

主-供模式下大型客机协同研制的演化博弈分析

张明¹, 朱建军¹, 王翥华²

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏南京 211106;

2. 金陵科技学院商学院, 江苏南京 211169)

摘要: 研究大型客机协同研制过程中考虑第三方监管的主制造商和供应商合作机制。基于贝叶斯思想刻画监管部门策略选择概率, 运用演化博弈理论, 探讨了主制造商能力与供应商态度的演化机制, 以及监管部门的策略选择对合作的影响。研究表明, 博弈系统存在9个纯平衡策略组合和39个混合平衡策略组合, 不同的约束条件存在不同的演化稳定策略组合; 供应商的合作态度不仅与主制造商的合作能力有关, 亦受监管部门策略选择以及其策略选择的固定成本、最初选择策略程度的影响。主制造商能力越强, 供应商与监管部门选择参与协同研制策略的程度会有所增强, 增强的幅度随着主制造商能力的增强而由小变大。

关键词: “主-供”模式; 协同研制; 初创期; 演化博弈; 能力; 态度

中图分类号: F224.32 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2019)06-0748-12

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.06.003

Evolutionary game analysis of co-development of large passenger aircraft under main manufacturer-supplier mode

Zhang Ming¹, Zhu Jianjun¹, Wang Hehua²

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. School of Business, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: This paper studies the cooperation mechanism between the main manufacturers and suppliers in the process of collaborative development of large passenger aircraft with the third party supervision considered. The strategic choice probability formula for supervision department is depicted based on Bayes formula, the evolutionary mechanism of main manufacturer's ability and suppliers' cooperative attitude, and the impact of strategic choice of supervision department on the cooperation are explored with evolutionary game theory applied. The result shows that there exists nine pure and thirty-nine mixed balance strategy combinations in the game system. The evolutionary stability strategy combination varies depending on different constraints. Suppliers' cooperative attitude is in relationship with not only main manufacturer's ability, but supervision department's choice, relative fixed cost and the initial probability. The stronger main manufacturer's ability is, the more suppliers and supervision department are likely to participate in the cooperation. And the increasing magnitude becomes bigger and bigger along with that.

Key words: main manufacturer-supplier mode; collaborative development; start-up stage; evolutionary game; ability; attitude

收稿日期: 2016-12-14; 修订日期: 2017-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71502073; 71372080; 71171112); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS2014086); 教育部人文社科基金资助项目(14YJC630120); 江苏省普通高校学术学位研究生创新计划资助项目(KYLX16_0307).

1 引言

由于航空制造业与其它制造业相比,产业链更宽更长,涉及技术领域更多,管理协调更复杂,“主制造商-供应商”(下文简称“主-供”)模式已成为航空制造企业的惯例,主制造商摆脱了具有高负荷特征的“制造生产”环节,可以集中资源和精力投入与市场和客户对接的关键环节,大大增强了企业应对市场变化的实力,增强了企业对产品、技术创新的资源保障、支撑能力。对大型客机研制而言,主制造商处于核心地位,对各级供应商具有一定的控制权,各级供应商与主制造商一同参与飞机研制整个过程,监管部门负责对该过程中主制造商与供应商所有合同等进行监管。在这种模式下,主制造商统筹整个项目的技术、收益和风险等关键事项的管控和分摊,供应商承担相关研制费用,共同分担与分享整个项目的风险与利润。

文献研究来看,对“主-供”协同合作模式的研究,国外对该方面的研究起步较早,其中 Van Mieghem^[1]通过分析资源竞争随机投资博弈,评估了制造商和供应商的分包机制对改善财务绩效和系统协同的重要性; Cachon 等^[2]研究了在电子信息时代信息共享和协同合作对不同结构供应链收益影响问题; Carr 等^[3]研究了供应商如何与主制造商签订协议,使主制造商能够同时接受供应商对已有货品的备货型生产与附加货品的订货型生产。随着“主-供”模式越来越多地为各类供应链所采用,对该模式的利益、激励等分配问题研究也越来越多地受到国内外学者的关注,李勇等^[4]通过运用 Rubinstein 讨价还价模型,研究了包含一个供应商和一个制造商的系统内部剩余利润分配问题; Zhou 等^[5]通过建立质量分析模型研究了供应商产品质量分类排序对供应商、制造商和社会福利的影响; Wang 等^[6]研究了上游供应商与下游主制造商在签订三种不同合同(批发价格合同、基于产品质量的批发价格合同、税收共享合同)情形下,对供应商创新投资的激励问题; Jiang 等^[7]通过采用序贯决策的方法研究了主制造商如何管理其零件的采购程序以及其供应商竞争环境的问题; Chen 等^[8]通过构造动态反向选择模型研究了在主供关系中的信息共享对供应商参与动机和生产效率的影响问题; Wu 等^[9]通过建立主从式博弈模型研究了内部和外部贸易上的协同对潜在运营效率的改善问题。“主-供”模式参与方本身的内在动力值得研究,一些学者从供应链参与方的利益角度出发运用博弈均衡相关理论进行研究,李波等^[10]通过运用 Stackelberg 主从博弈模型建模,研究了市场预测信息和增值服务成本信息同时共享或不共享时对制造商和零售商定价和利润的影响问题; Calvo 等^[11]通过议价均衡理论研究了基于卖方利益的快速反应机制的多源供应商对短周期产品需求风险的管理问题; Huang 等^[12]研究了在多个上游供应商与一个下游公司供应链中,信息联盟策略对供应商利益的影响问题。

大型客机集知识密集型与技术密集性于一体,具有高投入、高附加值和高风险的特点,与一般产品的主供模式存在明显的区别,第一,大型客机涉及多个利益主体,主制造商与供应商、监管方关系错综复杂,且随时间的变化而发生变化,这种变化具有不确定性;第二,对我国而言,主制造商处于“初创期”,关键系统技术掌握程度较弱,企业运作管理尚不成熟,顶层设计能力、技术研发能力、资源综合集成和调配能力等尚不够强,国内供应商培育不够完善,导致主制造商在功能上处于“主动”地位,但是能力上处于相对“弱势”;第三,在主制造商与供应商等协同研制过程中,供应商的态度与主制造商的能力呈现关联关系,这种复杂的“能力-态度”是现阶段必须要考虑的重要因素,主制造商与国外主要系统供应商、跨体制国内供应商协调难度和合作风险加大。根据现有的文献报道,大型客机的协同研制等方面研究得到了较为广泛的关注,集中在大型客机协同研制的风险识别和管控、大型客机协同研制平台、协同研制方的利益冲突博弈、大型客机协同研制的模式选择和激励机制等,王嵩华等^[13]运用 SCOR 模型,研究了大型客机项目协同研制各阶段的供应链风险分析与识别问题;陈洪转等^[14]研究了主制造商在非协调控制和协调控制两种情形下最优成本分担激励等问题;程永波等^[15]建立了复杂产品资源整合分解模型,研究了主制造商干预并协调供应商资源整合的问题。

从现有研究来看,对“主-供”模式及该模式供应链利益研究方面取得了丰富成果,但是对“主-供”模式下复杂产品供应链主制造商能力与供应商态度演化机制问题的研究较少,对我国主制造商能力相对较弱对供

应链所带来的风险关注不够,尚没有文献考虑第三方监管部门的参与对供应链带来的影响;现有研究对我国现阶段的特点考虑不多,需要重点关注“初创期”主制造商的能力,供应商合作态度、监管方的监管策略等,这些现实而又复杂的问题具有很强的研究价值。

博弈主体所面临的环境是复杂的、不确定的,主体对环境的计算能力和认识能力是有限的,演化博弈在解决许多博弈问题上体现出了较好的使用价值^[16-18]。本文研究了有限理性视角下,“初创期”大型客机协同研制过程中主制造商、供应商以及第三方监管部门三方参与主体行为策略选择的问题,建立三方演化博弈的动力系统方程,研究该方程的平衡点及其相关性质。主要创新点体现在两个方面,一是建立了主制造商、供应商和第三方监管部门参与的合作博弈模型,刻画了“初创期”我国主制造商能力“弱”,以及三方主体关系错综复杂的竞争合作特点;二是建立基于能力、态度及监管惩罚机制的三方演化博弈动力系统方程,研究了不同条件下该系统所存在的平衡点及其性质,具有较强的现实意义。

2 问题描述和模型假设

2.1 问题描述

由于研制产品的高技术等特性,主制造商和供应商在合作过程中都将承担较大的风险与代价,主制造商对参与研制的各方合同的管控执行能力,亦将直接影响供应商在协同研制过程中的合作执行意愿,进而影响主制造商和供应商的协同研制质量。在主供双方协同研制过程中,双方的合同管理部承担着对合同的起草到生效再到最终完成的监管功能,如果产生纠纷并不可调解时,需要诉之于具有惩罚功能的仲裁机构,由于合同管理部门与仲裁机构均具有司法公正性,本文将其统称为“第三方”监管部门,履行对主供双方合同履行过程的监管与惩罚,是有限理性的第三方局中人,其策略选择对主制造商、供应商的策略选择起引导性作用,也依赖于主制造商、供应商的策略选择。

2.2 基本定义和假设

主制造商行为策略空间为(有能力管控执行,无能力管控执行),简记为(mmc, \overline{mmc})。“有能力管控执行”指的是主制造商能力强,可以完全管理掌控供应商对合同的执行力度和诚信度,并有能力按时执行合同。“无能力管控执行”则指的是主制造商能力较弱,尚无法有效管理掌控供应商对合同的执行力度和诚信度,由此可能无法按时推进合同的执行。

供应商行为策略空间为(有意愿合作执行,无意愿合作执行),简记为(svc, \overline{svc})。“有意愿合作执行”指的是供应商有意愿且有诚信同主制造商合作,并按时执行合同。主制造商能力较强时,供应商具有良好的协同预期,供应商愿意选择该策略。若主制造商无能力管控执行时,协同成果预期不甚明朗,供应商可能会选择该策略。

监管部门行为策略空间为(监管并惩罚,监管但不惩罚,不监管也不惩罚),简记为($gsp, gs\bar{p}, g\bar{s}\bar{p}$)。gs代表选择监管策略,gp代表选择惩罚策略,gs与gp分别代表不选择监管策略和不选择惩罚策略。“监管”指的是第三方监管部门执行对合同从主制造商、供应商起草到执行的监督管理,“惩罚”指的是倘若主制造商、供应商中某一方或者双方未完成对合同的执行时,监管部门对其采取的经济上的仲裁,且监管部门是否选择惩罚策略取决于其选择监管策略的基础上,这里称监管策略为惩罚策略的先验策略,而监管部门的行为策略空间为先验策略空间。一般情况下,监管部门会以选择策略的成本收益为基准来选择是否监管或惩罚,在一些情况下这个成本收益可考虑政治、社会影响和国家利益等综合效应。

主制造商有能力管控执行合同、供应商有意愿合作执行合同、监管部门选择监管策略和惩罚策略均表示各博弈方选择参与协同研制,反之,则为各博弈方选择不参与协同研制。

为了更清楚地对模型进行解释,本文结合现实情况作出如下假设:

假设 1 供应商合作的意愿程度随着主制造商管控执行合同能力有关,且随着时间 t 的推移而发生改

变. 在时刻 t , 记主制造商管控执行合同的能力程度为 $m(t)$, 供应商合作执行合同的意愿程度为 $s(t)$, 监管部门选择监管策略和惩罚策略的程度分别为 $h(t)$ 和 $p(t)$.

考虑我国大型客机协同研制处于“主-供”模式的“初创期”, 主制造商能力初期相对较弱, 且由于大型客机协同研制的复杂性, 主制造商能力将长期相对供应商能力较弱, 但主制造商意愿比供应商意愿强, 随着主制造商管控执行合同的能力程度 m 增强, 又由于各级多部门供应商对主制造商认识的局限性及信息传递的延迟性, 供应商合作执行合同的意愿程度 s 也随之增强, 且增强程度变化先慢后快, 呈 J 型曲线增长趋势, 因此 $m \geq s$; 为了下面便于说明问题, 用符号 $\varphi(i)$ 表示主体选择策略 i 的可能性程度, 根据监管部门先验策略空间的性质, 监管策略是惩罚策略的必要非充分条件, 惩罚策略是监管策略的充分非必要条件, 监管部门选择监管并惩罚策略的程度 $\varphi(\text{gsp})$ 为 p , 选择监管但不惩罚策略的程度 $\varphi(\text{gs}\bar{p})$ 为 $h(1-p)$, 选择不监管也不惩罚策略的程度 $\varphi(\text{gs}\bar{p})$ 为 $(1-h)(1-p)$.

定义 1 称 $(m, s, (p, h(1-p)))$ 为大型客机协同研制供应链中主制造商、供应商与监管部门的策略组合, 又称先验策略组合. 特别地, 当且仅当 $p, h(1-p)$ 均取整数(0 或 1)时, 称监管部门采取纯策略或纯先验策略, 否则, 称该博弈方采取混合策略, 且 $p + h(1-p) \leq 1$.

假设 2 主制造商与供应商的收益与大型客机协同研制质量有关, 与主制造商管控执行合同的能力程度 m 及供应商合作执行合同的意愿程度 s 正相关, 分别简记为 $I_{\text{mmc}}(m, s)$ 和 $I_{\text{svc}}(m, s)$, 且 $I'_{\text{mmc}, m} > 0$, $I'_{\text{mmc}, s} > 0$, $I'_{\text{svc}, m} > 0$, $I'_{\text{svc}, s} > 0$, 主制造商和供应商作为大型客机协同研制质量的利益相关者, 会向监管部门支付一定的费用作为监管部门的收益, 记为 $I_{\text{gsp}}(m, s)$, 且 $I'_{\text{gsp}, m} > 0$, $I'_{\text{gsp}, s} > 0$, 其中 $I'_{i, m} = \frac{\partial I_i(m, s)}{\partial m}$, $I'_{i, s} = \frac{\partial I_i(m, s)}{\partial s}$, $i = \text{mmc}, \text{svc}, \text{gsp}$,

假设 3 主制造商有能力管控执行合同时、供应商有意愿合作执行合同时、监管部门选择监管策略和惩罚策略时均需要支付一定数额的成本, 且均与主制造商管控执行合同的能力程度、供应商合作执行合同的意愿程度以及监管部门选择监管策略和惩罚策略的程度负相关, 分别记为 $C_{\text{mmc}}(m, s, h, p)$, $C_{\text{svc}}(m, s, h, p)$, $C_{\text{gs}}(m, s, h, p)$, $C_{\text{gp}}(m, s, h, p)$, 且有 $C_i(m, s, h, p) \geq 0$, $C'_{i, m} \leq 0$, $C'_{i, s} \leq 0$, $C'_{i, h} \leq 0$, $C'_{i, p} \leq 0$, 其中 $i = \text{mmc}, \text{svc}, \text{gs}, \text{gp}$; $C'_{i, m}$ 等的定义与假设 2 中 $I'_{i, m}$ 等的定义相同. 借鉴文献[19], 成本函数取为

$$C_i(m, s, h, p) = \lambda_i - \alpha_i m - \beta_i s - \gamma_i h - \delta_i p, \quad (1)$$

其中 $i = \text{mmc}, \text{svc}, \text{gs}, \text{gp}$. $\lambda_i \geq 0$ 表示各博弈方选择参与协同研制时的固定成本, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i \geq 0$ 分别表示各博弈方选择参与协同研制时博弈三方选择参与协同研制策略的程度 m, s, h 和 p 变动时引起的单位成本变动.

假设 4 主制造商无能力管控执行合同时、供应商无意愿合作执行合同时均会面临一定数额的损失成本, 而监管部门选择不监管策略或者不惩罚策略时需要承担来自监管部门内部及主制造商和供应商的压力, 且势必相对于其选择监管策略和惩罚策略时在认可度等方面处于劣势, 亦会面临一定数额的损失成本, 这三方的损失成本均随着主制造商管控执行合同的能力程度、供应商合作执行合同的意愿程度以及监管部门选择监管策略和惩罚策略的程度的增大而增大, 该损失成本可分别用 $C_{\overline{\text{mmc}}}(m, s, h, p)$, $C_{\overline{\text{svc}}}(m, s, h, p)$, $C_{\overline{\text{gs}}}(m, s, h, p)$, $C_{\overline{\text{gp}}}(m, s, h, p)$ 来表示, 需满足 $C_j(m, s, h, p) \geq 0$, $C'_{j, m} \geq 0$, $C'_{j, s} \geq 0$, $C'_{j, h} \geq 0$, $C'_{j, p} \geq 0$, 其中 $j = \overline{\text{mmc}}, \overline{\text{svc}}, \overline{\text{gs}}, \overline{\text{gp}}$. 有

$$C_j(m, s, h, p) = \lambda_j + \alpha_j m + \beta_j s + \gamma_j h + \delta_j p, \quad (2)$$

其中 $j = \overline{\text{mmc}}, \overline{\text{svc}}, \overline{\text{gs}}, \overline{\text{gp}}$. $\lambda_j \geq 0$ 表示各博弈方选择不参与协同研制时的固定成本, $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j \geq 0$ 则分别表示各博弈方选择不参与协同研制时博弈三方选择参与协同研制策略的程度 m, s, h 和 p 变动时引起的单位成本变动.

从式(1)和式(2)式可以看出,与三方主体选择参与协同研制时所承担成本不同的是,三方主体选择不参与协同研制时所承担的成本均与主制造商管控执行合同的能力、供应商合作执行合同的意愿以及监管部门选择监管策略和惩罚策略的程度成正比。

由于“初创期”主制造商能力相对较弱,一方面,相对于供应商在监管部门的话语权也较弱,另一方面,监管部门的策略选择较大地取决于实力较强供应商策略选择的程度,当 m 与 s 同等程度发生变化时, C_i 受后者影响较大,则有 $\beta_i \geq \alpha_i, i = \text{gs}, \text{gp}, \overline{\text{gs}}, \overline{\text{gp}}$ 。

基于以上假设,主制造商选择 mmc 和 $\overline{\text{mmc}}$ 策略的支付分别为

$$\pi_{\text{mmc}} = I_{\text{mmc}}(m, s) - C_{\text{mmc}}(m, s, h, p), \quad (3)$$

$$\pi_{\overline{\text{mmc}}} = I_{\text{mmc}}(m, s) - C_{\overline{\text{mmc}}}(m, s, h, p). \quad (4)$$

供应商选择 svc 和 $\overline{\text{svc}}$ 策略的支付分别为

$$\pi_{\text{svc}} = I_{\text{svc}}(m, s) - C_{\text{svc}}(m, s, h, p), \quad (5)$$

$$\pi_{\overline{\text{svc}}} = I_{\text{svc}}(m, s) - C_{\overline{\text{svc}}}(m, s, h, p). \quad (6)$$

监管部门选择 gsp , $\text{gs}\overline{\text{p}}$ 和 $\overline{\text{gs}}\overline{\text{p}}$ 策略的支付分别为

$$\pi_{\text{gsp}} = I_{\text{gsp}}(m, s) - C_{\text{gs}}(m, s, h, p) - C_{\text{gp}}(m, s, h, p), \quad (7)$$

$$\pi_{\text{gs}\overline{\text{p}}} = I_{\text{gsp}}(m, s) - C_{\text{gs}}(m, s, h, p) - C_{\overline{\text{gp}}}(m, s, h, p), \quad (8)$$

$$\pi_{\overline{\text{gs}}\overline{\text{p}}} = I_{\text{gsp}}(m, s) - C_{\overline{\text{gs}}}(m, s, h, p) - C_{\overline{\text{gp}}}(m, s, h, p). \quad (9)$$

在大型客机协同研制过程中,主制造商、供应商与监管部门的行为选择是一个在受各博弈方策略选择影响下,通过学习、反应和策略调整以适应合作环境的过程,因此,各博弈方的博弈行为是重复且动态的,采用演化博弈理论来研究大型客机协同研制中各参与方行动的动态演变路径更加符合现实情况。

3 “能力-态度”下的演化博弈分析

3.1 演化过程的平衡点

通过以上分析可知,主制造商的平均支付为 $\bar{\pi}_{\text{mmc}} = m\pi_{\text{mmc}} + (1-m)\pi_{\overline{\text{mmc}}}$ 。根据 Malthusian 方程^[20],主制造商管控执行合同的能力程度的增长率与其选择该策略时的支付和其平均支付之差成正比,可得主制造商行动的复制动态方程

$$\dot{m} = m(\pi_{\text{mmc}} - \bar{\pi}_{\text{mmc}}) = m(1-m)(\pi_{\text{mmc}} - \pi_{\overline{\text{mmc}}}). \quad (10)$$

同理,供应商行动的复制动态方程为

$$\dot{s} = s(\pi_{\text{svc}} - \bar{\pi}_{\text{svc}}) = s(1-s)(\pi_{\text{svc}} - \pi_{\overline{\text{svc}}}). \quad (11)$$

而对于监管部门来讲,其选择监管策略的程度的增长率与其选择该策略(gsp 和 $\text{gs}\overline{\text{p}}$)时的支付和其平均支付之差成正比,则有

$$\dot{h} = (\varphi(\text{gsp}) + \varphi(\text{gs}\overline{\text{p}}))(\varphi(\text{gp}|\text{gs})\pi_{\text{gsp}} + \varphi(\overline{\text{gp}}|\text{gs})\pi_{\text{gs}\overline{\text{p}}} - \bar{\pi}_{\text{gsp}}),$$

其中 $\varphi(i|j)$ 表示主体在选择策略 j 的条件下选择策略 i 的可能性程度。

由于监管部门监管策略为先验策略的性质,根据贝叶斯公式,有

$$\varphi(\text{gp}|\text{gs}) = \frac{\varphi(\text{gsp})}{\varphi(\text{gsp}) + \varphi(\text{gs}\overline{\text{p}})} = \frac{p}{p + h(1-p)},$$

$$\varphi(\overline{gp}|gs) = \frac{\varphi(gsp)}{\varphi(gsp) + \varphi(gsp\overline{p})} = \frac{h(1-p)}{p+h(1-p)},$$

从而得到

$$\begin{aligned} \dot{h} &= (p+h(1-p)) \left(\frac{p}{p+h(1-p)} \pi_{gsp} + \frac{h(1-p)}{p+h(1-p)} \pi_{gsp\overline{p}} - \overline{\pi}_{gsp} \right) \\ &= (1-h)(1-p)((p+h(1-p))(\pi_{gs} - \pi_{gs\overline{s}}) + p(\pi_{gp} - \pi_{gp\overline{p}})), \end{aligned} \tag{12}$$

其中 $\pi_i = I_{gsp} - C_i, i = gs, gp, gs\overline{s}, gp\overline{p}$.

同理, 监管部门在惩罚策略上的复制动态方程为

$$\dot{p} = p(1-p)((1-h)(\pi_{gs} - \pi_{gs\overline{s}}) + (\pi_{gp} - \pi_{gp\overline{p}})). \tag{13}$$

可得四维动力系统

$$\begin{cases} \dot{m} = m(1-m)(\lambda_m + \alpha_m m + \beta_m s + \gamma_m h + \delta_m p) \\ \dot{s} = s(1-s)(\lambda_s + \alpha_s m + \beta_s s + \gamma_s h + \delta_s p) \\ \dot{h} = (1-h)(1-p)((p+h(1-p))(\lambda_h + \alpha_h m + \beta_h s + \gamma_h h + \delta_h p) + \\ \quad p(\lambda_p + \alpha_p m + \beta_p s + \gamma_p h + \delta_p p)) \\ \dot{p} = p(1-p)((1-h)(\lambda_h + \alpha_h m + \beta_h s + \gamma_h h + \delta_h p) + (\lambda_p + \alpha_p m + \beta_p s + \gamma_p h + \delta_p p)) \\ m \geq s, \end{cases}$$

其中 $\lambda_k, k = m, s, h, p$ 为各博弈方选择参与协同研制策略相比选择不参与协同研制策略的固定支付, 如 $\lambda_m = \lambda_{\overline{m}m\overline{c}} - \lambda_{m\overline{m}c}, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k \geq 0, k = m, s, h, p$ 为各博弈方受各自选择参与协同研制策略的程度 m, s, h 和 p 变动引发的单位变动支付, 如 $\alpha_m = \alpha_{\overline{m}m\overline{c}} + \alpha_{m\overline{m}c}, \beta_m = \beta_{\overline{m}m\overline{c}} + \beta_{m\overline{m}c}, \gamma_m = \gamma_{\overline{m}m\overline{c}} + \gamma_{m\overline{m}c}, \delta_m = \delta_{\overline{m}m\overline{c}} + \delta_{m\overline{m}c}$, 需要注意的是, $\beta_k \geq \alpha_k, k = h, p$.

由 $\dot{m} = 0, \dot{s} = 0, \dot{h} = 0, \dot{p} = 0, m \geq s$ 可得下列结论.

命题 1 该四维动力系统必然存在 9 个博弈三方均采取纯策略的平衡先验策略组合 $(0, 0, (0, 0)), (0, 0, (1, 0)), (0, 0, (0, 1)), (1, 0, (0, 0)), (1, 0, (1, 0)), (1, 0, (0, 1)), (1, 1, (0, 0)), (1, 1, (1, 0)), (1, 1, (0, 1))$.

证明 对于上述四维动力系统, 当 $m = 0$ 或 $1, s = 0$ 或 $1, h = 0$ 或 $1, p = 0$ 或 1 时, 恒有 $\dot{m} = 0, \dot{s} = 0, \dot{h} = 0, \dot{p} = 0$, 又 $m \geq s$, 因此 $(0, 0, 0, 0), (0, 0, 0, 1), (0, 0, 1, 1), (1, 0, 0, 1), (1, 0, 1, 1), (1, 0, 1, 0), (1, 1, 0, 0), (1, 1, 0, 1), (1, 1, 1, 1), (1, 1, 1, 0)$ 是系统的平衡点, 又根据定义 1 可知, 系统先验策略组合代数式形式应为 $(m, s, (p, h(1-p)))$, 则 $(0, 0, (0, 0)), (0, 0, (1, 0)), (0, 0, (0, 1)), (1, 0, (0, 0)), (1, 0, (1, 0)), (1, 0, (0, 1)), (1, 1, (0, 0)), (1, 1, (1, 0)), (1, 1, (0, 1))$ 为博弈三方均采取纯策略的平衡策略组合. 证毕.

上述四维动力系统还可能存在 22 个单个博弈方采取混合策略的平衡策略组合, 13 个两个博弈方采取混合策略的平衡策略组合, 4 个三个博弈方均采取混合策略的平衡策略组合, 这三种平衡混合先验策略组合的情况, 即 $\dot{m} = 0, \dot{s} = 0, \dot{h} = 0, \dot{p} = 0$, 且 m, s, h 和 p 中必有取值在开区间 $(0, 1)$ 上的情况, 这时需要注意各策略组合存在的条件.

对于两个或三个博弈方采取混合策略的平衡策略组合的情况中, 则需要注意当主制造商和供应商均采用混合策略组合时, 即 m, s 均取开区间 $(0, 1)$ 上的数时, 平衡策略组合的存在条件应满足 $m \geq s$.

3.2 平衡点的稳定性分析

根据文献[20-22]的结果, 命题 1 中所得的四维动力系统平衡策略组合未必是演化稳定策略(evolutionary stable strategy, ESS), 为寻求系统的演化稳定策略, 根据 Friedman^[23]提出的方法, 可通过分析该动力系统的雅克比矩阵的局部稳定性判断得到各平衡策略组合的稳定性, 进而给出该系统的演化稳定策略(ESS).

为便于分析问题, 令

$$\begin{aligned} M(m, s, h, p) &= \lambda_m + \alpha_m m + \beta_m s + \gamma_m h + \delta_m p, \\ S(m, s, h, p) &= \lambda_s + \alpha_s m + \beta_s s + \gamma_s h + \delta_s p, \\ H(m, s, h, p) &= \lambda_h + \alpha_h m + \beta_h s + \gamma_h h + \delta_h p, \\ P(m, s, h, p) &= \lambda_p + \alpha_p m + \beta_p s + \gamma_p h + \delta_p p, \end{aligned}$$

则该系统的雅克比矩阵为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix},$$

其中 $a_{11} = (1 - 2m)M + (1 - m)\alpha_m$, $a_{12} = m(1 - m)\beta_m$, $a_{13} = m(1 - m)\gamma_m$, $a_{14} = m(1 - m)\delta_m$,
 $a_{21} = s(1 - s)\alpha_s$, $a_{22} = (1 - 2s)S + (1 - s)\beta_s$, $a_{23} = s(1 - s)\gamma_s$, $a_{24} = s(1 - s)\delta_s$,
 $a_{31} = (1 - h)(1 - p)((p + h(1 - p))\alpha_h + p\alpha_p)$, $a_{32} = (1 - h)(1 - p)((p + h(1 - p))\beta_h + p\beta_p)$,
 $a_{33} = (1 - p)(2hp - 2p - 2h + 1)H - p(1 - p)P + (1 - h)(1 - p)((p + h(1 - p))\gamma_h + p\gamma_p)$,
 $a_{34} = (1 - h)(2hp - 2p - 2h + 1)H + (2p - 1)(h - 1)P + (1 - h)(1 - p)((p + h(1 - p))\delta_h + p\delta_p)$,
 $a_{41} = p(1 - p)((1 - h)\alpha_h + \alpha_p)$, $a_{42} = p(1 - p)((1 - h)\beta_h + \beta_p)$,
 $a_{43} = p(1 - p)(-H + (1 - h)\gamma_h + \gamma_p)$,
 $a_{44} = (1 - 2p)((1 - h)H + P) + p(1 - p)((1 - h)\delta_h + \delta_p)$.

从而可以得到系统各平衡点所对应的平衡(纯、混合)先验策略组合的 \mathbf{J} 的 $\text{Det}(\mathbf{J})$ 和 $\text{Tr}(\mathbf{J})$, 根据微分动力系统的稳定性^[24], 通过判断 $\text{Det}(\mathbf{J})$ 和 $\text{Tr}(\mathbf{J})$ 的符号, 进而判定各平衡策略组合的局部稳定性.

命题 2 在“初创期”情形下 ($m \geq s$), 倘若各博弈方选择不参与协同研制策略时的固定支付远小于选择参与协同研制策略时的固定支付, 即 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k$, $k = m, s, h, p$, 平衡策略组合 $(0, 0, (0, 0))$ 和 $(1, 1, (0, 0))$ 是演化稳定策略组合 (ESS); 而当 $|\lambda_h|, |\lambda_p|$ 较小时, 平衡策略组合 $(0, 0, (1, 0))$ 也是演化稳定策略组合 (ESS); 当 $|\lambda_s|$ 很大时, 平衡策略组合 $(1, 0, (1, 0))$ 和 $(1, 0, (0, 1))$ 也是演化稳定策略组合 (ESS).

证明 由于平衡先验策略组合 $(0, 0, (0, 0))$ 所对应的平衡点是 $(0, 0, 0, 0)$, 其中

$$\begin{aligned} \text{Det}(\mathbf{J}) &= (\lambda_m + \alpha_m)(\lambda_s + \beta_s)\lambda_h(\lambda_h + \lambda_p), \\ \text{Tr}(\mathbf{J}) &= \lambda_m + \alpha_m + \lambda_s + \beta_s + 2\lambda_h + \lambda_p. \end{aligned}$$

则当 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k$, $k = m, s, h, p$ 时, 有 $\text{Det}(\mathbf{J}) > 0$, $\text{Tr}(\mathbf{J}) < 0$. 因此平衡点 $(0, 0, 0, 0)$ 是渐进稳定的, 即平衡先验策略组合 $(0, 0, (0, 0))$ 是 ESS. 同理, 平衡策略组合 $(1, 1, (0, 0))$ 亦是 ESS.

当 $|\lambda_h|, |\lambda_p|$ 较小时, 平衡先验策略组合 $(0, 0, (1, 0))$ 所对应的平衡点 $(0, 0, h', 1)$ ($h' \in [0, 1]$) 的 $\text{Det}(\mathbf{J}) = 0$, $\text{Tr}(\mathbf{J}) = \lambda_m + \gamma_m h' + \delta_m + \alpha_m + \lambda_s + \gamma_s h' + \delta_s + \beta_s - (1 - h')(\lambda_h + \gamma_h h' + \delta_h) - (\lambda_p + \gamma_p h' + \delta_p)$, 在 $(1 - h')|\lambda_h| + |\lambda_p| < |\lambda_m| + |\lambda_s|$ 时, $\text{Tr}(\mathbf{J}) < 0$, 此时平衡策略组合 $(0, 0, (1, 0))$ 是 ESS.

当 $|\lambda_s|$ 很大时, 平衡先验策略组合 $(1, 0, (1, 0))$ 所对应的平衡点 $(1, 0, h', 1)$ ($h' \in [0, 1]$) 的 $\text{Det}(\mathbf{J}) = 0$, 而

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\mathbf{J}) &= -(\lambda_m + \alpha_m + \gamma_m h' + \delta_m) + (\lambda_s + \alpha_s + \gamma_s h' + \delta_s + \beta_s) - \\ &((1 - h')(\lambda_h + \alpha_h + \gamma_h h' + \delta_h) + (\lambda_p + \alpha_p + \gamma_p h' + \delta_p)). \end{aligned}$$

在 $|\lambda_s| > |\lambda_m| + (1 - h')|\lambda_h| + |\lambda_p|$ 时, $\text{Tr}(\mathbf{J}) < 0$, 此时平衡策略组合 $(1, 0, (1, 0))$ 是 ESS. 同理, 可证当 $|\lambda_s| > |\lambda_m| + |\lambda_h|$ 时, 平衡策略组合 $(1, 0, (0, 1))$ 是 ESS. 证毕.

需要注意的是, 当 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k$, $k = m, s, h, p$ 时, 平衡先验策略组合 $(1, 1, (1, 0))$ 所

对应的平衡点是不稳定点, 而 $(0, 0, (0, 1))$, $(1, 0, (0, 0))$ 和 $(1, 1, (0, 1))$ 所对应的平衡点是鞍点。

从命题 2 可知, 1) 当相应博弈方选择不参与协同研制策略时的固定支付远小于选择参与协同研制策略时的固定支付, 若主制造商完全有能力管控执行合同, 则供应商亦会完全有意愿合作执行合同, 监管部门选择不监管也不惩罚策略, 达到 ESS $(1, 1, (0, 0))$, 又 $(1, 1, (1, 0))$ 所对应的平衡点是不稳定点, 因此监管部门不会选择监管且惩罚策略; 若主制造商完全没有能力管控执行合同, 则供应商将会不执行合同, 监管部门选择不监管也不惩罚, 达到 ESS $(0, 0, (0, 0))$. 2) 当监管部门不选择与选择监管策略时的固定支付之差以及不选择与选择惩罚策略时的固定支付之差均较小, 若主制造商无能力管控执行合同, 供应商亦无意愿合作执行合同, 而监管部门选择监管且惩罚策略, 达到 ESS $(0, 0, (1, 0))$. 3) 当供应商选择无意愿合作执行与选择有意愿合作执行时的固定支付之差相对较大, 即便主制造商完全有能力管控执行, 供应商都选择无意愿合作执行策略, 监管部门选择监管且惩罚或者选择监管但不惩罚, 达到 ESS $(1, 0, (1, 0))$ 或 $(1, 0, (0, 1))$.

因此, 在 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, k = m, s, h, p$ 情形下, 我国主制造商应尽可能提升自己的能力直至完全有能力管控执行合同, 各国供应商才可能会选择完全有意愿合作执行合同. 这是由于尽管当 $|\lambda_h|, |\lambda_p|$ 较小, 或 $|\lambda_s|$ 很大时, 第三方监管部门会采取监管或者惩罚的措施对主制造商和供应商执行合同的行为加以约束, 供应商都选择无意愿合作执行策略, 依旧无法调动供应商的参与协同研制的积极性。

命题 3 倘若各博弈方选择不参与协同研制策略时的固定支付大于选择参与协同研制策略时的固定支付, 即 $\lambda_k > 0, k = m, s, h, p$, 平衡策略组合 $(1, 1, (1, 0))$ 是演化稳定策略组合(ESS); 而当 $|\lambda_h|, |\lambda_p|$ 较大时, 平衡策略组合 $(0, 0, (1, 0))$ 也是演化稳定策略组合(ESS); 当 $|\lambda_s|$ 较小时, 平衡策略组合 $(1, 0, (1, 0))$ 和 $(1, 0, (0, 1))$ 也是演化稳定策略组合(ESS)。

该命题 3 的证明与命题 2 证明类似, 值得注意的是 $\lambda_k > 0, k = m, s, h, p$ 时, 平衡先验策略组合 $(0, 0, (0, 0))$ 和 $(1, 1, (0, 0))$ 所对应的平衡点是不稳定点, 而 $(0, 0, (0, 1))$, $(1, 0, (0, 0))$ 和 $(1, 1, (0, 1))$ 所对应的平衡点依旧是鞍点。

由于大型客机协同研制过程的复杂性, 命题 3 假设的情况是存在的, 比如, 当主制造商或者供应商不参与协同研制时, 在现实中即为违约, 其固定支付很有可能大于参与协同研制时的固定支付; 而对于监管部门而言, 当其选择不监管或者不惩罚时, 则会面临社会对其失信失责的指责甚至政府对其经济上的惩罚, 其固定支付亦有可能大于其选择监管或者惩罚时的固定支付, 因此存在 $\lambda_k > 0, k = m, s, h, p$ 这样的情况。

从命题 3 可知, 1) 当相应博弈方选择不参与协同研制策略时的固定支付大于选择参与协同研制策略时的固定支付, 若主制造商有能力管控执行, 供应商亦有意愿合作执行, 监管部门选择监管且惩罚策略, 达到 ESS $(1, 1, (1, 0))$, 又 $(1, 1, (0, 0))$ 所对应的平衡点是不稳定点, 因此监管部门不会选择既不监管也不惩罚策略. 2) 当监管部门不选择与选择监管策略时的固定支付之差以及不选择与选择惩罚策略时的固定支付之差均较大, 若主制造商无能力管控执行合同, 供应商亦无意愿合作执行合同, 监管部门选择监管且惩罚策略, 达到 ESS $(0, 0, (1, 0))$, 又 $(0, 0, (0, 0))$ 所对应的平衡点是不稳定点, 因此监管部门不会选择既不监管也不惩罚策略. 3) 当供应商选择无意愿合作执行与选择有意愿合作执行时的固定支付之差相对较小, 即便主制造商完全有能力管控执行, 供应商都选择无意愿合作执行策略, 监管部门选择监管且惩罚策略或者选择监管但不惩罚策略, 达到 ESS $(1, 0, (1, 0))$ 或 $(1, 0, (0, 1))$ 。

因此, 在 $\lambda_k > 0, k = m, s, h, p$ 情形下, 我国主制造商不仅要提升自己的能力, 更应增加与各国供应商之间的协调, 使供应商尽可能实时了解主制造商能力提升情况. 尤其当 $|\lambda_s|$ 较小时, 无论第三方监管部门是否选择监管或者惩罚策略, 各国供应商都极有可能无意愿合作执行合同. 另外, 我国主制造商应尽量避免 $|\lambda_h|, |\lambda_p|$ 较大这种情况发生, 采取措施减少监管部门不选择监管或惩罚策略的固定成本, 或者增加其选择监管或者惩罚策略的固定成本。

命题 4 在“初创期”情形下($m \geq s$), 倘若 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, k = m, s, p$, 而 $\lambda_h > 0$, 平衡策略组合 $(0, 0, (0, 1))$ 是演化稳定策略组合(ESS)。

从命题4可知,当监管部门选择不监管时的固定支付大于监管时的固定支付,而其余各博弈方选择不参与协同研制策略时的固定支付远小于选择参与协同研制策略时的固定支付,若主制造商无能力管控执行,供应商亦无意愿合作执行,监管部门选择监管但不惩罚策略,达到ESS(0,0,(0,1)).

由于在 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, k = m, s, p$,而 $\lambda_h > 0$ 情形下,尽管第三方监管部门最终会选择监管但不惩罚策略,但各国供应商无意愿与能力较弱的我国主制造商合作.此时,可考虑采取措施改变 λ_h 的符号,如适当增加与监管部门的交易成本,增加其选择监管策略的固定成本,或者减少监管部门选择不监管策略的固定成本,促使达到命题2情形下的平衡策略组合状态(1,1,(0,0)),由此实现主制造商完全有能力管控执行合同,供应商完全有意愿合作执行合同.

命题5 在“初创期”情形下($m \geq s$),倘若 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, k = s, h, p$,而 $\lambda_m > 0$,平衡策略组合(1,0,(0,0))是演化稳定策略组合(ESS).

从命题5可知,当主制造商无能力管控执行时的固定支付大于有能力管控执行时的固定支付,而其余各博弈方选择不参与协同研制策略时的固定支付远小于选择参与协同研制策略时的固定支付,若主制造商有能力管控执行,供应商却无意愿合作执行,监管部门选择不监管也不惩罚策略,达到ESS(1,0,(0,0)).

由于在 $\lambda_k < 0$ 且 $|\lambda_k| \gg \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, k = s, h, p$,而 $\lambda_m > 0$ 情形下,尽管我国主制造商完全有能力管控执行合同,各国供应商最终也无意愿与主制造商合作,第三方监管部门最终也不会采取措施以支持主制造商.此时,可考虑改变 λ_m 的符号,减少主制造商无能力管控执行合同时的固定成本,或者增加其有能力管控执行合同时的固定成本,促使达到命题2情形下的平衡策略组合状态(1,1,(0,0)),从而有供应商有意愿与有能力的主制造商合作.

命题6 在“初创期”情形下($m \geq s$),倘若 $\lambda_k > 0, k = m, s, h$,而 $\lambda_p < 0$ 且 $|\lambda_p| \gg \alpha_p, \beta_p, \gamma_p, \delta_p$,平衡策略组合(1,1,(0,1))是演化稳定策略组合(ESS).

从命题6可知,当监管部门选择不惩罚时的固定支付远小于惩罚时的固定支付,而其余各博弈方选择不参与协同研制策略时的固定支付大于选择参与协同研制策略时的固定支付,若主制造商有能力管控执行,供应商亦有意愿合作执行,监管部门选择监管但不惩罚策略,达到ESS(1,1,(0,1)).

因此,在 $\lambda_k > 0, k = m, s, h$,而 $\lambda_p < 0$ 且 $|\lambda_p| \gg \alpha_p, \beta_p, \gamma_p, \delta_p$ 情形下所取得的各主体平衡策略选择情况是较为理想的.此时,我国主制造商不仅应提升自己的能力,亦应采取积极措施积极引导维持该情形长期稳定的发展.

考虑参数讨论的复杂性,对于混合平衡策略组合的局部稳定性的讨论分析将在下一节中通过数值算例进行说明.

4 算例分析

在我国大型客机协同研制过程中,假设就发动机的协同研制而言,设定下列分析参数,并进行分析.

主制造商无能力管控执行合同时的固定支付与有能力管控执行合同时的固定支付之差为 $\lambda_m = -40$;发动机供应商无意愿合作执行合同时的固定支付与有意愿合作执行合同时的固定支付之差为 $\lambda_s = -30$,且处于协同研制的“初创期”, $m \geq s$;监管部门选择不监管策略时的固定支付与选择监管策略时的固定支付之差为 $\lambda_h = -20$;监管部门选择不惩罚策略时的固定支付与选择惩罚策略时的固定支付之差为 $\lambda_p = -40$.另外,受主制造商管控执行合同的能力程度的单位变动、发动机供应商合作执行合同的意愿程度的单位变动以及监管部门选择监管策略和惩罚策略的程度的单位变动四种情况下的影响,主制造商无能力管控执行合同时的单位支付与有能力管控执行合同时的单位支付之和分别为 $\alpha_m = 10, \beta_m = 20, \gamma_m = 20, \delta_m = 10$;供应商无意愿合作执行合同时的单位支付与有意愿合作执行合同时的单位支付之和分别为 $\alpha_s = 7, \beta_s = 15, \gamma_s = 10, \delta_s = 15$;监管部门选择不监管策略时的单位支付与

选择监管策略时的单位支付之和分别为 $\alpha_h = 6, \beta_h = 10, \gamma_h = 10, \delta_h = 30$; 监管部门选择不惩罚策略时的单位支付与选择惩罚策略时的单位支付之和分别为 $\alpha_p = 10, \beta_p = 15, \gamma_p = 10, \delta_p = 50$.

通过分析该数值算例下系统的动力系统方程及其平衡策略组合的存在条件, 可知该系统存在18个平衡策略组合, 经计算各平衡策略组合下系统雅可比矩阵的行列式值 $\text{Det}(\mathbf{J})$ 和迹 $\text{Tr}(\mathbf{J})$, 可得该系统各平衡先验策略组合的局部稳定性判断. 从而得到该数值算例下各平衡先验策略组合所对应平衡点的局部稳定性结果见表1, 可以看出, 该系统不仅存在博弈三方均采用纯策略的平衡策略组合, 同时也存在平衡混合先验策略组合, 且混合策略组合 $(0, 0, (3/4, 0)), (1, 1, (19/80, 0))$ 和 $(1, 8/15, (1, 0))$ 是 ESS.

表1 各平衡策略组合所对应平衡点的局部稳定性

Table 1 The local stability of the equilibrium point corresponding to each equilibrium strategy combination

局部稳定性	平衡策略组合
EES	$(0, 0, (0, 0)), (0, 0, (1, 0)), (1, 0, (1, 0)), (1, 1, (0, 0)), (1, 1, (1, 0)), (1, 1, (0, 1)), (0, 0, (3/4, 0)), (1, 1, (19/80, 0)), (1, 8/15, (1, 0))$
鞍点	$(0, 0, (0, 1)), (1, 0, (0, 0)), (1, 0, (2/5, 3/5)), (1, 1, (1/10, 9/10)), (1, 1, (0, 2/5)), (1, 13/15, (0, 1))$
不稳定点	$(1, 0, (0, 1)), (0, 0, (3/5, 2/5)), (1, 0, (11/20, 0))$

从主制造商无能力管控执行合同的角度来看, 若主制造商管控执行合同的能力程度随着时间的推移而有增强, 且供应商亦无意愿合作执行合同时, 监管部门选择“监管但不惩罚”策略的程度随着时间的推移逐渐降为0, 此时监管部门既有可能选择“监管并惩罚”策略, 也有可能选择“既不监管也不惩罚”策略, 即系统达到 ESS $(0, 0, (0, 0))$ 或 $(0, 0, (1, 0))$, 另外, 监管部门亦有可能以 $3/4$ 的程度选择“监管并惩罚”策略, 并以 $1/4$ 的程度选择“既不监管也不惩罚”策略, 即系统达到 ESS $(0, 0, (3/4, 0))$.

从主制造商管控执行合同的能力程度在 $(0, 1)$ 之间变动的角度来看, 1) 无论监管部门选择何种策略, 主制造商管控执行合同的能力程度在较低范围内变动时, 供应商合作执行合同的意愿程度变化不大, 当主制造商管控执行合同的能力程度达到一定界限时, 供应商合作执行合同的意愿程度开始随之变化的速度变大, 这一界限表现为一个拐点, 该拐点位于 $[0.2, 0.4]$ 区间上. 2) 当监管部门选择“监管并惩罚”策略的程度为 $11/20$, 即系统处于不稳定平衡策略组合 $(1, 0, (11/20, 0))$ 时, 且供应商无意愿合作执行合同, 随着主制造商管控执行合同的能力程度减弱, 监管部门最终有可能完全选择“监管并惩罚”策略, 也有可能选择“既不监管也不惩罚”策略, 即系统达到 ESS $(0, 0, (0, 0))$ 或 $(0, 0, (1, 0))$, 且随着时间的推移, 监管部门选择“监管并惩罚”策略的程度变化速度先快后慢. 3) 当监管部门选择“监管并惩罚”策略的程度为 $2/5$, 且选择“监管但不惩罚”策略的程度为 $3/5$, 即系统处于鞍点所对应的平衡策略组合 $(1, 0, (2/5, 3/5))$ 时, 且供应商无意愿合作执行合同, 随着主制造商管控执行合同的能力程度减弱, 监管部门最终选择“既不监管也不惩罚”策略, 即系统达到 ESS $(0, 0, (1, 0))$, 且随着时间的推移, 监管部门选择“监管并惩罚”策略的程度变化速度先快后慢; 当供应商无意愿合作执行合同时, 主制造商管控执行合同的能力程度降低时, 随着时间的推移, 监管部门有可能仍选择“监管但不惩罚”策略, 直至主制造商无能力管控执行合同时, 监管部门不再选择“监管但不惩罚”策略, 也有可能选择“监管但不惩罚”策略的程度先快后慢降为0, 即系统达到 ESS $(0, 0, (0, 0))$ 或 $(0, 0, (1, 0))$. 4) 当主制造商管控执行合同的能力程度增强时, 而监管部门选择“监管但不惩罚”策略的程度降低, 供应商合作执行合同的意愿程度亦降低, 且变化速度先快后慢.

从主制造商完全有能力管控执行合同的角度来看, 1) 当主制造商管控执行合同的能力程度不变, 监管部门选择“监管并惩罚”策略的程度为 $11/20$ 时, 若供应商无意愿合作执行合同, 监管部门最终会完全选择“监管并惩罚”策略. 2) 当主制造商管控执行合同的能力程度不变, 监管部门选择“监管并惩罚”策略的程度为 $1/10$ 且选择“监管但不惩罚”策略的程度为 $9/10$ 时, 若供应商亦完全有意愿合作执行合同, 监管部门选择“监管并惩罚”策略的程度或降为0, 或升为 $19/80$, 或升为1, 而选择“监管但不惩罚”策略的程度或升为1, 或降为 $2/5$ 并最终降为0, 即系统达到 ESS $(1, 1, (0, 0)), (1, 1, (1, 0)), (1, 1, (0, 1)), (1, 1, (19/80, 0))$.

通过上述算例可得,该系统变化与现实吻合,符合博弈主体认知规律,在数值较低范围内,随着时间的推移系统的变化率较小,在数值较高范围内,随着时间的推移系统变化率逐渐增大.另外,当主制造商无能力管控执行合同时,系统的演化稳定策略组合(ESS)有 $(0, 0, (0, 0))$ 与 $(0, 0, (1, 0))$,即此时供应商亦无意愿合作执行合同,而监管部门有可能会选择“监管并惩罚”策略,也有可能选择“既不监管也不惩罚”策略,同时,从该算例中可以看出,当主制造商管控执行合同的能力程度 $(0, 1)$ 之间变动时,监管部门最终是否选择“监管并惩罚”策略与其最初选择“监管并惩罚”策略的程度有关.

5 结束语

本文运用演化博弈的理论知识,研究处于“初创期”的我国大型客机主制造商、供应商及监管部门策略选择的演化机制.研究表明,供应商与监管部门的策略选择与其选择策略的固定成本、最初选择策略的程度以及主制造商管控执行合同的能力程度密切相关.在后续的研究中将尝试考虑主制造商和供应商策略信息的对称性因素,探究“初创期”情形下大型客机协同研制供应链三方态度的演化机理,主制造商和多个供应商协同研制合作态度的相互影响也有待研究.

参考文献:

- [1] Van Mieghem J A. Coordinating investment, production, and subcontracting. *Management Science*, 1999, 45(7): 954–971.
- [2] Cachon G, Fisher M. Supply chain inventory management and the value of shared information. *Management Science*, 2000, 46(3): 436–443.
- [3] Carr S, Duenyas I. Optimal admission control and sequencing in a make-to-stock/make-to-order production system. *Operations Research*, 2000, 48(5): 709–720.
- [4] 李 勇, 张 异, 杨秀芬, 等. 供应链中制造商-供应商合作研发博弈模型. *系统工程学报*, 2005, 20(1): 12–18.
Li Y, Zhang Y, Yang X T, et al. Cooperative R&D game models of manufacturer-supplier in supply chain. *Journal of Systems Engineering*, 2005, 20(1):12–18. (in Chinese)
- [5] Zhou Z Z, Eric Johnson M. Quality risk ratings in global supply chains. *Production and Operations Management*, 2014, 23(12): 2152–2162.
- [6] Wang J Q, Shin H. The impact of contracts and competition on upstream innovation in a supply chain. *Production and Operations Management*, 2015, 24(1): 134–146.
- [7] Jiang L. Managing supplier competition and sourcing sequence for component manufacturing. *Production and Operations Management*, 2015, 24(2): 287–310.
- [8] Chen Y J, Deng M C. Information sharing in a manufacturer-supplier relationship: Suppliers' incentive and production efficiency. *Production and Operations Management*, 2015, 24(4): 619–633.
- [9] Wu D S, Luo C C, Wang H F, et al. Bi-level programming merger evaluation and application to banking operations. *Production and Operations Management*, 2016, 25(3): 498–515.
- [10] 李 波, 孙 鹏, 李庆华. 双渠道供应链中信息共享价值研究. *系统工程学报*, 2015, 30(4):530–538.
Li B, Sun P, Li Q H. Information sharing value in dual-channel supply chain. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(4): 530–538. (in Chinese)
- [11] Calvo E, Martínez-de-Albéniz V. Sourcing strategies and supplier incentives for short-life-cycle goods. *Management Science*, 2016, 62(2): 436–455.
- [12] Huang X, Boyaci T, Gümüs M, et al. United we stand or divided we stand: Strategic supplier alliances under order default risk. *Management Science*, 2016, 62(5): 1297–1315.
- [13] 王翥华, 黄 鑫, 陈 蓉. 基于 SCOR 模型的大型客机协同研制供应链风险识别研究. *金陵科技学院学报(社会科学版)*, 2015, 29(4):16–19.
Wang H H, Huang X, Chen R. Research on risk recognition of supply chain for large aircraft collaborative development based on SCOR model. *Journal of Jinling Institute of Technology(Social Science Edition)*, 2015, 29(4): 16–19. (in Chinese)

- [14] 陈洪转, 方志耕, 刘思峰, 等. 复杂产品主制造商-供应商协同合作最优成本分担激励研究. 中国管理科学, 2014, 22(9): 98-105.
Chen H Z, Fang Z G, Liu S F, et al. The optimal cost-sharing incentive strategy of main manufacturer-suppliers for complex product. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(9): 98-105. (in Chinese)
- [15] 程永波, 宋露露, 陈洪转, 等. 复杂产品多主体协同创新最优资源整合策略. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11): 2867-2878.
Cheng Y B, Song L L, Chen H Z, et al. Study on optimal resources integration strategy in multi-agent innovation cooperation of complex products. Systems Engineering: Theory and Practice, 2016, 36(11): 2867-2878. (in Chinese)
- [16] Cai G, Kock N. An evolutionary game theoretic perspective on e-collaboration: The collaboration effort and media relativeness. European Journal of Operational Research, 2009, 194(3): 821-833.
- [17] 金 帅, 杜建国, 盛昭瀚. 区域环境保护行动的演化博弈分析. 系统工程理论与实践, 2015, 35(12): 3107-3118.
Jin S, Du J G, Sheng Z H. Evolutionary game analysis of regional environmental programme. Systems Engineering: Theory and Practice, 2015, 35(12): 3107-3118. (in Chinese)
- [18] 罗建强, 李伟鹏, 赵艳萍. 基于演化博弈的制造企业服务衍生稳定性研究. 系统工程学报, 2016, 31(6): 761-771.
Luo J Q, Li W P, Zhao Y P. Stability analysis of manufacturing enterprise service derivative based on evolutionary game theory. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(6): 761-771. (in Chinese)
- [19] Dong L X, Narasimhan C, Zhu K J. Product line pricing in a supply chain. Management Science, 2009, 55(10): 1704-1717.
- [20] Weibull J W. Evolutionary Game Theory. Cambridge: The MIT Press, 1995.
- [21] Selten R. A note on evolutionarily stable strategies in asymmetric animal conflicts. Journal of Theoretical Biology, 1980, 84(1): 93-101.
- [22] Christian M, Daniel S. Game Theory and Economics. London: Palgrave Macmillan, 2003.
- [23] Friedman D. Evolutionary games in Economics. Econometrica, 1991, 59(3): 637-666.
- [24] 张锦炎. 常微分方程几何理论与分支问题. 北京: 北京大学出版社, 1981, 31-38.
Zhang J Y. Geometric Theory and Bifurcation Problems of Ordinary Differential Equations. Beijing: Peking University Press, 1981, 31-38. (in Chinese)

作者简介:

张 明(1989—), 女, 山东东营人, 博士生, 研究方向: 供应链建模与博弈分析, Email: rynsanny@163.com;

朱建军(1976—), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 供应链建模与博弈分析, 决策理论与方法等, Email: zhujianjun@nuaa.edu.cn;

王嵩华(1977—), 女, 辽宁灯塔人, 讲师, 研究方向: 供应链管理, 物流管理, 决策理论与方法, Email: wanghehua@nuaa.edu.cn.