

中文引用格式:沈海滨,胡玲,李娜,等. 动态惩罚机制下民航危险品运输演化博弈分析:以航空公司与地面服务代理人为例[J]. 中国安全科学学报,2025,35(5):23-31.

英文引用格式:SHEN Haibin, HU Ling, LI Na, et al. Evolutionary game analysis of dangerous goods transportation in civil aviation under dynamic penalty mechanism: case of airline and ground service agents [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 23-31.

动态惩罚机制下民航危险品运输演化博弈分析: 以航空公司与地面服务代理人为例*

沈海滨 副教授, 胡玲, 李娜, 张文怡, 谢润琪
(中国民航大学 安全科学与工程学院 天津 300399)

中图分类号:X949 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0301

资助项目:中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122022037)。

【摘要】 为解决民航危险品运输地面代理服务中地面服务代理人的违规行为、航空公司疏于监督管理等问题,首先,分别在航空公司采取静态惩罚及动态惩罚机制下构建危险品运输航空公司与地面服务代理人的演化博弈模型;其次,探究博弈双方在不同机制下的演化稳定策略;然后,结合系统动力学模型,构建航空公司与地面服务代理人的定量分析模型;最后,模拟分析重要参数对博弈双方行为策略的影响。结果表明:静态惩罚机制下博弈系统无稳定点,双方无演化稳定策略,且双方的行为策略随时间呈现周期性反复趋势;引入动态惩罚机制后,博弈系统存在稳定点,双方的行为策略能够收敛到稳定的焦点;相较于低惩罚力度,较高的惩罚力度更能提高地面服务代理人严格执行代理协议的概率。

【关键词】 动态惩罚机制; 危险品运输; 演化博弈; 航空公司; 地面服务代理人; 系统动力学

Evolutionary game analysis of dangerous goods transportation in civil aviation under dynamic penalty mechanism: case of airline and ground service agents

SHEN Haibin, HU Ling, LI Na, ZHANG Wenyi, XIE Runqi

(School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In addressing the issues of non-compliance by ground service agents and lax supervision by airlines in the transportation of hazardous materials in civil aviation. Firstly, evolutionary game models between airlines and ground service agents were constructed under both static and dynamic punishment mechanisms. The evolutionary stable strategies under different mechanisms were then explored. Subsequently, a quantitative analysis model was developed by integrating system dynamics to further analyze the interactions between the two parties. Finally, simulations were conducted to analyze the impact of key parameters on the behavioral strategies of both sides. The results reveal that under the static punishment mechanism, no stable equilibrium point is observed in the game system. No evolutionary stable strategy is formed, with the behavioral strategies of both parties showing periodic fluctuations over time. In contrast, when a dynamic punishment mechanism is introduced, a stable equilibrium point emerged in the game system. The behavioral strategies of both parties converge to a stable focal point. Moreover,

compared with a low level of punishment, a higher level of punishment is found to be more effective in increasing the probability that ground service agents strictly comply with the agency agreement.

Keywords: dynamic penalty mechanism; dangerous goods transportation; evolutionary game; airlines; ground service agents; system dynamics

0 引言

《民用航空危险品运输管理规定》(交通运输部令 2024 年第 4 号)^[1]中规定:公共航空运输经营人(即航空公司,简称航司)委托地面服务代理人代表其从事危险品航空运输地面服务的,应签订相关代理协议,并对地面服务代理人的货物查验及相关措施进行认可与定期检查。据此,航司对地面服务代理人具有监督管理的责任。与一般委托代理关系不同,地面服务代理人是指经经营人授权,代表经营人从事民航危险品运输地面服务的企业,比如机场、航司运营基地等。因此,航司必须对地面服务代理人进行监督管理,从而保证民航危险品的运输安全。据民航局 2016—2020 年危险品航空运输违规行为行政处罚公告来看,航司与地面服务代理人违反该规定的情况屡禁不止^[2-5]。这是因为实际运营中,航司内部面临着业务复杂、工作量大和日常监督管理成本过高等因素,容易造成监督管理力度不足;地面服务代理人一般会代理多家航司的危险品运输地面服务业务,并且不同航司间的代理要求存在显著差异,容易出现其不能严格执行代理协议等安全问题^[6]。因此,加强航司对地面服务代理人监督管理方面的研究,对于保障民航危险品运输安全具有重要意义。

目前,国内外学者,针对代理人监督管理进行了相关研究。如 YUAN Liang 等^[7]分析企业与代理人之间的委托代理演化博弈模型,指出合作的基本收益和成本影响企业与代理人委托关系的关键影响。宋猛等^[8]通过分析自然资源资产委托代理机制,发现“监管轻视”和“违规再委托”等风险的起源主要为委托人与代理人目标分离等现实因素。崔琳等^[9]分析委托人-代理人-被监管方的委托代理模型,得出当代理人信息搜集的准确度下降时,单代理人模式的激励成本将低于多代理人模式。朱庆华等^[10]使用系统动力学分析地方政府与制造企业博弈模型,得出当政府采取动态策略时该模型存在纳什均衡点。罗宏森等^[11]结合系统动力学和博弈论分析食品安全监管中各主体决策行为,得出动态惩罚机制能显著提高食品企业重视安全生产的积极

性。韩震等^[12]结合系统动力学仿真分析港口危险品管理中政府、资源提供商和物流服务商的演化博弈模型,得出监管成本、惩罚力度等因素会对三方博弈行为产生影响。GAO Honghu 等^[13]为研究影响港口危化品物流企业的监督因素,分析静态惩罚与动态惩罚下政企演化博弈模型,得出动态惩罚措施能够提高港口危化品物流企业对安全投入的重视程度。FENG Fenling 等^[14]建立铁路运输安全监管演化博弈模型,通过系统动力学分析各因素间的博弈关系,提出动态奖惩机制以提高安全生产率,减少监管投入。

综上所述,目前针对代理人的监督管理问题常用的研究方法为委托代理模型与演化博弈模型等,由于航司与民航危险品运输地面服务代理人间委托代理关系的特殊性,如何将系统动力学、动态惩罚机制与演化博弈结合起来,以提高航司对地面服务代理人监督管理的有效性是文中研究的重点,对于解决双方之间存在的安全生产监督管理问题具有现实意义。

1 博弈关系描述及模型假设

1.1 博弈关系描述

在民航危险品运输过程中,航司会与地面服务代理人签订代理协议,地面服务代理人应按照代理协议严格执行代理业务。但在实际操作过程中,地面服务代理人严格执行协议的要求会导致成本显著增加从而降低收益,所以会导致其趋向选择成本较低、收益较高的松懈执行策略;松懈执行一旦被发现,又会面临航司的严重处罚,这又使得地面服务代理人趋向于严格执行航司的要求。应法规要求,航司具有对与其合作的地面服务代理人监督管理的职责,但严格监督管理产生的较高成本会使其趋向于采用成本较低的宽松监督管理策略,另一方面宽松监督管理带来的损失又会使其趋于严格监督管理。

1.2 模型假设

基于上述描述,航司与地面服务代理人正常合作时,需要对在 1 个运营周期内影响双方行为策略

选择的主要经济因素作如下假设:

- 1) 假设 1。博弈参与者航司和地面服务代理人具备有限理性特征^[15],行为策略选择应遵循利益最大化。
- 2) 假设 2。航司有 2 种监督管理策略,分别为严格监督管理、宽松监督管理。前者指航司依据法规要求,同时也为了保证地面服务代理人严格执行代理协议,所进行的严格监督管理。在这种情况下,航司能够及时发现地面服务代理人的松懈执行行为并进行处罚。后者指航司由于工作量大或成本高等原因,并未对地面服务代理人进行严格的监督管理,从而不能及时发现地面服务代理人的松懈执行行为。此外,地面服务代理人有 2 种执行策略,分别为严格执行和松懈执行。前者能够降低事故风险并树立良好的企业形象,但成本较高且利润较低;后者则会获得较高的利润,但会带来较大的风险与事故损失。
- 3) 假设 3。地面服务代理人选择严格执行的概率为 $x(0 \leq x \leq 1)$,宽松执行的概率为 $1-x$ 。航司选择严格监督管理的概率为 $y(0 \leq y \leq 1)$,宽松监督管理策略的概率为 $1-y$ 。
- 4) 假设 4。航司基础收益为 R ,严格监督管理的成本为 C_1 ,宽松监督管理的成本为 C_2 ,显然 $C_1 > C_2$ 。当航司选择严格监督管理策略时,形成的良好企业口碑与形象带来的隐形收益为 L_1 ,如果发现地

面服务代理人松懈执行代理协议上的要求时,航司会处罚地面服务代理人,处罚值为 P 。在航司宽松监督管理下,不会发现地面服务代理人的松懈执行问题,所以无处 P 。

地面服务代理人严格执行的成本为 C_3 ,收益为 V_1 ,松懈执行成本为 C_4 ,收益为 V_2 ,显然 $C_3 > C_4$ 。当地面服务代理人选择严格执行策略时,与松懈执行相比,由于拒绝收运违规货物,所以会造成收益减少,因此 $V_1 < V_2$,但会形成良好的行业口碑和可信度,进而带来的隐形收益为 L_2 。

5) 假设 5。当地面服务代理人选择松懈执行策略,危险品事故的发生时概率为 $\lambda \in (0, 1)$,航司承担事故发生经济损失 T ,地面服务代理人承担事故发生经济损失为 W , T 和 W 包括直接经济损失和间接经济损失。即使未发生事故,地面服务代理人被发现松懈执行问题时,也会面临航司的处罚 P 与因失信带来的额外损失 S 。在航司宽松监督管理下,地面服务代理人不会被发现松懈执行的问题,所以无额外损失 S 。

上述假设分析了在危险品运输地面代理服务过程中,影响博弈双方行为策略选择的主要因素及其相互作用,未考虑博弈双方可能还会受到自身短期和长期目标、系统外主体以及地区差异等因素的影响。综上所述可以得到地面服务代理人与航司博弈双方的收益矩阵,见表 1。

表 1 航司与地面服务代理人的收益矩阵

Table 1 Revenue matrix for airlines and agents

名称	策略	航司	
		严格监督管理	宽松监督管理
地面服务代理人	严格执行	$V_1 - C_3 + L_2, R - C_1 + L_1$	$V_1 - C_3, R - C_2$
	松懈执行	$V_2 - C_4 - P - \lambda W - S, R - C_1 + P - \lambda T + L_1$	$V_2 - C_4 - \lambda W, R - C_2 - \lambda T$

$$f(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x) \left(\begin{matrix} yL_2 + yP + yS \\ + V_1 - V_2 - C_3 + \\ C_4 + \lambda W \end{matrix} \right) \quad (2)$$

此外,航司不同策略的预期收益和总体预期收益分别为 V_{11} 、 V_{12} 和 V_1 ,则根据马尔萨斯方程得到以下方程:

$$\begin{cases} V_{11} = x(R - C_1 + L_1) \\ + (1-x)(R - C_1 + P - \lambda T + L_1) \\ V_{12} = x(R - C_2) + (1-x)(R - C_2 - \lambda T) \\ V_1 = yV_{11} + (1-y)V_{12} \end{cases} \quad (3)$$

航司演化博弈的复制动态方程可得如下:

2 博弈演化模型的建立与稳定性分析

2.1 博弈演化模型的建立

假设地面服务代理人不同策略的预期收益和总体预期收益分别为 U_{11} 、 U_{12} 和 U_1 ,可得下式:

$$\begin{cases} U_{11} = y(V_1 - C_3 + L_2) + (1-y)(V_1 - C_3) \\ U_{12} = y(V_2 - C_4 - P - \lambda W - S) \\ + (1-y)(V_2 - C_4 - \lambda W) \\ U_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12} \end{cases} \quad (1)$$

根据马尔萨斯方程,得到地面服务代理人演化博弈的复制动态方程如下^[16]:

f(y) = \frac{dy}{dt} = y(1 - y) \left(\begin{matrix} -C_1 + P + C_2 \\ +L_1 - xP \end{matrix} \right) \tag{4}

2.2 博弈双方演化稳定性分析

2.2.1 航司静态惩罚机制下的演化稳定性分析

根据式(2)和式(3),可得地面服务代理人和航司的复制动态方程,如下:

\begin{cases} f(x) = \frac{dx}{dt} = x(1 - x) \left(\begin{matrix} yL_2 + yP + yS \\ +V_1 - V_2 - C_3 \\ +C_4 + \lambda W \end{matrix} \right) \\ f(y) = \frac{dy}{dt} = y(1 - y) \left(\begin{matrix} -C_1 + P + C_2 \\ +L_1 - xP \end{matrix} \right) \end{cases} \tag{5}

根据微分方程得分稳定性原理^[17],令f(x)=0, f(y)=0 可得到 4 个均衡点,A₁(0,0)、A₂(0,1)、A₃(1,0)、A₄(1,1),对式(2)进行求一阶导数,并令f'(x*)<0,f'(y*)<0,可得第 5 个均衡点 A₅(x*, y*),其中

\begin{cases} x^* = \frac{(-C_1 + P + C_2 + L_1)}{P} \\ y^* = \frac{(-V_1 + V_2 + C_3 - C_4 - \lambda W)}{(L_2 + P + S)} \end{cases}

地面服务代理人与航司演化系统的雅各比矩阵为:

J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x} & \frac{\partial f(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial f(y)}{\partial x} & \frac{\partial f(y)}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{6}

\frac{\partial f(x)}{\partial x} = (1 - 2x) \left[\begin{matrix} (L_2 + P + S)y + V_1 \\ -V_2 - C_3 + C_4 + \lambda W \end{matrix} \right]

\frac{\partial f(x)}{\partial y} = x(1 - x)(L_2 + P + S)

\frac{\partial f(y)}{\partial x} = -y(1 - y)P

\frac{\partial f(y)}{\partial y} = (1 - 2y)(-C_1 + P + C_2 + L_1 - xP)

设该矩阵的行列式为 det(J),该矩阵的迹为 tr(J),则,

\begin{aligned} \det(J) &= (1 - 2x) \left[\begin{matrix} (L_2 + P + S)y + V_1 \\ -V_2 - C_3 + C_4 + \lambda W \end{matrix} \right] \cdot \\ &\quad (1 - 2y)(-C_1 + P + C_2 + L_1 - xP) + \\ &\quad x(1 - x)(L_2 + P + S)y(1 - y)P \end{aligned} \tag{7}

\begin{aligned} \text{tr}(J) &= (1 - 2x) \left[\begin{matrix} (L_2 + P + S)y + V_1 \\ V_2 - C_3 + C_4 + \lambda W \end{matrix} \right] + \\ &\quad (1 - 2y)(-C_1 + P + C_2 + L_1 - xP) \end{aligned} \tag{8}

将 A₁~A₄ 代入 det(J) 和 tr(J),可得表 2。

表 2 均衡点及其行列式与迹表达式

Table 2 Equilibrium points and their determinant and trace expressions		
均衡点	行列式/迹	表达式
A ₁ (0,0)	det(J)	(V ₁ - V ₂ - C ₃ + C ₄ + λW)(-C ₁ + P + C ₂ + L ₁)
	tr(J)	(V ₁ - V ₂ - C ₃ + C ₄ + λW) + (-C ₁ + P + C ₂ + L ₁)
A ₂ (0,1)	det(J)	(L ₂ + P + S + V ₁ - V ₂ - C ₃ + C ₄ + λW)(C ₁ - P - C ₂ - L ₁)
	tr(J)	(L ₂ + P + S + V ₁ - V ₂ - C ₃ + C ₄ + λW) + (C ₁ - P - C ₂ - L ₁)
A ₃ (1,0)	det(J)	(-V ₁ + V ₂ + C ₃ - C ₄ - λW)(-C ₁ + C ₂ + L ₁)
	tr(J)	(-V ₁ + V ₂ + C ₃ - C ₄ - λW) + (-C ₁ + C ₂ + L ₁)
A ₄ (1,1)	det(J)	(-L ₂ - P - S - V ₁ + V ₂ + C ₃ - C ₄ - λW)(-C ₁ + C ₂ + L ₁)
	tr(J)	(-L ₂ - P - S - V ₁ + V ₂ + C ₃ - C ₄ - λW) + (-C ₁ + C ₂ + L ₁)
A ₅ (x*, y*)	det(J)	$\frac{(-C_1 + P + C_2 + L_1)(-C_1 + C_2 - L_1)(-V_1 + V_2 + C_3 - C_4 - \lambda W) \cdot (L + P + S + V_1 - V_2 - C_3 + C_4 + \lambda W)}{(L_2 + P + S)^2 P^2}$
	tr(J)	0

当均衡点满足 det(J)>0 和 tr(J)>0 时,该点为局部渐进稳定不动点,对应策略为演化稳定策略。根据假设可知 P>0、C₁>C₂、C₃>C₄、V₁<V₂,可得均衡点稳定性分析结果见表 3。

由表 3 可知:在该博弈模型中,A₁~A₄ 属于鞍点,A₅(x*, y*) 属于中心点,且点 A₅ 并不是渐进稳

定的,因此,系统不存在演化稳定策略^[18]。

通过以上分析得出,在航司静态惩罚机制下,博弈双方不存在演化稳定点,即发展的不稳定性将增加航司对地面服务代理人监督管理的难度。因此,需要有必要考虑加入航司动态惩罚机制,以优化该演化系统。

表 3 均衡点稳定性分析

Table 3 Equilibrium point stability analysis			
均衡点	det(J)	tr(J)	结果
$A_1(0,0)$	-	$\pm$	鞍点
$A_2(0,1)$	-	$\pm$	鞍点
$A_3(1,0)$	-	$\pm$	鞍点
$A_4(1,1)$	-	$\pm$	鞍点
$A_5(x^*,y^*)$	-	0	中心点

2.2.2 航司动态惩罚机制下的演化稳定性分析

假设航司对地面服务代理人惩罚与其选择松懈执行的概率成正比,即当地面服务代理人选择采取松懈执行措施,航司采取严格监督管理的策略时,地面服务代理人受到处罚费用由原来固定的常数 P 变为 $g(x)=(1-x)Q$,并且 $Q>C_1>0$,其中, Q 表示惩罚最高力度。加入上述的动态惩罚机制后,改变后得到的复制动态方程组为:

$$\begin{cases} f(x)' = \frac{dx}{dt} = x(1-x) \left(\begin{matrix} yL_2 + yg(x) + yS + V_1 \\ -V_2 - C_3 + C_4 + \lambda W \end{matrix} \right) \\ f(y)' = \frac{dy}{dt} = y(1-y) \left(\begin{matrix} -C_1 + g(x) + C_2 \\ +L_1 - xg(x) \end{matrix} \right) \end{cases}$$

(9)

从而得到加入动态惩罚机制后,航司与地面服务代理人系统动态演化的 5 个纳什均衡点,分别为点 $A_1'(0,0)$ 、 $A_2'(0,1)$ 、 $A_3'(1,0)$ 、 $A_4'(1,1)$ 和 $A_5'(x^*,y^*)$,其中,

$$\begin{cases} x^{**} = \frac{(-C_1 + g(x) + C_2 + L_1)}{g(x)} \\ y^{**} = \frac{(-V_1 + V_2 + C_3 - C_4 - \lambda W)}{(L_2 + g(x) + S)} \end{cases}, \text{ 并且满足}$$

$$0 \leq \frac{(-C_1 + g(x) + C_2 + L_1)}{g(x)} \leq 1, 0 \leq \frac{(-V_1 + V_2 + C_3 - C_4 - \lambda W)}{(L_2 + g(x) + S)} \leq 1,$$

将 5 个均衡点代入雅可比矩阵,计算均衡点的 $\det(J)$ 值和 $\text{tr}(J)$ 值,计算可得均衡点 $A_1' \sim A_4'$ 的 $\det(J)$ 都为负数,即 $A_1' \sim A_4'$ 都为鞍点。将 $A_5'(x^{**},y^{**})$ 代入雅可比矩阵 $J'(A_5')$,并对均衡点 A_5' 的特征根进行求解,可以得到 $|\lambda E - J'(A_5')| = 0$ 的特征根为:

$$\begin{aligned} &(-C_1 + C_2 + L_1 + (1-x)Q(C_1 - C_2 - L_1) \cdot \\ &\lambda_1, \lambda_2 = \frac{(V_1 - V_2 - C_3 + C_4 + \lambda W)(-Q) \pm \sqrt{\Delta}}{2((1-x)^2Q^2(L_2 + S + (1-x)Q)} \end{aligned}$$

其中, $\Delta < 0$, 并且 x^* 满足方程 $x^{**} =$

$$\frac{(-C_1 + (1-x)Q + C_2 + L_1)}{(1-x)Q}$$

的解。因此 $J'(A_5')$

的特征根是一对具有负实部的特征复根, $A_5'(x^{**},y^{**})$ 是稳定的焦点,系统具有渐进稳定性。

通过方程组

$$\begin{cases} x^{**} = \frac{(-C_1 + (1-x^{**})Q + C_2 + L_1)}{(1-x^{**})Q} \\ y^{**} = \frac{(-V_1 + V_2 + C_3 - C_4 - \lambda W)}{(L_2 + (1-x^{**})Q + S)} \end{cases}$$

可解得:

$$\begin{cases} x^{**} = 1 - \frac{\sqrt{Q(C_1 - C_2 - L_1)}}{Q} \\ y^{**} = \frac{(-V_1 + V_2 + C_3 - C_4 - \lambda W)}{L_2 + S + \sqrt{Q(C_1 - C_2 - L_1)}} \end{cases} \quad (10)$$

1) 对 x^{**} 求导可得:

$$\frac{\partial x^{**}}{\partial C_1} < 0, \frac{\partial x^{**}}{\partial C_2} = \frac{\partial x^{**}}{\partial L_1} > 0, \frac{\partial x^{**}}{\partial Q} > 0.$$

2) 对 y^{**} 求导可得: $\frac{\partial y^{**}}{\partial V_1} = \frac{\partial y^{**}}{\partial C_4} < 0, \frac{\partial y^{**}}{\partial V_2} =$

$$\frac{\partial y^{**}}{\partial C_3} > 0, \frac{\partial y^{**}}{\partial W} < 0, \frac{\partial y^{**}}{\partial \lambda} < 0, \frac{\partial y^{**}}{\partial L_2} = \frac{\partial y^{**}}{\partial S} < 0, \frac{\partial y^{**}}{\partial Q} < 0, \frac{\partial y^{**}}{\partial C_1} > 0, \frac{\partial y^{**}}{\partial C_2} = \frac{\partial y^{**}}{\partial L_1} < 0.$$

根据上述分析可知:若 C_1 增加, x^{**} 呈现下降趋势, y^{**} 呈现上升趋势,即航司严格监督管理的概率降低,地面服务代理人严格执行概率增加。当 C_2 、 L_1 或 Q 增加时,航司严格监督管理的概率会有所增加,地面服务代理人选择严格执行的策略的概率降低。

若 V_1 、 C_4 、 λ 、 W 、 L_2 或 S 增加,航司严格监督管理的概率降低。 V_2 或 C_3 增加,航司严格监督管理的概率将增加。

3 基于系统动力学的演化博弈分析

3.1 航司静态惩罚机制博弈与参数敏感性分析

3.1.1 航司静态惩罚机制演化博弈分析

为更直观地展示加入动态惩罚机制的效果,使用 Vensim PLE 软件对航司与地面服务代理人演化博弈系统进行建模,式(5)的存量—流量图模型如图 1 所示。

在该系统中,假定初始时间为 0,最终时间为 200,时间步长为 0.125,时间单位为月。

根据模型建立过程中得到的条件和航司与地面服务代理人在 1 个运营周期内对各个参数的实际运

营情况进行等比假设,简化模型并进行有效分析,参数值见表 4。

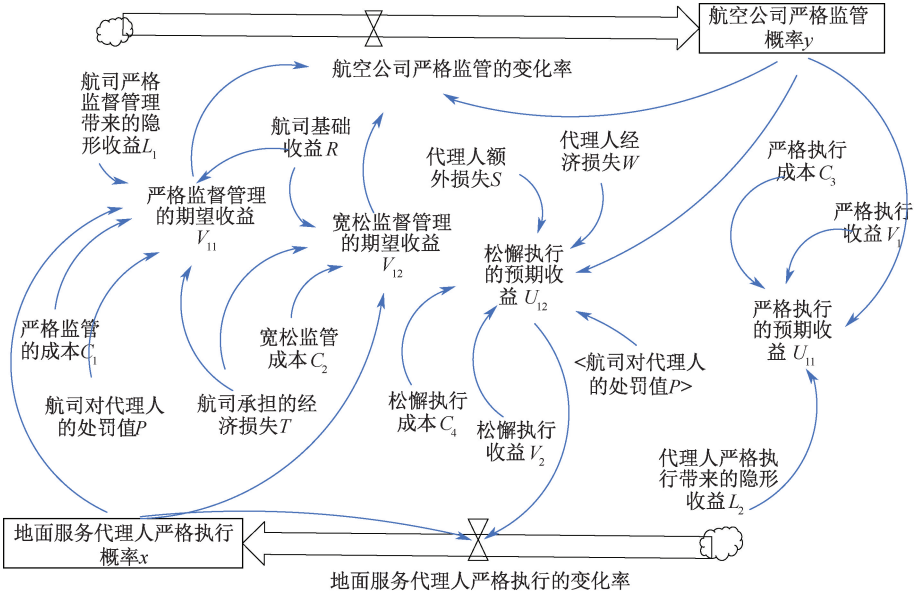


图 1 航司与地面服务代理人博弈的系统动力学模型
Fig. 1 System dynamics model of game between airlines and agents

表 4 辅助变量假设值

Table 4 Hypothetical values of auxiliary variables														万元
辅助变量	C_1	C_2	L_1	P	R	V_1	V_2	C_3	C_4	W	L_2	S	T	λ
参数值	2.5	1	1	1.5	5	7	9	5	3	150	1.5	2	10	0.02

为验证在航司静态惩罚措施下,是否存在稳定的均衡点,将模型初期航司选择严格监督管理的概率设定为系统均衡点纵坐标,即 $y^* = \frac{(-V_1 + V_2 + C_3 - C_4 - \lambda w)}{L_2 + P + S} = 0.2$,地面服务代理人严格执行的初始概率分别为 0.4 和 0.8 时的演化过程,如图 2 所示。由图 2 可知:虚线和实线分别代表初始值 x 为 0.4 和 0.8 时,地面服务代理人选择严格执行策略的概率演化过程,通过对比虚线和实线可发现,无论初始值取何值时,地面服务代理人策略选择的概率都是波动的, x 初始值越大,博弈演化过程曲线的波动幅度越大,且 x 的波动幅度会随着时间和博弈次数的增加而增大。

为研究航司和地面服务代理人在航司静态惩罚措施下是否存在均衡点,假设航司选择严格监督管理以及地面服务代理人选择严格执行的初始概率均为 0.5,可得航司和地面服务代理人混合策略的演化趋势,如图 3 所示。由图 3 可知:系统的演化趋势呈现不收敛曲线,即在航司静态惩罚措施下,航司与地面服务代理人之间不存在稳定均衡点。

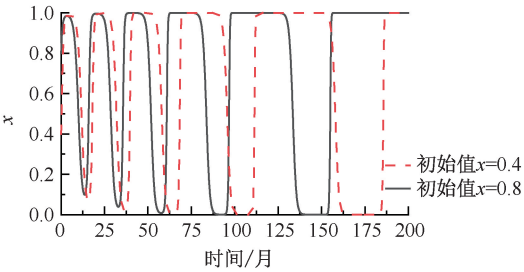


图 2 不同初始值地面服务代理人严格执行策略概率的演化过程
Fig. 2 Evolution of probability of strictly enforcing strategy by agents with different initial values

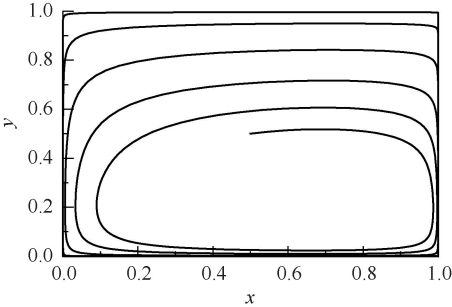


图 3 航司与地面服务代理人的混合策略的演化过程
Fig. 3 Evolution of mixed strategies of airlines and agents

3.1.2 静态惩罚机制下参数敏感性分析

为探讨航司对地面服务代理人松懈执行的处罚 P 对博弈双方行为策略选择的影响,对 P 进行敏感性分析,博弈双方行为策略的初始概率都设置为 0.5,其余参数值见表 4。

将 P 分别设置为 1.5、2、3、4、5,仿真结果如图 4 所示。从图 4 中可以得出,当处罚 P 逐渐增加,地面服务代理人行为策略从无稳定状态最终收敛于严

格执行,航司行为策略最终收敛于松懈监督管理。但长远看来,一味的加大处罚力度,既为地面服务代理人的实际操作带来了经济压力,又给航司的监督管理工作提供了错误参考,不利于民航危险品运输的安全发展。

因此,需要考虑加入航司动态惩罚机制,以优化该演化系统。

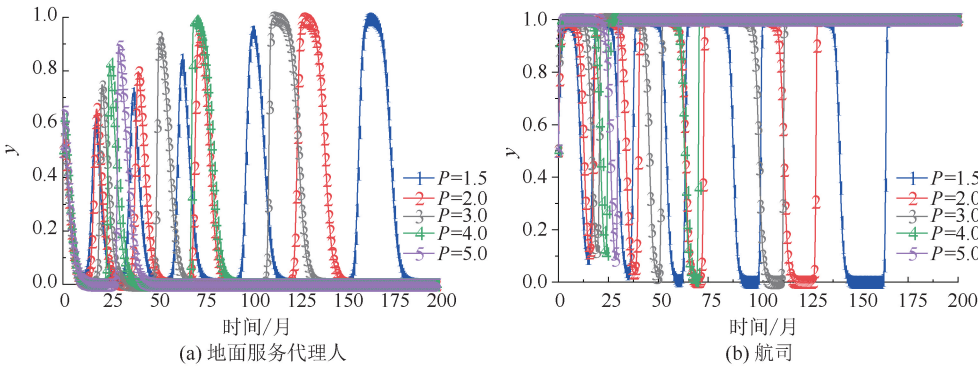


图 4 航司对地面服务代理人松懈执行处罚 P 演化过程

Fig. 4 Airline companies lax in enforcing penalties on ground service agents Evolutionary process

3.2 航司动态惩罚机制博弈与参数敏感性分析

3.2.1 航司动态惩罚机制演化博弈分析

在航司与地面服务代理人的系统动力学流程图中加入动态惩罚机制,式(9)的存量-流量图模型如图 5 所示。为确定航司和地面服务代理人在航司的动态惩罚措施下是否存在均衡点,将航司选择严格监督管理以及地面服务代理人选择严格执行的初始概率均设置为 0.5,得到航司和地面服务代理人混

合策略的演化过程如图 6 所示。同样,使用 Vensim PLE 软件对其演化过程进行模拟仿真分析,假定条件、参数设定以及事故发生概率与 3.1 节相同。不同惩罚下博弈双方概率的演化过程如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知:系统随着时间和博弈次数的增加,演化趋势呈螺旋收敛状态,即在航司动态惩罚措施下,航司与地面服务代理人之间存在稳定均衡点。

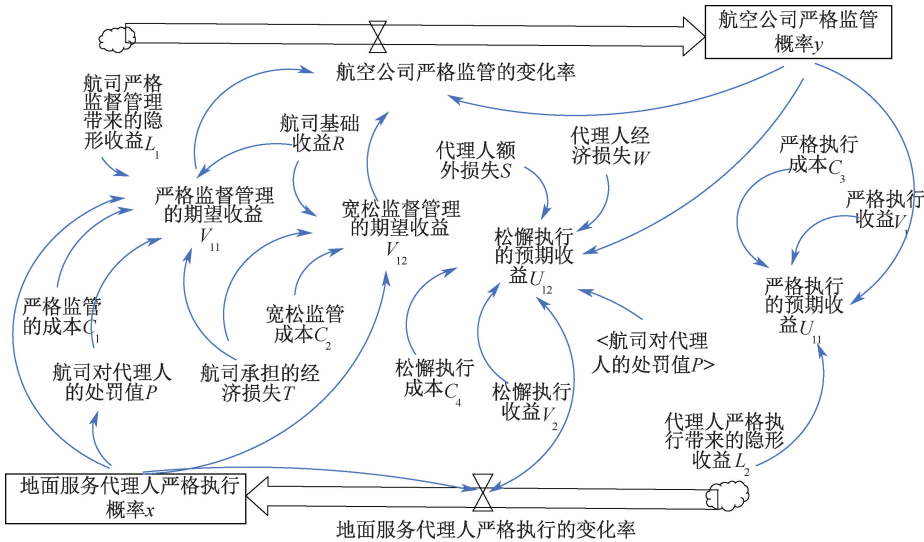


图 5 动态惩罚机制下的航司与地面服务代理人博弈的系统动力学模型

Fig. 5 System dynamics model of game between airline company and agent under dynamic penalty mechanism

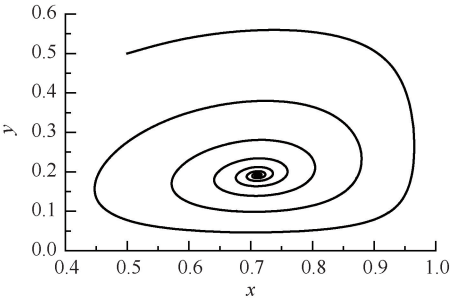


图6 动态惩罚措施下航司与地面服务代理人混合策略的演化过程

Fig. 6 Evolution of mixed strategies of airline companies and ground service agents under dynamic penalties

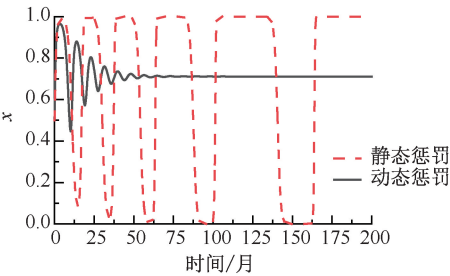
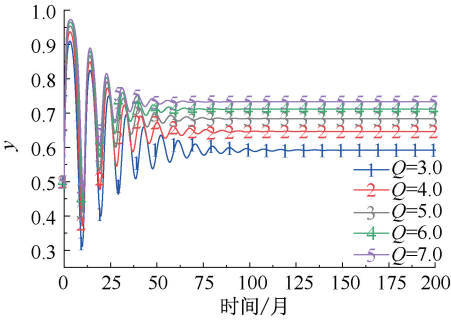


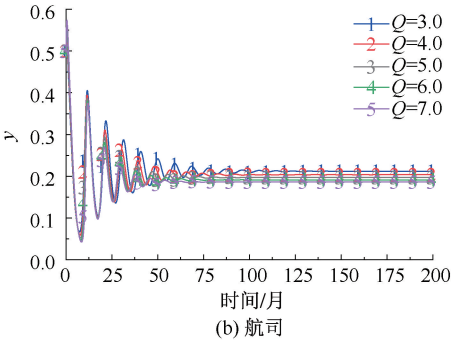
图7 不同惩罚下博弈双方概率的演化过程
Fig. 7 Evolution of probabilities of two sides of game under different penalties

3.2.2 动态惩罚机制下参数敏感性分析

为探究动态惩罚机制下,处罚值 $P=g(x)=(1-x)Q$ 对博弈双方行为策略选择的影响,对 P 进行敏感性分析, x,y 的初始值均设为 0.5,其余参数值见表 4。依据条件 $Q>C_1>0$,将 Q 分别设定为 3、4、5、6 和 7,观察不同惩罚力度下地面服务代理人选择严格执行概率的演化过程,仿真结果如图 8 所示。从图 8 中可以得出,航司与地面服务代理人的概率发展趋势基本相似,均随时间与博弈次数的增加而逐渐稳定。当 Q 逐渐增加时,地面服务代理人选择严格执行代理协议的概率逐渐增加,航司严格监督管理的概率逐渐降低。因此,航司可以通过在一定范围内加大惩罚力度的方式,促进地面服务代理人严格执行安全协议的行为,以达到危险品安全运输的目标。



(a) 地面服务代理人



(b) 航司

图8 航司对地面服务代理人松懈执行处罚力度 Q 演化过程

Fig. 8 Airline companies are lax in enforcing penalties on ground service agents Evolutionary process

4 结 论

- 1) 对比高惩罚与低惩罚力度下博弈双方策略选择概率的变化趋势,发现在一定范围内,航司选择的惩罚力度越高,地面服务代理人选择严格执行安全协议的概率就越高。
- 2) 航司应该改变传统的静态惩罚机制,针对地面服务代理人松懈执行程度,实行相应的动态惩罚。松懈执行程度越高,地面服务代理人面临的惩罚成本越大,从而降低其松懈执行的可能性。
- 3) 地面服务代理人往往会因惩罚力度不足而懈怠代理责任。因此,在可控范围内加强惩罚力度,提高惩罚上限,能够有效促进地面服务代理人严格履行代理协议的行为。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国交通运输部. 民用航空危险品运输管理规定[Z]. 2024-07-01.
[2] 中国民用航空局. 关于 2016 年危险品航空运输违规行为行政处罚情况的公告[Z]. 2017-05-17.
[3] 中国民用航空局. 关于 2017 年危险品航空运输违规行为行政处罚情况的公告[Z]. 2018-05-09.
[4] 中国民用航空局. 关于 2018 年危险品航空运输违规行为行政处罚情况的公告[Z]. 2019-04-30.
[5] 中国民用航空局. 中国民用航空局关于 2020 年危险品航空运输违规行为行政处罚情况的公告[Z]. 2021-03-30.
[6] 杜琚, 何家力. 基于社会网络的危险品航空运输违规行为分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(7):

73-78.

DU Jun, HE Jiali. Analysis of dangerous goods air transportation violations based on social network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(7): 73-78.

[7] YUAN Liang, TAO Xiaorui, RAMSEY T S, et al. Simulating the principal-agent relationship between enterprise owners and professional managers using evolutionary game theory and system dynamics[J]. Complexity, 2021, 2021: 1-18.

[8] 宋猛, 刘伯恩. 全民所有自然资源资产所有权委托代理机制探析—基于监管风险管控与规避的视角[J]. 自然资源学报, 2023, 38(11): 2 889-2 898.

SONG Meng, LIU Bo'en. Exploring the proxy mechanism of ownership of nationally owned natural resource assets: a perspective based on regulatory risk control and avoidance [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(11): 2 889-2 898.

[9] 崔琳, 周方伟. 信息搜集与激励视角下的金融监管模式[J]. 金融与经济, 2022(11): 3-15.

CUI Lin, ZHOU Fangwei. A model of financial regulation under the perspective of information collection and incentives[J]. Finance and Economy, 2022(11): 3-15.

[10] 朱庆华, 王一雷, 田一辉. 基于系统动力学的地方政府与制造企业碳减排演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2014, 23(3): 71-82.

ZHU Qinghua, WANG Yilei, TIAN Yihui. Game analysis of carbon emission reduction evolution between local governments and manufacturing enterprises based on system dynamics[J]. Operations Research and Management, 2014, 23(3): 71-82.

[11] 罗宏森, 王传生, 石夫磊. 基于系统动力学的动态惩罚机制下食品安全生产监管博弈[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2 660-2 667.

LUO Hongsen, WANG Chuansheng, SHI Fulei. A system dynamics-based game of food safety production regulation under dynamic penalty mechanism[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2 660-2 667.

[12] 韩震, 王菡, 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 port dangerous goods management based on system dynamics[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45(2): 28-35.

[13] GAO Honghu, CAO Guangmei, XING Daning. Evolutionary dynamics of the port hazardous chemical logistics enterprises' security behavior under dynamic punishment[J]. Journal of Coastal Research, 2019, 94(S1): 437-442.

[14] FENG Fenling, LIU Chengguang, ZHANG Jiaqi. China's railway transportation safety regulation system based on evolutionary game theory and system dynamics[J]. Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis, 2020, 40(10): 1 944-1 966.

[15] 王先甲, 全吉, 刘伟兵. 有限理性下的演化博弈与合作机制研究[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(增1): 82-93.

WANG Xianjia, QUAN Ji, LIU Weibing. Research on evolutionary games and cooperative mechanisms under limited rationality[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2011, 31(S1): 82-93.

[16] 李利华, 王瑶, 邓亚军, 等. 碳税政策下绿色物流发展的三方演化博弈[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3 715-3 726.

LI Lihua, WANG Yao, DENG Yajun, et al. Three-party evolutionary game of green logistics development under carbon tax policy[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3 715-3 726.

[17] 张明, 武文琪, 黄孟, 等. 环保社会组织参与下的企业漂绿行为治理: 演化博弈及仿真分析[J]. 环境经济研究, 2023, 8(4): 121-140.

ZHANG Ming, WU Wenqi, HUANG Meng, et al. Governance of corporate greenwash behavior with the participation of environmental social organizations: evolutionary game and simulation analysis[J]. Environmental Economics Research, 2023, 8(4): 121-140.

[18] ALEXANDER J M K. Evolutionary game theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023: 17-21.

作者简介: 沈海滨 (1978—), 男, 黑龙江双鸭山人, 硕士, 副教授, 主要从事民航危险品运输、民航安保等方面的研究。E-mail: haibinshen@126.com。

