

基于动态演化博弈的装备采购模型仿真研究

李蕴哲, 董鹏, 叶卫民, 文昊林

引用本文

李蕴哲, 董鹏, 叶卫民, 文昊林. [基于动态演化博弈的装备采购模型仿真研究](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(11A): 220900051-10.

LI Yunzhe, DONG Peng, YE Weimin, WEN Haolin. [Simulation of Equipment Procurement Model Based on Dynamic Evolutionary Game](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(11A): 220900051-10.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于智能体的舰船任务可靠度仿真系统设计](#)

Design of Ship Mission Reliability Simulation System Based on Agent

计算机科学, 2023, 50(11A): 220800272-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220800272>

[区块链架构下医疗数据共享的三方演化博弈研究](#)

Tripartite Evolutionary Game Analysis of Medical Data Sharing Under Blockchain Architecture

计算机科学, 2023, 50(6A): 221000080-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221000080>

[基于前景理论的微信健康信息质量三方博弈分析](#)

Evolutionary Game Analysis of WeChat Health Information Quality Optimization Based on Prospect Theory

计算机科学, 2022, 49(6A): 694-704. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210900186>

[基于演化博弈的理性拜占庭容错共识算法](#)

Rational PBFT Consensus Algorithm with Evolutionary Game

计算机科学, 2022, 49(3): 360-370. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210900110>

[基于演化博弈的数据收益权分配机制设计](#)

Mechanism Design of Right to Earnings of Data Utilization Based on Evolutionary Game Model

计算机科学, 2021, 48(3): 144-150. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201100056>

基于动态演化博弈的装备采购模型仿真研究

李蕴哲 董鹏 叶卫民 文昊林

海军工程大学管理工程与装备经济系 武汉 430033

(1327422511@qq.com)

摘要 针对装备采购,建立了以采购方、承包商为主体的双方采购模型和以采购方、主承包商、分承包商为主体的三方采购模型。基于动态演化博弈理论,分析了两种采购模型下各主体的策略选择及博弈均衡,运用 AnyLogic 动态模拟博弈演化过程并进行数值仿真分析。双方博弈模型中,承包商的演化均衡策略为不积极履行合同;而三方博弈模型可通过适当设计,使得主承包商积极履行合同,从而更好地保证质量。故采购方在进行采购模式选择时,选择采购方、主承包商和分承包商的模式更有利,并且需要合理设置监管正确率、合同罚金、抽查率等条款。

关键词 装备采购;采购合同;演化博弈;演化均衡策略;仿真模拟

中图分类号 TP391.9

Simulation of Equipment Procurement Model Based on Dynamic Evolutionary Game

LI Yunzhe, DONG Peng, YE Weimin and WEN Haolin

Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract Aiming at the equipment procurement problem, a two-party procurement model with the purchaser and the contractor as the main body and a three-party procurement model with the purchaser, the main contractor and the sub contractor as the main body are established. Based on the dynamic evolutionary game theory, the strategy selection and game equilibrium of each subject under the two procurement models are analyzed, and the game evolution process is dynamically simulated and analyzed by numerical simulation using AnyLogic. In the game model of both parties, the evolutionary equilibrium strategy of the contractor is not actively perform the contract. The three-party game model can make the main contractor actively perform the contract through proper design, so as to better guarantee the quality. Therefore, when the purchaser selects the procurement mode, it is more advantageous to select the mode of the purchaser, the main contractor and the sub contractor, and it is necessary to reasonably set the terms such as the supervision accuracy rate, the contract penalty and the spot check rate.

Keywords Equipment procurement, Purchase contract, Evolutionary game, Evolutionary equilibrium strategy, Analogue simulation

由于装备器材的复杂性和社会分工的存在,装备器材在定制采购时,往往很难找到一家拥有完整的工作线并且可独立承制采购任务的供应商。因此,装备器材的采购定制可能存在两种情况:(1)从不同功能部件出发,分别找到对应的多家供应商,分别定制采购;(2)根据装备的主要功能选择一家供应商(本文称其为主承包商)进行采购。

Ma 等对近 20 年间 CNKI 中文期刊全文数据库进行了统计分析并指出,不同于国外的装备采购研究主要偏重于利用数学模型求解实际具体问题,国内针对装备采购领域的研究方向更偏向于理论阐述、合理性建议和法制建设的探索,缺乏具体的实践分析和可行性政策建议^[1]。本文针对国内装备采购领域研究缺乏具体的实践分析及可行性政策建议等问题,建立装备采购模型,基于动态演化博弈理论^[2],运用 AnyLogic 对两种采购方式进行仿真分析,比较判断两种模式的优劣,从而为实际装备采购提供一定参考。

其中,对于第一种情况,即采购方(设为 A)和多家供应商(假设有 2 个,设为 B 和 C)分别构成多组(本文假设 2 组)

博弈关系,本文称该情况下的博弈为双方博弈;对于第二种情况,即采购方选择的一家供应商,实质上为主承包商(设为 D),D 可以将备附件等的订购工作分包给其他供应商(为简化计算,假设只有一家分承包商 E),采购方验收产品时,主承包商对分承包商交付的产品负全部责任,采购方 A 对主承包商 D 进行相应的奖惩,主承包商 D 对分承包商 E 再进行相应的奖惩^[3],本文称该情况下的博弈为三方博弈。

采购合同签订后,其合同价格、奖惩、机制等都已确定,因此本文主要从可动态变化的采购方自身的监管水平,即监管正确率的角度进行分析,以得到双方博弈和三方博弈两种模型下,监管正确率对两种模型的影响,并得出监管正确率、合同罚金、抽查率等条款不同关系下,各方所作出的不同选择。

1 基于双方博弈的采购模型

由于 B 和 C 二者地位等同,A 与承包商 B 之间的博弈结果同样适用于 A 与 C 之间的博弈,不失一般性,只需考虑 A 与 B 之间的博弈即可。

基金项目:2021 国家社科基金军事学项目(2021-SKJJ-C-017)

This work was supported by the Military Science Project of National Social Science Foundation of China in 2021(2021-SKJJ-C-017).

通信作者:文昊林(457813217@qq.com)

双方博弈的情况下,对于承包商 B ,策略集为: $S_b = \{ \text{积极履行 } S_{b1}, \text{不积极履行 } S_{b2} \}$ 。其中,若积极履行合同被 A 方发现,将获得额外收益 e ,不积极履行被发现则会受到相应的处罚。对于 A 方,其策略集为: $S_a = \{ \text{积极监管 } S_{a1}, \text{不积极监管 } S_{a2} \}$ 。

1.1 参数设定及假设

承包商 B 积极履行合同被发现时,将因积极履行带来企业声誉等而获得额外收益,记为 e ,积极履行合同成本设为 c_1 ,且 $e > c_1$,不积极履行合同被发现时被处以罚金,设为 f ; A 方积极监管成本为 c_2 ,且 $f > c_2$,承包商 B 不积极履行会为 A 方带来损失 m ,且 $m > c_2$ 。由于信息不对称的存在,承包商 B 作为合同的具体履行方,拥有更多的信息,因此承包商 B 采取积极策略所需成本低于 A 方采取积极策略时的成本,即 $c_1 < c_2$; 设 A 方、 B 方积极监管和积极履行的概率分别为 y 和 x 。

设 A 方正确发现承包商 B 采取的行为策略的概率为 p 。将受到处罚的承包商 B 可能会以 θ 的概率采取贿赂成本为 h 的行为以逃避处罚。

假设 1 在合同的履行过程中,存在多个单位进行相互博弈,为了简化模型、方便分析,只考虑一个承包商与 A 方之间的两两博弈。

假设 2 只有在 A 方采取不积极监管策略时, A 方群体中有 θ 的比例获得贿赂成本 h 。

假设 3 合同满足承包商 B 的保留效用约束,由于所有收益中均线性含有合同价格减去承包商 B 正常履行时成本,故省去合同价格减去承包商 B 正常履行时成本不影响模型及计算结果。为简化计算,本文将省略合同价格减去承包商 B 正常履行时的成本。

A 方与 B 方的收益矩阵如表 1 所列。

表 1 A 方与承包商 B 的收益矩阵

Table 1 Income matrix of party A and contractor B

承包商 B	A 方		
	积极监管 (y)		不积极监管 ($1-y$)
	发现 (p)	未发现 ($1-p$)	
积极履行 (x)	$(e-c_1, -c_2)$	$(-c_1, -c_2)$	$(-c_1, 0)$
不积极履行 ($1-x$)	$(-f, -c_2+f)$	$(0, -c_2-m)$	$(0, -m)$

1.2 双方博弈模型及求解

由于博弈双方的有限理性,博弈方不可能一开始就找到最优策略以及最优均衡点,博弈方需要经过一段时间的模仿和试错,最终所有博弈方会趋于某个稳定的策略。

复制动态实际上是描述某一特定策略在一个种群中被采用的频数或频度的动态微分方程^[4-6]。

承包商 B 积极履行合同的期望收益为:

$$E(B_1) = y[p(e-c_1) + (1-p)(-c_1)] + (1-y)(-c_1) = ype - c_1$$

承包商 B 不积极履行合同的期望收益为:

$$E(B_2) = yp(-f)$$

承包商 B 的期望收益为:

$$E(B) = xE(B_1) + (1-x)E(B_2)$$

承包商 B 积极履行合同的复制动态方程为:

$$F(B_0) = x[E(B_1) - E(B)] = x(1-x)(ypf + ype - c_1)$$

同理, A 方积极监管的期望收益为:

$$E(A_1) = (1-x)(pf + pm - m) - c_2$$

A 方不积极监管的期望收益为:

$$E(A_2) = -m(1-x)$$

A 方的期望收益为:

$$E(A) = yE(A_1) + (1-y)E(A_2)$$

A 方积极监管的复制动态方程为:

$$F(A_0) = y[E(A_1) - E(A)] = y(1-y)[(1-x)(pf + pm) - c_2]$$

求解均衡点,令

$$F(A_0) = 0, F(B_0) = 0$$

即:

$$x[E(B_1) - E(B)] = x(1-x)(ypf + ype - c_1) = 0$$

$$y[E(A_1) - E(A)] = y(1-y)[(1-x)(pf + pm) - c_2] = 0$$

可得均衡点:

$$M_1(0, 0), M_2(1, 0), M_3(0, 1), M_4(1, 1),$$

$$M_5\left(\frac{pf + pm - c_2}{pf + pm}, \frac{c_1}{ep + fp}\right)$$

1) 对于 $F(A_0) = y(1-y)(pf - pfx - c_2)$ 。当 $[(1-x) * (pf + pm) - c_2] < 0$, 即 $x > (pf - c_2 + mp) / (pf + mp)$ 时, 在 $y=0$ 时 $F(A_0)$ 的导数小于 0, 在 $y=1$ 时, $F(A_0)$ 的导数大于 0, 故其趋近于 $y=0$; 当 $x < (pf - c_2) / pf$ 时, 在 $y=0$ 时 $F(A_0)$ 的导数大于 0, 在 $y=1$ 时, $F(A_0)$ 的导数小于 0, 故其趋近于 $y=1$ 。

2) 对于 $F(A_0) = y(1-y)(pf - pfx - c_2)$ 。 $ypf + ype - c_1 < 0$, 即 $y < c_1 / (pf + pe)$ 时在 $x=0$ 时 $F(B_0)$ 的导数小于 0, 在 $x=1$ 时 $F(B_0)$ 的导数大于 0, 故其趋近于 $x=0$; 当 $y > c_1 / (pf + pe)$ 时, 在 $x=0$ 时 $F(A_0)$ 的导数大于 0, 在 $x=1$ 时, $F(B_0)$ 的导数小于 0, 故其趋近于 $x=1$ 。

故其动态演化过程为:

当 $p < c_1 / (f + e)$ 且 $p < c_2 / (f + m)$ 时, $\frac{pf + pm - c_2}{pf + pm} < 0, \frac{c_1}{ep + fp} > 1$, ESS 点为 $(0, 0)$, 相位变化如图 1 所示。

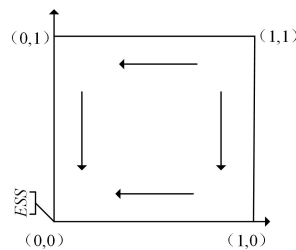


图 1 演化动态相位图 I

Fig. 1 Evolution dynamic phase diagram I

当 $c_1 / (f + e) < p < c_2 / (f + m)$ 时, $\frac{pf + pm - c_2}{pf + pm} < 0, 0 < \frac{c_1}{ep + fp} < 1$, ESS 点为 $(0, 0)$, 相位变化如图 2 所示。

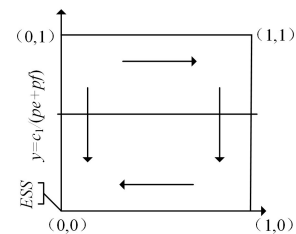


图 2 演化动态相位图 II

Fig. 2 Evolution dynamic phase diagram II

当 $c_1/(f+e) > p > c_2/(f+m)$ 时, $1 > \frac{(pf+pm-c_2)}{pf+pm} > 0, \frac{c_1}{(ep+fp)} > 1$, ESS 点为 $(0,1)$, 相位变化如图 3 所示。

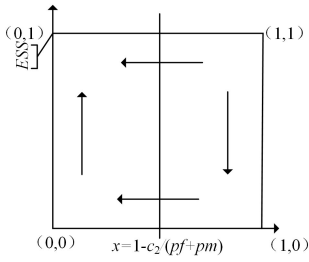


图 3 演化动态相位图 III

Fig. 3 Evolution dynamic phase diagram III

当 $p > c_1/(f+e)$ 且 $p > c_2/(f+m)$, $1 > \frac{(pf+pm-c_2)}{pf+pm} > 0, 1 > \frac{c_1}{(ep+fp)} > 0$, 无 ESS 点, 相位变化如图 4 所示。

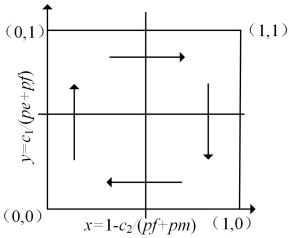


图 4 演化动态相位图 IV

Fig. 4 Evolution dynamic phase diagram IV

故: 1) 当 $p < c_1/(f+e)$ 且 $p < c_2/(f+m)$ 时, 系统渐进稳定于 $(0,0)$, 即演化均衡策略为 {采购方 A 不积极监管, 承包方 B 不积极履行合同};

2) 当 $c_1/(f+e) < p < c_2/(f+m)$ 时, 系统渐进稳定于 $(0,0)$, 即演化均衡策略为 {采购方 A 不积极监管, 承包方 B 不积极履行合同};

3) 当 $c_1/(f+e) > p > c_2/(f+m)$ 时, 系统渐进稳定于 $(0,$

1)。即演化均衡策略为 {采购方 A 积极监管但承包方 B 不积极履行合同}。

2 基于三方博弈的采购模型

三方博弈的情况下, 对于承包商 D, 策略集为: {积极履行, 不积极履行}, 其中, 如果积极履行合同被 A 方发现将获得额外收益 e , 而如果不积极履行被发现则会受到相应的处罚; 对于承包商 E, 策略集为: {认真工作, 不认真工作}; 对于 A 方, 其策略集为: {积极监管, 不积极监管}。

2.1 参数设定及假设

相关参数定义如下:

c_1 : 主承包商 D 积极履行合同成本;

c_2 : 采购方 A 积极监管成本;

c_3 : 分承包商 E 认真工作成本;

f : D 不积极履行合同受到 A 的罚金;

f_2 : 因 E 不认真工作 D 受到 A 的罚金;

f_3 : E 不认真工作受到 D 的罚金;

e : D 积极履行合同带来的额外收益;

e_3 : E 认真工作带来的额外收益;

p : A 正确发现 D(E) 状态的概率;

δ : E 被 A 抽查的几率;

m : 出现问题时为 A 带来的损失;

x : D 方积极履行合同的概率;

y : A 方积极监管的概率;

z : E 方认真工作的概率。

其中, 由于存在信息不对称的情况, 作为合同的具体履行方, 主承包商 B 拥有更多的信息, 因此其采取积极策略所需成本低于 A 方采取积极策略时的成本, 即 $c_1 < c_2$; 分承包商 C 采取积极策略所需成本少于 B 方采取积极策略时的成本, 即 $c_3 < c_1$ 。各参数间的关系如下:

$$m > c_2 > c_1 > c_3 > 0, f > c_2 > c_1 > c_3 > 0, f_3 > c_3, e > c_1 > c_3, f_3 > f_2, 0 <= p \leq 1, 0 \leq \delta \leq 1$$

三方博弈的收益矩阵如表 2 所列。

表 2 三方博弈的收益矩阵

Table 2 Income matrix of three party game

		积极监管(y)		不积极监管 (1-y)
		正确发现(p)	未发现(1-p)	
积极履行合同 (x)	认真工作(z)	$(-c_1+e, -c_2, -c_3+\delta e_3)$	$(-c_1, -c_2, -c_3)$	$(-c_1, 0, -c_3)$
	不认真工作(1-z)	$(-c_1-\delta f_2+\delta f_3, -c_2+\delta f_2, -\delta f_3)$	$(-c_1, -c_2-m, 0)$	$(-c_1, -m, 0)$
不积极履行合同 (1-x)	认真工作(z)	$(-f, -c_2+f, -c_3+\delta e_3)$	$(0, -c_2-m, -c_3)$	$(0, -m, -c_3)$
	不认真工作(1-z)	$(-f-\delta f_2+\delta f_3, -c_2+f+\delta f_2, -\delta f_3)$	$(0, -c_2-m, 0)$	$(0, -m, 0)$

2.2 三方博弈模型及求解

1) 采购方 A 收益

积极监管的期望收益:

$$E(A_1) = p\delta f_2(1-z) + pf(1-x) + (1-p)(xz-1)m - c_2$$

不积极监管的期望收益:

$$E(\bar{A}_1) = mxz - m$$

其动态复制方程为:

$$F(A) = y(1-y)[pf_2\delta(1-z) + (1-x)pf - c_2 - mpxz + pm]$$

2) 主承包商 D 的收益

积极履行合同的期望收益:

$$E(D) = yp\delta(1-z)(f_3 - f_2) + zype - c_1$$

不积极履行合同的期望收益:

$$E(\bar{D}) = yp\delta(1-z)(f_3 - f_2) - ypf$$

其动态复制方程为:

$$F(D) = x(1-x)(zype + ypf - c_1)$$

3) 分承包商 E 的收益

认真工作的期望收益:

$$E(E) = yp\delta e_3 - c_3$$

不认真工作的期望收益:

$$E(\bar{E}) = -yp\delta f_3$$

其动态复制方程为:

$$F(E) = z(1-z)[py\delta e_3 - c_3 + py\delta f_3]$$

均衡点的渐进稳定性由李雅普诺夫判别法(间接法)判定。

首先求雅可比矩阵及其特征值。根据李雅普诺夫判别法(间接法),当雅可比矩阵的所有特征值 $\lambda < 0$ 时,该均衡点是渐进稳定点,即为汇;当雅可比矩阵所有特征值 $\lambda > 0$ 时,该均衡点不是稳定点,即为源;当雅可比矩阵特征值 λ 中有正有负时,该均衡点不是稳定点,此时为鞍点^[7]。演化博弈的雅可比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(D)}{\partial x} & \frac{\partial F(D)}{\partial y} & \frac{\partial F(D)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(A)}{\partial x} & \frac{\partial F(A)}{\partial y} & \frac{\partial F(A)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(E)}{\partial x} & \frac{\partial F(E)}{\partial y} & \frac{\partial F(E)}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)(-c_1 + fp_y + ep_yz) & -px(f+ez)(x-1) & -epxy(x-1) \\ py(f+mz)(y-1) & (2y-1)(c_2 - fp - mp - f_2 p\delta + fp_x + f_2 pz\delta + mpxz) & py(y-1)(f_2\delta + mx) \\ 0 & -pz\delta(e_3 + f_3)(z-1) & -(2z-1)(e_3 py\delta - c_3 + f_3 py\delta) \end{bmatrix}$$

可得共有 13 个均衡点。其中,5 个为混合策略均衡点,8 个为纯策略均衡点(见表 3),纯策略均衡点如表 3 所列。在非对称博弈中,若演化博弈均衡 E 是演化稳定均衡,则 E

一定是严格纳什均衡,而严格纳什均衡又是纯策略均衡,即在非对称博弈中混合策略均衡一定不是演化稳定均衡,因此只需讨论纯策略均衡的渐近稳定性即可^[8]。

表 3 均衡点、特征值及 ESS 求解

Table 3 Equilibrium point, eigenvalue and ESS solution

均衡点	特征值 1	特征值 2	特征值 3	实部符号	稳定性结论	备注
$M_1(0,0,0)$	$-c_1$	$-c_3$	$fp - c_2 + mp + f_2 p\delta$	$(-, -, \times)$	ESS	$p < \frac{c_2}{f_2\delta + f + m}$
$M_2(1,0,0)$	c_1	$-c_3$	$mp - c_2 + f_2 p\delta$	$(+, -, -)$	不稳定	
$M_3(0,1,0)$	$-c_1 + fp$	$e_3 p\delta - c_3 + f_3 p\delta$	$c_2 - fp - mp - f_2 p\delta$	$(-, -, -)$	ESS	$p > \frac{c_2}{f_2\delta + f + m}$ 且 $p < \frac{c_1}{f}$ 且 $p < \frac{c_3}{e_3\delta + f_3\delta}$
$M_4(0,0,1)$	c_3	$-c_1$	$fp - c_2 + mp$	$(+, -, \times)$	不稳定	
$M_5(1,1,0)$	$c_1 - fp$	$e_3 p\delta - c_3 + f_3 p\delta$	$c_2 - mp - f_2 p\delta$	$(-, -, -)$	ESS	$p > \frac{c_2}{f_2\delta + m}$ 且 $p > \frac{c_1}{f}$ 且 $p < \frac{c_3}{e_3\delta + f_3\delta}$
$M_6(1,0,1)$	c_1	c_3	$-c_2$	$(+, +, -)$	不稳定	
$M_7(0,1,1)$	$c_3 - e_3 p\delta - f_3 p\delta$	$c_2 - fp - mp$	$-c_1 + ep + fp$	$(-, -, -)$	ESS	$p > \frac{c_2}{f+m}$ 且 $p < \frac{c_1}{f+e}$ 且 $p > \frac{c_3}{e_3\delta + f_3\delta}$
$M_8(1,1,1)$	c_2	$c_3 - e_3 p\delta - f_3 p\delta$	$c_1 - ep - fp$	$(+, \times, \times)$	不稳定	

4) 当 $p < \frac{c_2}{f_2\delta + f + m}$ 时,系统渐进稳定于 $(0,0,0)$ 。即当采购方正确发现概率满足 $p < \frac{c_2}{f_2\delta + f + m}$ 时,三方博弈会逐渐稳定于{主承包商不积极履行合同,采购方不积极监管,分承包商不认真工作},相位变化如图 5 所示。

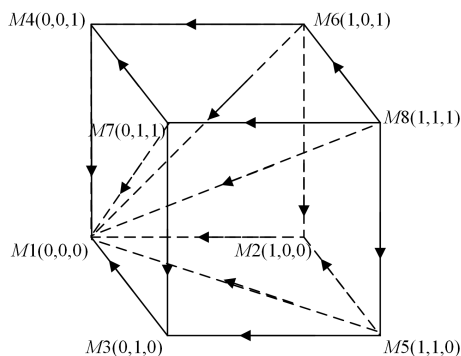


图 5 演化动态相位图 V

Fig. 5 Evolution dynamic phase diagram V

5) $p > \frac{c_2}{f_2\delta + f + m}$ 且 $p < \frac{c_1}{f}$ 且 $p < \frac{c_3}{e_3\delta + f_3\delta}$ 时,系统渐进稳定于 $(0,1,0)$ 。此时,三方博弈会逐渐稳定于{主承包商不积极履行合同,采购方积极监管,分承包商不认真工作},相位变化如图 6 所示。

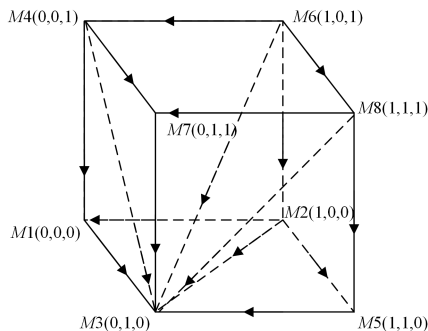


图 6 演化动态相位图 VI

Fig. 6 Evolution dynamic phase diagram VI

6) $p > \frac{c_2}{f_2\delta + m}$ 且 $p > \frac{c_1}{f}$ 且 $p < \frac{c_3}{e_3\delta + f_3\delta}$ 时,系统渐进稳定于 $(1,1,0)$ 。此时,三方博弈会逐渐稳定于,主承包商积极履行合同、采购方积极监管、分承包商不认真工作,相位变化如图 7 所示。

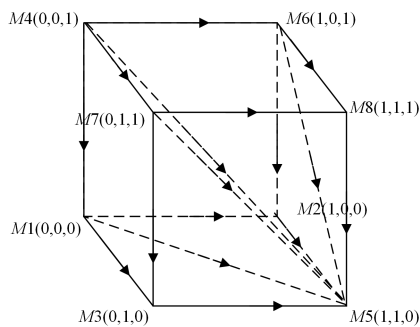


图 7 演化动态相位图 VII

Fig. 7 Evolution dynamic phase diagram VII

7) $p > \frac{c_2}{f+m}$ 且 $p < \frac{c_1}{f+e}$ 且 $p > \frac{c_3}{e_3\delta + f_3\delta}$ 时,系统渐进稳定于 $(0,1,1)$ 。此时,三方博弈会逐渐稳定于{主承包商不积极履行合同,采购方积极监管,分承包商认真工作},相位变化如图 8 所示。

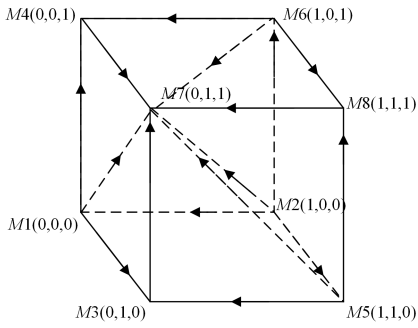


图8 演化动态相位图 VIII

Fig. 8 Evolution dynamic phase diagram VIII

3 基于 AnyLogic 的博弈模型仿真实现与分析

AnyLogic 仿真软件,是一款能同时支持系统动力学、离散事件和多智能体等方法的多方法仿真建模工具,利用 Any-Logic 软件既能对各主体的内部变化情况进行仿真分析,又能对整体变化趋势有效仿真模拟。本文利用系统动力学和多智能体方法对博弈模型进行仿真分析^[9-10]。

3.1 双方博弈模型仿真模型

为便于分析研究,各参数取模拟值如表 4 所列。

表 4 参数模拟值

Table 4 Parameter analog value

主承包商 B 积极履行合同成本 $c_1=1$	采购方 A 积极监管成本 $c_2=1.2$
B 不积极履行合同受到 A 的罚金 $f=2.5$	B 积极履行合同带来的额外收益 $e=1.6$
出现问题时为 A 带来的损失 $m=2$	A 正确发现 B 状态的概率 $p=(0.2, 0.25, 0.4, 0.8)$
其中: $m > c_2 > c_1 > 0, f > c_2 > c_1 > 0, e > c_1, 0 \leq p \leq 1, 0 \leq \delta \leq 1$	

此时, $c_1/(f+e)=0.2439, c_2/(f+m)=0.2667$ 。

1) 系统动力学模型

建立双方博弈的系统动力学模型如图 9 所示。

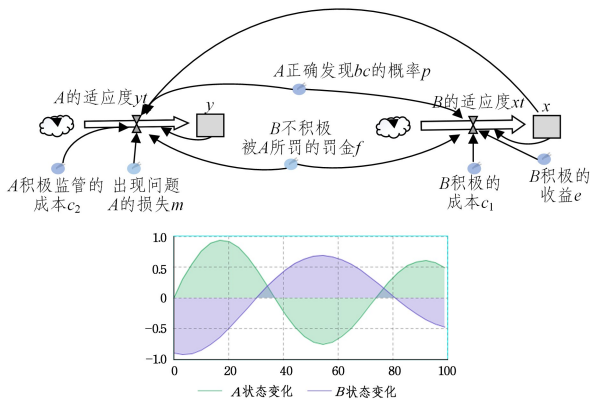


图9 双方博弈系统动力学模型

Fig. 9 System dynamics model of two-party game

其中,A 方的适应度 $y_t = y(1-y)[(1-x)(pf+pm) - c_2]$,当 A 的适应度大于 0 时,A 的状态会由不积极监管状态变为积极监管状态,表现为 y 的值增大;当 A 的适应度小于 0 时,A 的状态会由积极监管状态变为不积极监管状态,表现为 y 的值减小。

B 方的适应度 $x_t = x(1-x)(ypf+ype - c_1)$,当 B 的适应度大于 0 时,B 的状态会由不积极履行状态变为积极履行状态,表现为 x 的值增大;当 B 的适应度小于 0 时,B 的状态

会由积极履行状态变为不积极履行状态,表现为 x 的值减小。

2) 多智能体模型

利用状态图分别建立 A 方和 B 方多智能体仿真模型,其状态图如图 10 和图 11 所示。

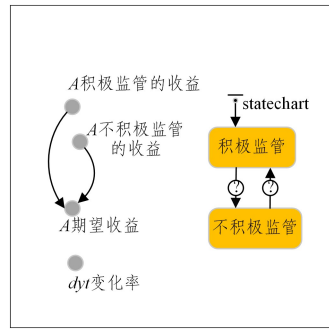


图 10 A 方智能体流程图

Fig. 10 Flow chart of party A's agent

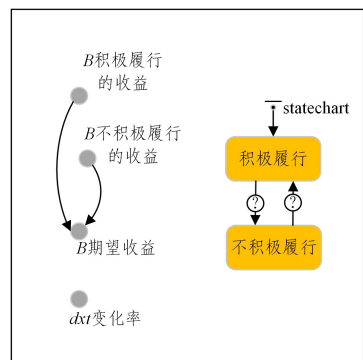


图 11 B 方智能体流程图

Fig. 11 Flow chart of party B's agent

其中,A 和 B 多智能体流程图中变迁触发均为条件触发,当适应度小于 0 时,智能体状态由积极监管(积极履行)状态变为不积极监管(积极履行)状态,当适应度大于 0 时,智能体状态由不积极监管(积极履行)状态变为积极监管(积极履行)状态。

A 积极监管的收益为:

$$E(A_1) = (1-x)(pf + pm - m) - c_2$$

A 不积极监管的收益为:

$$E(A_2) = -m(1-x)$$

B 方积极履行合同的收益为:

$$E(B_1) = ype - c_1$$

B 方不积极履行合同的收益为:

$$E(B_2) = yp(-f)$$

当 $p=0.2$ 和 0.25 时,此时 $c_1/(f+e)=0.2439, c_2/(f+m)=0.2667$,A,B 双方最终趋于 $(0,0)$,其博弈趋势如图 12 和图 13 所示。

由此可以看出:

1) 当 $p < c_1/(f+e)$ 且 $p < c_2/(f+m)$ 时或 $c_1/(f+e) < p < c_2/(f+m)$ 时,双方渐进稳定于 $(0,0)$,即 A 方不积极监管,B 方不积极履行合同;

2) A 正确发现 B 状态的概率越大,趋近于稳定点 $(0,0)$ 的速度越快。

当 $p=0.4$ 和 $p=0.8$ 时, $p > c_1/(f+e)=0.2439$ 且 $p > c_2/(f+m)=0.2667$,此时双方演化情况如图 14 和图 15 所示。

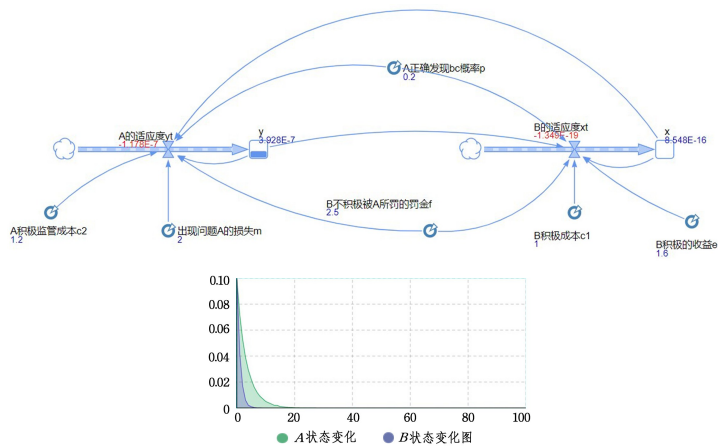


图 12 A 和 B 双方博弈演化图 ($p=0.2$)

Fig. 12 Game evolution diagram of A and B ($p=0.2$)

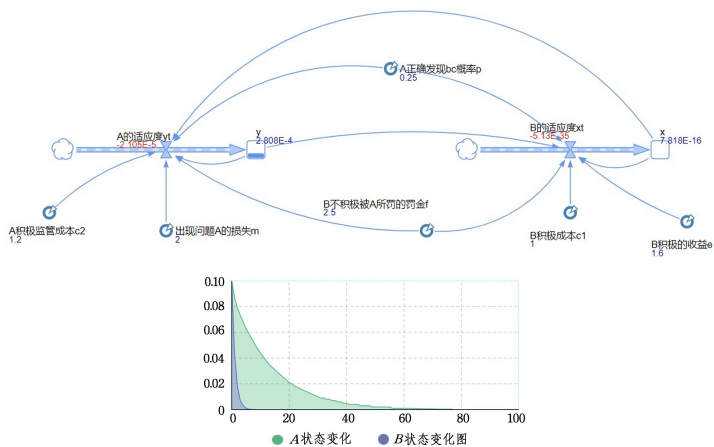


图 13 A 和 B 双方博弈演化图 ($p=0.25$)

Fig. 13 Game evolution diagram of A and B ($p=0.25$)

故当 $p > c_2 / (f + m) = 0.2667 > c_1 / (f + e) = 0.2439$ 时, A 方与 B 方刚开始积极工作的人员比例均呈现增加趋势,且 B 方人员增加速率较 A 方快,但当 B 方积极工作人员比例增加到一定时,积极工作人员的比例呈逐渐减少趋势,当 B 方积极工作人员比例下降到一定程度后, B 方积极工作人员又逐渐增加,循环往复;类似地,当 A 方积极工作的人员达到一定比例后, A 方积极工作人员比例开始下降,逐渐下降至一定程度后又逐渐增加,循环往复。

可能的原因:初始阶段 A 方和 B 方多数人员为各自

利益均积极工作,一段时间后由于收益较好,部分人员可能逐步出现懈怠情况导致积极工作人员比例下降,随着懈怠人员变多,相关惩罚和出现的问题等导致利益受损,又使得人们为弥补损失、创造收益开始积极工作。且随着 p 增大, A 方和 B 方变化周期变小, B 方积极工作人员最大和最小比例逐渐变大, A 方积极工作人员最大和最小比例逐渐变小。

因此双方博弈模型中,对 A 方而言,为达到良好收益,检查抽查准确率应满足 $p > c_2 / (f + m)$ 且 $p > c_1 / (f + e)$ 。

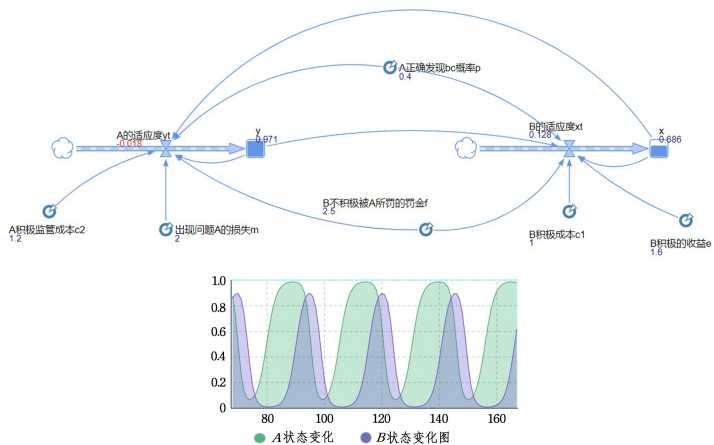


图 14 A 和 B 双方博弈演化图 ($p=0.4$)

Fig. 14 Game evolution diagram of A and B ($p=0.4$)

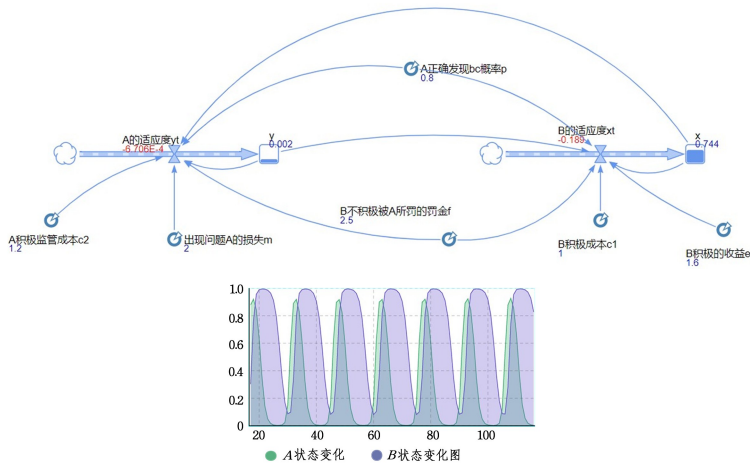


图 15 A 和 B 双方博弈演化图($p=0.8$)

Fig. 15 Game evolution diagram of A and B($p=0.8$)

3.2 三方博弈模型仿真模型

为便于分析研究,各参数取模拟值如表 5 所列。

表 5 参数模拟值

Table 5 Parameter analog value

主承包商 D 积极履行 合同成本 $c_1=1$	采购方 A1 积极监 管的成本 $c_2=1.2$	分包商 E 认真工 作的成本 $c_3=0.5$
D 不积极履行合同受 到 A1 的罚金 $f=2.5$	因 E 不认真工作 D 受 到 A1 的罚金 $f_2=0.6$	E 被 A1 抽查的几 率 $\delta=0.2$
出现问题时为 A1 带 来的损失 $m=2$	E 不认真工作受到 D 的罚金 $f_3=0.65$	A1 正确发现 D, E 状态的概率 $p=(0.1,$ $0.3, 0.5, 0.8)$
D 积极履行合同带来 的额外收益 $e=3.2$	E 认真工作带来的额 外收益 $e_3=0.6$	

其中: $m > c_2 > c_1 > c_3 > 0, f > c_2 > c_1 > c_3 > 0, f_3 > c_3, e > c_1 > c_3, f_3 > f_2, 0 \leq p \leq 1, 0 \leq \delta \leq 1$ 。

此时 $c_2 / (f_2 \delta + f + m) = 0.2597, c_2 / (f_2 \delta + m) = 0.5660,$

$c_1 / f = 0.4, c_3 / (e_3 \delta + f_3 \delta) = 2, c_2 / (f + m) = 0.2667, c_1 / (e + f) = 0.1754$ 。故由结论 4-7 可知,当 $0 < p < 0.2597$ 时,三方演化稳定于 $(0, 0, 0)$;当 $0.2597 < p < 0.4$ 时,三方演化稳定于 $(0, 1, 0)$;当 $0.5660 < p < 1$ 时,三方演化稳定于 $(1, 1, 0)$ 。下面通过 AnyLogic 进行仿真验证分析。

1) 系统动力学模型

建立三方博弈系统动力学模型,如图 16 所示。

其中,A1 方的适应度为 $y_t = y(1-y)[pf_2\delta(1-z) + (1-x)pf - c_2 - mpxz + pm]$;D 方的适应度为 $x_t = x(1-x) * (zyp e + ypf - c_1)$;分包商 E 方的适应度 $z_t = z(1-z)[p * y\delta e_3 - c_3 + py\delta f_3]$,图中 A 状态变化代表的是采购方即 y 的状态变化,B 方状态变化代表的是主承包商即 x 的状态变化,C 方状态变化代表的是分包商即 z 的状态变化。

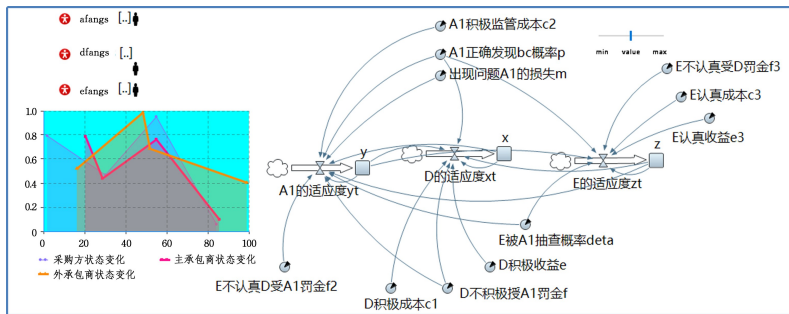


图 16 三方博弈系统动力学模型

Fig. 16 System dynamics model of tripartite game

2) 多智能体模型

分别建立 A1, D 和 E 方的多智能体仿真模型,其状态图

如图 17—图 19 所示。

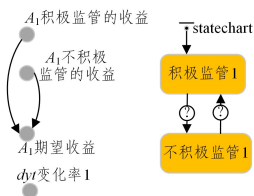


图 17 A1 方智能体流程图

Fig. 17 Flow chart of agent of party A1

$$E(\bar{A}_1) = mxz - m;$$

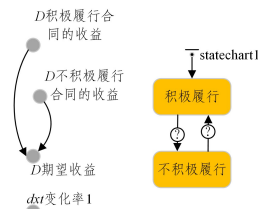


图 18 D 方智能体流程图

Fig. 18 Flow chart of agent of party D

其中,A1 认真工作的收益为 $E(A_1) = p\delta f_2(1-z) + pf(1-x) + (1-p)(xz-1)m - c_2$,不认真工作的收益为

D 方认真工作的收益为 $E(D) = yp\delta(1-z)(f_3 - f_2) + zyp e - c_1$,不认真工作的收益为 $E(\bar{D}) = yp\delta(1-z)(f_3 - f_2) - ypf$ 。

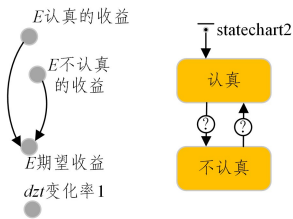


图 19 E 方智能体流程图

Fig. 19 Flow chart of agent of party E

E 方认真工作的收益为 $E(E) = yp\delta e_3 - c_3$, 不认真工作的收益为 $E(\bar{E}) = -yp\delta f_3$ 。

A1, D 和 E 多智能体流程图中变迁触发均为条件触发, 当适应度变化率小于 0 时, 即适应度为负时, 智能体状态由认真状态变为不认真状态; 当适应度变化率大于 0, 即适应度为正时, 智能体状态由不认真状态变为认真状态。

当 $p=0.1, 0.3, 0.5$ 和 0.8 时, 三方博弈趋势如图 20—图 23 所示。

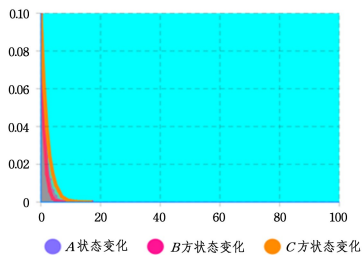


图 20 三方博弈演化图 ($p=0.1$)

Fig. 20 Evolution diagram of tripartite game ($p=0.1$)

可知, $0 < p=0.1 < c_2/(f_2\delta + f + m) = 0.2597$ 时, 三方演化稳定于 $(0, 0, 0)$, 三方博弈模型中 4) 得证。

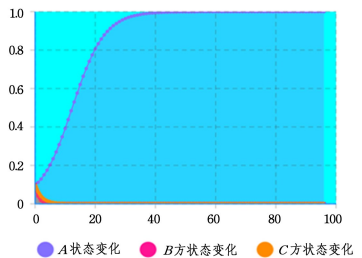


图 21 三方博弈演化图 ($p=0.3$)

Fig. 21 Evolution diagram of tripartite game ($p=0.3$)

故 $c_2/(f_2\delta + f + m) = 0.2597 < p=0.3 < c_1/f = 0.4 < c_3/(e_3\delta + f_3\delta)$, 三方演化稳定于 $(0, 1, 0)$, 三方博弈模型中 5) 得证。

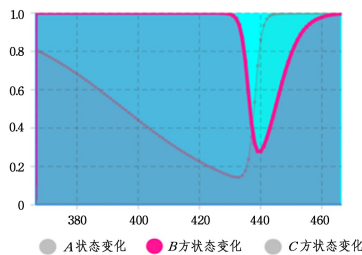


图 22 三方博弈演化图 ($p=0.5$)

Fig. 22 Evolution diagram of tripartite game ($p=0.5$)

此时, $c_1/f = 0.4 < p=0.5 < c_2/(f_2\delta + m) = 0.5660$, 三方演化不稳定。

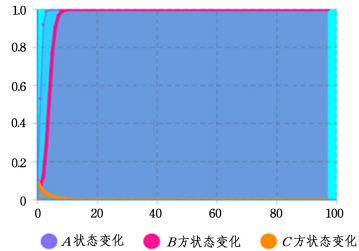


图 23 三方博弈演化图 ($p=0.8$)

Fig. 23 Evolution diagram of tripartite game ($p=0.8$)

故 $c_1/f = 0.4 < c_2/(f_2\delta + m) = 0.5660 < p=0.8 < 1$ 时, 三方演化稳定于 $(1, 1, 0)$, 三方博弈模型中 6) 得证。

取 $c_1=1.8, c_2=2, c_3=0.2, f=3, f_2=0.6, \delta=0.5, m=5, f_3=0.65, e=3.2, e_3=1$, 当 $c_3/(e_3\delta + f_3\delta) = 0.242 < p=0.27, c_2/(f+m) = 0.25 < p=0.27 < c_1/(f+e) = 0.29$ 时, 三方演化稳定于 $(0, 1, 1)$, 如图 24 所示, 三方博弈模型中 7) 得证。

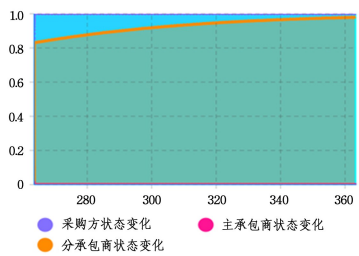


图 24 三方博弈演化图

Fig. 24 Evolution diagram of tripartite game

采购合同签订后, 其合同价格、奖惩、抽查机制等都已确定, 因此本文主要从可动态变化的采购方自身监管水平, 即监管正确率的角度进行分析, 得到: 三方博弈中, 采购方为使主承包商 D 积极履行合同, 应努力保证正确发现 D, E 状态的概率 p 满足:

$$p > \frac{c_2}{f_2\delta + m} \text{ 且 } p > \frac{c_1}{f} \text{ 且 } p < \frac{c_3}{e_3\delta + f_3\delta}$$

3.3 结果分析

通过上述对双方博弈和三方博弈的演化分析可知, 各方的策略选择会受到成本、监管正确率、抽查率、不同策略下收益及惩罚的影响, 各方均会选择对自身有利的策略。成本、监管正确率、抽查率、收益及惩罚等因素对各方的策略选择即博弈结果影响如下。

3.3.1 双方博弈结果分析

1) 采购方。采购方的策略选择会受到采购方不积极监管的损失、对承包商不积极履行合同的罚金、监管正确率和采购方积极监管的成本等的影响, 具体如下:

结论 1 采购方不积极监管的总损失小于其积极监管的成本时, 对采购方而言, 不积极监管更有利, 采购方会选择不积极监管。

其中, 不积极监管的总损失 = (采购方不积极监管的损失 + 对承包商不积极履行合同的罚金) * 监管正确率。即, 当 (采购方不积极监管的损失 + 对承包商不积极履行合同的罚金) * 监管正确率 < 采购方积极监管的成本时, 采购方会选择不积极监管的策略。

结论 2 采购方不积极监管的总损失大于其积极监管的成本时, 积极监管更有利, 采购方会选择积极监管。

其中,不积极监管的总损失=(采购方不积极监管的损失+对承包商不积极履行合同的罚金)*监管正确率。即,当(采购方不积极履行的损失+对承包商不积极履行合同的罚金)*监管正确率>采购方积极监管的成本时,对采购方而言,积极监管更有利,采购方会选择积极监管。

2)承包商。承包商策略选择会受到其积极履行合同的成本、收益以及不积极履行合同所遭受的罚金和监管正确率等的影响。

结论3 承包商积极履行合同的总收益小于积极履行合同的成本时,承包商会选择积极履行合同。

其中,承包商积极履行合同的总收益=(承包商积极履行合同所带来的收益+不积极履行合同所遭受的罚金)*监管正确率。即,当(承包商积极履行合同所带来的收益+不积极履行合同所遭受的罚金)*监管正确率<承包商积极履行合同成本时,对承包商而言,积极履行合同的成本更大,承包商会选择积极履行合同。

结论4 承包商积极履行合同的总收益大于积极履行合同的成本时,承包商的策略选择会受到采购方策略的影响。

(1)当采购方不积极监管时,承包商会最终选择不积极履行合同的策略。即,当采购方不积极监管时,承包商积极履行合同和不积极履行合同被发现的情况比实际的少,从而导致积极履行合同的总收益逐渐减少,最终使得承包商逐渐趋于选择不积极履行合同的策略。其中,承包商积极履行合同的总收益=承包商积极履行合同所带来的收益+不积极履行合同所遭受的罚金)*监管正确率。

(2)当采购方积极监管时,承包商与采购方的策略选择会呈现周期性变化。即,随着采购方积极监管,承包商会逐渐选择积极履行合同,但随着承包商逐渐积极履行合同,采购方会逐渐放松监管,从而导致承包商又会逐渐选择不积极履行合同,随着承包商逐渐选择不积极履行合同,采购方又会加强监管力度,如此往复,呈现周期性变化,如图10和图11所示。同时,由图10和图11可看出,采购方监管力度越高,承包商积极履行合同的情况越明显,采购方的状态变化对监管正确率的提升较敏感,从而采购方可通过提高监管正确率来提升监管力度。

3.3.2 三方博弈结果分析

1)采购商。采购方策略的选择会受到采购方积极监管的成本和不积极监管遭受的损失、主承包商积极履行合同的收益和不积极履行合同遭受的罚金、分承包商积极工作的收益和不积极工作遭受的罚金,以及监管正确率和抽查率的影响,具体影响情况如下。

结论5 采购方不积极监管的总损失小于其积极监管的成本时,不积极监管更有利,采购方会选择积极监管。

其中,不积极监管的总损失=(分承包商不认真工作的罚金*抽查率+主承包商不积极履行合同的罚金+采购方不积极监管的损失)*监管正确率。即,当(分承包商不认真工作的罚金*抽查率+主承包商不积极履行合同的罚金+采购方不积极监管的损失)*监管正确率<采购方的成本时,对于采购方而言,积极监管的风险更大,采购方会选择积极监管的策略。

结论6 采购方不积极监管的总损失大于其积极监管的成本时,积极监管更有利,采购方会选择积极监管。

其中,不积极监管的总损失=(分承包商不认真工作的

罚金*抽查率+主承包商不积极履行合同的罚金+采购方不积极监管的损失)*监管正确率。即,当(分承包商不认真工作的罚金*抽查率+主承包商不积极履行合同的罚金+采购方不积极监管的损失)*监管正确率>采购方的成本时,采购方积极监管更有利,采购方会选择积极监管的策略。

2)主承包商。主承包商的策略选择受到采购方监管正确率、积极履行合同的成本和不积极履行合同的罚金的影响。

结论7 主承包商不积极履行合同的损失小于积极履行合同的成本时,主承包商会选择积极履行合同。

其中,主承包商不积极履行合同的损失=监管正确率*不积极履行合同的罚金。即,监管正确率*不积极履行合同的罚金<主承包商的积极履行合同成本时,主承包商不积极履行合同被发现,遭受处罚值小于其积极履行合同的成本,主承包商会选择积极履行合同。

结论8 主承包商不积极履行合同的损失大于积极履行合同的成本时,主承包商会选择积极履行合同。

其中,主承包商不积极履行合同的损失=监管正确率*不积极履行合同的罚金。即,监管正确率*不积极履行合同的罚金>主承包商的积极履行合同成本时,主承包商不积极履行合同被发现,遭受处罚值大于其积极履行合同的成本,主承包商会选择积极履行合同。

3)分承包商。分承包商策略的选择与其认真工作的成本、收益、不认真工作受到主承包商的罚金、被采购商抽查的概率等因素有关。

结论9 分承包商认真工作的收益小于认真工作的成本时,分承包商会选择不认真工作。

其中,认真工作的收益=(分承包商认真工作的收益+不认真工作的罚金)*抽查率*监管正确率。即,当(分承包商认真工作的收益+不认真工作的罚金)*抽查率*监管正确率<认真工作的成本时,不认真工作对分承包商更有利,分承包商会选择不认真工作。

结论10 分承包商认真工作的收益大于认真工作的成本时,分承包商会选择认真工作。

其中,认真工作的收益=(分承包商认真工作的收益+不认真工作的罚金)*抽查率*监管正确率。即,当(分承包商认真工作的收益+不认真工作的罚金)*抽查率*监管正确率>认真工作的成本时,认真工作对分承包商更有利,分承包商会选择认真工作。

通过结论4、结论8的对比分析易知,对采购方而言,三方博弈模型可通过适当设计,使得主承包商积极履行合同,比双方博弈模型更有优势。

结束语 本文针对装备采购中的两类采购模式,建立了以采购方、承包商为主体的双方采购模型和以采购方、主承包商、分承包商为主体的三方采购模型,并基于动态演化博弈理论,运用AnyLogic对两种采购模型进行仿真分析,得到了两种模型不同情况下的策略选择及影响因素和条件,可知:监管正确率、罚金设计、抽查率等对采购工作中各方的策略选择具有至关重要的作用;对采购方而言,三方博弈模型可通过对主承包商不积极履行合同的罚金进行设计,使得主承包商不积极履行合同被发现时所遭受的损失大于其积极履行合同的成本,此时主承包商将会选择积极履行合同的策略,这比双方博弈模型更有优势。

参 考 文 献

- [1] MA H J, LU Y, ZHOU F. Research status and trend of domestic equipment procurement-visual analysis of knowledge mapping software based on CiteSpace [J]. National Defense Technology, 2021, 42(2): 22-27.
- [2] WEIBULL J W. Evolutionary Game Theory [M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2006.
- [3] BAI F K. Study on the Management of Equipment Procurement Sub-contract[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2005, 16(2): 11-14.
- [4] ZHAO L. Evolutionary Game Analysis of Promoting High-quality Development of Manufacturing Industry [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [5] MA H K. Game Theory [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.
- [6] WANG X Y, XIAO Y M. Game Theory and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [7] ZHAO D Z, HAO J Q, YANG J, et al. Evolutionary game analysis of three parties in sharing economy considering network externality of platform[J]. Control and Decision, 2020, 35(7): 1741-1750.
- [8] TIAN X F, LI H H, WU Y K, et al. The profit simulation analysis of urban subway based on tripartite evolutionary game[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2021, 23(6): 71-80.
- [9] GRIGORYEV L. AnyLogic modeling and simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [10] LIU L, CHEN Y G. Complex System Simulation with AnyLogic [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.



LI Yunzhe, born in 1991, postgraduate. His main research interests include project management and equipment procurement management.



WEN Haolin, born in 1995, master. His main research interests include equipment integrated support and complex system modeling and simulation.