

文章编号: 1005-0523(2020)03-0066-08

## 区域多机场系统辐射域竞争均衡模型研究

胡夏婷, 曾小舟, 潘怡凡

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 辐射域竞争与协同态势, 体现了多机场系统内各机场的竞争力。本文基于 Lotka-Volterra 模型对区域多机场系统内的交叉腹地进行竞争均衡研究, 以机场综合实力为影响因子, 选择各机场在交叉腹地的市场份额为因变量, 求解两机场间的竞争稳定状态及满足条件。以长三角机场群内南京禄口机场、杭州萧山机场的腹地交叉区域为例, 对其进行数值仿真。结果表明, 当两机场间的综合实力比值均大于腹地交叉区域旅客对相应机场的需求量时, 两机场将实现各自在辐射域交叉部分的竞争均衡。这为机场提升自身在区域多机场系统内的竞争力提供了一种理论分析方法。

**关键词:** 区域多机场系统; 交叉腹地; 竞争均衡; Lotka-Volterra 模型

**中图分类号:** U116; F562

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.03.009

随着经济及社会的发展, 我国民航运输体系已初具规模, 民用运输机场数量也随之增加。截止 2018 年底, 我国共有民航运输机场 235 个<sup>[1]</sup>。经济发达的长三角、珠三角地区, 其机场密度已达到每万平方公里 1.09, 2.37 个。而世界典型机场群的机场密度, 如纽约机场群、伦敦机场群, 仅为 0.43 及 1.11 个。因此, 机场群协同运行已成为我国区域机场运行面临的新问题, 对我国机场群进行辐射域竞争均衡研究具有重要意义。

随着机场密度的持续增加, 区域多机场系统也随之出现。区域多机场系统指区域内地理位置相邻的机场之间, 为实现区域资源的有效分配及协调管理, 形成具有一定竞争和协同关系的机场群。

机场腹地(hinterland)是为机场提供客流和货流的内陆地区, 又称为机场的吸引范围、吸引地, 其内涵是机场吸收和辐射能力能够达到并能促进其经济发展的地域范围<sup>[2]</sup>。本文所指的机场腹地是从空间角度出发, 基于机场综合实力的地理辐射和经济辐射范围。

目前, 对区域多机场系统的研究主要以机场间的竞争与协作为背景, 以提升系统运作效率为目标, 分析机场的功能划分及发展现状等<sup>[3-6]</sup>。机场腹地的研究则以测算辐射范围为主: 一类从城市空间相互作用角度出发, 使用传统理论模型<sup>[7]</sup>、引力模型及其衍生模型<sup>[8]</sup>进行测算, 也有学者基于空间分割原理, 使用城市断裂点模型<sup>[9]</sup>或加权 Voronoi 图<sup>[10]</sup>, 对机场辐射范围进行研究; 另一类则从旅客选择角度出发, 使用非集计模型<sup>[11]</sup>等确定机场市场份额, 得到辐射范围。

上述研究均取得了一定成果。但目前, 针对机场辐射域交叉部分的竞争均衡研究还较少, 而机场间腹地交叉区域的竞争和协同才是机场竞争的重点。因此, 本文以 Lotka-Volterra 模型为基础, 对区域多机场系统内的交叉腹地进行竞争均衡研究。引入机场综合实力为影响因子, 从空间角度出发确定各机场的腹地范围; 以腹地交叉区域的市场份额变化趋于稳定为均衡, 构建竞争均衡模型, 进而求解两机场间的竞争稳定状态

**收稿日期:** 2019-11-22

**作者简介:** 胡夏婷(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为民航运输经济

**通讯作者:** 曾小舟(1965—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为民航运输规划与管理。

及满足条件。最后,以长三角机场群为例,对南京禄口机场、杭州萧山机场的辐射域交叉部分进行仿真,分析其竞争情况和可能的均衡结果,为机场提升在区域多机场系统内的竞争力明确方向。

## 1 竞争均衡模型构建

### 1.1 模型建立

20世纪40年代,美国生态学家 Lotka 和意大利数学家 Volterra 分别提出了生物数学经典模型,即 Lotka-Volterra 模型。该模型通常被用于描述生态系统中两种群间的种群规模演变过程,涉及的种群关系包括种间竞争、捕食与被捕食、寄生与共存。Lotka-Volterra 模型的一般形式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 y) \\ \frac{dy}{dt} &= y(\alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2 x) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $x, y$  分别为两种群的种群密度; $t$  为种群竞争时间; $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}$  分别为两种群密度在时间  $t$  内的变化率; $\beta_1, \beta_2$  为两种群内的密度作用系数; $\gamma_1, \gamma_2$  为两种群间的密度作用系数; $\alpha_1, \alpha_2$  分别为两种群的内增长率; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i (i=1, 2)$  均为常数,其中  $i$  为种群类别数。

该模型由于其一般性被广泛运用,但同时,由于种群间的关系较多,包括种间竞争、捕食与被捕食、寄生与共存等,许多学者也随之对 Lotka-Volterra 模型进行了改进。

对于区域多机场系统而言,机场之间普遍存在腹地交叉区域,该区域内的旅客拥有机场的自主选择权。对旅客来说,可选择的机场之间是存在竞争关系的。同时,旅客是否选择某一机场与该机场的陆侧交通、航班数量、票价等密切相关,有学者将这一系列影响因素整合为机场综合实力<sup>[8]</sup>。因此,为了定量描述机场的竞争情况和可能的均衡结果,本文基于机场综合实力这一影响因子,运用 Lotka-Volterra 竞争模型进行分析。具体模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \rho_1 x \left( 1 - \frac{x}{d_1} - \gamma_{12} y \right) \\ \frac{dy}{dt} &= \rho_2 y \left( 1 - \frac{y}{d_2} - \gamma_{21} x \right) \\ \gamma_{12} &= \frac{P_1}{P_2}, \gamma_{21} = \frac{P_2}{P_1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $x, y$  为区域多机场系统内,机场 1、机场 2 在腹地交叉部分的市场份额; $t$  为竞争系统的时间; $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}$  表示在系统时间  $t$  内,两机场市场份额的变化率; $\rho_1, \rho_2$  为两机场市场份额的变化率; $d_1, d_2$  为腹地交叉区域内的旅客对两机场的最大需求; $\gamma_{12}$  为机场 1 对机场 2 的竞争系数、 $\gamma_{21}$  为机场 2 对机场 1 的竞争系数,由两机场的综合实力决定; $P_1, P_2$  为两机场的综合实力,考虑机场的内部运营与外部环境,通过机场客货运吞吐量、飞机起降架次、航站楼面积、机场机位数目、机场航线数量、运营航空公司数目、通航城市数目、机场依托城市路网密度、地面交通平均旅行速度共 10 个指标<sup>[8]</sup>确定。由于各参数均有实际意义,因此均为正值。

### 1.2 竞争均衡模型求解

根据式(2),本文对该模型求解其平衡点,使用雅可比矩阵对平衡点进行稳定性分析,最终得到具有稳定性的平衡点及其所需条件,并对竞争情况和可能的均衡结果进行分析。在求得的具有稳定性的平衡点时,两机场市场份额的变化率趋于稳定,同时市场份额达到均衡,该种状态即为两机场间的竞争稳定状态,也是本文所需的最终结果。

令系统时间  $t \rightarrow +\infty$ , 通过微分方程组(2)得到代数方程组(3):

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 x \left(1 - \frac{x}{d_1} - \gamma_{12} y\right) &= 0 \\ \rho_2 y \left(1 - \frac{y}{d_2} - \gamma_{21} x\right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

求解式(3)得到平衡点  $K(x_0, y_0)$ 。在点  $K$  处,即两机场最终市场份额分别为  $x_0, y_0$  时,其市场份额的变化率均为 0 且达到平衡状态。通过求解得到下列 4 个平衡点:

$$K_1(0, 0), K_2(d_1, 0), K_3(0, d_2), K_4\left(\frac{d_1(1-\gamma_{12}d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}, \frac{d_2(1-\gamma_{21}d_1)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}\right)$$

其中:  $K_1(0, 0)$  表示两机场最终的市场份额均为 0;  $K_2(d_1, 0)$  表示机场 1 最终的市场份额为  $d_1$ , 机场 2 为 0;  $K_3(0, d_2)$  表示机场 1 最终的市场份额为 0, 机场 2 为  $d_2$ ;  $K_4\left(\frac{d_1(1-\gamma_{12}d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}, \frac{d_2(1-\gamma_{21}d_1)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}\right)$  表示机场 1 最终的市场份额为  $\frac{d_1(1-\gamma_{12}d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}$ , 机场 2 最终的市场份额为  $\frac{d_2(1-\gamma_{21}d_1)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}$ 。

同时,对式(3)在平衡点  $K(x_0, y_0)$  展开泰勒级数,省略二次及二次以上展开项,得到式(4):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \rho_1 \left(1 - \frac{2x}{d_1} - \gamma_{12} y\right) (x - x_0) - \rho_1 \gamma_{12} x (y - y_0) \\ \frac{dy}{dt} &= \rho_2 \left(1 - \frac{2y}{d_2} - \gamma_{21} x\right) (y - y_0) - \rho_2 \gamma_{21} y (x - x_0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其对应的平衡点的雅可比矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 \left(1 - \frac{2x}{d_1} - \gamma_{12} y\right) & -\rho_1 \gamma_{12} x \\ -\rho_2 \gamma_{21} y & \rho_2 \left(1 - \frac{2y}{d_2} - \gamma_{21} x\right) \end{bmatrix}$$

平衡点的稳定条件为:  $p > 0, q > 0$ 。其中  $p = -f_x - g_y, q = \det A$ 。据此判断平衡点  $K_1, K_2, K_3, K_4$  的稳定性。

1) 对点  $K_1(0, 0)$ , 有  $A = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ 0 & \rho_2 \end{bmatrix}$ ,  $p = -\rho_1 - \rho_2 < 0$ , 故点  $K_1$  不稳定。

2) 对点  $K_2(d_1, 0)$ , 有  $A = \begin{bmatrix} -\rho_1 & -\rho_1 \gamma_{12} d_1 \\ 0 & \rho_2 (1 - \gamma_{21} d_1) \end{bmatrix}$ ,  $p = \rho_1 - \rho_2 (1 - \gamma_{21} d_1), q = -\rho_1 \rho_2 (1 - \gamma_{12} d_2)$ , 故当  $1 - \gamma_{21} d_1 < 0$  时, 点  $K_2$  具有稳定性。

3) 对点  $K_3(0, d_2)$ , 有  $A = \begin{bmatrix} \rho_1 (1 - \gamma_{12} d_2) & 0 \\ -\rho_2 \gamma_{21} d_2 & -\rho_2 \end{bmatrix}$ ,  $p = -\rho_1 (1 - \gamma_{12} d_2) + \rho_2, q = -\rho_1 \rho_2 (1 - \gamma_{12} d_2)$ , 故当  $1 - \gamma_{12} d_2 < 0$  时, 点  $K_3$  具有稳定性。

4) 对点  $K_4\left(\frac{d_1(1-\gamma_{12}d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}, \frac{d_2(1-\gamma_{21}d_1)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}\right)$ , 有  $A = \begin{bmatrix} -\frac{\rho_1(1-\gamma_{12}d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}} & -\rho_1\gamma_{12}d_1\frac{1-\gamma_{12}d_2}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}} \\ -\rho_2\gamma_{21}d_2\frac{1-\gamma_{12}d_2}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}} & -\frac{\rho_2(1-\gamma_{21}d_1)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}} \end{bmatrix}$ ,  $p = \frac{\rho_1(1-\gamma_{12}d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}} +$

$\frac{\rho_2(1-\gamma_{21}d_1)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}, q = \frac{\rho_1\rho_2(1-\gamma_{12}d_2)(1-\gamma_{21}d_1)(1-\gamma_{12}\gamma_{21}d_1d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}^2}$ , 故当  $1 - \gamma_{12}d_2 > 0$  且  $1 - \gamma_{21}d_1 > 0$  时, 点  $K_4$  具有稳定性。

### 1.3 平衡点分析

对求得的具有稳定性的平衡点做进一步分析:

1) 当腹地交叉区域内的旅客对机场 1 的需求量  $d_1$  大于机场 1 对机场 2 的竞争系数  $\gamma_{12}$ , 即  $1 - \gamma_{21}d_1 < 0$  时, 点  $K_2(d_1, 0)$  具有稳定性。考虑旅客对机场 2 的需求量  $d_2$  及机场 2 对机场 1 的竞争系数  $\gamma_{21}$  的大小关系, 即考虑  $1 - \gamma_{12}d_2 < 0$  或  $1 - \gamma_{12}d_2 > 0$  的情况。

a. 当  $1 - \gamma_{21}d_1 < 0$  且  $1 - \gamma_{12}d_2 < 0$  时, 即  $d_1 > \frac{1}{\gamma_{21}}$  且  $d_2 > \frac{1}{\gamma_{12}}$ 。根据式(3)画出机场 1 及机场 2 的竞争状态图, 如图 1 所示, 其中实线为机场 1, 虚线为机场 2。

从坐标轴原点  $o$  出发,机场 1 及机场 2 市场份额的变化率均大于 0,故两机场的市场份额持续增加。增加到两线交点时,两机场的市场份额达到均衡状态,虽然该交点处为两机场的平衡点,但这种状态很不稳定。在交点两侧由实线、虚线和坐标轴构成的三角形区域内,机场 2 市场份额的变化率仍大于 0,因此该机场的市场份额会持续增长,而机场 1 市场份额的变化率小于 0,因此其市场份额会逐渐减少。经过时间  $t$  后,两机场的市场份额均停止增长,机场 2 在竞争中获得最大市场份额,机场 1 被淘汰。

b.当  $1-\gamma_{21}d_1 < 0$  且  $1-\gamma_{12}d_2 > 0$  时,即  $d_1 > \frac{1}{\gamma_{21}}$  且  $d_2 < \frac{1}{\gamma_{12}}$ 。两机场的竞争状态图如图 2 所示。

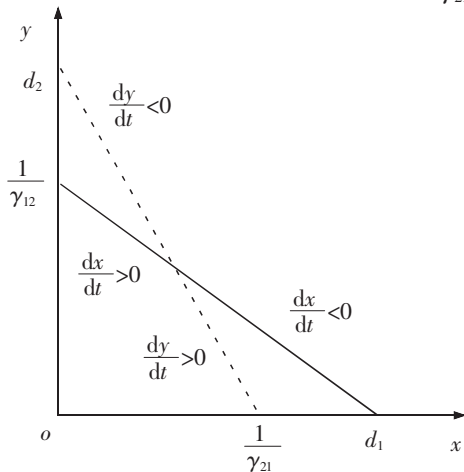


图 1 条件 1)a 时两机场竞争状态图

Fig.1 The competition state diagram of two airports at Condition 1)a

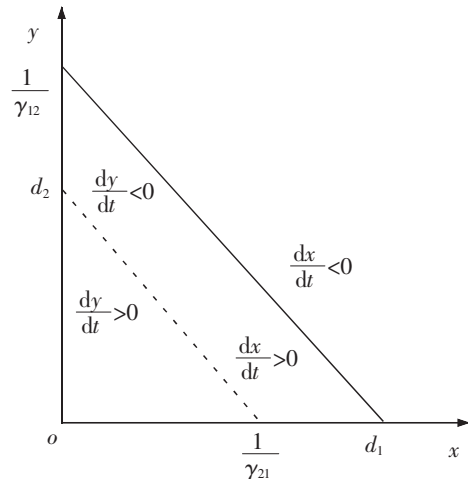


图 2 条件 1)b 时两机场竞争状态图

Fig.2 The competition state diagram of two airports at Condition 1)b

从坐标轴原点  $o$  出发,机场 1 及机场 2 市场份额的变化率均大于 0,故两机场的市场份额持续增加。在实线、虚线和坐标轴构成的梯形区域内,机场 2 市场份额的变化率开始小于 0,因此其市场份额会逐渐降低,而机场 1 市场份额的变化率仍大于 0,故市场份额会持续增长。经过时间  $t$  后,两机场的市场份额均停止增长,机场 1 在竞争中获得最大市场份额,机场 2 被淘汰。

2) 当腹地交叉区域内的旅客对机场 2 的需求量  $d_2$  大于机场 2 对机场 1 的竞争系数  $\gamma_{21}$  时,即  $1-\gamma_{12}d_2 < 0$ ,点  $K_3(0, d_2)$  具有稳定性。考虑旅客对机场 1 的需求量  $d_1$  及机场 1 对机场 2 的竞争系数  $\gamma_{12}$  的大小关系,即考虑  $1-\gamma_{21}d_1 < 0$  及  $1-\gamma_{21}d_1 > 0$  的情况。

a.当  $1-\gamma_{12}d_2 < 0$  且  $1-\gamma_{21}d_1 < 0$  时,即  $d_2 > \frac{1}{\gamma_{12}}$  且  $d_1 > \frac{1}{\gamma_{21}}$ 。两机场的竞争状态图及最终结果如图 1。

b.当  $1-\gamma_{12}d_2 < 0$  且  $1-\gamma_{21}d_1 > 0$  时,即  $d_2 > \frac{1}{\gamma_{12}}$  且  $d_1 < \frac{1}{\gamma_{21}}$ 。两机场的竞争趋势如图 2 所示,但最终结果为,机场 2 在竞争中获得最大市场份额,机场 1 被淘汰。

3) 当腹地交叉区域内的旅客对机场 2 的需求量  $d_2$  小于机场 2 对机场 1 的竞争系数  $\gamma_{21}$ ,且旅客对机场 1 的需求量  $d_1$  小于机场 1 对机场 2 的竞争系数  $\gamma_{12}$ ,即  $1-\gamma_{12}d_2 > 0$  且  $1-\gamma_{21}d_1 > 0$  时,点  $K_4(\frac{d_1(1-\gamma_{12}d_2)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}}, \frac{d_2(1-\gamma_{21}d_1)}{1-d_1d_2\gamma_{12}\gamma_{21}})$  具有稳定性。两机场的竞争状态图,如图 3 所示。

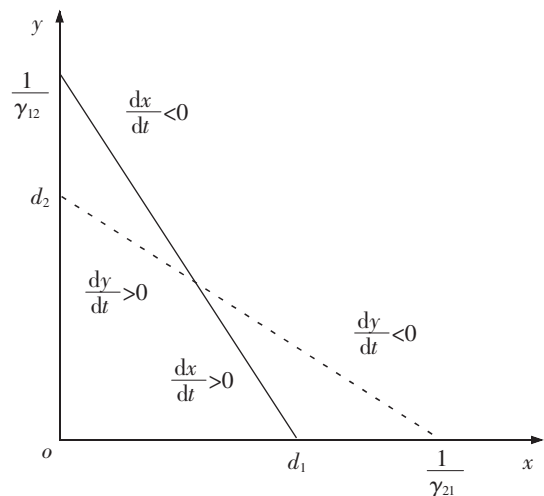


图 3 条件 3)时两机场竞争状态图

Fig.3 The competition state diagram of two airports at Condition 3)

从坐标轴原点  $o$  出发,机场 1 及机场 2 市场份额的变化率均大于 0,故两机场的市场份额持续增加。增加到两线交点时,两机场的市场份额达到均衡状态,且这种状态稳定。在交点两侧由实线、虚线和坐标轴构成的三角形区域内,机场 1 市场份额的变化率仍大于 0,因此该机场的市场份额会持续增长,而机场 2 市场份额的变化率小于 0,因此其市场份额会逐渐减少。经过时间  $t$  后,两机场最终达到  $\frac{1}{\gamma_{12}}$  或  $\frac{1}{\gamma_{21}}$ 。当达到  $\frac{1}{\gamma_{12}}$  时,由于机场 1 市场份额的变化率为 0,机场 2 的变化率小于 0,因此两机场的状态不会稳定在该区域内,最终将返回至两线交点处;当达到  $\frac{1}{\gamma_{21}}$  时,情况相同。因此在条件  $d_2 < \frac{1}{\gamma_{12}}$  且  $d_1 < \frac{1}{\gamma_{21}}$  下,两机场的市场份额实现均衡,均不会被淘汰。

## 2 长三角机场群腹地范围测算

本文选取长三角城市群内的主要机场作为样本对象。由于上海浦东机场在长三角航空运输市场中承担大部分的国际航班,而长三角内其他机场则以国内航班为主。因此,对上海市本文仅选取上海虹桥机场作为研究对象。最终选取的 14 个机场样本如表 1 所示。

由于需要通过机场辐射能力确定机场之间的腹地交叉区域,本文选择运用较为广泛的威尔逊模型,基于陈雨亭等<sup>[8]</sup>得到的综合因子得分并采用线性回归分析,将综合因子得分大于 0 的机场认为是辐射能力较强的机场,得到具体的机场名称及其综合实力,如表 2 所示。

在本文中,区域内的机场数  $N$  为 14,具有较强辐射能力的机场数  $n_{max}$  为 5,区域面积  $D$  为 10 158.82 km<sup>2</sup>,根据衰减因子的计算公式<sup>[12]</sup>  $\beta = \sqrt{\frac{2N}{n_{max}D}}$ ,得衰减因子  $\beta$  为 0.023 478 6。同时,第  $i$  个机场的综合实力为  $P_i$ ,假定阈值  $\theta$  为 0.01,即当机场辐射强度衰减到 0.01 以下时,机场失去对周边区域的辐射能力,代入公式  $R = \frac{1}{\beta} \ln \frac{P_i}{\theta}$ ,得到各机场的辐射半径。

最终,各辐射能力较强的机场名称及其辐射半径如表 3 所示。根据辐射半径画出各机场的腹地范围,如图 4 所示。

表 1 长三角地区 14 个主要机场

Tab.1 14 major airports in the Yangtze river delta region

城市名称	机场名称
上海	上海虹桥机场
江苏	南京禄口机场
	苏南硕放机场
	常州奔牛机场
	南通兴东机场
	扬州泰州机场
浙江	盐城南洋机场
	杭州萧山机场
	宁波栎社机场
	台州路桥机场
安徽	舟山普陀山机场
	合肥新桥机场
	安庆天柱山机场
	池州九华山机场

表 2 辐射能力较强机场及其综合实力  
Tab.2 Strong radiation capacity airport and its comprehensive strength

机场名称	综合实力
上海虹桥机场	1.355 25
南京禄口机场	1.301 97
杭州萧山机场	1.614 75
宁波栎社机场	0.214 21
合肥新桥机场	0.627 77

表 3 各机场辐射半径  
Tab.3 Radiation radius of each airport

机场名称	辐射半径/km
上海虹桥机场	209.091
南京禄口机场	207.382
杭州萧山机场	216.553
宁波栎社机场	130.518
合肥新桥机场	176.313



通过对比 5 个机场的辐射范围,可以发现任意两机场之间均存在腹地交叉现象,甚至还存在三机场、四机场的腹地交叉区域,机场之间已经构成了一个具有相互覆盖区域的网络。因此,腹地交叉区域应是机场竞争和协同的重点。

根据上文计算所得的各机场辐射半径,本文选取南京禄口机场及杭州萧山机场,以两机场间的腹地交叉区域为对象,研究其竞争情况和可能的均衡结果。两机场的辐射半径分别为 207.382,216.553 km,腹地范围如图 5 所示,腹地交叉区域包括常州市、无锡市、苏州市、湖州市、宣城市全境及南京、杭州等市的部分区域。



图 4 各机场腹地范围图  
Fig.4 Hinterland map of each airport



图 5 南京禄口机场、杭州萧山机场腹地范围图  
Fig.5 Hinterland area of Nanjing Lukou Airport and Hangzhou Xiaoshan Airport

### 3 交叉腹地竞争均衡仿真

为了更直观地了解两机场间的竞争稳定状态及所需条件,分析参数在不同取值情况下对机场最终竞争均衡结果的影响,针对选取的南京禄口机场和杭州萧山机场,使用 MATLAB 对两机场的竞争稳定状态进行仿真。

由于无法确定腹地交叉区域内两机场目前的市场份额,本文假设两机场的初始市场份额均为 50%,市场份额的变化率根据 2018 年两机场旅客、货邮吞吐量的增速确定<sup>[3]</sup>,对数据进行无量纲化处理,得到两机场市场份额的变化率  $\rho_1, \rho_2$  为 4.15,8.1。按照第一节各平衡点的参数条件进行数值仿真,最终得到下列 3 种情况。

1) 根据前文计算所得的机场综合实力,得到两机场的竞争系数  $\gamma_{12}, \gamma_{21}$  为 0.81,1.24。设最大需求量  $d_1, d_2$  均为 100。据此,两机场市场份额随时间的变化情况如图 6 所示。

上述参数满足条件  $1-\gamma_{21}d_1 < 0$  且  $1-\gamma_{12}d_2 > 0$ , 即腹地交叉区域内的旅客对机场 1 的需求量  $d_1$  大于机场 1 对机场 2 的竞争系数  $\gamma_{12}$ ,且旅客对机场 2 的需求量  $d_2$  小于机场 2 对机场 1 的竞争系数  $\gamma_{21}$ 。

最终结果对应图 2 的分析。在  $t=0$  时,两机场拥有同样的市场份额。但在该交点后,随着时间  $t$  的推移,南京禄口机场的市场份额逐渐增加,杭州萧山机场的市场份额逐渐减少。最终,禄口机场获得全部市场份额,而萧山机场被淘汰。

2) 不改变两机场的机场综合实力,即竞争系数  $\gamma_{12}, \gamma_{21}$ 。将最大需求量  $d_1, d_2$  设为 100,200。据此,两机场市场份额随时间的变化情况图 7 所示。

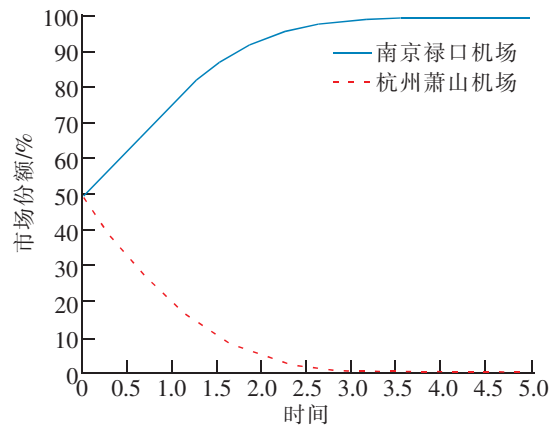


图 6 两机场仿真结果 1

Fig.6 Simulation result 1 of two airports

上述参数满足条件  $1-\gamma_{21}d_1 < 0$  且  $1-\gamma_{12}d_2 < 0$ , 即腹地交叉区域内的旅客对机场 1 的需求量  $d_1$  大于机场 1 对机场 2 的竞争系数  $\gamma_{12}$ , 且旅客对机场 2 的需求量  $d_2$  大于机场 2 对机场 1 的竞争系数  $\gamma_{21}$ 。

最终结果对应图 1 的分析。随着时间的推移, 南京禄口机场的市场份额逐渐增加, 杭州萧山机场的市场份额在经历小段时间的增长之后开始逐渐减少。最终, 仍是禄口机场获得全部市场份额, 而萧山机场被淘汰。

3) 设两机场的竞争系数  $\gamma_{12}, \gamma_{21}$  均为 1, 最大需求量  $d_1, d_2$  均为 50。得到两机场市场份额随时间的变化情况如图 8 所示。

上述参数满足条件  $1-\gamma_{12}d_2 > 0$  且  $1-\gamma_{21}d_1 > 0$ , 即腹地交叉区域内的旅客对机场 2 的需求量  $d_2$  小于机场 2 对机场 1 的竞争系数  $\gamma_{21}$ , 且旅客对机场 1 的需求量  $d_1$  小于机场 1 对机场 2 的竞争系数  $\gamma_{12}$ 。

最终结果对应图 3 的分析。在  $t=0$  时, 杭州萧山机场与南京禄口机场有着同样的市场份额, 随着时间的推移, 两机场的市场份额也随之变化, 最终两机场均拥有一定的市场份额且达到均衡状态。在该条件下, 任何一个机场都不会被淘汰, 两机场在竞争中实现了共存。

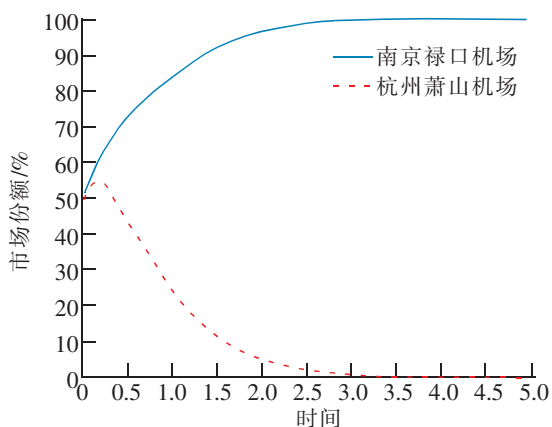


图 7 两机场仿真结果 2

Fig.7 Simulation result 2 of two airports

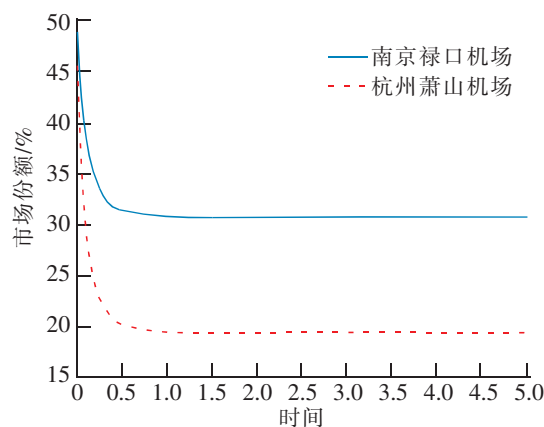


图 8 两机场仿真结果 3

Fig.8 Simulation result 3 of two airports

#### 4 结论

对辐射域交叉部分进行竞争均衡研究, 可进一步确定影响竞争力的各类因素, 进而为机场提升自身在区域多机场系统内的竞争力提供理论依据。本文基于 Lotka-Volterra 模型, 考虑机场综合实力对竞争的影响, 求解区域多机场系统内两机场在腹地交叉区域的竞争均衡状态及满足条件, 确定机场市场份额的变化趋势, 最后对该模型进行数值仿真。

结果表明, 本文建立的竞争均衡模型能较好地描述机场在辐射域交叉部分的竞争与协同态势。机场间的竞争均衡结果随机场综合实力、腹地交叉区域旅客对机场的需求量而相应改变。当旅客对两机场的需求量均小于本机场与另一机场综合实力的比值时, 两机场将在腹地交叉区域内均占有一定的市场份额, 实现了最终的竞争均衡。

同时, 由于机场综合实力包含客货运吞吐量、飞机起降架次、航站楼面积等 10 个指标, 每一指标对机场综合实力、对辐射域交叉部分竞争均衡结果的影响及其数值关系则需要进一步研究分析。

#### 参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 2018 年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2019-11-22]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201905/t20190508\\_196035.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201905/t20190508_196035.html).
- [2] LEE H, YANG H M. Strategies for a global logistics and economic hub: Incheon International Airport[J]. Journal of Air Transport Management, 2003, 9(2):113-121.

- [3] BONNEFOY P A, NEUFVILLE R D, HANSMAN R J. Evolution and development of multi-airport systems: a worldwide perspective[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(11): 1021–1029.
- [4] DERUDDER B, DEVRIENDT L, WITLOX F. A spatial analysis of multiple airport cities[J]. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(3): 345–353.
- [5] 屈云茜. 我国多机场系统的内涵、分类与特性[J]. *厦门理工学院学报*, 2014, 22(4): 51–56.
- [6] 王璐, 张小宁, 何俊凯, 等. 多机场系统内外部航线网络构建的优化问题[J]. *航空计算技术*, 2017, 47(4): 22–25.
- [7] 潘竟虎, 从忆波. 中国民用机场可达性与服务范围测度[J]. *经济地理*, 2015, 35(2): 46–53.
- [8] 陈雨亭, 曾小舟, 王进贤. 基于改进 Wilson 模型的机场辐射范围研究[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(5): 56–64.
- [9] 陈思宇. 成都双流机场发展潜力分析[D]. 成都: 西南财经大学, 2013.
- [10] 冯社苗. 基于加权 Voronoi 图的民航机场空间服务范围研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(5): 140–144.
- [11] ROGIER LIESHOUT. Measuring the size of an airport's catchment area[J]. *Journal of Transport Geography*, 2012, 25: 27–34.
- [12] 王铮, 邓悦, 葛昭攀, 等. 理论经济地理学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [13] 中国民用航空局. 2018 年民航机场生产统计公报[EB/OL]. [2019–11–22]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201903/t20190305\\_194972.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201903/t20190305_194972.html).

## Analysis of Radiation Domain Competition Equilibrium Model for Regional Multi-Airport System

Hu Xiating, Zeng Xiaozhou, Pan Yifan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The competition and cooperation of radiation domain reflects the competitiveness of the airports in the multi-airport system. Based on Lotka–Volterra model, this paper studies the competition equilibrium of the cross hinterland for the regional multi-airport system. Taking the comprehensive strength of airports as the influencing factor, the market share of each airport in the cross hinterland is selected as the dependent variable to solve the competitive stable state and the required conditions between the two airports. Taking the cross hinterland of Nanjing Lukou Airport and Hangzhou Xiaoshan Airport in the Yangtze river delta airport group as an example, the numerical simulation is carried out. The results show that when the comprehensive strength ratio of the two airports is greater than the demand of the corresponding airport in the hinterland cross region, the two airports achieve the competition equilibrium in the cross region of the radiation domain. This provides a theoretical analysis method for an airport to improve its competitiveness in a regional multi-airport system.

**Key words:** regional multi-airport system; cross hinterland; competition equilibrium; Lotka–Volterra model