

基于四方演化博弈的无人机安全监管策略研究

张青松^{a,b}, 范宽^b

(中国民航大学 a. 民航热灾害防控与应急重点实验室; b. 安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 为提高中国民用无人机监督管理效能,降低无人机事故率,进一步保障中国通用航空运输安全,本文运用演化博弈理论,构建中国民用航空局通航无人机安全监管部门、地方政府、无人机企业和无人机操控者多个利益主体间的无人机市场流通的全流程监督管理四方演化博弈模型,探索了多主体在动态博弈分析中的策略选择路径、演化趋势及不同关键策略影响下系统稳定控制场景,为中国民用无人机的监管策略提出了合理性建议。结果表明,大幅度提高无人机监管效率和降低无人机事故率需要加大对无人机企业的追责力度及采用分级监管策略。

关键词: 演化博弈; 无人机监管; 通用航空; 分级监管

中图分类号: V279; X949 文献标志码: A 文章编号: 1674-5590(2025)06-0068-07

Research on UAV safety supervision strategies based on a four-party evolutionary game model

ZHANG Qingsong^{a,b}, FAN Kuan^b

(a. Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response;

b. College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to improve the supervision and management efficiency of civil unmanned aerial vehicles (UAVs) in China, reduce their accident rate, and further ensure the safety of general aviation, this study applies evolutionary game theory to construct a four-party evolutionary game model for the full-process supervision of UAV market circulation. The model involves multiple stakeholders, including the Civil Aviation Administration of China (CAAC) safety supervision department, local governments, UAV enterprises, and UAV operators. The study explores the strategy selection paths, evolutionary trends, and system stability and control scenarios under the influence of different strategies, and proposes reasonable regulatory strategies for civil UAVs in China. The results indicate that significantly improving UAV regulatory efficiency and reducing UAV accident rates require strengthening accountability for UAV enterprises and adopting a hierarchical supervision strategy.

Key words: evolutionary game; unmanned aerial vehicle (UAV) supervision; general aviation; hierarchical supervision

中国无人机数量繁多,截至2022年底,全行业无人机拥有者注册用户70.0万个,全行业注册无人机共95.8万架^[1],而注册外的轻型无人机更是数不胜数。无人机小巧便携、操作简单的特性使其存在监管困难、违法成本低、飞手法律意识淡薄等问题,导致无人机黑飞事件频发^[2]。2017年4月,仅在一周内,四川成都双流国际机场就发生了4起无人机扰航事件。尽管相关部门已经意识到问题的严重性,但目前中国相应的法律法规并不完善,由于在2023年两会提出的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》^[3]仍处于征求意见阶段,在无人机空域使用的管控中存在着“无法

可依”的情况^[4]。因此,制定行之有效的监管策略是目前亟待解决的问题^[5]。

已有学者针对无人机监管策略进行了深入研究,但大都局限于宏观制度的完善,并没有给出具体建议,如陈帆^[6]和徐瑞华等^[7]分别从监管制度和监管对象方面阐述了目前中国无人机监管存在的问题。由于无人机使用广泛、信息收集困难,所以事故发生后对责任人追责困难^[8-9],监管权责对象不明晰。因此,本文在前人研究的基础上,对宏观的监管策略进行细化,探讨采用分级监管策略对追责溯源的优势,从而降低无人机事故发生率,达到优化中国无人机监管系统

的目的。

综上,拟构建中国民用航空局通航无人机安全监管部门(简称民航局方)、地方政府、无人机企业和无人机操控者为博弈主体的四方演化博弈模型。通过模拟无人机从投产到使用的过程中遇到的问题和所属的监管主体,提出分级监管策略,采用追责溯源的原则,最大程度上消解信息不对称^[10]带来的影响。最后,通过模拟不同关键要素下多方博弈演化过程及演化结果,分析得出分级监管可以有效提高无人机监管效率,为无人机监管体系优化提供理论支持。

1 四方演化博弈模型

1.1 理论方法

本文采用的理论方法是演化博弈论,该理论摒弃了完全理性的假设,把参与博弈的主体行为策略选择看作一个始终以满足自身最大利益为目标的动态过程。因其采用有限的理性假设,满足博弈主体在信息不对称的情况下动态调整策略,符合中国无人机安全监管过程中参与者的长期动态博弈。

1.2 博弈模型构建

基于《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》构建无人机综合管理平台,通过无人机分级监管体系各利益主体不完全信息博弈模型,研究各级监管和奖惩力度对无人机执行合法飞行任务的监管效果,其逻辑关系如图 1 所示,并对无人机安全监管四方演化博弈模型做出规范性表述和假设。

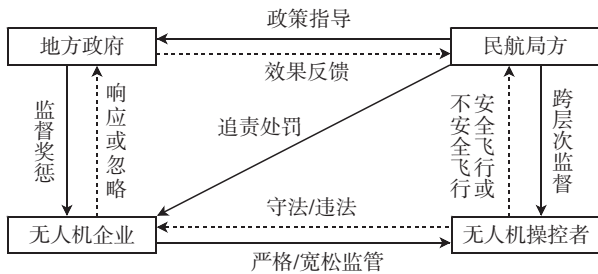


图 1 无人机安全监管四方演化博弈模型逻辑关系

Fig.1 Logical relationships in the four-party evolutionary game model for UAV safety supervision

选择民航局方、地方政府、无人机企业、无人机操控者四方为博弈主体。民航局方对民用无人机活动进行强监管的概率为 x ,进行弱监管的概率为 $1-x$;地方政府通过在民航局方下发的法规政策指导下,因地制宜地对无人机企业等进行严格监管的概率为 y ,确保无人机流通用途明确,进行宽松监管的概率为 $1-y$,包括不监管或监管不到位;无人机企业在销售无人机

时对无人机操控者进行资质严格审查并对无人机操控者进行培训,确保无人机操控者具备执行合法飞行计划知识的概率为 z ,对无人机操控者进行资质宽松审查的概率为 $1-z$;无人机操控者在执行飞行计划时,能合法飞行的概率为 m ,不能合法飞行的概率为 $1-m$ 。 $x, y, z, m \in [0, 1]$,拓展到整个社会群体,每个概率为该博弈主体在系统中选择某策略的比例,四方主体均以追求自身利益最大化为目标。博弈过程中涉及的具体参数如表 1 所示。

表 1 无人机安全监管四方演化博弈模型参数及含义

Tab.1 Parameters and definitions in the four-party evolutionary game model for UAV safety supervision

参数	参数含义
a	民航局方强监管成本
b	民航局方弱监管成本
c	民航局方对无人机操控者弱监管但对无人机企业强监管成本
d	民航局方强监管保障安全带来的收益
e	民航局方弱监管导致声誉、公信力等受损的负收益
f	地方政府严格监管成本
g	地方政府宽松监管成本
h	地方政府严格监管带来的社会稳定等收益
i	地方政府宽松监管导致声誉、公信力等受损的负收益
n	无人机企业严格审查成本
o	无人机企业宽松审查成本
p	无人机企业严格审查带来社会稳定等收益
q	无人机企业宽松审查导致事故增加等负收益
s	无人机企业受到的追责处罚
j	无人机操控者合法飞行成本
k	无人机操控者合法飞行收益
l	无人机操控者违法飞行收益
r	无人机操控者违法飞行处罚
α	地方政府宽松监管、民航局方强监管下无人机企业严格审查概率
β	地方政府严格监管、民航局方弱监管下无人机企业严格审查概率

1.3 博弈主体稳定性分析

根据博弈参与主体策略集合、支付及收益的假设,可以得到民航局方、地方政府、无人机企业和无人机操控者等四方的收益函数矩阵如表 2 所示。当四方采取不同策略组合时,表 2 中的函数项分别对应四方不同策略组合条件下的收益函数表达式。

1.3.1 民航局方策略稳定性分析

民航局方选择强监管的期望收益 $E(x)$,弱监管的期望收益 $E(1-x)$,监管策略的复制动态方程 $F(x)$ 和监管策略的一阶导数 $F'(x)$ 分别表示为

$$E(x) = \alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a \quad (1)$$

$$E(1-x) = -b - e + me \quad (2)$$

$$F(x) = x(1-x)[\alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a + b + e - me] \quad (3)$$

$$F'(x) = (1-2x)[\alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a + b + e - me] \quad (4)$$

表2 无人机安全监管四方演化博弈模型收益函数矩阵

Tab.2 Payoff matrix of the four-party evolutionary game model for UAV safety supervision

策略选择	无人机企业	民航局方			
		强监管 x		弱监管 $1-x$	
		合法 m	违法 $1-m$	合法 m	违法 $1-m$
地方监管部门	严格监管	$-a-c+d$	$-a-c$	$-b$	$-b-e$
	审查	$-f+h$	$-f$	$-f+h$	$-f$
	y	$-j+l$	$-j-n$	$-j+l$	$-j-\beta n$
	z	$-o+p$	$o+q-r$	$-o+p$	$o+p-\beta r$
	宽松	$-a+(1-\alpha)d$	$-a$	$-b$	$-b-e$
	审查	$-f+h$	$-f$	$-f+h$	$-f$
府	$1-z$	$j-2k$	$-k-s-n$	$j-2k$	$-k-s-\beta n$
		$-o+p$	$o+q-r$	$-o+p$	$o+p-\beta r$
	宽松	$-a-c+d$	$-a-c$	$-b$	$-b-e$
	严格监管	$f-2g$	$-g-i$	$f-2g$	$-g-i$
	$1-y$	$-j+l$	$-j-\alpha n$	$-j+l$	$-j$
	z	$-o+p$	$o+q-\alpha r$	$-o+p$	$o+p$
府	宽松	$-a-(1-\alpha)f$	$-a$	$-b$	$-b-e$
	审查	$f-2g$	$-g-i$	$f-2g$	$-g-i$
	$1-z$	$j-2k$	$-k-s-\alpha n$	$j-2k$	$-k-r$
		$-o+p$	$o+q-\alpha r$	$-o+p$	$o+p$

由微分定理稳定性可知,民航局方选择强监管并处于稳定状态必须满足: $F(x) = 0$ 且 $F'(x) < 0$ 。

命题1 设

$$N(z) = \alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a + b + e - me \quad (5)$$

由于 $\frac{\partial N(z)}{\partial z} < 0$,则 $N(z)$ 是关于 z 的减函数,即当 $z < z_0$ 时,民航局方的稳定策略是强监管;当 $z > z_0$ 时,民航局方的稳定策略是弱监管;当 $z = z_0$ 时,无法确定其稳定策略。其中,阈值 $z_0 = [a - b - e + me - (1-\alpha)dm] / (\alpha dm - c)$ 。

命题1表明,在分级监管的管理办法下,当无人机企业能够保证和提高无人机操控者的合法飞行意识时,可以减少无人机不安全飞行的事故率,同时节省民航局方的监管成本,反之,民航局方就要付出高成本去监控无人机的飞行安全。

1.3.2 地方政府策略稳定性分析

地方政府选择严格监管的期望收益 $E(y)$,宽松监管的期望收益 $E(1-y)$,监管策略的复制动态方程 $F(y)$ 和监管策略的一阶导数 $F'(y)$ 分别表示为

$$E(y) = mh - f \quad (6)$$

$$E(1-y) = fm - gm + mi - g - i \quad (7)$$

$$F(y) = y(1-y)(mh - f - fm + gm - mi + g + i) \quad (8)$$

$$F'(y) = (1-2y)(mh - f - fm + gm - mi + g + i) \quad (9)$$

由微分定理稳定性可知,地方政府选择严格监管并处于稳定状态必须满足: $F(y) = 0$ 且 $F'(y) < 0$ 。

命题2 设

$$N(m) = mh - f - fm + gm - mi + g + i \quad (10)$$

由于 $\frac{\partial N(m)}{\partial m} < 0$,则 $N(m)$ 是关于 m 的减函数,当

$m < m_0$,地方政府的稳定策略是严格监管;当 $m > m_0$ 时,地方政府的稳定策略是宽松监管;当 $m = m_0$ 时无法确定其稳定策略。其中,阈值 $m_0 = (f - g - i) / (h - f + g - i)$ 。

命题2表明,随着无人机操控者的守法意识提高,地方政府的稳定策略由严格监管转化为宽松监管。当无人机操控者有自主安全飞行和主动提交飞行计划的意识,可以减少地方政府对无人机操控者的监管成本,反之,地方政府要付出一定的成本保证无人机的飞行安全。

1.3.3 无人机企业策略稳定性分析

无人机企业选择严格审查的期望收益 $E(z)$,宽松审查的期望收益 $E(1-z)$,监管策略的复制动态方程 $F(z)$ 和监管策略的一阶导数 $F'(z)$ 分别为

$$E(z) = ym\beta n - y\beta n - x\alpha n + xm\alpha n + ml - j \quad (11)$$

$$E(1-z) = ym\beta n + xm\alpha n - y\beta n - x\alpha n + mj - km - k - s + sm \quad (12)$$

$$F(z) = z(1-z)(ml - j - mj + km + k + s - sm) \quad (13)$$

$$F'(z) = (1-2z)(ml - j - mj + km + k + s - sm) \quad (14)$$

由微分定理稳定性可知,无人机企业选择严格审查并处于稳定状态必须满足: $F(z) = 0$ 且 $F'(z) < 0$ 。

命题3 设

$$S(m) = ml - j - mj + km + k + s - sm \quad (15)$$

当发生无人机不安全事件时,对无人机企业的追责处罚程度很高, $\frac{\partial S(m)}{\partial m} < 0$,则 $S(m)$ 是关于 m 的减函数;反之,当发生无人机不安全事件时,对无人机企业的追责处罚程度很低,则 $S(m)$ 是关于 m 的增函数。

命题3表明,当无人机企业受到的追责处罚程度很高时,无人机企业会选择对无人机操控者进行严格审查,当无人机操控者有较强的安全意识时,无人机企业会选择从严格审查转变为宽松审查,从而降低审查成本。

1.3.4 无人机操控者策略稳定性分析

无人机操控者选择合法飞行的期望收益 $E(m)$,违法飞行的期望收益 $E(1-m)$,监管策略的复制动态方程 $F(m)$ 和监管策略的一阶导数 $F'(m)$ 表示为

$$E(m) = -o + p \quad (16)$$

$$E(1-m) = o + q + 2xyr - y\beta r - x\alpha r \quad (17)$$

$$F(m) = m(1-m)(p - q - 2xyr + y\beta r + x\alpha r) \quad (18)$$

$$F'(m) = (1-2m)(p - q - 2xyr + y\beta r + x\alpha r) \quad (19)$$

由微分定理稳定性可知,无人机操控者选择合法飞行并处于稳定状态必须满足: $F(m) = 0$ 且 $F'(m) < 0$ 。

命题 4 设

$$N(x) = p - q - 2xyr + y\beta r + x\alpha r \quad (20)$$

由于 $\frac{\partial N(x)}{\partial x} < 0$, 则 $N(x)$ 是关于 x 的减函数。当 $x < x_0$ 时, 无人机操控者的稳定策略是合法飞行; 当 $x > x_0$ 时, 无人机操控者的稳定策略是违法飞行; 当 $x = x_0$ 时, 无法判断其稳定策略。其中, 阈值 $x_0 = (q - p - y\beta r) / (\alpha r - 2yr)$ 。

命题 4 表明, 当民航局方对无人机操控者进行强监管时, 无人机操控者违法飞行概率会下降; 反之,

$$J = \begin{pmatrix} (1-2x)[\alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a + b + e - me] & x(1-x)am & x(1-x)(adm - c) & x(1-x)[\alpha dz + (1-\alpha)d + ay - e] \\ 0 & (1-2y)(mh - f - fm + gm - mi + g + i) & 0 & y(1-y)(h - f + g - i) \\ 0 & 0 & (1-2z)(ml - j - mj + km + k + s - sm) & z(1-z)(l - j + k - s) \\ m(1-m)(\alpha r - 2yr) & m(1-m)(\beta r - 2xr) & 0 & (1-2m)(p - q - 2xyr + y\beta r + x\alpha r) \end{pmatrix}$$

$$\text{tr}J = (1-2x)[\alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a + b + e - me] + (1-2y)(mh - f - fm + gm - mi + g + i) + (1-2z)(ml - j - mj + km + k + s - sm) + (1-2m)(p - q - 2xyr + y\beta r + x\alpha r)$$

$$\det J = (1-2x)(1-2y)(1-2z)(1-2m)[\alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a + b + e - me](mh - f - fm + gm - mi + g + i)(ml - j - mj + km + k + s - sm)(p - q - 2xyr + y\beta r + x\alpha r) - ym(1-y)(1-m)(1-2x)(1-2z)(h - f + g - i)(\beta r - 2xr)[\alpha dmz + (1-\alpha)dm - cz + amy - a + b + e - me](ml - j - mj + km + k + s - sm)$$

只有满足 $\text{tr}J < 0, \det J > 0$ 的系统稳定点才是演化稳定策略, 通过比较不同影响因素作用下的雅可比矩阵的 $\text{tr}J$ 和 $\det J$ 判断均衡点是否为演化稳定策略。

1.4.1 无人机企业宽松审查下策略组合均衡分析

当无人机企业策略选择为宽松审查时, 即满足条件 $ml - j - mj + km + k + s - sm > 0$, 复制动态系统均衡点的渐近稳定性分析如表 3 所示。

表 3 无人机企业宽松审查策略下复制动态系统均衡点的渐近稳定性分析

Tab.3 Asymptotic stability analysis of equilibrium points in the replicator dynamics under the relaxed review strategy of UAV enterprises

均衡点	trJ	detJ	稳定性
(0,0,1,0)	<0	<0	不稳定
(0,1,0,0)	不确定	>0	无法确定
(0,1,0,1)	<0	<0	不稳定
(1,1,0,1)	不确定	<0	无法确定
(1,0,0,0)	<0	>0	稳定点
(1,0,0,1)	>0	不确定	无法确定
(1,1,0,0)	>0	>0	不稳定
(0,0,0,1)	>0	>0	不稳定

由表 3 可知, 稳定策略即为现存策略, 没有考虑分级监管的管理办法, 仅由民航局方直接对无人机操

如果放松对无人机操控者的监管, 就会导致违法飞行事件概率上升。

1.4 博弈模型均衡状态分析

演化均衡策略 (ESS, evolutionarily stable strategy) 是指如果群体绝大多数个体选择进化的稳定策略, 那么小的突变不会侵入群体, 而在演化中趋于消失, 微分系统的稳定性可以由系统的雅可比矩阵的稳定性分析得出。

令 $F(x) = 0, F(y) = 0, F(z) = 0, F(m) = 0$ 可以得出该演化系统内存在的稳定点, 对式 $F(x), F(y), F(z), F(m)$ 分别求关于 x, y, z, m 的偏导数, 得出该系统的雅可比矩阵 J , 并计算矩阵的行列式 $\text{tr}J$ 和迹 $\det J$, 即

控者进行监管, 因此不做分析。

1.4.2 无人机企业严格审查下策略组合均衡分析

当无人机企业策略选择为严格审查时, 即满足条件 $ml - j - mj + km + k + s - sm < 0$, 复制动态系统均衡点的渐近稳定性分析如表 4 所示。

表 4 无人机企业严格审查策略下复制动态系统均衡点的渐近稳定性分析

Tab.4 Asymptotic stability analysis of equilibrium points in the replicator dynamics under the strict review strategy of UAV enterprises

均衡点	trJ	detJ	稳定性
(0,0,1,0)	<0	<0	不稳定
(0,1,1,0)	不确定	>0	无法确定
(0,1,1,1)	<0	<0	不稳定
(1,1,1,1)	<0	>0	稳定点
(1,0,1,0)	不确定	<0	无法确定
(1,0,1,1)	>0	不确定	无法确定
(1,1,1,0)	>0	>0	不稳定
(0,0,1,1)	<0	>0	稳定点

由表 4 可知, 在无人机企业选择严格审查的情况下, 存在两种可能的稳定策略, (1,1,1,1) 和 (0,0,1,1)。当发生无人机不安全事件时, 策略选择为 (1,1,1,1), 随着民航局方和地方政府加大对无人机操控者和无

人机企业的监管力度,在双方的督促下,无人机企业提高对无人机操控者的审查力度,从而降低无人机事故率。随着博弈的进行,无人机事故数量逐渐下降趋于稳定时,为节省成本,策略选择趋于(0,0,1,1)。

2 仿真模拟

2.1 设置初始数据

参考徐瑞华等^[7]、张攀科等^[8]关于无人机操控者策略的数值设定,郭进平等^[11]、孙淑慧等^[12]关于地方政府策略的数值设定,冯文刚等^[13]关于民航局方策略的数值设定,Hassan 等^[14]和 Challita 等^[15]对无人机联网飞行的安全管理,并基于近年来无人机事故处罚结果,综合考虑对初始数值进行选取。在执行一次无人机飞行计划时,无人机操控者选择合法飞行成本 $j = 5$,合法飞行收益 $k = 5$ 。无人机企业在销售无人机时,对无人机操控者的飞行资质等进行严格审查成本 $n = 6$,宽松审查成本 $o = 2$,因无人机企业严格审查带来的社会稳定等收益 $p = 24$ 。地方政府选择对无人机操控者及无人机企业严格监管成本 $f = 8$,宽松监管成本 $g = 1$,因地方政府严格监管带来的社会稳定等收益 $h = 10$,

因地方政府宽松监管导致声誉、公信力等受损的负收益 $i = 11$ 。民航局方选择强监管成本 $a = 12$,选择弱监管成本 $b = 1$,在分级监管策略下,对无人机操控者选择弱监管但对无人机企业选择强监管成本 $c = 6$,因强监管保障安全带带来收益 $d = 15$ (假定在两种强监管强度下带来的收益相同)。为了满足更多的利益,无人机操控者会选择违法飞行的收益 $l = 8$,因违法飞行受到的处罚 $r = 10$ 。无人机企业因宽松审查导致无人机操控者违法受到的追责处罚 $s = 15$,因无人机企业宽松审查导致事故增加等负收益 $q = 12$ 。民航局方的声誉、公信力等受损的负收益 $e = 11$ 。当地方政府宽松监管而民航局方强监管时,无人机企业有 $\alpha = 0.4$ 的概率对无人机操控者严格审查;当地方政府严格监管而民航局方弱监管时,无人机企业有 $\beta = 0.6$ 的概率对无人机操控者严格审查。各博弈方初始策略选择为 $x = 0.5, y = 0.3, z = 0.2, m = 0.4$ 。

2.2 民航局方强监管成本的影响

设 $a = \{18, 8, 6, 2\}$, 仿真周期为 t 。民航局方、地方政府、无人机企业和无人机操控者(以无人机操控者违法飞行进行仿真演示,下同)四方博弈主体策略演化过程及结果如图 2 所示。

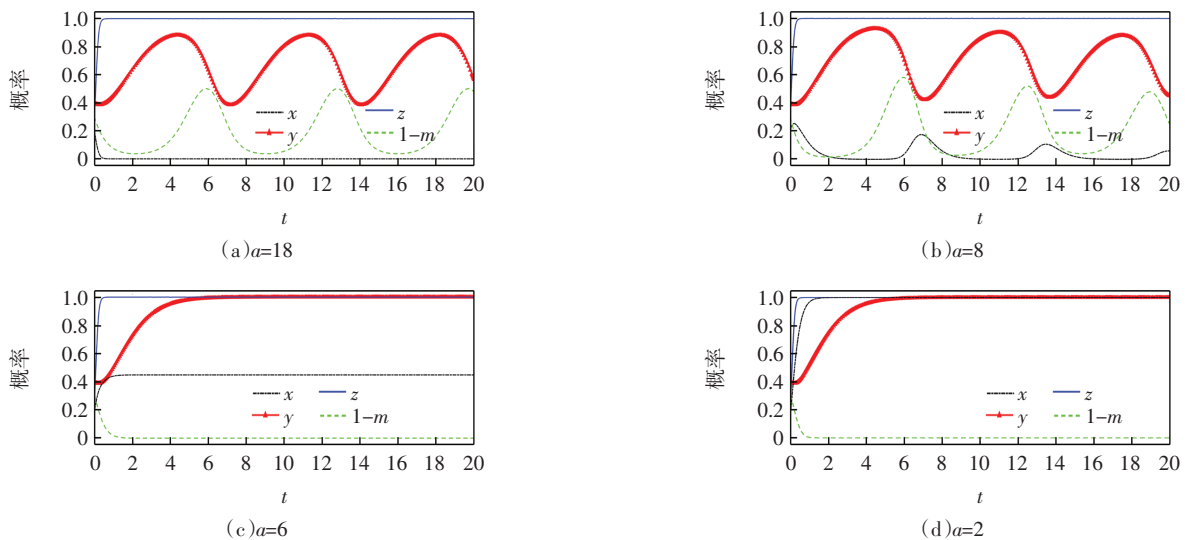


图 2 民航局方强监管成本对四方博弈主体策略演化的影响

Fig.2 Impact of CAAC's strong-supervision costs on the evolution of four-party game strategies

由图 2 可知,随着民航局方进行强监管所需的成本降低,为了保持较高的安全水平,地方政府需要一直保持严格监管策略;当民航局方的监管成本下降足够低时,地方政府会一直保持强监管策略,无人机操控者违法飞行的概率短时间内稳定趋于 0,地方政府可以节省严格监管成本,稳定策略选择转为宽松监管。因此,降低民航局方的监管成本不仅可以降低无人机

操控者违法飞行的概率,同时可以减少地方政府的监管成本。

2.3 无人机操控者违法飞行受处罚程度的影响

设 $r = \{15, 20, 30, 40\}$, 民航局方、地方政府、无人机企业和无人机操控者这四方博弈主体策略演化过程及结果如图 3 所示。

由图 3 可知,当无人机发生事故时,提高对无人

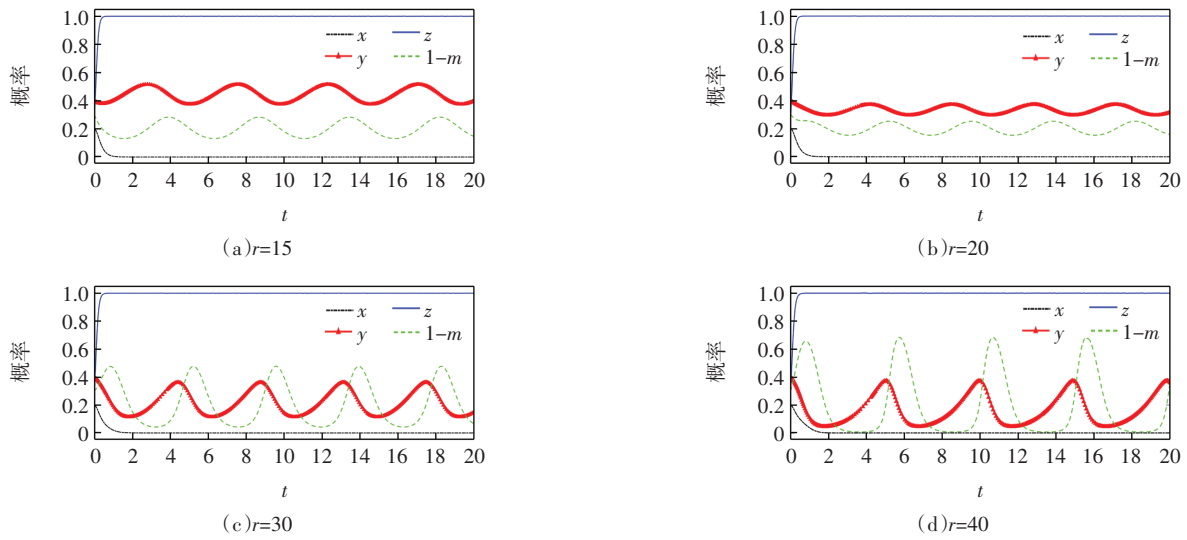


图 3 无人机操控者违法受到处罚程度对四方博弈主体策略演化的影响

Fig.3 Impact of punishment severity for UAV operators' violations on the evolution of four-party game strategies

机操控者违法飞行的处罚力度,对无人机事故率的降低没有显著影响。为了保证无人机的飞行安全,地方政府和民航局方在一定反应时间内仍旧需要投入一定的监管成本。当无人机违法飞行可以带给无人机操控者足够利益时,处罚力度的强弱几乎无法影响无人机事故率,因此,为了降低无人机事故率需要找到其他行之有效的策略。

2.4 无人机企业被追责处罚力度的影响

设当 $s = \{10, 15, 20, 30\}$ 时,民航局方、地方政府、无人机企业和无人机操控者四方博弈主体策略演化过程及结果如图 4 所示。

由图 4 可知,当无人机发生事故时,随着对无人机企业的追责处罚力度加深,民航局方和地方政府的监管强度将减弱。当无人机企业受到的追责处罚足够

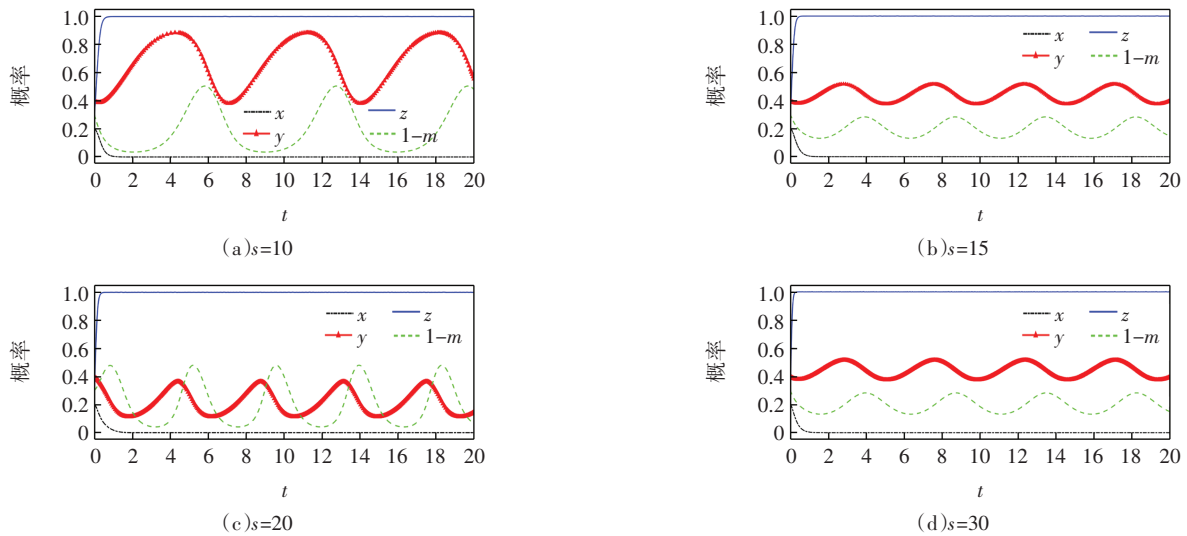


图 4 无人机企业被追责处罚力度对四方博弈策略演化的影响

Fig.4 Impact of penalty intensity for UAV enterprises on the evolution of four-party game strategies

高时,将有效减少民航局方和地方政府的监管成本。为了保证自身利益,无人机企业会始终对无人机操控者进行严格审查,确保无人机事故率始终趋于 0,验证了分级监管策略的可行性。

2.5 分级监管策略组合下三方监管强度的影响

为了进一步探究三方监管成本和处罚力度对系

统安全性的影响,设选取 3 组策略组合分别为:① $a = 8, c = 4, f = 8, r = 12, s = 15$; ② $a = 10, c = 2, f = 10, r = 16, s = 18$; ③ $a = 16, c = 1, f = 12, r = 20, s = 20$, 四方博弈主体策略演化过程及结果如图 5 所示。

由图 5 可知,当民航局方和地方政府的监管成本高时,提高对无人机企业的追责处罚力度,即使民航

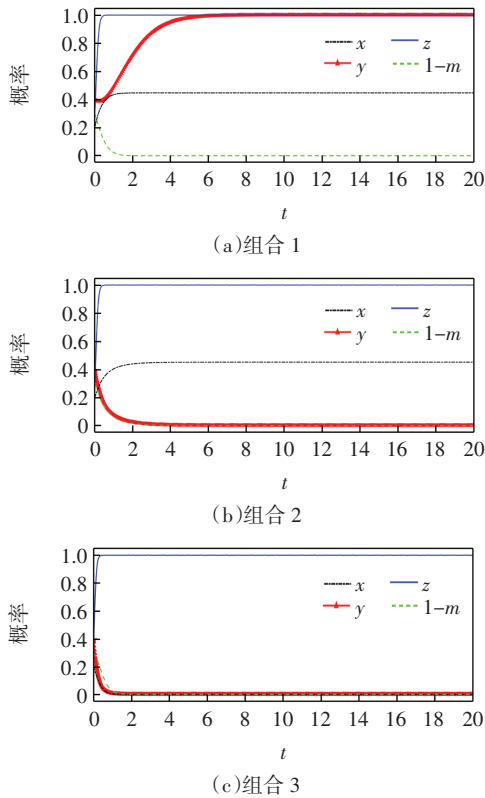


图 5 分级监管策略组合对四方博弈策略演化的影响

Fig.5 Impact of hierarchical supervision strategy combinations on the evolution of four-party game strategies

局方和地方政府都减少监管成本的投入,仅靠无人机企业的严格审查策略,依旧可以保持较低的无人机事故率。这一结论在降低对无人机企业的监管强度时同样适用,即分级监管策略可以在节省民航局方和地方政府的监管成本的基础上,有效降低无人机事故率。

3 结语

本文针对中国目前的无人机监管机制,考虑在民航局方的政策指导下将无人机企业审查和地方政府监管结合,在无人机数量繁多但监管主体不明确、无人机监管流程繁琐的背景下,大幅度地提高监管效率和降低无人机事故率需要加大对无人机企业的追责处罚力度及采用分级监管策略。

1) 加大对无人机企业的追责力度

当无人机发生事故时,提高对无人机企业的追责处罚力度有利于提高无人机监管效率,降低无人机事故率。无人机企业对无人机操控者进行销售时进行监管,严格审查每架无人机的去向、用途,有效避免发生事故时找不到无人机所有人的情况,减少因信息不对称带来的不利影响。提高对无人机企业追责力度也可以更大程度地避免一些中小无人机企业贪图方便而

在向无人机操控者销售无人机时违背《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》中对无人机及其操控者登记注册的原则。

2) 采用分级监管策略

构建完整的无人机监管体系,权责到人,分解到点,精确定位每一环的负责主体,可以最大程度地解决监管主体不明确的问题。由数据仿真结果可知,失职追责、强化各权责主体协调联动,即使提高对某权责主体的监管成本,也可以获得较高的收益,进而提高监管效率,确保无人机飞行安全。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 2023 年民航行业发展统计公报[EB/OL]. (2024-05-31)[2024-06-13]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202405/t20240531_224333.html.
- [2] 国务院,中央军委. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. (2023-06-30)[2024-05-27]. https://zwfw.gansu.gov.cn/wenxian/zczx/zwgg/art/2023/art_93bdcc7e3f7244359fa505858751c1d0.html.
- [3] 费丽娅. 无人机“黑飞”的社会风险和法律规制[J]. 铁道警察学院学报, 2017, 27(6): 32-37.
- [4] 俞洁. 民用无人机法律规制浅析[J]. 检察风云, 2023(23): 13-15.
- [5] 孙永生,周震博. 无人驾驶航空器安全风险防控: 基于最大化最小原则[J]. 中国人民公安大学学报(社会科学版), 2018, 34(2): 141-148.
- [6] 陈帆. 民用无人机治安风险防控探析[D]. 上海: 华东政法大学, 2018.
- [7] 徐瑞华,罗帆. 机场净空区无人机抗扰监管演化博弈研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(5): 25-30.
- [8] 张攀科,罗帆. 通用航空安全监管演化博弈的系统动力学仿真[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 43-50.
- [9] 陆启航. SQ 市民用无人机安全监管研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [10] 高家伟. 无人机适航管理法律问题研究[J]. 飞航导弹, 2017(6): 30-36.
- [11] 郭进平,耿阳,张星. 基于系统动力学的事故瞒报博弈演化研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(9): 106-111.
- [12] 孙淑慧,苏强. 重大疫情期医药研究报道质量监管四方演化博弈分析[J]. 管理学报, 2020, 17(9): 1391-1401.
- [13] 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.
- [14] HASSAN M Z, KADDOUM G, AKHRIF O. Resource allocation for joint interference management and security enhancement in cellular-connected Internet-of-drones networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(12): 12869-12884.
- [15] CHALLITA U, FERDOWSI A, CHEN M Z, et al. Machine learning for wireless connectivity and security of cellular-connected UAVs[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 28-35.

(责任编辑:孟欣)