

# 基于伯特兰德模型的航空企业与高铁的博弈分析

林贵华<sup>1</sup>, 裴红波<sup>1</sup>, 邹远洋<sup>1,2</sup>

(1. 上海大学管理学院, 上海 200444;

2. 湖北经济学院工商管理学院, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 基于差异化产品的伯特兰德模型, 建立了航空企业之间以及航空企业与高速铁路之间在特定运输网络中的竞争与合作模型, 以探究客运企业对不同竞争与合作情形的偏好以及对社会福利的影响. 在模型中, 航空企业以盈利最大化为目标, 而高速铁路则以盈利与社会福利最大化为目标. 研究表明, 当高速铁路考虑较少或中等水平的社会福利时, 最可能出现的是航空企业之间合作组成互补的航线联营; 而当高速铁路考虑较多的社会福利时, 在合作企业利润可再分配的条件下, 最可能出现的是航空企业与高速铁路组成半互补的空铁联运. 社会福利的最大化与各企业利润的最大化所导致的偏好并不一致, 这表明企业的自身利益与社会福利之间存在冲突.

**关键词:** 伯特兰德模型; 博弈; 航线联营; 空铁联运

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-5781(2020)03-0325-15

**doi:** 10.13383/j.cnki.jse.2020.03.004

## Analysis on games between airlines and high-speed rail based on Bertrand model

Lin Guihua<sup>1</sup>, Pei Hongbo<sup>1</sup>, Zou Yuanyang<sup>1,2</sup>

(1. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Business Administration, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Based on the differentiated Bertrand model, this paper establishes some competition and cooperation models for airlines and high-speed rail in the transportation network so as to reveal the preferences of passenger transport enterprises for different competition and cooperation situations and their impact on social welfare. In the models, the airlines aim at maximizing their profits and the high-speed rail aims at maximizing its profit and social welfare. The result shows that, when high-speed rail takes less or middle level social welfare, it is most likely to form a complementary route cooperation among airlines and, when high-speed rail takes more social welfare into account, it is most likely to form a semi-complementary air-rail transport under the condition of redistribution of the profits of the cooperative enterprises. The preferences maximizing the social welfare and those maximizing the profit for each enterprise are not consistent. This indicates that there is a conflict between the benefit of each enterprise and social welfare.

**Key words:** Bertrand model; game theory; airline alliance; air-rail transport

## 1 引言

随着航空业的发展, 国家逐渐放松了民航业的管制, 并制定了民航公平竞争的法規和政策. 自 2004 年

收稿日期: 2017-04-23; 修订日期: 2018-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11671250; 11431004); 教育部人文社会科学研究一般资助项目(15YJA630034).

出台《民航国内航空运输价格改革方案》后,国内航线逐渐开放,机票价格由政府管理向市场调节转变.2005年国家颁布了《国内投资民用航空业规定》,放宽了国内航空投资准入政策,并鼓励地方政府、企业、各种经济组织和公民投资民航业,促进了民航业发展,同时也加剧了民航业竞争.与此同时,高速铁路近年来得到快速发展,截至2015年底,我国高速铁路营业里程达到19 838 km,约占世界高速铁路总里程的65%,当年客运总量达到96 139万人,使航空企业面临前所未有的激烈竞争形势.在航空企业间以及航空企业与高铁间的双重竞争压力下,部分航空企业为降低运输成本,优化航线网络结构,提高国内国际竞争力,纷纷组成航空联盟、航线联营和空铁联运等.在此背景下,在特定运输网络中客运企业之间的竞争与合作关系如何影响各自利润?高速铁路承担不同比重社会福利又会对竞争与合作关系产生何种影响?不同竞争与合作关系的总社会福利又有什么变化?这些都是亟待解决的问题.本文将利用寡头博弈理论,探究特定运输网络下航空企业与高速铁路之间的竞争与合作关系.

截至目前,相关研究主要基于非合作寡头博弈理论,大致分为两大类:一类是研究航空企业之间的竞争与合作<sup>[1-8]</sup>,另一类是研究航空企业与高速铁路之间的竞争与合作<sup>[9-16]</sup>.关于航空企业之间的竞争与合作研究,Bilotkach<sup>[1]</sup>研究了在考虑运输密度经济因素时互补合作伙伴和半互补合作伙伴对社会福利的影响,研究表明在需求价格敏感时半互补合作伙伴产生更大的社会福利;在此基础上,郑士源等<sup>[2]</sup>基于伯特兰德模型并运用合作博弈理论的最大一致集和合作联盟形成的均衡过程,对在“枢纽港-支线港网络”下航空企业之间动态竞争与合作情形的稳定性、影响因素以及对社会福利的影响进行了研究,其研究表明航空企业不结成联盟时社会福利最佳;Brueckner等<sup>[3]</sup>研究了单一航线上双寡头航空企业之间的竞争问题,在假定航班间隔相同的情形下,主要考虑旅客的延时成本,与以往文献不同的是航空企业运用航班时刻表进行竞争,避免了空间复杂性,结果表明均衡的航班频率会降低运输效率;之后,纪杰等<sup>[4]</sup>使用类似的研究方法研究了枢纽航线网络中飞行频率和拥挤成本对互补性航空联盟的形成以及对不同市场中旅客利益的影响,系统分析了中枢轮辐网络机场拥挤问题,结果表明航空企业的均衡航班频率存在过度供给,得到了与文献[3]相同的结论,进一步的分析表明,互补型航空联盟能够使联盟利润增加,对连接市场的旅客有利,并且可以缓解机场拥挤.

关于航空企业与高速铁路之间的竞争与合作研究,Adler等<sup>[9]</sup>以航空企业与高速铁路均最大化各自利润为目标,运用博弈理论对中长途客运市场中航空客运与高速铁路之间的竞争问题进行了研究,结果表明,尽管跨欧洲的高铁项目固定成本高,但从长期考虑仍然是合理的;Yang等<sup>[10]</sup>将追求利润并兼顾一定比重的社会福利作为高速铁路的目标函数,研究了基于霍特林模型的航空企业与高速铁路之间竞争与合作问题,并考虑了在价格歧视情况下各自的利润和社会福利,但其只考虑了单条线路竞争的情形;在此基础上,Jiang等<sup>[11]</sup>基于古诺模型考虑了枢纽网络中机场容量受限制情形下航空企业与高速铁路企业之间的竞争与合作,研究表明,无论机场容量是否受限,空铁合作都会提高社会福利,进一步还研究了不对称模型下两类客运企业的运营成本、不同乘客类型以及经济交通密度之间的关系;Talebian等<sup>[12]</sup>运用三阶段博弈模型对航空企业与铁路交通企业之间的竞争模式进行了研究,在铁路交通企业使用不同列车技术的假设下,航空企业与铁路交通企业先后进行票价和发车频率的竞争,研究表明高速列车是与航空企业竞争最有优势的列车技术,如果铁路交通企业更多考虑社会福利时,高速铁路会降低票价以及增加发车频率,但其只研究了单条线路竞争的情形;张婧等<sup>[13]</sup>基于双层规划理论研究了枢纽网络中航空企业与高铁企业以票价最优为目标的博弈问题,同时考虑了旅客的旅行负效应,但其未考虑高铁承担社会福利以及消费者剩余的情形.

本文将运用寡头博弈理论,并基于伯特兰德价格竞争模型来建立航空企业与高速铁路之间的博弈模型.与上述研究成果相比,本文考虑的运输网络结构有所不同,既重新定义了旅客的旅行成本,也兼顾了旅客的时间成本,并在此基础上分析以盈利为目标的航空企业之间、航空企业与以盈利为目标并兼顾社会福利的高速铁路企业之间的竞争与合作的四种情形,进一步探究在合作企业之间利益可分配和不可分配这两种情况下客运企业对不同竞争与合作模式的偏好、不同竞争与合作情形下总社会福利的变化趋势等,以便为航空企业和高速铁路制定竞争策略提供参考,也便于为政府制定科学的竞争规则和政策提供理论支持.

## 2 客运企业之间竞争与合作模型

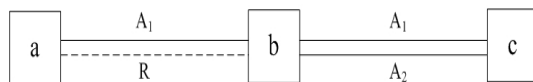


图 1 运输网络结构

Fig. 1 Transport network structure

考虑图 1 的交通网络, 其中 a 与 b 为国内城市, c 为国外城市, 而 b 为交通枢纽城市. a 与 b 之间为国内客运市场, 记为市场 1, 运输距离为  $L_1$ ; b 与 c 之间为国际客运市场, 记为市场 2, 运输距离为  $L_2$ ; a 与 c 之间为国内国际联运市场, 记为市场 3, 运输距离为  $L_3$ . 假设市场 3 中 a, c 之间没有直达航线, 需要经过城市 b 进行转乘, 且 a, b 之间和 b, c 之间客运服务分别只能由一家客运企业承运.  $A_1$  与  $A_2$  表示两家航空企业, R 表示高速铁路企业, 其中  $A_1$  经营市场 1、市场 2 和市场 3, R 只经营市场 1,  $A_2$  只经营市场 2. 现实中有很多类似的市场结构, 例如, 2016 年之前中国东方航空公司垄断了邯郸与上海之间航空客运, 但之后两地间高速铁路通车, 形成双寡头竞争. 邯郸与悉尼之间没有直达航线, 需要经上海转机, 而上海与悉尼之间的航线不仅有中国东方航空公司, 还有澳洲航空公司相互竞争, 同样属于多寡头竞争.

表 1 符号说明

Table 1 Symbols description

符号	含义
$i$	市场类型(包含 1, 2, 3 三种)
$j$	客运企业 (市场 1 与市场 2 包含 $A_1, A_2, R$ 三类; 市场 3 包含 $RA_2, RA_1, A_1A_2$ 三类)
$q_1^{A_1}, q_1^R$	航空企业 $A_1$ 与高速铁路 R 在市场 1 中的需求量
$q_2^{A_1}, q_2^{A_2}$	航空企业 $A_1$ 与 $A_2$ 在市场 2 中的需求量
$q_3^{A_1A_1}, q_3^{RA_2}, q_3^{RA_1}$	航空企业 $A_1$ 独立客运, 高速铁路 R 与航空企业 $A_2$ 组合客运, 高速铁路 R 与航空企业 $A_1$ 组合客运在市场 3 中的需求量
$P_1^{A_1}, P_1^R$	市场 1 中旅客搭乘航空企业 $A_1$ 与高速铁路 R 的广义旅行成本
$P_2^{A_1}, P_2^{A_2}$	市场 2 中旅客搭乘航空企业 $A_1$ 与 $A_2$ 的广义旅行成本
$P_3^j$	市场 3 中旅客搭乘两家客运企业组合客运的广义旅行成本
$T_1^{A_1}, T_1^R$	航空企业 $A_1$ 与高速铁路 R 在市场 1 中的旅行总时间
$T_2^{A_1}, T_2^{A_2}$	航空企业 $A_1$ 与 $A_2$ 在市场 2 中的旅行总时间
$T_3^{A_1}, T_3^{RA_2}$	航空企业 $A_1$ , 高速铁路 R 与航空企业 $A_2$ 合作在市场 3 中的旅行总时间
$T_3^{RA_1}, T_3^{A_1A_2}$	高速铁路 R 与航空企业 $A_1$ 合作, 航空企业 $A_1$ 与航空企业 $A_2$ 合作在市场 3 中的旅行总时间

本文中, 运输市场的需求函数与文献[2, 11, 12]一致. 基于图 1 的交通网络, 分别假设客运市场 1、市场 2 和市场 3 的需求函数如下(其中各种符号说明详见表 1).

市场 1 中, 航空企业  $A_1$  和高速铁路 R 的需求函数分别为

$$q_1^{A_1} = \alpha_1 - P_1^{A_1} + \gamma_1 P_1^R, \tag{1}$$

$$q_1^R = \alpha_1 - P_1^R + \gamma_1 P_1^{A_1}. \tag{2}$$

市场 2 中, 航空企业  $A_1$  和  $A_2$  的需求函数分别为

$$q_2^{A_1} = \alpha_2 - P_2^{A_1} + \gamma_2 P_2^{A_2}, \tag{3}$$

$$q_2^{A_2} = \alpha_2 - P_2^{A_2} + \gamma_2 P_2^{A_1}. \tag{4}$$

市场 3 中, 各客运企业的需求函数分别为

$$q_3^{A_1A_1} = \alpha_3 - P_3^{A_1A_1} + \gamma_3 P_3^*, \tag{5}$$

$$q_3^{RA_2} = \alpha_3 - P_3^{RA_2} + \gamma_3 P_3^{A_1A_1}, \tag{6}$$

$$q_3^{\text{RA}_1} = \alpha_3 - P_3^{\text{RA}_1} + \gamma_3 P_3^{\text{A}_1 \text{A}_1}, \quad (7)$$

$$q_3^{\text{A}_1 \text{A}_2} = \alpha_3 - P_3^{\text{A}_1 \text{A}_2} + \gamma_3 P_3^{\text{A}_1 \text{A}_1}, \quad (8)$$

其中  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  分别表示市场 1, 市场 2 和市场 3 的规模, 其值越大表示市场规模越大;  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \in (0, 1)$  分别表示市场 1, 市场 2 和市场 3 中不同客运企业之间具有替代性, 其值越大表明两客运企业之间替代性越强; 市场 3 中能够满足客运需求的企业组合分别为  $\text{RA}_2, \text{RA}_1, \text{A}_1 \text{A}_2$ .

对于一般旅客, 旅行成本不仅包括票价, 还应包含旅行时间成本. 基于此, 本文定义旅客的广义旅行成本为客运服务价格与旅行时间成本之和, 即  $P_i^j = p_i^j + vT_i^j$ , 其中  $i$  代表市场类别,  $j$  代表客运企业,  $p_i^j$  表示市场  $i$  中客运企业  $j$  的客运服务价格,  $v$  为旅客的时间价值,  $T_i^j$  表示市场  $i$  中旅客搭乘客运企业  $j$  完成客运所需的旅行总时间. 旅行总时间定义为  $T_i^j = e^j + L_i/S^j + g$ , 其中  $e^j$  代表进出机场或者火车站所需要的时间,  $S^j$  代表交通工具速度,  $g$  代表联运衔接时间.

就一般而言, 从出发地到进出机场所花费的时间要大于进出高铁车站, 飞机的运输速度要大于高速列车<sup>[10]</sup>. 因此, 参照文献[10], 假设  $e^A \geq e^R, S^A \geq S^R$ , 且在合作联运时  $g = 0$ . 对于不同市场不同客运企业, 有不同的旅行总时间, 参见表 2.

表 2 旅行总时间  
Table 2 Total travel time

市场类型	客运企业	旅行总时间
市场 1	航空企业 $\text{A}_1$	$T_1^{\text{A}_1} = e^A + L_1/S^A$
市场 1	高速铁路 $\text{R}$	$T_1^{\text{R}} = e^R + L_1/S^R$
市场 2	航空企业 $\text{A}_1$	$T_2^{\text{A}_1} = e^A + L_2/S^A$
市场 2	航空企业 $\text{A}_2$	$T_2^{\text{A}_2} = e^A + L_2/S^A$
市场 3	航空企业 $\text{A}_1$	$T_3^{\text{A}_1 \text{A}_1} = e^A + L_3/S^A$
市场 3	$\text{A}_2$ 与 $\text{R}$ 合作	$T_3^{\text{A}_2 \text{R}} = e^A + e^R + L_2/S^A + L_1/S^R$
市场 3	$\text{A}_1$ 与 $\text{R}$ 合作	$T_3^{\text{A}_1 \text{R}} = e^A + e^R + L_2/S^A + L_1/S^R$
市场 3	$\text{A}_1$ 与 $\text{A}_2$ 合作	$T_3^{\text{A}_1 \text{A}_2} = e^A + L_3/S^A$

由图 1, 客运企业之间的竞争与合作可分为四种情形.

## 2.1 情形 1: 各方相互竞争

考虑航空企业之间以及航空企业与高速铁路之间都不存在合作的情形. 客运企业在市场 1 与市场 2 的需求函数分别为式(1)和式(2)与式(3)和式(4). 市场 3 中的旅客可以选择航空企业  $\text{A}_1$  独立客运或者高速铁路  $\text{R}$  与航空企业  $\text{A}_2$  组合客运, 由式(5)和式(6)可得市场 3 的需求函数为

$$q_3^{\text{A}_1 \text{A}_1} = \alpha_3 - P_3^{\text{A}_1 \text{A}_1} + \gamma_3 (P_1^{\text{R}} + P_2^{\text{A}_2} + vg), \quad (9)$$

$$q_3^{\text{RA}_2} = \alpha_3 - (P_1^{\text{R}} + P_2^{\text{A}_2} + vg) + \gamma_3 P_3^{\text{A}_1 \text{A}_1}. \quad (10)$$

为简便起见, 假定航空客运和铁路客运的单位旅客成本不变, 且固定成本为 0, 由此可得航空企业和高速铁路的客运成本为

$$G(q_i^j) = c^j q_i^j, \quad (11)$$

其中  $c^j$  表示单位旅客成本,  $c^A$  和  $c^R$  分别表示航空企业和高速铁路的单位旅客成本.

由式(1)~式(4)和式(9)~式(11), 可得航空企业  $\text{A}_1$  与  $\text{A}_2$  的目标函数分别为

$$Z^{\text{A}_1} = \pi^{\text{A}_1} = (p_1^{\text{A}_1} - c^A)(q_1^{\text{A}_1} + q_3^{\text{A}_1 \text{A}_1}) + (p_2^{\text{A}_1} - c^A)(q_2^{\text{A}_1} + q_3^{\text{A}_1 \text{A}_1}), \quad (12)$$

$$Z^{\text{A}_2} = \pi^{\text{A}_2} = (p_2^{\text{A}_2} - c^A)(q_2^{\text{A}_2} + q_3^{\text{RA}_2}), \quad (13)$$

其中  $p_i^j$  是各客运企业的决策变量, 表示市场  $i$  中客运企业  $j$  的客运服务价格.

高速铁路由于投资量巨大, 一般由政府出资或者政府和社会资本共同投资建设, 具有很强的公益性, 不

只需要考虑高速铁路利润, 还应同时考虑社会福利. 因此, 高速铁路运营目标函数应为其利润和高速铁路系统内社会福利的加权和<sup>[10,12,17,18]</sup>. 由此可得高速铁路的目标函数为

$$Z^R = \theta\pi^R + (1 - \theta)W^R = \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{RA_2}) + (1 - \theta)W^R, \quad (14)$$

其中  $\theta \in [0, 1]$ ,  $(1 - \theta)$  代表高速铁路承担消费者福利的比重(如果  $\theta = 1$ , 高速铁路退化为仅以盈利为目的的企业),  $W^R$  代表高速铁路系统内的社会福利.

高速铁路系统内的社会福利表示为  $W^R = CS + \pi^R$ , 其中  $CS$  表示消费者剩余,  $\pi^R$  表示高速铁路利润<sup>[10,12,19,20]</sup>.

在式(2)中令  $q_1^R = 0$ , 可得  $\tilde{P}_1^R = \alpha + \gamma_1 P_1^{A_1} = \alpha + \gamma_1(p_1^{A_1} + vT_1^{A_1})$ , 通过文献[10]得到消费者剩余为

$$CS = \int_{P_1^R}^{\tilde{P}_1^R} (\alpha - z + \gamma_1 P_1^{A_1}) dz.$$

在此情形下, 航空企业  $A_1$  的价格决策模型为

$$\text{Max}_{p_1^{A_1}, p_2^{A_1}} Z^{A_1} = (p_1^{A_1} - c^A)(q_1^{A_1} + q_3^{A_1 A_1}) + (p_2^{A_1} - c^A)(q_2^{A_1} + q_3^{A_1 A_1}), \quad (15)$$

航空企业  $A_2$  的价格决策模型为

$$\text{Max}_{p_2^{A_2}} Z^{A_2} = (p_2^{A_2} - c^A)(q_2^{A_2} + q_3^{RA_2}), \quad (16)$$

高速铁路 R 的价格决策模型为

$$\text{Max}_{p_1^R} Z^R = \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{RA_2}) + (1 - \theta)W^R. \quad (17)$$

对优化问题(15)可得一阶条件

$$\alpha_1 + \alpha_3 + 3c^A + \gamma_3 (\gamma_3 v (T_1^{A_1} + T_2^{A_2} + g) + p_2^{A_2} + \gamma_3 p_1^R) - 2(2p_1^{A_1} + p_2^{A_1}) - v \left( (T_3^{A_1})^2 + T_1^{A_1} \right) + \gamma_1 (p_1^R + vT_1^R) = 0, \quad (18)$$

$$\alpha_2 + \alpha_3 + 3c^A + \gamma_3 (v (T_1^{A_1} + T_2^{A_2} + g) + p_2^{A_2} + p_1^R) - 2p_1^{A_1} - 4p_2^{A_1} + \gamma_2 (vT_2^{A_2} + p_2^{A_1}) - v (T_3^{A_1})^2 - vT_2^{A_1} = 0. \quad (19)$$

对优化问题(16)可得一阶条件

$$\alpha_2 + \alpha_3 + 2c^A + \gamma_2 (p_2^{A_1} + vT_2^{A_1}) + \gamma_3 (p_1^{A_1} + p_2^{A_1} + v (T_3^{A_1})^2) - 4p_2^{A_2} - vT_1^{A_1} - vT_2^{A_2} - p_1^R - vT_1^R = 0. \quad (20)$$

对优化问题(17)可得一阶条件

$$\alpha_3 + \theta (\alpha_1 + \gamma_1 p_1^{A_1}) + \gamma_3 (p_1^{A_1} + p_2^{A_1}) - p_2^{A_2} + \gamma_3 v (T_3^{A_1})^2 + (\gamma_1 \theta - 1)vT_1^{A_1} + 2c^R - (\theta + 3)p_1^R - (\theta + 1)vT_1^R = 0. \quad (21)$$

联立式(18)~式(21), 可得客运企业的均衡客运服务价格分别为

$$p_2^{A_2} = \frac{-64(2\gamma_1^2\theta + \gamma_3\gamma_1(\theta + 1) + 2\gamma_3^2 - 6(\theta + 3))(-\gamma_2(f_1 - 2f_2) + \gamma_3(f_1 + f_2) + 6f_4) + 64(\gamma_1(\gamma_3 - \gamma_2) + \gamma_3(\gamma_2 + 2\gamma_3) - 6)(\gamma_1(2f_1 - f_2)\theta + \gamma_3(f_1 + f_2) + 6f_3)}{-8(\gamma_1(\gamma_3 - \gamma_2) + \gamma_3(\gamma_2 + 2\gamma_3) - 6)},$$

$$p_1^R = \frac{\gamma_1(f_2 - 2f_1)\theta - \gamma_3(f_1 + f_2) - 6f_3 + p_2^{A_2}(\gamma_1(\gamma_2 - \gamma_3)\theta - \gamma_3(\gamma_2 + 2\gamma_3) + 6)}{2\gamma_1^2\theta + \gamma_3\gamma_1(\theta + 1) + 2\gamma_3^2 - 6(\theta + 3)},$$

$$p_2^{A_1} = \frac{1}{12} ((4f_2 - 2f_1) - (2(\gamma_1 - \gamma_3))p_1^R - (-2(2\gamma_2 + \gamma_3))p_2^{A_2}),$$

$$p_1^{A_1} = \frac{1}{4} (f_1 + \gamma_3 p_2^{A_2} + (\gamma_1 + \gamma_3)p_1^R - 2p_2^{A_1}),$$

其中

$$\begin{aligned} f_1 &= 3c^A - v(T_3^{A_1})^2 + \alpha_1 + \alpha_3 + (\gamma_3 - 1)vT_1^{A_1} + \gamma_3gv + \gamma_1vT_1^R\gamma_3 + vT_2^{A_2}, \\ f_2 &= 3c^A - vT_2^{A_1} - v(T_3^{A_1})^2 + \alpha_2 + \alpha_3 + \gamma_2vT_2^{A_2}\gamma_3 + v(T_2^{A_2} + T_1^{A_1} + g), \\ f_3 &= \alpha_1\theta + \alpha_3 + \gamma_3v(T_3^{A_1})^2 + (\gamma_1 - 1)vT_1^{A_1} + \gamma_1(\theta - 1)vT_1^{A_1} + 2c^R - (\theta + 1)vT_1^R, \\ f_4 &= \alpha_2 + \alpha_3 + 2c^A + \gamma_2vT_2^{A_1} - vT_2^{A_2} + \gamma_3v(T_3^{A_1})^2 - vT_1^{A_1} - vT_1^R. \end{aligned}$$

一般而言,同一市场下航空旅行距离要小于高速铁路旅行距离,因此高速铁路旅行距离等于航空旅行距离和绕道距离之和,即  $L^R = L^A + \varphi$ , 其中  $\varphi$  为绕道距离,令  $y = T_1^{A_1} - T_1^R \geq 0$ , 可得如下结论.

**结论 1** 当客运距离  $L \geq \frac{(e^A - e^R)S^R S^A - S^A \varphi}{S^A - S^R}$  时,航空旅行相比高速铁路更具时间优势,且旅行距离越长,航空旅行时间优势越大.

在双寡头垄断情况下单独考虑市场 1 时,通过式(1),式(2)和式(11),可得航空企业  $A_1$  和高速铁路 R 在市场 1 中的目标函数分别为

$$Z^{A_1} = \pi^{A_1} = (p_1^{A_1} - c^A)(\alpha_1 - (p_1^{A_1} + vT_1^{A_1}) + \gamma_1(p_1^R + vT_1^R)), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Z^R &= \theta\pi^R + (1 - \theta)W^R = \theta(p_1^R - c^R)(\alpha_1 - (p_1^{A_1} + vT_1^{A_1}) + \\ &\quad \gamma_1(p_1^R + vT_1^R)) + (1 - \theta) \left( \frac{(q_1^R)^2}{2} + \pi^R \right). \end{aligned} \quad (23)$$

将式(22)和式(23)分别对  $p_1^{A_1}, p_1^R$  求一阶偏导数,可得均衡条件下各自的客运服务价格分别为

$$p_1^{A_1} = \frac{\alpha_1(\gamma_1\theta + \theta + 1) + (\theta + 1)c^A + vT_1^{A_1}(\gamma_1^2\theta - \theta - 1) + \gamma_1c^R + \gamma_1vT_1^R}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}, \quad (24)$$

$$p_1^R = \frac{2c^R + \theta(2\alpha_1 + \gamma_1(\alpha_1 + c^A) + \gamma_1vT_1^{A_1} + (\gamma_1^2 - 2)vT_1^R)}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}. \quad (25)$$

将式(24)和式(25)代入需求函数式(1)和式(2),可得两客运企业的均衡需求量分别为

$$q_1^{A_1} = \frac{-\alpha_1(\gamma_1\theta + \theta + 1) + c^A(\gamma_1^2(-\theta) + \theta + 1) + vT_1^{A_1}(\gamma_1^2(-\theta) + \theta + 1) - \gamma_1c^R - \gamma_1vT_1^R}{\gamma_1^2\theta - 2(\theta + 1)}, \quad (26)$$

$$q_1^R = -\frac{2\alpha_1 + \gamma_1(\alpha_1 + c^A) + \gamma_1vT_1^{A_1} + (\gamma_1^2 - 2)c^R + (\gamma_1^2 - 2)vT_1^R}{\gamma_1^2\theta - 2(\theta + 1)}. \quad (27)$$

将式(24)~式(27)分别对  $v$  求一阶偏导数可得

$$\frac{\partial p_1^{A_1}}{\partial v} = \frac{T_1^{A_1}(\gamma_1^2\theta - (\theta + 1)) + \gamma_1T_1^R}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial p_1^R}{\partial v} = \frac{\theta(T_1^R(\gamma_1^2 - 2) + \gamma_1T_1^{A_1})}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial q_1^{A_1}}{\partial v} = \frac{T_1^{A_1}(\gamma_1^2\theta - (\theta + 1)) + \gamma_1T_1^R}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}, \quad (30)$$

$$\frac{\partial q_1^R}{\partial v} = \frac{T_1^R(\gamma_1^2 - 2) + \gamma_1T_1^{A_1}}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}. \quad (31)$$

由式(28)~式(31)可得如下结论.

**结论 2** 当  $\frac{T_1^{A_1}}{T_1^R} \leq \frac{\gamma_1}{(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}$  时,航空旅行的客运服务价格随旅客时间价值增加而提高,且搭乘

飞机的时间价值更高的商务旅客增多; 当  $\frac{T_1^{A_1}}{T_1^R} \geq \frac{2 - \gamma_1^2}{\gamma_1}$  时, 高速铁路客运服务价格随旅客时间价值增加而提高, 且乘坐高速铁路的时间价值更高的商务旅客增多.

将式(24)和式(25)分别对  $T_1^{A_1}, T_1^R$  求一阶偏导数可得

$$\frac{\partial p_1^{A_1}}{\partial T_1^{A_1}} = -\frac{v((\theta + 1) - \gamma_1^2\theta)}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}, \tag{32}$$

$$\frac{\partial p_1^{A_1}}{\partial T_1^R} = \frac{\gamma_1 v}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}, \tag{33}$$

$$\frac{\partial p_1^R}{\partial T_1^{A_1}} = \frac{\gamma_1 v \theta}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}, \tag{34}$$

$$\frac{\partial p_1^R}{\partial T_1^R} = -\frac{v\theta(2 - \gamma_1^2)}{2(\theta + 1) - \gamma_1^2\theta}. \tag{35}$$

由式(32)~式(35)有下列结论.

**结论 3** 当  $\theta \neq 0$  时, 客运服务价格随客运企业自身旅行总时间增加而减少或随对方旅行总时间增加而增加, 但高速铁路有一定特殊性; 当  $\theta = 0$  时, 高速铁路的客运服务价格与自身旅行总时间及航空旅行总时间均无关.

市场 2 中, 航空企业  $A_1$  和  $A_2$  相互竞争的情形下, 通过同样方法可得类似结论.

### 2.2 情形 2: $A_2$ 与 R 合作

在市场 3 中, 航空企业  $A_2$  与高速铁路  $R$  合作组成互补的空铁联运, 其中  $R$  和  $A_2$  分别负责  $a, b$  之间和  $b, c$  之间的客运服务, 从而在市场 3 中与  $A_1$  的独立客运竞争, 而在其他市场类型中各客运企业依然处于竞争状态. 市场 2 与市场 3 的需求函数不变, 由式(5)和式(6)可得市场 3 的需求函数为

$$q_3^{A_1A_1} = \alpha_3 - P_3^{A_1A_1} + \gamma_3 P_3^{RA_2}, \quad q_3^{RA_2} = \alpha_3 - P_3^{RA_2} + \gamma_3 P_3^{A_1A_1}.$$

由需求函数可得目标函数为

$$\begin{aligned} Z^{RA_2} &= \pi^{A_2} + \theta\pi^R + (1 - \theta)W^R = (p_2^{A_2} - c^A)(q_2^{A_2} + q_3^{RA_2}) + \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{RA_2}) + (1 - \theta)W^R, \\ Z^{A_1} &= \pi^{A_1} = (p_1^{A_1} - c^A)(q_1^{A_1} + q_3^{A_1A_1}) + (p_2^{A_1} - c^A)(q_2^{A_1} + q_3^{A_1A_1}). \end{aligned}$$

在此情形下, 合作企业  $A_2, R$  的价格决策模型为

$$\text{Max}_{p_2^{A_2}, p_1^R} Z^{RA_2} = (p_2^{A_2} - c^A)(q_2^{A_2} + q_3^{RA_2}) + \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{RA_2}) + (1 - \theta)W^R,$$

航空企业  $A_1$  的价格决策模型为  $\text{Max}_{p_1^{A_1}, p_2^{A_1}} Z^{A_1} = (p_1^{A_1} - c^A)(q_1^{A_1} + q_3^{A_1A_1}) + (p_2^{A_1} - c^A)(q_2^{A_1} + q_3^{A_1A_1})$ .

### 2.3 情形 3: $A_1$ 与 R 合作

在市场 3 中, 只有航空企业  $A_1$  与高速铁路  $R$  合作组成半互补的空铁联运, 其中  $R$  和  $A_1$  分别负责  $a, b$  之间和  $b, c$  之间的客运服务, 从而在市场 3 与  $A_1$  的独立客运竞争, 而在其它市场类型中各客运企业依然处于竞争状态. 类似于第 2.2 节, 由式(5)和式(7)可得市场 3 的需求函数分别为

$$q_3^{A_1A_1} = \alpha_3 - P_3^{A_1A_1} + \gamma_3 P_3^{RA_1}, \quad q_3^{RA_1} = \alpha_3 - P_3^{RA_1} + \gamma_3 P_3^{A_1A_1}.$$

由需求函数可得目标函数为

$$\begin{aligned} Z^{RA_1} &= \pi^{A_1} + \theta\pi^R + (1 - \theta)W^R = (p_1^{A_1} - c^A)(q_1^{A_1} + q_3^{A_1A_1}) + (p_2^{A_1} - c^A) \times \\ &\quad (q_2^{A_1} + q_3^{A_1A_1} + q_3^{RA_1}) + \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{RA_1}) + (1 - \theta)W^R, \\ Z^{A_2} &= \pi^{A_2} = (p_2^{A_2} - c^A)q_2^{A_2}. \end{aligned}$$

在此情形下, 合作企业  $A_1, R$  的价格决策模型为

$$\begin{aligned} \text{Max}_{p_1^{A_1}, p_2^{A_1}, p_1^R} Z^{A_1 R} = & (p_1^{A_1} - c^A)(q_1^{A_1} + q_3^{A_1 A_1}) + (p_2^{A_1} - c^A)(q_2^{A_1} + q_3^{A_1 A_1} + q_3^{R A_1}) + \\ & \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{R A_1}) + (1 - \theta)W^R, \end{aligned}$$

航空企业  $A_2$  的价格决策模型为  $\text{Max}_{p_2^{A_2}} Z^{A_2} = (p_2^{A_2} - c^A)q_2^{A_2}$ .

#### 2.4 情形 4: $A_1$ 与 $A_2$ 合作

在市场 3 中, 只有航空企业  $A_1$  与  $A_2$  合作组成半互补的航线联营, 其中  $A_1$  和  $A_2$  分别负责  $a, b$  之间和  $b, c$  之间的客运服务, 从而在市场 3 与  $A_1$  的独立客运竞争, 而在其他市场类型中依然处于竞争状态. 同样类似于第 2.2 节, 由式(5)和式(8)可得市场 3 的需求函数分别为

$$q_3^{A_1 A_1} = \alpha_3 - P_3^{A_1 A_1} + \gamma_3 P_3^{A_1 A_2}, \quad q_3^{A_1 A_2} = \alpha_3 - P_3^{A_1 A_2} + \gamma_3 P_3^{A_1 A_1}.$$

由需求函数可得目标函数为

$$\begin{aligned} Z^{A_1 A_2} = & \pi^{A_1} + \pi^{A_2} = (p_1^{A_1} - c^A)(q_1^{A_1} + q_3^{A_1 A_2} + q_3^{A_1 A_1}) + \\ & (p_2^{A_1} - c^A)(q_2^{A_1} + q_3^{A_1 A_1}) + (p_2^{A_2} - c^A)(q_2^{A_2} + q_3^{A_1 A_2}), \\ Z^R = & \theta\pi^R + (1 - \theta)W^R = \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{R A_2}) + (1 - \theta)W^R. \end{aligned}$$

在此情形下, 合作企业  $A_1, A_2$  的价格决策模型为

$$\begin{aligned} \text{Max}_{p_1^{A_1}, p_2^{A_1}, p_2^{A_2}} Z^{A_1 A_2} = & (p_1^{A_1} - c^A)(q_1^{A_1} + q_3^{A_1 A_2} + q_3^{A_1 A_1}) + \\ & (p_2^{A_1} - c^A)(q_2^{A_1} + q_3^{A_1 A_1}) + (p_2^{A_2} - c^A)(q_2^{A_2} + q_3^{A_1 A_2}), \end{aligned}$$

高速铁路  $R$  的价格决策模型为  $\text{Max}_{p_1^R} Z^R = \theta(p_1^R - c^R)(q_1^R + q_3^{R A_2}) + (1 - \theta)W^R$ .

对于情形 2、情形 3 和情形 4, 各客运企业的均衡客运服务价格与情形 1 的解析解形式相似, 故省略.

### 3 客运企业相互竞争的动态博弈模型

伯特兰德模型是基于完全信息假设. 然而, 现实中多数情况下企业对市场和其他企业的信息不能完全获得, 但可参考本期价格信息和盈利状况决定下一期价格, 逐步实现目标函数最大化. 本节以情形 1 为例, 采用有限理性假设建立动态伯特兰德模型, 并分析各均衡点的稳定性.

#### 3.1 动态模型建立

由各市场下客运企业的目标函数(12)~式(14), 可得  $t$  时期的边际函数分别为  $\frac{\partial Z^{A_1}(t)}{\partial p_1^{A_1}}, \frac{\partial Z^{A_1}(t)}{\partial p_2^{A_1}}, \frac{\partial Z^{A_2}(t)}{\partial p_2^{A_2}}, \frac{\partial Z^R(t)}{\partial p_1^R}$ , 其中  $p_i^j(t)$  表示  $t$  时期客运企业  $j$  在市场  $i$  中的价格,  $Z^j(t)$  表示  $t$  时期客运企业  $j$  的目标函数.

由上述可得各企业在有限理性假设下的伯特兰德博弈系统分别为

$$\begin{cases} p_1^{A_1}(t+1) = p_1^{A_1}(t) + \varepsilon_1 p_1^{A_1}(t) \frac{\partial Z^{A_1}(t)}{\partial p_1^{A_1}} \\ p_2^{A_1}(t+1) = p_2^{A_1}(t) + \varepsilon_2 p_2^{A_1}(t) \frac{\partial Z^{A_1}(t)}{\partial p_2^{A_1}} \\ p_2^{A_2}(t+1) = p_2^{A_2}(t) + \varepsilon_3 p_2^{A_2}(t) \frac{\partial Z^{A_2}(t)}{\partial p_2^{A_2}} \\ p_1^R(t+1) = p_1^R(t) + \varepsilon_4 p_1^R(t) \frac{\partial Z^R(t)}{\partial p_1^R}, \end{cases} \quad (36)$$

其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  均为正参数, 分别代表各客运企业在不同市场下客运服务价格的调整强度.



有限理性表现为企业对  $t + 1$  时期的价格决策受其  $t$  时期边际目标函数的影响, 即当本期客运企业边际目标为正时企业为增加利润而在下一期提高价格, 而当本期边际目标为负时企业在下一期降低价格, 从而通过市场需求量的变化来影响目标函数.

### 3.2 均衡点及其稳定性

在上述有限理性假设下的伯特兰德博弈系统中, 令  $p_i^j(t + 1) = p_i^j(t)$ , 可求得系统有 16 个均衡点, 其中 15 个为边界均衡点, 另一个为纳什均衡点. 为简便起见, 令  $\theta = 1$ , 其它参数如表 3 中所设.

经计算可得均衡点为

$$\begin{aligned}
 & E_1(0, 0, 0, 0), E_2(0, 390.35, 0, 364.63), E_3(405.54, 0, 376.65, 0), E_4(464.56, 0, 0, 423.76), \\
 & E_5(0, 486.52, 457.71, 0), E_6(257.46, 261.62, 0, 0), E_7(0, 0, 264.91, 254.45), E_8(557.90, 0, 309.54, 410.66), \\
 & E_9(0, 546.55, 403.37, 301.81), E_{10}(401.58, 261.62, 0, 480.39), E_{11}(232.12, 371.96, 455.28, 0), \\
 & E_{12}(0, 0, 0, 320.67), E_{13}(0, 0, 328.52, 0), E_{14}(388.27, 0, 0, 0), E_{15}(0, 364.39, 0, 0), \\
 & E^*(381.82, 365.07, 387.94, 393.04),
 \end{aligned}$$

其中  $E_1, E_2, \dots, E_{15}$  均为边界均衡点,  $E^*$  为唯一纳什均衡点.

由系统(36)可求得雅可比矩阵为<sup>[22]</sup>

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & -1.90 \varepsilon_1 p_1^{A1} & 0.45 \varepsilon_1 p_1^{A1} & 0.94 \varepsilon_1 p_1^{A1} \\ -1.90 \varepsilon_2 p_2^{A1} & J_{22} & 1.04 \varepsilon_2 p_2^{A1} & 0.45 \varepsilon_2 p_2^{A1} \\ 0.48 \varepsilon_3 p_2^{A2} & 1.04 \varepsilon_3 p_2^{A2} & J_{33} & -0.95 \varepsilon_3 p_2^{A2} \\ 0.95 \varepsilon_4 p_1^R & 0.47 \varepsilon_4 p_1^R & -0.95 \varepsilon_4 p_1^R & J_{44} \end{bmatrix}, \tag{37}$$

其中

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= 1 - 3.88 \varepsilon_1 p_1^{A1} + \varepsilon_1(1\ 404.14 + 0.45 p_2^{A2} + 0.94 p_1^R - 3.88 p_1^{A1} - 1.90 p_2^{A1}), \\
 J_{22} &= 1 - 3.88 \varepsilon_2 p_2^{A1} + \varepsilon_2(1\ 413.83 + 1.04 p_2^{A2} + 0.45 p_1^R - 1.90 p_1^{A1} - 3.88 p_2^{A1}), \\
 J_{33} &= 1 - 3.90 \varepsilon_3 p_2^{A2} + \varepsilon_3(1\ 277.42 - 3.90 p_2^{A2} - 0.95 p_1^R + 0.48 p_1^{A1} + 1.05 p_2^{A1}), \\
 J_{44} &= 1 - 3.89 \varepsilon_4 p_1^R + \varepsilon_4(1\ 209.81 - 0.95 p_2^{A2} - 3.89 p_1^R + 0.95 p_1^{A1} + 0.47 p_1^{A1}).
 \end{aligned}$$

将上述 15 个边界均衡点以及 1 个纳什均衡点代入式(37)中并计算矩阵的特征值, 比较特征值与 1 的大小关系, 由此可判断均衡点的稳定性. 如果该矩阵的非零特征值大于 1, 那么该均衡点不稳定.

**结论 4** 系统的边界均衡点  $E_1, E_2, \dots, E_{15}$  均为不稳定均衡点, 而纳什均衡点  $E^*$  在一定条件下为稳定均衡点.

以  $E_1$  为例, 代入雅可比矩阵中可得

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 + 1\ 404.14 \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + 1\ 413.83 \varepsilon_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + 1\ 277.42 \varepsilon_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + 1\ 209.81 \varepsilon_4 \end{bmatrix}.$$

由于该矩阵的非零特征值均大于 1, 因此  $E_1$  为不稳定均衡点. 同理可验证其它边界均衡点均为不稳定均衡点, 即在竞争中将出现客运企业退出市场的情况.

将  $E^*$  代入式(37)中得对应的特征多项式为

$$P(\lambda) = \lambda^4 + \mu_1 \lambda^3 + \mu_2 \lambda^2 + \mu_3 \lambda + \mu_4,$$

其中

$$\begin{aligned}
 \mu_1 &= 1\ 224.26 \varepsilon_1 + 1\ 342.57 \varepsilon_2 + 1\ 463.04 \varepsilon_3 + 1\ 321.60 \varepsilon_4 - 4, \\
 \mu_2 &= 1.356\ 23 \times 10^6 \varepsilon_1 \varepsilon_2 + 1.778\ 22 \times 10^6 \varepsilon_1 \varepsilon_3 + 1.522\ 85 \times 10^6 \varepsilon_1 d -
 \end{aligned}$$

$$3\ 673.07\ \varepsilon_1 + 1.859\ 75 \times 10^6\ \varepsilon_2\varepsilon_3 + 1.662\ 26 \times 10^6\ \varepsilon_2\varepsilon_4 - 4\ 057.72\varepsilon_2 +$$

$$1.831\ 66 \times 10^6\ \varepsilon_3\varepsilon_4 - 4\ 419.11\ \varepsilon_3 - 3\ 964.80\ \varepsilon_4 + 6,$$

$$\mu_3 = 1.727\ 63 \times 10^9\ \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 + 1.522\ 5 \times 10^9\ \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 - 2.512\ 45 \times 10^6\ \varepsilon_1\varepsilon_2 +$$

$$2.112\ 04 \times 10^9\ \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 - 3.556\ 05 \times 10^6\ \varepsilon_1\varepsilon_3 - 3.045\ 7 \times 10^6\ \varepsilon_1\varepsilon_4 + 3673.07\ \varepsilon_1 +$$

$$2.292\ 46 \times 10^9\ \varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 - 3.699\ 51 \times 10^6\ \varepsilon_2\varepsilon_3 - 3.534\ 53 \times 10^6\ \varepsilon_2\varepsilon_4 + 4\ 057.72\ \varepsilon_2 -$$

$$3.653\ 33 \times 10^6\ \varepsilon_3\varepsilon_4 + 4\ 419.11\varepsilon_3 + 3\ 964.80\varepsilon_4 - 4,$$

$$\mu_4 = 2.024\ 02 \times 10^{12}\ \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 - 1.717\ 63 \times 10^9\ \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 - 1.562\ 50 \times 10^9\ \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 +$$

$$1.246\ 23 \times 10^6\ \varepsilon_1\varepsilon_2 - 2.103\ 04 \times 10^9\ \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 + 1.778\ 02 \times 10^6\ \varepsilon_1\varepsilon_3 +$$

$$1.522\ 85 \times 10^6\ \varepsilon_1\varepsilon_4 - 1\ 234.36\ \varepsilon_1 - 2.292\ 46 \times 10^9\ \varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 + 1.849\ 75 \times 10^6\ \varepsilon_2\varepsilon_3 +$$

$$1.762\ 26 \times 10^6\ \varepsilon_2\varepsilon_4 - 1\ 352.57\ \varepsilon_2 + 1.831\ 66 \times 10^6\ \varepsilon_3\varepsilon_4 - 1\ 473.04\ \varepsilon_3 - 1321.60\ \varepsilon_4 + 1.$$

令  $\psi_1 = 1 - \mu_4^2$ ,  $\psi_2 = \mu_1 - \mu_3\mu_4$ ,  $\psi_3 = \mu_2 - \mu_2\mu_4$ ,  $\psi_4 = \mu_3 - \mu_1\mu_4$ ,  $\xi_1 = \psi_4^2 - \psi_1^2$ ,  $\xi_2 = \psi_3\psi_4 - \psi_1\psi_2$ ,  $\xi_3 = \psi_2\psi_4 - \psi_1\psi_3$ . 由 Jury 判别法可得,  $E^*$  稳定的充要条件为

$$\begin{cases} 1 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 > 0, \\ 1 + \mu_1 - \mu_2 + \mu_3 - \mu_4 > 0, \\ |\mu_4| < 1, |\psi_4| < |\psi_3|, |\xi_1| < |\xi_3|. \end{cases} \quad (38)$$

即当系统同时满足条件(38)时, 纳什均衡点  $E^*$  是稳定的.

由上述分析可知,  $E^*$  是否稳定由系统参数决定. 由于客运企业均基于有限理性假设, 因此不能立即达到纳什均衡状态, 需经反复博弈, 最终才能达到纳什均衡. 但如果一家企业的客运服务价格调整强度过大, 使  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  超出式(38)所定义的范围, 就会导致系统进入不稳定状态, 但  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  的取值不会改变纳什均衡点  $E^*$ .

## 4 数值分析

本节在保证各航线客运需求和价格、利润均为正且不影响问题本质的前提下设定相应参数值, 并在此基础上分析和比较各企业对竞争与合作四种情形的偏好和相应情形下的总社会福利.

### 4.1 参数说明

表 3 列出了参数的取值, 表中的大部分参数值是参照相关文献给出的.

表 3 参数值

Table 3 Parameter values

参数	$\alpha$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$e^A$	$e^R$	$g$	$v$	$c^R$	$c^A$	$L_1$	$S^A$	$S^R$
数值	600	0.5	0.6	0.6	3	1	2	12	90	120	600 km	720 km/h	290 km/h

例如, 在伦敦与巴黎之间的客运市场, Jiang 等<sup>[11]</sup> 根据 Behrens 等<sup>[23]</sup> 的实证分析数据得出相关参数. Fu 等<sup>[24]</sup> 研究发现日本高铁与航空具有实质性不同, 高速铁路与航空企业之间的替代性要小于航空企业之间的替代性, 因此参数满足  $\gamma_1 < \gamma_2$ . 在高速铁路和航空企业单位乘客成本比较上, 根据 Meunier 等<sup>[25]</sup> 和 Fröidh<sup>[26]</sup> 的研究, 一般情形有  $c^R < c^A$ . 进出不同机场, 高铁站所需的时间不同, 根据 Adler 等<sup>[9]</sup> 以及 Gonzalez-Savignat 等<sup>[27]</sup> 研究可得, 进出机场及高铁站所需时间比较典型的是  $e^A = 3\text{ h}$ ,  $e^R = 1\text{ h}$ . 在旅行距离上, Rothengatter<sup>[28]</sup> 和 Adler 等<sup>[9]</sup> 研究得到高铁与航空运输之间有效竞争旅行距离, 由此令市场 1 和市场 2 的距离为  $L = 600\text{ km}$ . 民航飞机的飞行速度较为固定为  $720\text{ km/h}$ , 但高速列车行驶速度会发生变化, 比较典型的是  $290\text{ km/h}$ . 本文同时参考了中国国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn>)根据中国各大城市的人均每小时 GDP 估计旅客的时间价值.

企业间替代性及其相关参数依据相关文献所确定, 其中为简化计算, 令  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha, L = L_1 = L_2$ . 参数的取值详见表 3.

在高速铁路承担不同比重社会福利时, 本文计算了航空企业之间、航空企业与高速铁路之间竞争与合作四种情形下各企业利润以及总社会福利, 计算结果见图 2 与图 4.

### 4.2 各客运企业对竞争与合作情形的偏好

客运企业作为理性个体, 对不同竞争与合作情形的偏好由不同情形下自身利润所决定. 同时客运企业利润不仅与客运企业自身选择有关, 其它客运企业对不同情形的选择也影响着客运企业自身利润.

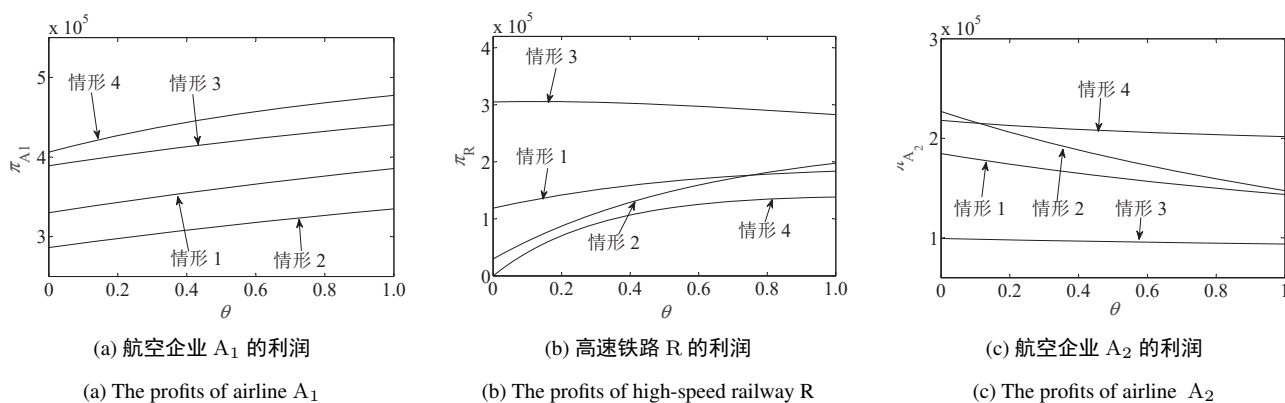


图 2 四种情形下各客运企业的利润

Fig. 2 Profits of each passenger transport enterprise in four situations

由图 2 可见, 航空企业 A<sub>1</sub> 在四种情形下的利润随  $\theta$  的增加而增加, 且在情形 4 的利润上升速率和幅度最大, 并随高速铁路承担社会福利比重的降低而增加, 尤其当航空企业 A<sub>1</sub> 与 A<sub>2</sub> 合作时对航空企业 A<sub>1</sub> 的利润影响最大.

高速铁路 R 在情形 1、情形 2 和情形 4 的利润随  $\theta$  的增加而增加, 且在情形 2 的利润增加幅度最大, 并随高速铁路承担社会福利比重的降低而增加, 当其与航空企业 A<sub>2</sub> 合作时对高速铁路 R 的利润影响最大. 但在情形 3, 即航空企业 A<sub>1</sub> 与高速铁路 R 合作形成空铁联运时, 高速铁路 R 的利润随  $\theta$  的增加而降低, 并随其承担社会福利比重的降低而降低.

航空企业 A<sub>2</sub> 在四种情形下的利润随  $\theta$  的增加而降低, 且在情形 2 的利润下降速率和幅度最大, 并随高速铁路承担社会福利比重的降低而降低, 当航空企业 A<sub>2</sub> 与高速铁路 R 合作时对航空企业 A<sub>2</sub> 的利润影响最大.

用  $\prec_j$  表示客运企业  $j$  在  $\theta$  不同取值时对不同情形的偏好顺序. 例如,  $1 \prec_j 2$  表示在情形 1 与情形 2 的比较中客运企业  $j$  更偏好情形 2. 客运企业作为理性个体, 其偏好顺序由不同情形下的利润所决定, 即  $1 \prec_j 2 \Leftrightarrow \pi_1^j < \pi_2^j$ , 其中  $\pi_x^j$  表示企业  $j$  在情形  $x$  的利润 ( $x = 1, 2, 3, 4$ ). 由上述准则以及图 2 可得各客运企业的偏好顺序如下.

航空企业 A<sub>1</sub>: 当  $\theta \in [0, 1]$  时,  $2 \prec_{A_1} 1 \prec_{A_1} 3 \prec_{A_1} 4$ .

高速铁路 R: 当  $\theta \in [0, 0.7509)$  时,  $4 \prec_R 2 \prec_R 1 \prec_R 3$ ; 当  $\theta \in [0.7509, 1]$  时,  $4 \prec_R 1 \prec_R 2 \prec_R 3$ .

航空企业 A<sub>2</sub>: 当  $\theta \in [0, 0.1021)$  时,  $3 \prec_{A_2} 1 \prec_{A_2} 4 \prec_{A_2} 2$ ; 当  $\theta \in [0.1021, 1]$  时,  $3 \prec_{A_2} 1 \prec_{A_2} 2 \prec_{A_2} 4$ .

在合作企业利润不可再分配情况下, 由上述偏好关系可得企业对竞争与合作情形的选择. 当  $\theta \in [0.1021, 1]$  时, 三家客运企业中, 航空企业 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> 同时偏好情形 4; 当  $\theta \in [0, 0.1021]$  时, 各企业间不存在同时偏好的情形. 由此可得如下结论.

**结论 5** 在合作企业利润不可再分配情况下, 当  $\theta \in [0, 0.1021)$  时, 最可能出现的竞争与合作情形不

确定; 当  $\theta \in [0.102\ 1, 1]$  时, 最可能出现的竞争与合作情形为情形 4, 即航空企业  $A_1, A_2$  合作组成互补的航线联营.

在合作企业间利润可再分配情况下, 由于利润可在合作企业间转移, 因此合作企业间各自的利润以及合作企业的总利润很大程度上决定了企业对各种竞争与合作情形的偏好. 本文定义企业利润总增益为

$$NG_x = \frac{\pi_x^{j_1} + \pi_x^{j_2}}{\bar{\pi}^{j_1} + \bar{\pi}^{j_2}},$$

其中  $j_1, j_2$  分别表示情形  $x$  中的合作企业,  $\pi^{j_1}, \pi^{j_2}$  分别表示客运企业  $j_1, j_2$  在四种情形下的平均利润. 当  $x = 1$  时有

$$NG_1 = \frac{\sum_{j=A_1, A_2, R} \pi_1^j}{\sum_{j=A_1, A_2, R} \bar{\pi}^j}.$$

企业利润总增益的大小决定了不同竞争与合作情形出现的可能性. 例如,  $NG_1 < NG_2$  表示情形 1 比情形 2 出现的可能性更大. 当  $NG > 1$  时, 两企业存在合作积极性, 且  $NG$  越大, 两企业合作积极性越大, 即两企业合作可能性越大. 通过计算可得四种情形下企业利润总增益, 见图 3.

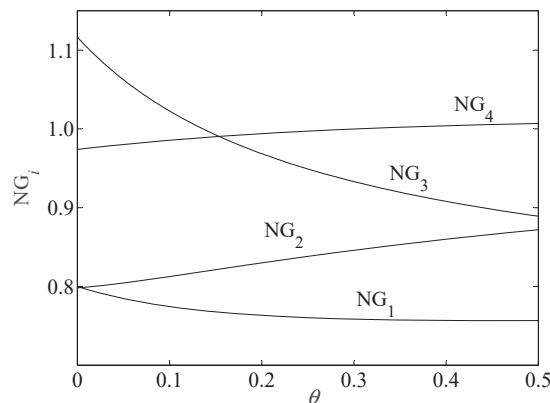


图 3 四种情形下利润总增益

Fig. 3 Profit gains in four situations

由图 3 可见, 在情形 2 和情形 4 时, 企业利润总增益随  $\theta$  的增加而增加, 即航空企业  $A_2$  与高速铁路 R 合作组成的空铁联运和航空企业  $A_1, A_2$  合作组成互补的航线联营的利润总增益随高速铁路承担社会福利比重的降低而增加. 在情形 1 和情形 3 时, 企业利润总增益随  $\theta$  的增加而降低, 即在各企业相互竞争和在航空企业  $A_1$  与高速铁路 R 合作组成半互补空铁联运的利润总增益随高速铁路承担社会福利比重的降低而降低. 比较四种情形下企业利润总增益的大小可得

当  $\theta \in [0, 0.007\ 5]$  时,  $NG_3 > NG_4 > NG_1 > NG_2$ ;

当  $\theta \in [0.007\ 5, 0.309\ 4]$  时,  $NG_3 > NG_4 > NG_2 > NG_1$ ;

当  $\theta \in [0.309\ 4, 1]$  时,  $NG_4 > NG_3 > NG_2 > NG_1$ .

由上述企业利润总增益大小关系, 可得如下结论.

**结论 6** 在合作企业间利润可再分配情况下, 当  $\theta \in [0, 0.309\ 4]$  时, 最可能出现的竞争与合作情形为情形 3, 即航空企业  $A_1$  与高速铁路 R 合作组成半互补的空铁联运; 当  $\theta \in [0.309\ 4, 1]$  时, 最可能出现的竞争与合作情形为情形 4, 即航空企业  $A_1, A_2$  合作组成互补的航线联营.

#### 4.3 总社会福利的分析

总社会福利由市场中旅客的消费者剩余和客运企业利润两部分组成, 其中消费者剩余为旅客效用减去

票价, 而客运企业利润为企业的票价收入减去客运成本, 总社会福利可表示为旅客效用减去客运成本, 即

$$W_x = U_1 + U_2 + U_3 - G^{A_1} - G^{A_2} - G^R,$$

其中  $x$  代表不同竞争与合作情形,  $U_1, U_2, U_3$  分别为市场 1、市场 2 和市场 3 中的旅客效用,  $G^j$  为客运企业  $j$  在情形  $x$  的客运成本(可由式(15) 得到). 根据 Singh 等<sup>[29]</sup> 提出的航空客运市场中旅客的效用函数, 可得

$$U_1 = \frac{\alpha_1 (q_1^{A_1} + q_1^R)}{1 - \gamma_1} - \frac{2\gamma_1 q_1^{A_1} q_1^R + (q_1^{A_1})^2 + (q_1^R)^2}{2(1 - \gamma_1^2)},$$

$$U_2 = \frac{\alpha_2 (q_2^{A_1} + q_2^{A_2})}{1 - \gamma_2} - \frac{2\gamma_2 q_2^{A_1} q_2^{A_2} + (q_2^{A_1})^2 + (q_2^{A_2})^2}{2(1 - \gamma_2^2)},$$

$$U_3 = \frac{\alpha_3 (q_3^{A_1 A_1} + q_3^*)}{1 - \gamma_2} - \frac{2\gamma_2 q_3^{A_1 A_1} q_3^* + (q_3^{A_1 A_1})^2 + (q_3^*)^2}{2(1 - \gamma_2^2)},$$

其中在情形 1 和情形 2 时 \* 均为  $RA_2$ , 而在情形 3 和情形 4 时 \* 分别为  $RA_1, A_1 A_2$ . 通过计算可得四种情形的总社会福利, 如图 4 所示.

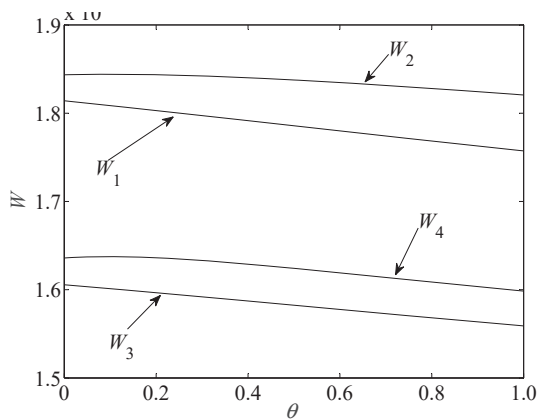


图 4 四种情形下  $\theta$  对总社会福利的影响

Fig. 4 Effects of  $\theta$  on the aggregate social welfare in four situations

由图 4 可见, 当  $\theta \in [0, 1]$  时有  $W_3 < W_4 < W_1 < W_2$ . 在情形 2 下, 当  $\theta \in [0, 0.098 2]$  时, 总社会福利随  $\theta$  的增加而增加; 当  $\theta \in [0, 0.098 2]$  时, 总社会福利随  $\theta$  的增加而降低. 其它三种情形下, 总社会福利随  $\theta$  的增加而降低, 即社会福利随高速铁路承担社会福利比重的降低而降低. 在航空企业  $A_2$  与高速铁路 R 合作组成互补的空铁联运且  $\theta = 0.098 2$  时, 总社会福利达到最大.

通过以上分析以及对四种竞争与合作情形的偏好与总社会福利最大化偏好做对比即可发现, 社会利益与客运企业利益存在冲突.

### 5 结束语

本文针对图 1 所示的运输网络, 建立了两个航空企业之间以及航空企业与高速铁路之间的竞争与合作模型. 通过静态分析发现, 在短途旅行中高速铁路更具有时间成本优势. 航空企业与高速铁路竞争时, 前者应集中资源用于长途客运线路, 以发挥自身在长途路线上的时间成本优势. 旅客时间价值和旅行总时间的变动对不同企业的均衡价格和需求量的影响各有差异. 航空企业应针对不同旅客群体(商务旅客, 休闲旅客等), 采取差异化定价策略, 以发挥自身竞争优势. 通过动态分析发现, 当客运企业价格调整强度过大时, 系统就会进入不稳定状态, 政府应对寡头客运企业的价格变动幅度做适当限制, 以防止客运服务价格出现大幅波动. 当高速铁路承担较少或中等水平社会福利时, 最可能出现的情形是航空企业之间合作组成互补的航线联营; 当高速铁路承担较多社会福利时, 在合作企业利润可再分配条件下, 最可能出现的情形是航空企业

与高速铁路组成半互补的空铁联运. 另外, 总社会福利最大化与各企业利润最大化所导致的偏好不一致, 此时政府应制定相应政策协调各方利益, 最大化总社会福利, 并根据情况限制市场中寡头企业之间的合作, 并购等行为, 以防止寡头企业损害公共利益的事件发生.

### 参考文献:

- [1] Bilotkach V. Complementary versus semi-complementary airline partnerships. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2005, 41(4): 381–393.
- [2] 郑士源, 王浣尘. 基于动态合作博弈理论的航空联盟稳定性. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(4): 184–192.  
Zheng S Y, Wang H C. Airline alliance stability based on dynamic cooperative game theory. *System Engineering: Theory and Practice*, 2009, 29(4): 184–192. (in Chinese)
- [3] Brueckner J K, Flores-Fillol R. Airline schedule competition. *Review of Industrial Organization*, 2007, 30(3): 161–177.
- [4] 纪杰, 龙勇. 飞行频率、拥挤成本和互补型航空联盟中枢辐射网络机场拥挤分析. *管理评论*, 2012, 24(3): 164–170.  
Ji J, Long Y. Analysis on airport congestion in hub-and-spoke network based on flight frequency, congestion cost and complementary airline alliances. *Business Review*, 2012, 24(3): 164–170. (in Chinese)
- [5] Grauberger W, Kimms A. Airline revenue management games with simultaneous price and quantity competition. *Computers & Operations Research*, 2016, 75(1): 64–75.
- [6] 寇勇刚, 吴桐水, 樊玮. 航空公司竞争层次演化的元胞自动机仿真. *系统工程学报*, 2010, 25(6): 784–790.  
Kou Y G, Wu T S, Fan W. Cellular automata simulation of airlines' competition level evolution. *Journal of Systems Engineering*, 2010, 25(6): 784–790. (in Chinese)
- [7] 崔强, 匡海波. 基于小世界网络博弈的空港联盟准入算法. *系统工程学报*, 2015, 30(1): 1–8.  
Cui Q, Kuang H B. Airport alliance access algorithm through the game on small-world network. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(1): 1–8. (in Chinese)
- [8] Harder R, Vaze V. Two-stage game theoretic modelling of airline frequency and fare competition. New York: ACM, 2017.
- [9] Adler N, Pels E, Nash C. High-speed rail and air transport competition game engineering as tool for cost-benefit analysis. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2010, 44(7): 812–833.
- [10] Yang H, Zhang A. Effects of high-speed rail and air transport competition on prices, profits and welfare. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2012, 46(10): 1322–1333.
- [11] Jiang C, Zhang A. Effects of high-speed rail and airline cooperation under hub airport capacity constraint. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2014, 60(2): 33–49.
- [12] Talebian A, Zou B. A multi-stage approach to air-rail competition focus on rail agency objective, train technology and station access. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 2016, 6(1): 48–66.
- [13] 张婧, 郭啸, 陈维亚, 等. 多模式枢纽网络中高铁与航空票价优化模型. *系统工程学报*, 2015, 30(5): 693–702.  
Zhang J, Guo X, Chen W Y, et al. Price optimization model of high-speed rail and airline in a multi-modal hub network. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(5): 693–702. (in Chinese)
- [14] Jiang X, Zhang X, Lu W. Competition between high-speed rail and airline based on game theory. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017(3): 1–9.
- [15] Xia W, Zhang A. High-speed rail and air transport competition and cooperation: A vertical differentiation approach. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2016, 94(26): 456–481.
- [16] 肖燕, 李登峰. 不完全信息情景下三方相互威慑讨价还价模型. *系统工程学报*, 2017, 32(5): 604–612.  
Xiao Y, Li D F. Bargaining model of mutual deterrence among three players with incomplete information situations. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(5): 604–612. (in Chinese)
- [17] Ishibashi K, Kaneko T. Partial privatization in mixed duopoly with price and quality competition. *Journal of Economics*, 2008, 95(3): 213–231.
- [18] Matsumura T. Partial privatization in mixed duopoly. *Journal of Public Economics*, 1998, 70(3): 473–483.
- [19] Alfonso D T, Jiang C, Bracaglia V. Would competition between air transport and high-speed rail benefit environment and social welfare. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2015, 74(1): 118–137.
- [20] Socorro M P, Vicens M F. The effects of airline and high speed train integration. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 2013, 49(49): 160–177.

- [21] Jiang C, Zhang A. Effects of high-speed rail and airline cooperation under hub airport capacity constraint. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2014, 60(2): 33–49.
- [22] 刘 峰, 李亚光, 王宏兴. 非线性需求下四寡头价格博弈模型及其复杂特性. *系统工程学报*, 2016, 31(6): 719–728.  
Liu F, Li Y G, Wang H X. Four oligarchs price game model and its complex characteristics with nonlinear demand. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 31(6): 719–728. (in Chinese)
- [23] Behrens C, Pels E. Intermodal competition in the London–Paris passenger market high-speed rail and air transport. *Journal of Urban Economics*, 2012, 71(3): 278–288.
- [24] Fu X, Oum T H, Yan J. An analysis of travel demand in japan’s intercity market empirical estimation and policy simulation. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2014, 48(1): 97–113.
- [25] Meunier D, Quinet E. Applications of transport economics and imperfect competition. *Research in Transportation Economics*, 2012, 36(1): 19–29.
- [26] Fröidh O. Perspectives for a future high-speed train in the Swedish domestic travel market. *Journal of Transport Geography*, 2008, 16(4): 268–277.
- [27] González-Savignat M. Competition in air transport: The case of the high speed train. *Journal of Transport Economics & Policy*, 2004, 38(1): 77–107.
- [28] Rothengatter W. Economic crisis and consequences for the transport sector. *Transportation Research Economics and Policy*, 2011: 9–28.
- [29] Singh N, Vives X. Price and quantity competition in a differentiated duopoly. *Rand Journal of Economics*, 1984, 15(4): 546–554.

#### 作者简介:

林贵华(1967—), 男, 河北沧州人, 博士, 教授, 研究方向: 最优决策, 多目标优化, 随机优化, Email: guihualin@shu.edu.cn;

裴红波(1994—), 男, 河北邯郸人, 硕士生, 研究方向: 博弈论, Email: 17191766016@163.com;

邹远洋(1983—), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 研究方向: 交通规划, 博弈论等, Email: zyy0806zou@163.com.