

基于系统动力学模型的智慧真空系泊技术推广应用分析

蒋军¹, 周春旭¹, 付晓娜²

(1. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆市大足区交通运输委员会, 重庆 402360)

摘要: 为加快推进智慧港口建设, 助推航运业绿色可持续发展, 构建了以政府、港口企业和航运公司三方主体参与的演化博弈模型, 研究各方在博弈过程中的策略选择。在该博弈模型的基础上建立了演化博弈系统动力学模型, 对不同情景下主体参与的演化情况及策略的稳定性进行了仿真分析。结果表明: 政府、港口企业和航运公司的策略抉择呈相互促进的关系, 政府在博弈系统中起主导作用, 政府补贴监管力度的增加能够有效降低港口企业的投资风险和管控航运公司的决策行为, 从而促使博弈系统加速收敛至积极投资使用智慧真空系泊装置的理想稳定状态, 但过高的监管成本会抑制政府的实施意愿, 所以三方主体应加强合作共同减少监管成本以促进智慧真空系泊装置的发展。

关键词: 智慧港口; 智慧系泊; 演化博弈; 系统动力学; 低碳

中图分类号: U651; F552 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2025)03-0017-07

doi: 10.7640/zggwjs202503003

Analysis of popularization and application of intelligent vacuum mooring technology based on system dynamics model

JIANG Jun¹, ZHOU Chun-xu¹, FU Xiao-na²

(1. School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Dazu District Transportation Committee, Chongqing 402360, China)

Abstract: In order to accelerate the construction of smart ports and promote the green and sustainable development of the shipping industry, an evolutionary game model with the participation of the government, port enterprises and shipping companies is constructed to study the strategy selection of each party in the game process. Then an evolutionary game system dynamics model was established on the basis of this game model, and simulation analysis was carried out on the evolution of the main players and the stability of the strategies under different scenarios. The results show that the strategic choices of the government, port enterprises, and shipping companies are mutually reinforcing, and the government plays a dominant role in the game system. The increase of government subsidy and regulation can effectively reduce the investment risk of port enterprises and control the decision-making behaviour of shipping companies, thus accelerating the convergence of the game system to the ideal stable state of actively investing in the use of intelligent vacuum moorings, but the high cost of regulation will inhibit the government's willingness to implement. Therefore, the three parties should strengthen cooperation to reduce regulatory costs to promote the development of smart vacuum mooring devices.

Key words: smart port; smart moorings; evolutionary game; system dynamics; low-carbon

0 引言

目前国内关于智慧港口的研究主要集中在智

慧装卸作业、智慧货物管理等方面, 系泊方式仍采用最原始的人工作业方式。其中, 在国外已得

收稿日期: 2024-11-09 修回日期: 2025-01-23

基金项目: 重庆市教育委员会人文社科项目 (23SKGH141); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2024NSCQ-MSX1186); 重庆市研究生联合培养基地 (JDLHPYJD2022002); 重庆交通大学研究生科学创新项目 (2023S0056)

作者简介: 蒋军 (1983—), 男, 湖北荆州人, 博士, 副教授, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: 362531571@qq.com

到成品应用的智慧真空系泊装置则是解决这个问题的关键，它是一种无需缆绳，直接通过终端计算机操作控制真空吸盘和液压控制技术来固定船舶的新型自动化系泊装置。使用智慧真空系泊装置进行系泊作业通常只需 10~20 s，不仅提高了系泊的安全性和效率，还大大降低了港口的碳排放。智慧真空系泊装置发展前景广阔，但前期建设投入较大，投资回收期长，建设时涉及政府、港口企业、航运公司等多主体利益，因此如何加快推进我国智慧港口建设尤其是系泊方式的转变，仍是一个亟待解决的难题。

我国近年来才陆续开展了无缆绳自动系泊的研究。刘佳伦等^[1]从智能航运发展规划动态、船舶智能装备发展动态等方面进行了案例讨论。高峰等^[2]通过介绍国内外自动系泊装置的研发与应用成果来阐述智慧系泊方式良好的发展前景和意义。吴昊等^[3]提出了对 LNG 浮式转接驳与 LNG 运输船所需吸附力大小进行估算的真空吸附装置模拟计算方法。此外，邓玉勇等^[4]基于超效率 DEA 和 DEA-Malmquist 指数模型对智慧港口效率进行评价。赵慧达等^[5]通过建立 Stackelberg 博弈模型研究了影响港口投资的各项因素。韩震等^[6]和程志友等^[7]将博弈论与系统动力学相结合以探究加强港口危化品运输管理的方法。李晓东等^[8]发现在静态机制下，惩罚力度的调节对港航公司的积极减排策略没有明显影响。

综上，目前还没有关于如何加快推进智慧真空系泊装置应用的相关研究，且现有文献大多以静态环境下进行 Stackelberg 主从博弈为主，而从无到有推广智慧真空系泊装置的应用是一个动态的复杂过程，这种静态设定无法捕捉到动态变化和演化过程中的复杂情况。针对演化博弈均衡求解困难的问题，提出基于系统动力学的建模求解方法来研究推广应用智慧真空系泊装置的动态演化过程，旨在找到博弈系统的演化稳定策略、稳定条件和存在的理想化稳定策略，并可对演化情况及均衡解的稳定性作出分析，研究结果可为未来推广应用智慧真空系泊装置以及港口绿色可持续发展提供理论依据与决策参考。

1 三方演化博弈模型的假设及相应描述

基于博弈主体的有限理性构建地方政府、港口企业和航运公司三方演化博弈模型。根据基本假设，三方共有 8 种组合策略，如表 1 所示。

表 1 政府、港口企业和航运公司的博弈收益矩阵

Table 1 Game benefits matrix for government, port enterprises and shipping companies

策略选择	政府收益	港口企业收益	航运公司收益
(G_1, P_1, S_1)	$R_{g0} + R_{g1} - C_{g1} - \alpha C_{p1} - \beta F_{s1}$	$R_{p0} + R_{p1} + \alpha C_{p1} - C_{p1} - F_{p1}$	$R_{s0} + \beta F_{s1} - C_{s1} - F_{s1}$
(G_2, P_1, S_1)	R_{g0}	$R_{p0} + R_{p1} - C_{p1} - F_{p1}$	$R_{s0} - C_{s1} - F_{s1}$
(G_1, P_1, S_2)	$R_{g0} + T_{s2} - C_{g1} - \alpha C_{p1} - L$	$R_{p0} + \alpha C_{p1} - C_{p1}$	$R_{s0} - C_{s2} - F_{s2} - T_{s2}$
(G_2, P_1, S_2)	$R_{g0} - L$	$R_{p0} - C_{p1}$	$R_{s0} - C_{s2} - F_{s2}$
(G_1, P_2, S_1)	$R_{g0} + T_{p2} - C_{g1} - \beta F_{s1} - L$	$R_{p0} - C_{p2} - T_{p2}$	$R_{s0} - C_{s2} - F_{s2}$
(G_2, P_2, S_1)	$R_{g0} - L$	$R_{p0} - C_{p2}$	$R_{s0} - C_{s2} - F_{s2}$
(G_1, P_2, S_2)	$R_{g0} + T_{s2} + T_{p2} - C_{g1} - L$	$R_{p0} - C_{p2} - T_{p2}$	$R_{s0} - C_{s2} - F_{s2} - T_{s2}$
(G_2, P_2, S_2)	$R_{g0} - L$	$R_{p0} - C_{p2}$	$R_{s0} - C_{s2} - F_{s2}$

假设 1：博弈由政府、港口企业、航运公司 3 个参与主体组成，且均为有限理性主体。3 个博弈主体通过不断博弈，试图寻求适合自己利益最大化的最优策略。

假设 2：3 个博弈主体分别有且仅有 2 种行为策略。对于政府(G)而言，可分为实施政策和不实施政策推广智慧真空系泊装置，其策略空间 $M_1 = (G_1, G_2) = (\text{实施}, \text{不实施})$ ，选择 G_1 和 G_2 的概率分别为 x 和 $1-x$ 。对港口企业(P)而言，可分为积极投资建设和不积极投资建设智慧真空系泊装置，其策略空间 $M_2 = (P_1, P_2) = (\text{积极投资}, \text{不积极投资})$ ，选择 P_1 和 P_2 的概率分别为 y 和 $1-y$ 。对航运公司(S)而言，可分为使用和不使用智慧真空系泊装置，其策略空间 $M_3 = (S_1, S_2) = (\text{使用}, \text{不使用})$ ，选择 S_1 和 S_2 的概率分别为 z 和 $1-z$ 。其中， $0 \leq x, y, z \leq 1$ 。

假设 3：政府的初始收益为 R_{g0} 。当政府选择决策实施策略时，政策实施成本为 C_{g1} ，在政策实施期间，若港口企业和航运公司选择积极使用智慧真空系泊装置，则二者均能获得相应的补贴，补贴力度分别为 α 和 β ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$)，政府获得环境效益为 R_{g1} ，若港口企业或航运公司消极响应政策，则会给政府带来损失 L 。港口企业的初始收益为 R_{p0} 。当港口企业选择积极投资策略时，需付出智慧真空系泊装置的购买、安装成本为 C_{p1} ，购买后升级、维护费用 F_{p1} ，获得政府的补贴为 αC_{p1} ，安装智慧真空系泊装置港口作业效率提高后给港口带来的收益为 R_{p1} 。当港口企业选择不积极投资策略时，即通过使用传统的缆绳系泊方式来完成作业，需要大量的人力成本和较高的安全作业成本 C_{p2} ，港口企业消极推行相关政策被政府部门处罚并责令整改，费用为 T_{p2} 。航运公司的初

始收益为 R_{s0} 。当航运公司选择使用策略时, 船舶靠离泊效率 and 安全性均有所提高, 船舶在港时间有所减少, 此时船舶靠港期间产生的停泊成本为 C_{s1} , 服务费为 F_{s1} , 由于港口改造后服务费用有所提高, 所以政府对靠港船舶进行补贴, 补贴额度为 βF_{s1} 。当航运公司选择不使用策略时, 停泊成本为 C_{s2} ($C_{s2} > C_{s1}$), 服务费为 F_{s2} ($F_{s2} > F_{s1}$), 由于航运企业消极推进相关政策, 政府将予以处罚, 费用为 T_{s2} 。

2 演化博弈分析

2.1 政府演化路径分析

设政府选择实施策略的期望收益为 E_x , 选择不实施策略的期望收益为 E_{1-x} , 平均期望收益为 \bar{E}_x , 则:

$$E_x = R_{g0} - C_{g1} - L + T_{s2} + T_{p2} + zy(R_{g1} + L - \beta F_{s1}) - y(\alpha C_{p1} + T_{p2}) - zT_{s2} \quad (1)$$

$$E_{1-x} = R_{g0} - L + zyL \quad (2)$$

$$\bar{E}_x = xE_x + (1-x)E_{1-x} \quad (3)$$

政府选择实施政策的复制动态方程 $G(x)$ 为:

$$G(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_x - \bar{E}_x) = x(1-x)(E_x - E_{1-x}) = x(1-x)[-C_{g1} + T_{s2} + T_{p2} + zy(R_{g1} - \beta F_{s1}) - y(\alpha C_{p1} + T_{p2}) - zT_{s2}] \quad (4)$$

2.2 港口企业演化路径分析

设港口企业选择积极投资策略的期望收益为 E_y , 选择不积极投资策略的期望收益为 E_{1-y} , 平均期望收益为 \bar{E}_y , 则:

$$E_y = R_{p0} - C_{p1} + z(R_{p1} - F_{p1}) + x\alpha C_{p1} \quad (5)$$

$$E_{1-y} = R_{p0} - C_{p2} - xT_{p2} \quad (6)$$

$$\bar{E}_y = yE_y + (1-y)E_{1-y} \quad (7)$$

港口企业选择投资策略的复制动态方程 $P(y)$ 为:

$$P(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_y - \bar{E}_y) = y(1-y)(E_y - E_{1-y}) = y(1-y)[C_{p2} - C_{p1} + z(R_{p1} - F_{p1}) + x(\alpha C_{p1} + T_{p2})] \quad (8)$$

2.3 航运公司演化路径分析

设航运公司选择积极使用策略的期望收益为 E_z , 选择不积极使用策略的期望收益为 E_{1-z} , 平均期望收益为 \bar{E}_z , 则:

$$E_z = R_{s0} - y(C_{s1} + F_{s1}) - x(C_{s2} + F_{s2}) + xy\beta F_{s1} \quad (9)$$

$$E_{1-z} = R_{s0} - C_{s2} - F_{s2} - xT_{s2} \quad (10)$$

$$\bar{E}_z = zE_z + (1-z)E_{1-z} \quad (11)$$

航运公司选择积极使用策略的复制动态方程 $S(z)$ 为:

$$S(z) = \frac{dz}{dt} = z(E_z - \bar{E}_z) = z(1-z)(E_z - E_{1-z}) = z(1-z)[C_{s2} + F_{s2} - y(C_{s1} + F_{s1}) + x(T_{s2} - C_{s2} - F_{s2}) + xy\beta F_{s1}] \quad (12)$$

2.4 三方主体组合策略稳定性分析

将政府、港口企业及航运公司三者的复制动态方程组联立可得三方博弈系统下的复制动态方程组和雅可比矩阵 J 。令 $G(x) = P(y) = S(z) = 0$, 得到 8 个局部稳定均衡点 $(0, 0, 0)$ 、 $(1, 0, 0)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ 、 $(1, 1, 0)$ 、 $(1, 0, 1)$ 、 $(0, 1, 1)$ 、 $(1, 1, 1)$, 这 8 个纯策略相应的特征根如表 2 所示, 若特征值的符号全部为负则为稳定点 ESS, 否则为不稳定点。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial G(x)}{\partial x} & \frac{\partial G(x)}{\partial y} & \frac{\partial G(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial P(y)}{\partial x} & \frac{\partial P(y)}{\partial y} & \frac{\partial P(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial S(z)}{\partial x} & \frac{\partial S(z)}{\partial y} & \frac{\partial S(z)}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2x-1)[C_{g1}-F_{s2}+y\alpha C_{p1}+z(F_{s2}+\beta F_{s1})-yzR_{g1}] & x(x-1)[T_{p2}+\alpha C_{p1}-z(R_{g1}-\beta F_{s1})] & x(x-1)[F_{s2}-y(R_{g1}-\beta F_{s1})] \\ y(1-y)(T_{p2}+\alpha C_{p1}) & (2y-1)[C_{p1}-C_{p2}+z(F_{p1}-R_{p1})-x(T_{p2}+\alpha C_{p1})] & y(y-1)(F_{p1}-R_{p1}) \\ z(z-1)(C_{s2}+F_{s2}-T_{s2}-y\beta F_{s1}) & z(z-1)(C_{s1}+F_{s1}-x\beta F_{s1}) & (1-2z)[C_{s2}+F_{s2}-x(C_{s2}+F_{s2}-T_{s2})-y(C_{s1}+F_{s1})-xy\beta F_{s1}] \end{bmatrix}$$

表 2 三方博弈系统下的特征值

Table 2 Eigenvalues under a three-way game system

均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3
$(0, 0, 0)$	$C_{p2} - C_{p1}$	$C_{s2} + F_{s2}$	$T_{p2} - C_{g1} + T_{s2}$
$(1, 0, 0)$	T_{s2}	$C_{g1} - T_{p2} - T_{s2}$	$C_{p2} - C_{p1} - T_{p2} + \alpha C_{p1}$
$(0, 1, 0)$	$C_{p1} - C_{p2}$	$T_{s2} - C_{g1} - \alpha C_{p1}$	$C_{s2} - C_{s1} - F_{s1} + F_{s2}$
$(0, 0, 1)$	$-C_{s2} - F_{s2}$	$C_{p2} - C_{p1} - F_{p1} + R_{p1}$	$T_{p2} - F_{s2} - C_{g1} + T_{s2}$
$(1, 1, 0)$	$C_{g1} - T_{s2} + \alpha C_{p1}$	$T_{s2} - F_{s1} - C_{s1} + \beta F_{s1}$	$C_{p1} - C_{p2} - T_{p2} - \alpha C_{p1}$
$(1, 0, 1)$	$-T_{s2}$	$C_{g1} + F_{s2} - T_{p2} - T_{s2}$	$C_{p2} - C_{p1} - F_{p1} + R_{p1} + T_{p2} + \alpha C_{p1}$
$(1, 1, 1)$	$C_{s1} + F_{s1} - T_{s2} - \beta F_{s1}$	$C_{g1} + F_{s2} - R_{g1} - T_{s2} + \alpha C_{p1} + \beta F_{s1}$	$C_{p1} - C_{p2} + F_{p1} - R_{p1} - T_{p2} - \alpha C_{p1}$
$(0, 1, 1)$	$C_{s1} - C_{s2} + F_{s1} - F_{s2}$	$C_{p1} - C_{p2} + F_{p1} - R_{p1}$	$R_{g1} - F_{s2} - C_{g1} - T_{s2} - \alpha C_{p1} - \beta F_{s1}$

在局部均衡点 $(0, 0, 0)$ 和 $(1, 0, 0)$ 处, 有特征值 $C_{s2} + F_{s2}$ 、 T_{s2} 恒大于 0, 所以 $(0, 0, 0)$ 和 $(1, 0, 0)$ 不是演化稳定策略, 只需考虑其余 6 个局部均

衡点的特征值是否满足条件,分为6个情形进行讨论。

情形 1: 当同时满足 $C_{s2}+F_{s2}<C_{s1}+F_{s1}$ 、 $C_{p2}>C_{p1}$ 以及 $T_{p2}+T_{s2}<C_{g1}$ 时,稳定点为 $(0, 1, 0)$ 。此时,港口企业选择投资建设智慧真空系泊装置的成本小于长期使用传统系泊方式所需的成本。

情形 2: 由于 $-C_{s2}-F_{s2}$ 恒小于 0, 所以当同时满足条件 $C_{p1}+F_{p1}>R_{p1}$ 和 $T_{p2}+T_{s2}<C_{g1}$ 时,稳定点为 $(0, 0, 1)$, 此时因为政府选择实施相关政策对港口企业和航运公司进行监管所需的成本大于了相关的收益。

情形 3: 当同时满足条件 $T_{p2}+T_{s2}>C_{g1}$ 、 $\beta F_{s1}+T_{s2}-F_{s1}-C_{s1}<0$ 和 $C_{p1}-\alpha C_{p1}<C_{p2}$ 时,稳定点为 $(1, 1, 0)$, 此时政府和港口企业分别选择实施和积极投资策略的收益大于其付出的成本,而航运公司选择使用策略所需的成本远远高于罚款。

情形 4: 当同时满足条件 $T_{p2}+T_{s2}>C_{g1}$ 和 $C_{p1}+F_{p1}>R_{p1}$ 时,稳定点为 $(1, 0, 1)$, 此时仅有港口企业选择投资策略的成本高于所得的收益。

情形 5: 当同时满足条件 $C_{p1}+F_{p1}<R_{p1}$ 、 $C_{g1}+F_{s2}-R_{g1}-T_{s2}+\alpha C_{p1}+\beta F_{s1}<0$ 和 $\beta F_{s1}+T_{s2}-F_{s1}-C_{s1}>0$ 时,稳定点为 $(1, 1, 1)$ 。此时三方选择实施、投资、使用策略的收益均高于初始收益。

情形 6: 当同时满足条件 $C_{p1}+F_{p1}<R_{p1}$ 、 $R_{g1}-C_{g1}<\alpha C_{p1}+\beta F_{s1}+F_{s2}-T_{s2}$ 和 $C_{s2}+F_{s2}>C_{s1}+F_{s1}$ 时,稳定点为 $(0, 1, 1)$, 此时虽然政府选择不实施策略,但港口企业和航运公司在没有政府补贴的情况下发现投资建设、使用智慧真空系泊的收益仍然较高,所以二者选择积极投资和使用策略。

3 系统动力学模型建立与分析

3.1 系统结构分析与模型构建

引入系统动力学(system dynamics, SD)对相关参数进行数值仿真分析,探究在各参数变化的影响下,博弈三方策略选择的演化趋势。现使用 Vensim PLE 软件建立该演化博弈模型的系统动力学模型,见图 1。其中, x 、 y 、 z 作为系统存量,期望收益 E_x 、 E_{1-x} 、 E_y 、 E_{1-y} 、 E_z 、 E_{1-z} 为系统中间变量,其它均为外生变量。根据均衡点 $(1, 1, 1)$ 的稳定条件及相关企业资料和专家建议对变量进行赋值,相关参数初始设置如下:

INITIAL TIME =0, FINAL TIME =100, TIME STEP=0.031 25, UNITS FOR TIME=Month, $R_{g0}=0.2$, $C_{g1}=0.28$, $R_{g1}=0.65$, $L=0.2$, $R_{p0}=1.8$, $C_{p1}=1$, $\alpha C_{p1}=0.2C_{p1}$, $F_{p1}=0.05$, $R_{p1}=0.8$, $C_{p2}=0.55$, $T_{p2}=0.25$, $R_{s0}=0.8$, $C_{s1}=0.18$, $F_{s1}=0.18$, $\beta F_{s1}=0.2F_{s1}$, $C_{s2}=0.28$, $F_{s2}=0.05$, $T_{s2}=0.15$ 。

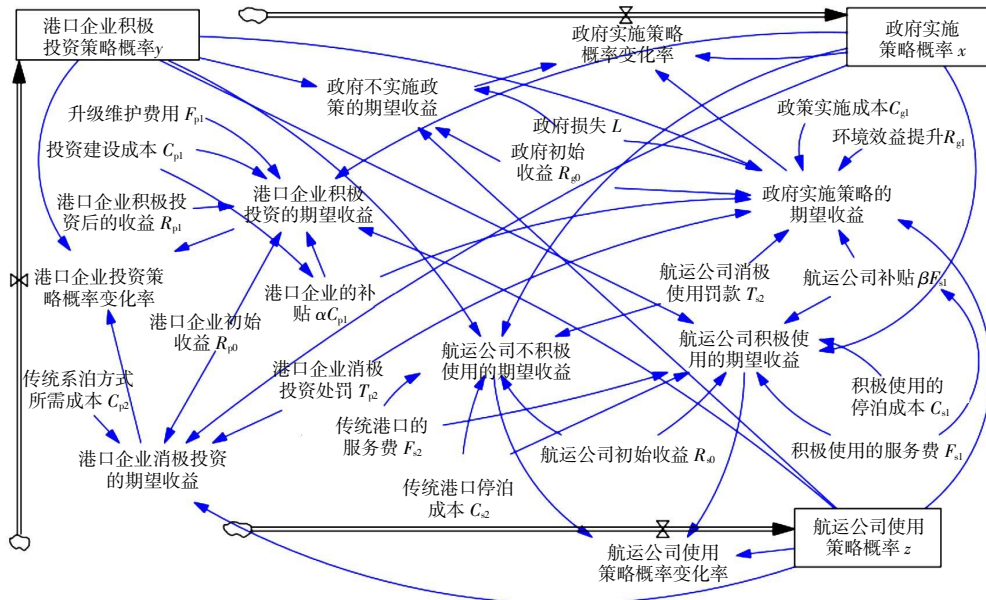


图 1 政府、港口企业与航运公司的博弈系统动力学仿真模型

Fig. 1 Simulation model of system dynamics of the game among government, port enterprises and shipping companies

3.2 初始策略概率变化的演化稳定性分析

3.2.1 政府初始策略概率变化

在上述赋值条件下,仅改变政府实施策略概

率 x , 对 x 依次取 0.2、0.5、0.8, x 的改变对港口企业和航运公司的策略选择概率 p 的影响如图 2 所示。整体而言,随着 x 的增加,港口企业和航

运公司收敛速度加快, 且在 $x=0.8$ 时, 各主体收敛最快, 表明政府决策对港口企业和航运公司的主体意愿均具有促进作用。此外, 政府的实施意愿对港口企业的决策选择影响最大, 在 $x=0.2$ 时港口企业的投资意愿明显下降, 但随着演化时间的增加, 当 $Time=15$ 时, 港口企业的选择积极投资策略的收敛速度开始加快, 这是由于港口企业前期投资成本过高, 但政府的补贴可以有效减少其投资的风险, 增加投资的意愿。

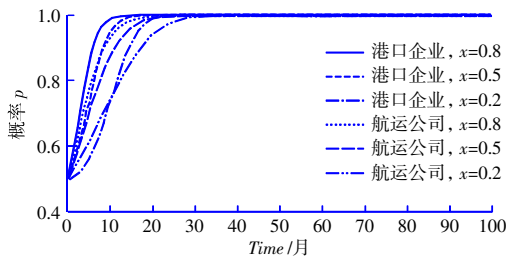


图 2 政府初始策略概率变化对演化系统的影响

Fig. 2 Influence of changes in the probability of the government's initial strategy on the evolutionary system

3.2.2 港口企业初始策略概率变化

保持其它参数不变, 对港口企业初始策略概率 y 依次取 0.2、0.5、0.8, 其演化结果见图 3。整体而言, y 的增加对政府和航运公司的策略选择都产生了积极的影响且最终都收敛于 1。港口企业的投资意愿对政府的影响更为明显, 政府前期投入了大量资金来推广智慧真空系泊装置直至市场能够自发地正常运作, 所以在 $y=0.2$ 时, 政府在前期实施意愿持续降低, 直至 $Time=14$ 才开始逐渐升高。

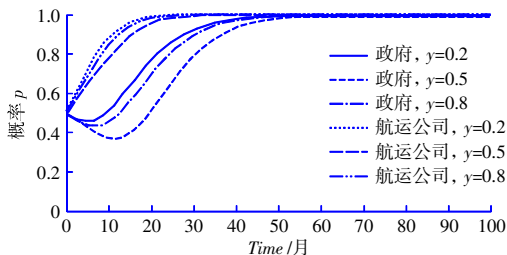


图 3 港口企业初始策略概率变化对演化系统的影响

Fig. 3 Influence of changes in the probability of initial strategies of port companies on the evolutionary system

3.2.3 航运公司初始策略概率变化

保持其它参数不变, 对航运公司初始策略概率 z 依次取 0.2、0.5、0.8, 其演化结果见图 4。随着 z 的增加, 政府和港口企业的收敛速度加快,

且在 $z=0.8$ 时收敛速度最快。在 $z=0.2$ 时, 由于航运公司使用意愿较低, 港口企业选择投资策略前期会造成持续的亏损, 但在政府和市场共同努力下, 随着演化时间的增加智慧真空系泊装置的使用需求会越来越大, 最终港口企业的投资概率会加速收敛至 1。

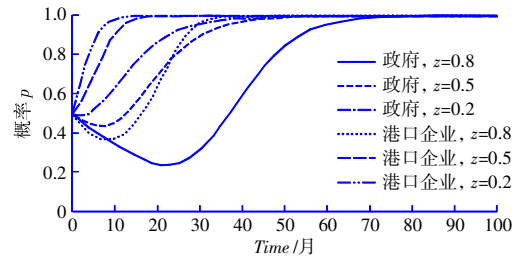


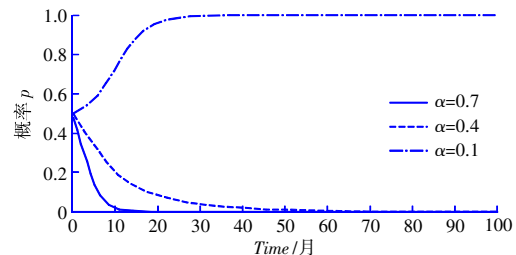
图 4 航运公司初始策略概率变化对演化系统的影响

Fig. 4 Influence of changes in the probability of a shipping company's initial strategy on the evolutionary system

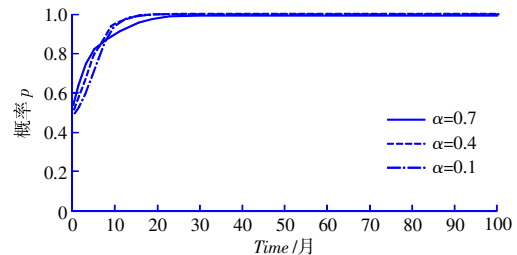
3.3 关键参数变化对系统的演化稳定性分析

3.3.1 补贴系数 α

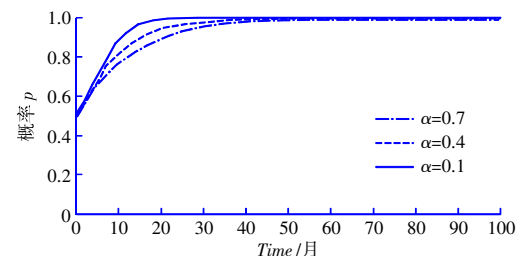
保持其它参数数值不变, 对补贴系数 α 依次取值 0.1、0.4 和 0.7, 其演化结果见图 5。



(a) α 变化对政府策略选择的影响



(b) α 变化对港口企业策略选择的影响



(c) α 变化对航运公司策略选择的影响

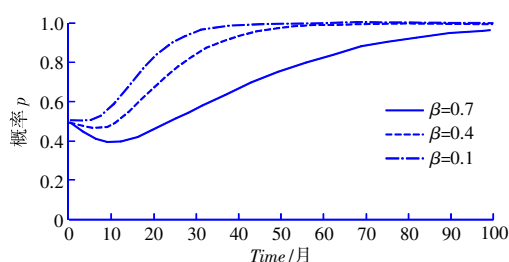
图 5 α 变化对演化系统的影响

Fig. 5 Impact of changes in α on evolving systems

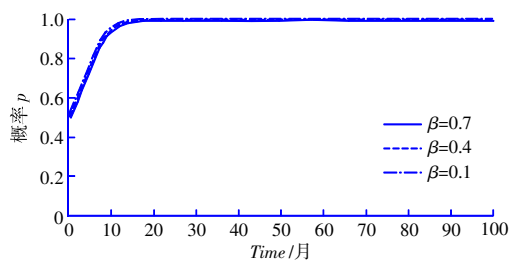
从演化结果来看,当 $\alpha=0.1$ 时,只是减缓政府趋于实施策略演化速度,但当 $\alpha=0.4$ 和 $\alpha=0.7$ 时,政府收敛至0即不实施策略的稳定状态,说明此时政府所需承担的补贴金额过大,不愿意选择实施策略。

3.3.2 补贴系数 β

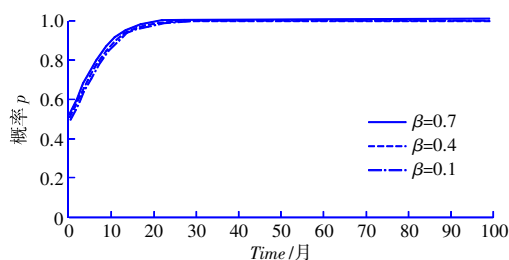
保持其它参数数值不变,对补贴系数 β 的取值依次改为0.1、0.4和0.7,其演化结果见图6。从演化结果来看,随着 β 的逐渐增加,只是减缓了政府趋于实施策略的演化速度,最终还是会收敛于1。



(a) β 变化对政府策略选择的影响



(b) β 变化对港口企业策略选择的影响



(c) β 变化对航运公司策略选择的影响

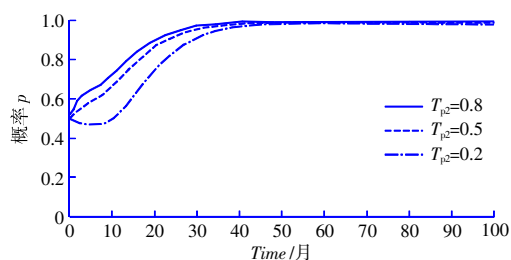
图6 β 变化对演化系统的影响

Fig. 6 Impact of changes in β on evolving systems

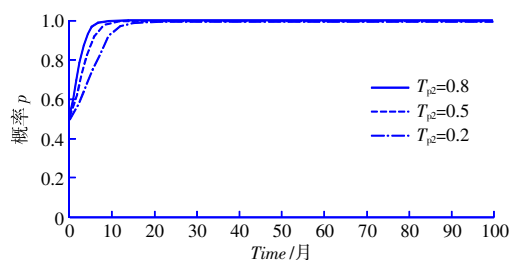
3.3.3 罚款 T_{p2}

保持其它参数数值不变,将罚款 T_{p2} 的取值依次改为0.2、0.5和0.8,得到如图7所示的演化结果。演化结果表明随着 T_{p2} 的增大,政府和港口企业趋于1的理想状态越快,这是因为罚款会给政府带来一定的收益,而对港口企业而言不仅会造成经济上的损失,还会对合作关系产生负面影响,为保证自身竞争力,港口企业会选择积极投资智

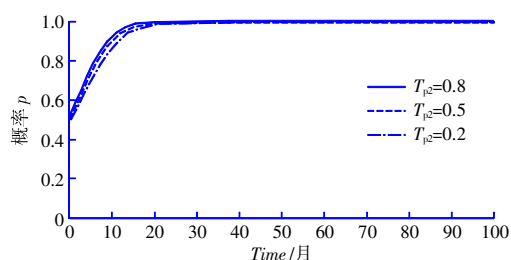
慧港口建设。



(a) T_{p2} 变化对政府策略选择的影响



(b) T_{p2} 变化对港口企业策略选择的影响



(c) T_{p2} 变化对航运公司策略选择的影响

图7 T_{p2} 变化对演化系统的影响

Fig. 7 Impact of changes in T_{p2} on evolving systems

3.3.4 罚款 T_{s2}

保持其它参数数值不变,将罚款 T_{s2} 的取值依次改为0.2、0.5和0.8,得到如图8—图10所示的演化结果。从演化结果来看,随着 T_{s2} 的增大,港口企业和航运公司收敛于1的演化速率都增大。这表明,适当增加罚款金额不仅能够促进港口企业和航运公司的选择投资使用智慧真空系泊装置,还能提高政府监管部门的监管积极性。

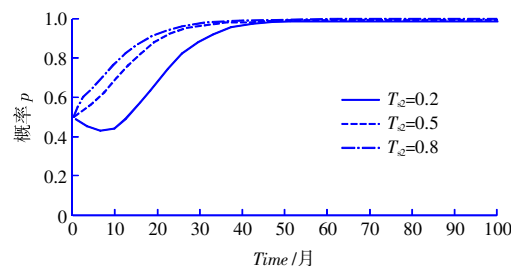
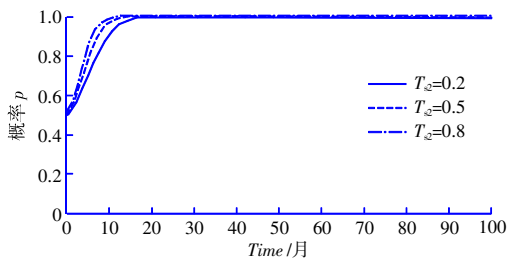
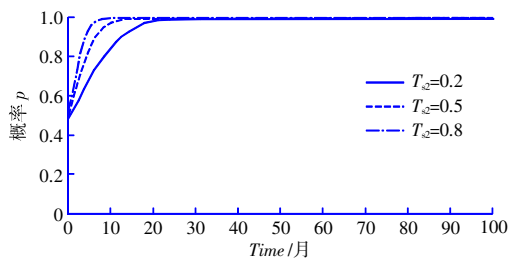


图8 T_{s2} 变化对政府策略选择的影响

Fig. 8 Impact of changes in T_{s2} on government strategy selection

图9 T_d 变化对港口企业策略选择的影响Fig. 9 Impact of changes in T_d on the strategy selection of port enterprises图10 T_d 变化对航运公司策略选择的影响Fig. 10 Impact of changes in T_d on the strategy selection of shipping companies

4 结语

以港口企业推进智慧系泊装置应用为研究对象,针对目前演化博弈动态研究不足的问题,从补贴系数和监管力度等关键影响因素出发,提出了基于系统动力学的政府、港口企业和航运公司三方主体演化博弈模型及求解方法,并使用 Ven-sim PLE 仿真软件对初始概率和关键参数变化对主体决策和稳定性的影响进行探讨,结果表明:1)整体上看,系统动力学模型中三方主体存在激励的博弈,三方主体初始概率的提高会加速系统达到稳定状态。2)航运公司初始概率的变化对博弈系统的影响最大。3)政府在推进智慧真空系泊装置应用中起主导作用。政府积极补贴监管的态度能加速港口企业和航运公司向积极投资、使用的理想稳定演化,但过高的补贴监管成本会减弱政府实施策略的意愿,所以三方主体应加强合作共同努力减少监管成本。4)港口企业相比于航运公司对政府补贴力度较监管力度更为敏感。5)罚款金额的增加会缩短系统向最优稳定决策的演化时间。所以政府应该通过设计合理的动态处罚机制和优化监管方式来激励港口企业投资意愿和提高航运公司的使用需求,使得博弈系统得到良性演

化发展。

参考文献:

- [1] 刘佳仑,陈然,李诗杰,等. 智能水路运输系统的发展与应用:案例分析与前景展望[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(3): 175-181.
LIU Jia-lun, CHEN Ran, LI Shi-jie, et al. Development and application of intelligent waterway transportation systems: Case analysis and prospects[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41(3): 175-181.
- [2] 高峰,唐友刚,聂晓彤,等. 港口船舶自动系泊系统研发与应用综述[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(9): 11-15.
GAO Feng, TANG You-gang, NIE Xiao-tong, et al. Review of research and application on automatic mooring system of ships in ports[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(9): 11-15.
- [3] 吴昊,夏华波,周毅,等. 基于 AWQA 的 LNG 浮式转接驳真空吸附装置吸附力模拟计算[J]. 船海工程, 2023, 52(2): 57-61.
WU Hao, XIA Hua-bo, ZHOU Yi, et al. Simulation calculation of adsorption force of LNG floating transfer barge vacuum adsorption device based on AWQA[J]. Ship & Ocean Engineering, 2023, 52(2): 57-61.
- [4] 邓玉勇,秦俊平. 基于超效率 DEA 和 DEA-Malmquist 指数模型的智慧港口效率评价[J]. 上海海事大学学报, 2022, 43(4): 83-90.
DENG Yu-yong, QIN Jun-ping. Evaluation on smart port efficiency based on super efficiency DEA and DEA-Malmquist index model [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2022, 43(4): 83-90.
- [5] 赵慧达,刘家国,王军进,等. 考虑区块链技术投资的港航供应链决策研究[J]. 管理工程学报, 2022, 36(6): 117-128.
ZHAO Hui-da, LIU Jia-guo, WANG Jun-jin, et al. Research on investment strategy of shipping supply chain based on blockchain technology[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2022, 36(6): 117-128.
- [6] 韩震,王茜,孟好. 基于系统动力学的港口危险品管理演化博弈分析[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(2): 28-35.
HAN Zhen, WANG Han, MENG Hao. Evolutionary game analysis of hazardous goods management in ports based on system dynamics [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45(2): 28-35.
- [7] 程志友,罗锋,吴蕊,等. 基于系统动力学模型的港口危化品运输管理演化博弈[J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(3): 71-78, 99.
CHENG Zhi-you, LUO Feng, WU Rui, et al. Hazardous chemical transportation management evolutionary game in ports based on system dynamics model[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2023, 44(3): 71-78, 99.
- [8] 李晓东,匡海波,何鸿宇. 政府环境规制下港航系统减排演化博弈研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 17-29.
LI Xiao-dong, KUANG Hai-bo, HE Hong-yu. Evolutionary game analysis of port and shipping system emission reduction under government regulation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 17-29.