_{22} 以及平均期望收益 $\bar{U}_2$ 为

$$U_{21} = x[(r-s_2)q + Q - m] + R_b + g + m - Q - (1-b)c \quad (5)$$

$$U_{22} = x(h - m) + R_b \quad (6)$$

$$\bar{U}_2 = y\{x[(r-s_2)q + Q - h] + g + m - Q - (1-b)c\} + x(h - m) + R_b \quad (7)$$

由式(5)~式(7)可知,支线航空公司选择“合作”策略时的复制动态方程为

表1 博弈双方的支付矩阵

博弈主体		支线航空公司 B	
		合作 y	不合作 $1-y$
干线航空公司 A	合作 x	$R_a + g + (p-s_1)q - bc$ $R_b + g + (r-s_2)q - (1-b)c$	$R_a + g + m - Q - bc$ $R_b + h - m$
	不合作 $1-x$	$R_a + h - m$ $R_b + g + m - Q - (1-b)c$	R_a R_b

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{21} - \bar{U}_2) = y(1-y)\{x[(r-s_2)q+Q-h] + g+m-Q-(1-b)c\} \quad (8)$$

综合式(4)和式(8)可得干线航空公司和支线航空公司演化博弈系统的复制动态方程组为

$$\begin{cases} F(x) = x(1-x)\{y[(p-s_1)q+Q-h] + g+m-Q-bc\} \\ F(y) = y(1-y)\{x[(r-s_2)q+Q-h] + g+m-Q-(1-b)c\} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 模型分析

2.3.1 演化博弈均衡点分析

对干线航空公司和支线航空公司的复制动态方程分别求偏导可得:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = (1-2x)\{y[(p-s_1)q+Q-h] + g+m-Q-bc\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial F(y)}{\partial y} = (1-2y)\{x[(r-s_2)q+Q-h] + g+m-Q-(1-b)c\} \quad (11)$$

通过计算可以得到干线航空公司和支线航空公司的复制动态方程,根据所求复制动态方程找到干线航空公司和支线航空公司演化博弈的稳定状态(ESS),接着对干支联运系统的稳定策略进行讨论。

首先令 $F(x) = 0, F(y) = 0$, 可以求得 5 个干支联运博弈均衡点, 即 $(0,0), (1,0), (0,1), (1,1)$, 和 $\left[\frac{Q+(1-b)c-g-m}{(r-s_2)q+Q-h}, \frac{Q+bc-g-m}{(p-s_1)q+Q-h}\right]$, 其中鞍点可以记作 (x^*, y^*) , $x^* = \frac{Q+(1-b)c-g-m}{(r-s_2)q+Q-h}$, $y^* = \frac{Q+bc-g-m}{(p-s_1)q+Q-h}$ 。

对干线航空公司的复制动态方程分析,根据博弈理论可知,当 $F(x) = 0$ 且 $\frac{\partial F(x)}{\partial x} < 0$ 时民航干线航空公司的决策演化稳定。分情况进行讨论:①当 $y = y^* = \frac{Q+bc-g-m}{(p-s_1)q+Q-h}$ 时,无论 x 取何值, $F(x)$ 始终为 0,干线航空公司均处于稳定状态。即当支线航空公司选择以 $\frac{Q+bc-g-m}{(p-s_1)q+Q-h}$ 合作水平向干线航空公司合作时,对干线航空公司而言,选择合作策略和选择不合作策略时收益没有变化;②当 $y > y^*$ 时,可得 $F(0) > 0, F(1) < 0$, 即 $x = 1$ 为演化稳定策略,即当支线航空公司选择合作策

略的比例大于 y^* 时,干线航空公司由原来的不合作策略转向选择合作策略;③当 $y < y^*$ 时,同理可得 $x = 0$ 为演化稳定策略,即当支线航空公司选择合作策略的概率 $y < y^*$ 时,干线航空公司由选择合作策略转向选择不合作策略。同理可得支线航空公司的演化稳定策略为:①当 $x = x^* = \frac{Q+(1-b)c-g-m}{(r-s_2)q+Q-h}$ 时,无论 y 取何值, $F(y)$ 始终为 0, 即当干线航空公司选择以 $x = \frac{Q+(1-b)c-g-m}{(r-s_2)q+Q-h}$ 水平合作时,支线航空公司选择合作策略和选择不合作策略时的收益相同;②当 $x > x^*$ 时, $y = 1$ 为演化稳定策略,即当干线航空公司选择以 $x > x^*$ 水平合作时,支线航空公司由选择不合作策略转向选择合作策略;③当 $x < x^*$ 时, $y = 0$ 为演化稳定策略,即当干线航空公司选择以 $x < x^*$ 水平合作时,支线航空公司由原来选择合作策略转向选择不合作策略。

2.3.2 演化博弈稳定性分析

由复制动态方程组式(9)可得到一个二维连续动态系统,该系统描述了干支线航空的演化动态。令 $F(x) = 0, F(y) = 0$ 可得二阶微分方程组的 5 组解,为 $A(0,0), B(0,1), E\left[\frac{Q+(1-b)c-g-m}{(r-s_2)q+Q-h}, \frac{Q+bc-g-m}{(p-s_1)q+Q-h}\right], C(1,0), D(1,1)$, 这 5 个点即为博弈系统的均衡点。根据 Friedman^[16] 提出的方法,系统的均衡点稳定性可由雅可比矩阵的局部稳定性推导。该系统的雅可比矩阵为

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (12)$$

将博弈双方的复制动态方程代入矩阵中可得矩阵式:

$$J = \begin{pmatrix} (1-2x)(A_1y-B_1) & (x-x^2)A_1 \\ (y-y^2)A_2 & (1-2y)(A_2x-B_2) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{cases} A_1 = (p-s_1)q+Q-h \\ A_2 = (r-s_2)q+Q-h \\ B_1 = Q+bc-g-m \\ B_2 = Q+(1-b)c-g-m \end{cases} \quad (14)$$

根据雅可比矩阵 J 写出行列式的 $\det J$ 和 $\text{tr} J$:

$$\det J = [(1-2x)(A_1y-B_1)(1-2y)(A_2x-B_2)] - [(x-x^2)(y-y^2)A_1A_2] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{tr} \mathbf{J} = & (1-2x)(A_1y-B_1) + \\ & (1-2y)(A_2x-B_2) \end{aligned} \quad (16)$$

根据干线航空公司和支线航空公司演化博弈系统的复制动态方程雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 的行列式 $\det \mathbf{J}$ 和迹 $\text{tr} \mathbf{J}$ 的正负,分析博弈均衡点的局部稳定性。通过对行列式 $\det \mathbf{J}$ 和迹 $\text{tr} \mathbf{J}$ 计算,可以得出 5 个演化均衡点下的 $\det \mathbf{J}$ 和 $\text{tr} \mathbf{J}$ 的正负性,当矩阵中局部均衡点满足行列式大于 0 且矩阵的迹小于零时,则该均衡点为干线航空公司与支线航空公司联合运营决策系统的演化稳定策略。系统均衡点的局部稳定性分析结果见表 2。

根据表 2 可以看出,干线航空公司与支线航空公司的合作演化博弈系统中,存在两个演化稳定点,即 $A(0,0)$ 和 $D(1,1)$ 对应着干支线航空公司联运策略选择最终会达到两种稳定状态即为双方都选择不合作和双方都选择合作。存在两个演化不稳定点,即 $B(0,1)$ 、 $C(1,0)$,系统的鞍点为 $E(x^*, y^*)$ 。此时,民航干支线航空公司在该条件下的博弈动态过程如图 1 所示。

从系统的演化动态相位图不仅可以直观地显示博弈主体的演化趋势,还能够表现系统的演化情况。利用区域 $BECA$ 和区域 $BECD$ 的面积大小变化来描述干线航空公司和支线航空公司策略变化趋势。当干线航空公司和支线航空公司的策略位于 $BECD$ 区域内时,合作双方选择合作时的整体收益要高于不合作时的收益。当鞍点的位置越接近不合作策略时,博弈双方选择合作策略的概率越

大,即选择合作的概率会逐渐增加,并最终随着时间的推移收敛至均衡点 $D(1,1)$ 。当干线航空公司和支线航空公司的策略位于 $BECA$ 区域时,表示合作双方选择合作的整体收益要低于选择不合作时的收益。当鞍点的位置越接近合作策略,博弈双方选择不合作策略的概率越大,即选择合作的概率会逐渐减小,并最终随着时间的推移收敛至均衡点 $A(0,0)$,即二者的演化策略更容易演化为不合作策略。干线航空公司和支线航空公司的决策演化结果与初始状态密切相关,随着初始状态的变化,形成了不同路径的演化稳定状态,系统演化稳定状态取决于 $BECD$ 和 $BECA$ 的面积大小,而区域面积的大小则受到鞍点位置的影响。鞍点越靠近 A 点博弈双方更倾向于选择合作策略,鞍点越靠近 D 点博弈双方更倾向于选择不合作策略。

3 结论和建议

基于演化博弈理论研究了民航干线航空公司和支线航空公司之间的演化博弈问题,通过分析得出双方的演化稳定策略为(合作,合作)和(不合作,不合作),而博弈双方的演化结果又和鞍点在系统中的位置密切相关,鞍点位置的变化受到各个参数的影响,鞍点位置的移动会导致双方博弈策略的改变。当鞍点的位置向不合作策略移动时, $BECD$ 的面积会增大,博弈双方选择合作概率也会增大;当鞍点的位置向合作策略移动时, $BECD$ 的面积会减小,博弈双方选择不合作的概率会增大。

表 2 系统均衡点的局部稳定性分析结果

均衡点	$\det \mathbf{J}$	符号	$\text{tr} \mathbf{J}$	符号	是否稳定
$A(0,0)$	B_1B_2	+	$-B_1-B_2$	-	ESS
$B(0,1)$	$B_2(A_1-B_1)$	+	$A_1-B_1+B_2$	+	不稳定
$C(1,0)$	$B_1(A_2-B_2)$	+	$A_2-B_2+B_1$	+	不稳定
$D(1,1)$	$(A_1-B_1)(A_2-B_2)$	+	$-A_1+B_1-A_2+B_2$	-	ESS
$E(x^*, y^*)$	$-\frac{(A_2B_2-B_2^2)(A_1B_1-B_1^2)}{A_1A_2}$	-	0		鞍点

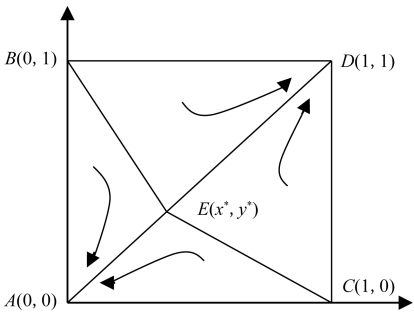


图 1 系统的演化相位图

针对以上结论,从实践角度提出以下建议:干支线航空公司应合理地进行定价,对于联运产品除了给予适当折扣外,还应该从旅客出行的需求考虑,缩短换乘时间、减少安检登机程序、优化行李托运步骤等,提高联运效率,给旅客带来良好的出行体验,加大信息共享,建立联运数字化平台,减少成本投入,更大程度地实现干支联运的互利共赢;将干支线航空公司的利益紧密联系起来,政府应该加大对干线航空公司和支线航空公司联运的政策支

持,对于积极合作的一方适当地给予补贴,同时建立合适的处罚机制,对于中途违约和不合作方提高处罚罚金,从而促进干支联运的发展。

参考文献

- [1] FORBES S J, LEDERMAN M. The role of regional airlines in the US airline industry[J]. *Advances in Airline Economics*, 2007, 2: 193-208.
- [2] GILLEN D, HASHEMINIA H, JIANG C. Strategic considerations behind the network-regional airline tie ups: a theoretical and empirical study[J]. *Transportation Research Part B*, 2015, 72: 93-111.
- [3] 景崇毅, 刘存, 陈浩. 航空公司干支结合的模式选择研究[J]. *舰船电子工程*, 2023, 43(3): 92-95.
- [4] OUM T H, ZHANG A. Key aspects of global strategic alliances and the impacts on the future of Canadian airline industry [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2001, 7(5): 287-301.
- [5] BRUECKNER J K. International airfares in the age of alliances: the effects of code sharing and antitrust immunity [J]. *Review of Economics and Statistics*, 2003, 85(1): 105-118.
- [6] BRUECKNER J K, WHALEN W T. The price effects of international airline alliances[J]. *The Journal of Law and Economics*, 2000, 43(2): 503-546.
- [7] 王海龙, 蔡涛, 钟山文, 等. 基于干支协作的航线网络研究[J]. *民航管理*, 2020(2): 26-30.
- [8] 王琨, 朱金福, 朱星辉. 基于博弈分析的支线航空合作动因[J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(3): 557-561.
- [9] 徐慧. 基于博弈论的航空运输干支线合作运营问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [10] 罗彤. 干支结合的网络化运营方式是发展支线航空的必由之路[J]. *民航管理*, 2020(8): 19-22.
- [11] 汤劲, 张洁. 基于干支联运的中国支线运营模式研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2018(3): 6-9.
- [12] 岳鹏飞. 我国支线航空发展政策刍议[J]. *人民论坛*, 2010(35): 110-111.
- [13] VINCENT T L, BROWN J S. *Evolutionary game theory, natural selection, and Darwinian dynamics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [14] 蒋士林. 基于演化博弈的多机场系统空铁联运定价优化策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [15] 卫亮. 基于博弈论的空铁一体化合作策略及收益分配研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [16] FRIEDMAN D. *Evolutionary games in economics*[J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1991, 59: 637-666.

Research on Joint Operation Strategy of Civil Aviation Major and Regional Combination Based on Evolutionary Game

JING Chongyi, YANG Yaru, DU Wenfeng

(Economic and Management College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: In order to realize the construction of China's "major and regional communication are fully connected" air transport service network, promote the coordinated development of China's major and regional airlines, and create convenient conditions for people's travel, the evolutionary game model between major airlines and regional airlines is constructed based on the evolutionary game theory. The stability conditions and stability of major airlines, regional airlines and major and branch intermodal transport systems are discussed, and the strategic choices of both sides of the game in the evolution process are studied. The results show that the choice of the cooperative strategy of the system is related to the position of the saddle point, the closer the position of the saddle point is, the greater the probability that both parties choose not to cooperate. When the closer the position of the saddle point is to the non-cooperative strategy, the greater the probability that both parties choose to cooperate.

Keywords: major airlines; regional airlines; evolutionary game