

基于演化博弈研究的机场净空安全监管

文 军, 樊志翔

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618300)

摘要: 为提升机场净空安全监管水平,保障机场净空区域的安全运行,构建了机场管理部门与净空违规者之间的演化博弈模型,深入分析双方在不同情景条件下的策略选择及其成因。运用 MATLAB 软件对重要参数的敏感度进行了数值分析,探讨了净空违规者违规运行被发现的概率、处罚力度、合规运行成本以及违规运行收入 4 个重要参数对系统演化路径及演化结果的影响。结果表明,提高违规操作被发现的概率和加大处罚力度,可以有效促使违规者向合规运行策略转变;同时,通过降低合规运行成本和限制违规收益,能够进一步减少违规行为的发生概率。

关键词: 机场净空; 安全管理; 演化博弈; 仿真分析; 参数敏感性

中图分类号: V351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)06-0036-06

随着我国航空业的快速发展,机场的运营压力日益增加,净空区安全管理作为确保飞行安全的重要环节,正面临着愈加复杂的挑战。机场净空区的安全管理主要指对机场周边空域及设施的监管,确保无障碍物干扰飞机的正常起降。然而,城市扩展、无人机广泛应用以及建筑开发的增加,使得机场净空区的违规行为频发,严重威胁航空安全。

机场净空安全管理一直是国内外学者关注的重要课题,主要围绕机场净空管理问题开展了相关研究,研究成果主要集中在机场净空可视化研究^[1-2]、机场净空障碍物监测^[3-5]、机场净空区障碍物评定^[6]等方面,这些研究主要从技术层面对机场净空管理进行分析,很少从监管主体和监管对象的行为选择进行研究。

机场净空安全监管作为一项长期性、复杂性和动态性的管理工作,各参与主体之间容易出现利益冲突,如何协调各参与主体的利益冲突成为管理工作的难点。1978 年, Taylor 和 Jonker 等^[7]在有限理性的条件下首次提出复制动态模型,标志着演化博弈理论正式诞生。演化博弈理论是研究主体行为决策以及决策均衡的模型方法,适用于探究各主体间决策背后的逻辑关系^[8],近年来在安全监管领域得到了广泛的应用。已有部分学者将演化博弈理论运用到民航领域安全监管中。2016 年,王文轲等^[9]最先将演化博弈理论运用到民航安全监管中,

探讨出加大安全管理力度降低监管成本等手段均可促进行业全方位进行安全投入,确保飞行安全。陈陶和冯文刚^[10]为了提升民航安检效率,构建了旅客、机场公安和安检员三方演化博弈模型,得出安检员、机场公安以及旅客在民航安检中的影响。高坤和杨春辉^[11]结合机场不停航施工特点,基于前景理论和心理账户理论对传统博弈价值感知矩阵进行优化,构建了安全监管演化博弈模型,进一步完善了机场不停航施工安全管理和相应监管制度。文军等^[12]构建了机场安全运行监管演化博弈模型,探讨了政府监管部门与机场在机场安全运行中的策略选择。许雅玺和张一凡^[13]构建了民航监管机构、航空公司与旅客的三方演化博弈模型,分析了不同情境下各参与主体的稳定演化策略。冯文刚等^[14]在有限理性前提下构建了民航公安、风险旅客和机场航司三方策略的演化博弈模型,探讨了三个主体决策过程中的演化策略路径选择以及影响动态博弈系统稳定状态的重要因素。但都未从演化博弈理论的角度研究机场净空监管。

鉴于此,本文以有限理性假设为基础,考虑了机场管理部门和净空违规者为主要利益相关者,从双方博弈的角度出发,构建了机场管理部门与净空违规者的演化博弈模型。该模型运用演化博弈模型来研究双方之间动态博弈的过程,并建立了机场管理部门和净空违规者的博弈框架,同时分析了模

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 2023 年大学生创新创业项目(S202310624065)

作者简介: 文军(1968—),男,四川成都人,博士,教授,研究方向为机场净空安全管理;通信作者樊志翔(1997—),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为机场净空安全管理。

型中重要的参数对净空违规者合规运行策略的影响。这些研究成果有助于提升净空违规者合规运行的意愿,并为实现机场净空安全运行提供了有益的决策参考。

1 模型假设与构建

1.1 演化博弈模型假设

将机场管理部门与净空违规者作为机场净空安全运行的主要参与者,研究它们之间的行为决策演化策略。

假设 1:机场管理部门主要是包括机场公安部门和机场飞行区管理部,负责根据相关规定对机场净空进行巡视检查,发现并制止影响机场净空安全事件,并对影响机场净空安全的净空违规者进行处罚;净空违规者主要分为两类群体:一类是无心之举的个人(如无人机、热气球、航模飞机的操作者),另一类是出于经济利益故意违规的机构或个人(如净空区域内的开发商)。这些违规行为可能危及飞行安全。

假设 2:有限理性的博弈参与人为机场管理部门和净空违规者,两者相互独立。机场管理部门的策略空间是(严格监管,宽松监管),净空违规者的策略空间是(合规运行,违规运行)。其中,“严格监管”指机场管理部门依据相关法律法规进行全面监视;“宽松监管”指机场管理部门对机场净空区进行监管或者应付监管;“合规运行”指净空违规者在机场净空区域活动遵守《运输机场净空保护管理办法》等相关法律法规,履行申报程序;“违规运行”指净空违规者无视规章制度,在净空区域内违规操作。

假设 3:博弈初始状态假设。在博弈开始时,机场管理部门选择“严格监管”策略的概率为 $x(0 \leq x \leq 1)$,选择“宽松监管”策略的概率为 $(1-x)$;净空违规者选择“合规运行”策略的概率为 $y(0 \leq y \leq 1)$,选择“违规运行”策略的概率为 $(1-y)$ 。

假设 4:当机场管理部门选择严格监管时, C_1 为投入新的监测设备与巡视成本; L_1 为有效防止机场净空遭受破坏,并挽回机场的声誉取得的收益;当机场管理部门选择宽松监管时, C_2 为宽松监管的成本; D 为机场净空遭受破坏机场产生的各种损失; P_1 为被民航局的罚款。

假设 5:当净空违规者选择合规运行时, C_3 为净空违规者在净空范围内活动所需的申报、考证等所需的成本; L_2 为合规运行取得的收益;当净空违规者选择违规运行时, L_3 为违规运行取得的违规收益;因违规运行被机场管理部门监查到的概率为 α ,

受到的处罚为 P_2 。

基于上述假设,得出两方博弈支付矩阵如表 1 所示。

表 1 机场管理部门和净空违规者的支付矩阵

净空违规者	机场管理部门	
	严格监管 x	宽松监管 $(1-x)$
合规操作 y	$L_1 - C_1; L_2 - C_3$	$-C_2; L_2 - C_3$
违规操作 $(1-y)$	$L_1 + \alpha P_2 - C_1;$ $C_3 + L_3 - \alpha P_2$	$-D - \alpha P_1 - C_2;$ $L_3 - \alpha P_2$

1.2 演化博弈模型

设机场管理部门采取严格监管策略和宽松监管策略的期望收益及平均期望收益分别为 U_x, U_{1-x}, U_1 。

$$U_x = y(L_1 - C_1) + (1-y)(L_1 + \alpha P_2 - C_1) \quad (1)$$

$$U_{1-x} = y(-C_2) + (1-y)(-D - \alpha P_1 - C_2) \quad (2)$$

$$U_1 = xU_x + (1-x)U_{1-x} \quad (3)$$

设净空违规者采取合规运行和违规运行的期望收益分别为 U_y, U_{1-y}, U_2 。

$$U_y = x(L_2 - C_3) + (1-x)(L_2 - C_3) \quad (4)$$

$$U_{1-y} = x(C_3 + L_3 - \alpha P_2) + (1-x)(L_3 - \alpha P_2) \quad (5)$$

$$U_2 = yU_y + (1-y)U_{1-y} \quad (6)$$

根据演化博弈理论,机场管理部门的复制动态方程为

$$F(x) = -x(x-1)(C_2 - C_1 + D + L_1 + \alpha P_2 + \alpha P_1 - Dy - \alpha P_2 y - \alpha P_1 y) \quad (7)$$

净空违规者的复制动态方程为

$$F(y) = y(y-1)(C_3 - L_2 + L_3 - \alpha P_2 + C_3 x) \quad (8)$$

令 $F(x) = 0, F(y) = 0$, 可得到 5 个博弈均衡点,分别为 $(0,0), (1,0), (0,1), (1,1), (x^*, y^*)$,

$$\text{其中, } x^* = \frac{C_3 - L_2 + L_3 - \beta P_2}{C_3}, y^* = \frac{C_2 - C_1 + D + L_1 + \alpha P_2 + \alpha P_1}{D + \alpha P_2 + \alpha P_1}。$$

1.3 演化稳定性分析

根据 Friedman 理论,对系统的五个局部均衡点进行稳定性分析,将五个均衡点代入到雅可比矩阵中。若能满足 $\text{tr}J < 0$ 且 $\text{det}J > 0$, 则该均衡点为稳定策略点。但由于 (x^*, y^*) 处的 $\text{tr}J = 0$, 不满足该点为演化博弈稳定策略的条件,故该均衡点一定不是稳定策略点。计算结果如表 2 所示。

表 2 各博弈均衡点的行列式和迹

均衡点	det \mathbf{J}	tr \mathbf{J}
(0,0)	$-(C_3 - L_2 + L_3 + \alpha P_2)(C_2 - C_1 + D + L_1 + \alpha P_2 + \alpha P_1)$	$C_2 - C_1 - C_3 + D + L_1 + L_2 - L_3 + 2\alpha P_2 + \alpha P_1$
(1,0)	$(2C_3 - L_2 + L_3 - \alpha P_2)(C_2 - C_1 + D + L_1 + \alpha P_2 + \alpha P_1)$	$-C_2 + C_1 - 2C_3 - D - L_1 + L_2 - L_3 - \alpha P_1$
(0,1)	$(C_3 - L_2 + L_3 - \alpha P_2)(C_2 - C_1 + L_1)$	$C_2 - C_1 + C_3 + L_1 - L_2 + L_3 - \alpha P_2$
(1,1)	$-(2C_3 - L_2 + L_3 - \alpha P_2)(C_2 - C_1 + L_1)$	$-C_2 + C_1 + 2C_3 - L_1 - L_2 + L_3 - \alpha P_2$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $J_{11} = (1-2x)(C_2 - C_1 + D + L_1 + \alpha P_1 + \alpha P_2 - Dy - \alpha P_1 y - \alpha P_2 y)$; $J_{12} = x(x-1)(D + \alpha P_2 + \alpha P_1)$; $J_{21} = y(y-1)C_3$; $J_{22} = (2y-1)(C_3 - L_2 + L_3 - \alpha P_2 + C_3 x)$ 。

情景 1: 当 $C_3 + L_3 + \alpha P_2 > L_2$ 且 $C_2 + D + L_1 + \alpha P_2 + \alpha P_1 < C_1$ 时, 均衡点(0,0)对应的 $\det \mathbf{J} > 0$, $\text{tr} \mathbf{J} < 0$, 此时该均衡点为稳定点。表明当机场管理部门严格监管的成本大于其宽松监管的净成本时, 机场管理部门会选择宽松监管策略来规避高额的监管成本; 当净空违规者的选择合规运行的收益小于违规运行的净收益时, 净空违规者会选择违规运行策略。

情景 2: 当 $C_2 + D + L_1 + \alpha P_2 + \alpha P_1 > C_1$ 且 $C_3 + L_3 + 2\alpha P_2 > L_2 + \alpha P_2$ 时, 均衡点(1,0)对应的 $\det \mathbf{J} > 0$, $\text{tr} \mathbf{J} < 0$, 此时该均衡点为稳定点。其表明当机场管理部门严格监管的总收益大于宽松监管的总收益时, 机场管理部门会选择严格监管策略; 当净空违规者合规运行的总收益小于其违规运行的总收益时, 净空违规者会选择违规运行策略来获得高额的违规收益。

情景 3: 当 $C_2 + L_1 < C_1$ 且 $C_3 + L_3 + \alpha P_2 < L_2$ 时, 均衡点(0,1)对应的 $\det \mathbf{J} > 0$, $\text{tr} \mathbf{J} < 0$, 此时该均衡点为稳定点。表明当机场管理部门严格监管的成本大于宽松监管成本与严格监管的收益之和时, 机场管理部门会选择宽松监管策略; 当净空违规者的合规运行的收益大于其违规运行的收益与对其的违规罚款之和时, 净空违规者会选择合规运行策略。

情景 4: 当 $C_2 + L_1 > C_1$ 且 $2C_3 + L_3 + \alpha P_2 < L_2$ 时, 均衡点(1,1)对应的 $\det \mathbf{J} > 0$, $\text{tr} \mathbf{J} < 0$, 此时该均衡点为稳定点。表明当机场管理部门严格监管的成本小于宽松监管成本与严格监管的收益之和时, 机场管理部门会选择严格监管策略; 当净空违规者的合规监管的收益大于其违规运行的收益与

对其违规罚款之和时, 净空违规者会选择合规运行策略。

为了直观观察演化博弈过程及最终演化结果, 利用 MATLAB 软件进行仿真分析, 进一步分析演化博弈中参与方策略选择。赋值如下: $C_1 = 5, C_2 = 1, C_3 = 1, L_1 = 7, L_2 = 4, L_3 = 3, D = 10, P_1 = 5, P_2 = 5, \alpha = 0.5$ 。演化结果如图 1 所示。

由图 1 可知, 无论两方的初始策略意愿选择大小, 经过一段时间的博弈, 系统最终都会稳定在点(1,1), 即机场管理部门选择“严格监管”策略, 净空违规者选择“合规运行”策略。

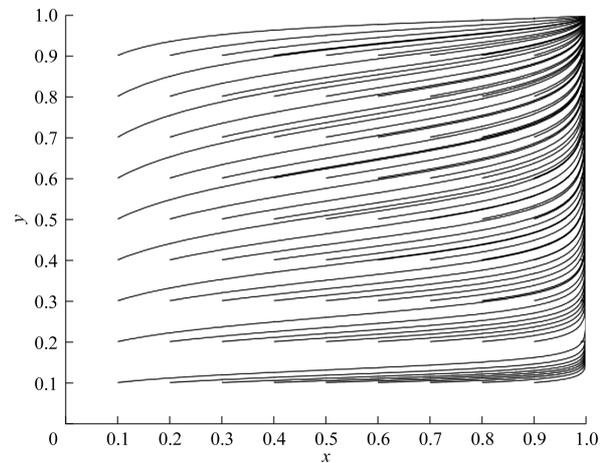


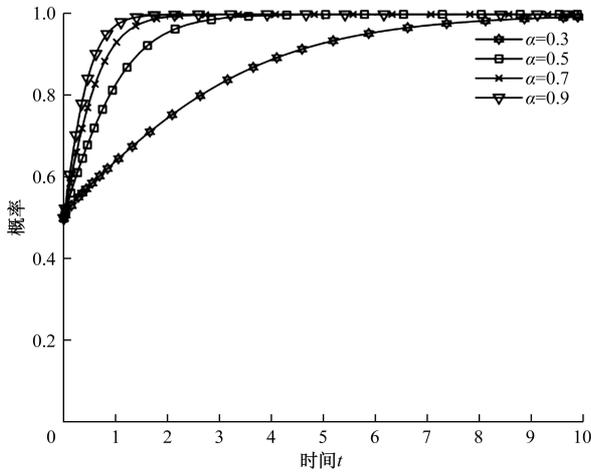
图 1 情景 4 下的系统演化状态

2 演化博弈模型参数敏感性仿真分析

为了进一步探究机场净空监管演化博弈模型重要参数对机场管理部门和净空违规者的影响效应, 运用 MATLAB 软件, 根据机场净空日常监管的实际情况, 结合演化博弈模型的约束条件, 对该模型的相关重要参数进行了敏感度仿真分析。

2.1 参数 α 对净空违规者合规运行概率的影响

令 $\alpha = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$, 在其他参数不变的情况下, 净空违规者合规运行的概率如图 2 所示。由图 2 可知, 随着机场监管部门对净空违规者违规操作发现的概率增大, 净空违规者逐渐由违规运行向合规运行策略演化, 且随着净空违规者被发现违规运行的概率越大, 其向合规运行策略演化的速率越

图2 参数 α 对净空违规者合规运行概率的影响

快,系统达到演化稳定状态的时间越短,这说明净空违规者被发现违规运行的概率在一定程度上可以有效地抑制净空违规者违规运行。因此,机场管理部门可以引入技术手段有效提高违规行为的发现概率。此外,设立公众监督渠道、鼓励机场员工和群众举报违规行为,也能够一定程度上提升违规行为的发现率,从而降低违规时间的发生频率。

2.2 参数 L_3 对净空违规者合规运行概率的影响

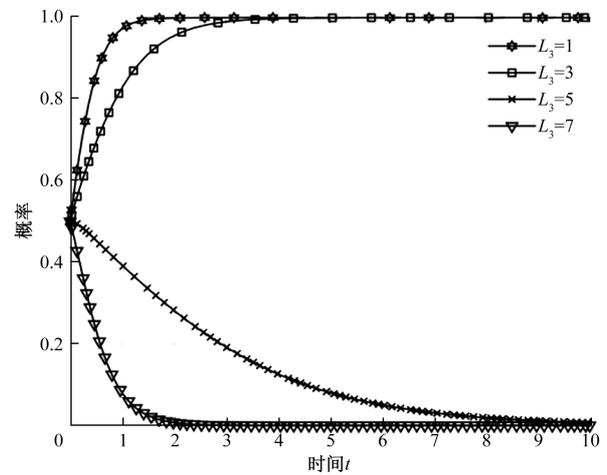
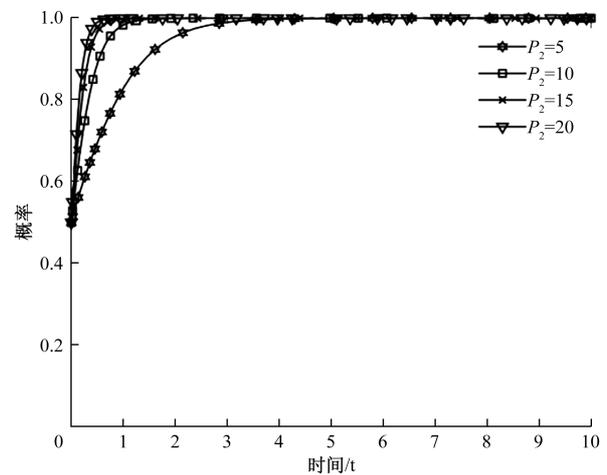
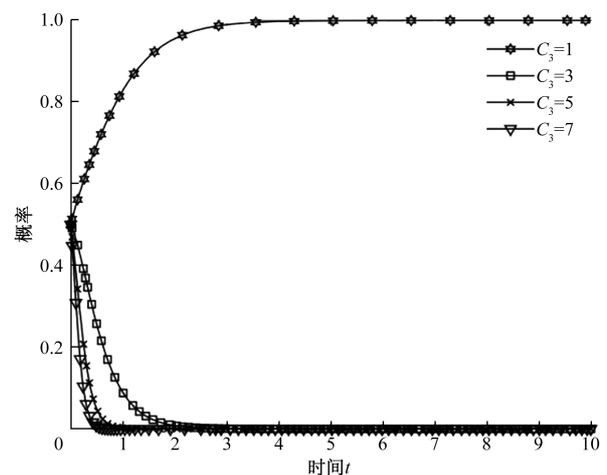
令 $L_3=1,3,5,7$,在其他参数不变的情况下,净空违规者合规运行的概率如图3所示。由图3可知,随着净空违规者违规运行收入的增加,净空违规者的策略选择逐渐由合规运行转变为违规运行,且违规收入增加得越多,其向违规运行策略演化的速率越快,系统达到演化稳定状态的时间越短,这说明净空违规者违规收入的减少同样可以一定程度上抑制净空违规者违规运行。因此,在日常管理中有关部门应采取有效措施,限制净空违规者的违规运行的收入。

2.3 参数 P_2 对净空违规者合规运行概率的影响

令 $P_2=5,10,15,20$,在其他参数不变的情况下,净空违规者合规运行的概率如图4所示。由图4可知,随着惩罚力度的增加,净空违规者向合规运行策略演化的速率显著提升,系统更迅速地达到稳定状态。具体而言,较大的惩罚力度能够有效增加违规者的违规成本,从而驱使其放弃违规操作,转向合规运行。因此,机场管理部门在制定管理政策时,应通过提高罚款力度加强处罚执行力来促使净空违规者减少违规行为。

2.4 参数 C_3 对净空违规者合规运行概率的影响

令 $C_3=1,3,5,7$,在其他参数不变的情况下,

图3 参数 L_3 对净空违规者合规运行概率的影响图4 参数 P_2 对净空违规者合规运行概率的影响图5 参数 C_3 对净空违规者合规运行概率的影响

净空违规者合规运行的概率如图5所示。由图5可知,当合规成本较低时,净空违规者更倾向于选择合规运行。然而,随着合规成本的增加,净空违

规者逐渐转向违规操作。尤其对于小型机场,由于资源有限、监管力度相对较弱,净空违规者更可能选择违规行为以规避较高的合规成本。因此,机场管理部门可以通过简化合规流程、降低相关学习等相关费用来推动净空违规者选择合规运行。

3 对策建议

根据机场净空安全监管演化博弈模型分析结果,基于机场净空监管现状,本文从管理层面提出一些建议对策。

(1)提升违规行为的发现概率。通过引入无人机巡查、卫星遥感及三维激光雷达等监测等手段,实时监控机场净空区域的违规行为,从而显著提升违规行为被发现的概率。

(2)强化违规行为的处罚力度。政府管理部门可以通过制定更为严格的法律法规,提升对违规行为的处罚力度和强度,增加违规者的违规成本。

(3)简化审批流程,降低合规运行的成本。通过引入数字化审批平台,实现合规运行申请的在线化、电子化处理,减少审批环节。对一些常见的净空作业,通过制定简便易行的操作指南和短期培训,降低违规者的合规运行的成本。

(4)限制违规运行的潜在经济收益。针对净空区域内的开发商,制定明确的限制措施,禁止任何违规违建行为,并利用经济手段,如征收高额的违建税费等措施,减少违规行为的经济收入。

(5)加强公众监督与社会参与。通过设置举报奖励制度,鼓励机场周边居民及机场员工积极举报机场净空区域的违规行为。并通过媒体、互联网等方式,提高公众对机场净空安全重要性的认识,增强对违规行为的警惕性和举报的主动性。

4 结论

对机场净空安全管理问题运用演化博弈理论进行了分析,构建了以机场管理部门与净空违规者为参与方的两方演化博弈模型。通过对模型的初步求解得到了该博弈模型的复制动态方程,并运用Friedman理论对求得的5个均衡点进行了稳定性分析,并运用MATLAB软件对重要参数其进行了仿真分析,分析结果发现:①机场管理部门通过增加对净空违规者的巡视和监控手段,能够显著提高对违规行为的发现概率,从而有效的抑制净空违规者违规行为的发生;②增加对净空违规

者的处罚力度,能够提升净空违规者的违规成本,使其更加倾向于选择合规运行;③简化审批流程、降低合规运行成本也是促使净空违规者选择合规运行的重要因素;④减少净空违规者的违规运行中的潜在收益,可以有效降低违规行为的吸引力。

基于研究结论,给出了提升违规行为的发现概率、强化违规行为的处罚力度、简化审批流程,降低合规运行的成本、限制违规运行的潜在经济收益和加强公众监督与社会参与的建议对策,以为机场净空安全运行提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 李静,赵晨阳,李顺,等.基于BIM的三维机场净空可视化研究[J].大连理工大学学报,2023,63(5):536-543.
- [2] 庄育锋,张聆兮,陈茜颖,等.变坡跑道的机场净空模型及其解析式分析[J].北京邮电大学学报,2022,45(5):7-15.
- [3] 刘冬枝,许庆领.高分七号与资源三号卫星联合服务机场净空监测[J].测绘通报,2023(6):138-141.
- [4] 童矿,宋洋,孔祥芬.机场净空区建筑物的识别与监测[J].测绘通报,2022(3):127-131.
- [5] 杨盛华,尹洋,郭欣萌,等.基于多源遥感数据的净空区建筑物三维动态监测[J].测绘通报,2019(S1):105-109.
- [6] 耿昊,蔡良才,邵斌.三维机场净空应用模型研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(1):9-15.
- [7] TAYLOR P D, JONKER L B. Evolutionary stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Biosciences, 1978(40):145-156.
- [8] RASMUSSEN J. Risk management in a dynamic society: a modeling problem[J]. Safety Science, 1997, 27(2/3):183-213.
- [9] 王文轲,蔡洁,陈曾洁,等.民航安全监管中的多方演化博弈研究[J].中国安全科学学报,2016,26(1):136-141.
- [10] 陈陶,冯文刚.基于演化博弈的民航安检有效性提升研究[J].复杂系统与复杂性科学,2023,20(4):77-84.
- [11] 高坤,杨春辉.机场不停航施工安全监管策略博弈分析[J].中国安全生产科学技术,2022,18(6):141-147.
- [12] 文军,孙静,侯明利,等.基于演化博弈的机场安全运行监管研究[J].安全与环境学报,2019,19(5):1655-1661.
- [13] 许雅玺,张一凡.基于三方演化博弈的民用航空安全监管研究[J].航空计算技术,2023,53(2):6-10.
- [14] 冯文刚,张育玮,何晓春.有限理性下民航安保参与方策略演化博弈分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(9):1279-1286.

Airport Clearance Safety Supervision Based on Evolutionary Game Theory

WEN Jun, FAN Zhixiang

(Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: To enhance the level of safety management in airport clearance zones and ensure safe operations within these areas, an evolutionary game model between airport management authorities and clearance violators was constructed. An in-depth analysis of the strategic choices was provided made by both parties under different scenario conditions and the underlying reasons for these choices was explored. Using MATLAB software, a sensitivity analysis of key parameters was conducted, examining the impact of four crucial factors, such as the probability of detecting violations, penalty severity, compliance operation costs, and non-compliance income, on the system's evolutionary path and outcomes. The results show that increasing the probability of detecting violations and imposing stricter penalties can effectively encourage violators to shift towards compliant strategies. Furthermore, reducing compliance costs and limiting non-compliance income can further decrease the probability of violations occurring.

Keywords: airport clearance; safety management; evolutionary game; simulation analysis; parameter sensitivity