

风险偏好视角下塔式起重机 施工安全监管演化博弈分析

陈兆芳¹, 葛雪慧¹, 黄文翰²

(1. 福建理工大学 管理学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省特种设备检验研究院, 福建 福州 350008)

摘要: 为有效提高塔式起重机施工安全监管效果, 减少事故发生, 在引入风险偏好系数描述决策主体对风险感知程度的基础上, 构建了塔式起重机安全监管三方演化博弈模型, 并分析其稳定策略。结果表明: 政府监管部门松弛管理会加大安全事故发生的概率; 第三方检测机构和塔式起重机用户的风险感知程度对策略演化结果有着关键影响作用。此外, 安全管理成本、事故惩罚力度和安全行为收益也会影响主体的策略选择。提高主体对安全事故的风险意识, 可以有效地减少安全事故的发生。

关键词: 塔式起重机; 风险偏好; 演化博弈

中图分类号: F224.32

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0233-10

Evolutionary game analysis of tower crane construction safety supervision from the perspective of risk preference

CHEN Zhaofang¹, GE Xuehui¹, HUANG Wenhan²

(1. School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Special Equipment Inspection & Research Institute, Fuzhou 350008, China)

Abstract: In order to effectively improve the effect of tower crane construction safety supervision and reduce the occurrence of accidents, based on the introduction of risk preference coefficient describing the different degree of risk perception of the decision-making subject, a tripartite evolution game model of tower crane safety supervision is constructed and its stabilization strategy is analyzed. Results show that: slack management by government regulators will increase the probability of safety accidents; the risk perception degree of third-party testing institutions and tower crane users has a key influence on strategy evolution results. In addition, the cost of safety management, the intensity of accident penalties and the benefits of safety actions also affect the subject's strategy choice. Improving the subject's risk awareness of safety accidents can effectively reduce the occurrence of accidents.

Keywords: tower cranes; accident preferences; evolutionary games

塔式起重机是现代建筑工程中的核心施工设备, 在高层建筑的施工过程中用途广泛, 但目前安全事故频发。考虑到建筑施工过程是一个涉及人员、机械和环境因素相互作用的复杂系统行为, 风险可能在系统中多个节点孕育、传递, 并演化出不可预料的结果^[1]。因此, 分析塔式起重机利益相关者的风险感知程度, 引导参与方采取风险规避行为, 对从根源上解决塔式起重机事故的发生具有重要的意义。

国内外学者围绕塔式起重机安全问题展开了大量研究。在安装与拆卸阶段, 通过大量案例找出造成事故发生的各项原因^[2-5], 构建安装与拆卸作业模型分析事故原因^[6], 布置传感器检测安装拆卸过程各项指标变化^[7-8]; 在施工阶段侧重于分析风险因素间关系, 利用算法分析风险因素并预测安全风险等级^[9], 采用关联规则挖掘事故间的关联关系^[10], 利用系统动力学仿真风险因

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 福建省社会科学规划重点项目 (FJ2024MGA027); 福州市社会科学规划重点项目 (2023FZB05)

第一作者简介: 陈兆芳 (1984—), 女, 福建龙海人, 副教授, 博士, 研究方向: 多属性决策、优化理论。

素,提出控制方案^[11]。分析控制塔式起重机安装、拆卸与施工阶段存在的问题,可以有效地减少安全事故的发生,但安全事故发生的重要原因之一是人为因素,由人员侥幸心理等诱发的不安全行为反映出人员对事故风险的感知不足。

因此,本文在演化博弈的基础上,引入风险偏好系数描述利益方的风险感知,构建政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户的有限理性博弈模型。结合实际情况,分析影响决策主体策略选择的关键因素,并通过仿真模拟外部变量改变对演化结果的影响,为塔式起重机运行的安全监管行为提供理论基础和决策支持。

1 模型构建与分析

1.1 基本假设

选取塔式起重机三个利益相关者作为博弈主体,分别是政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户,构建的三方主体之间的逻辑关系如图 1 所示。

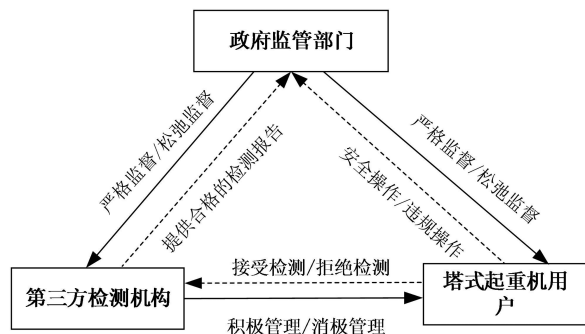


图 1 三方演化博弈模型逻辑关系图

Fig.1 Logic relationship diagram of three-party evolutionary game model

假设 1:三方利益相关者分别是政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户,且三方均是有限理性的,其策略选择会随着时间演化逐渐趋于最优。

假设 2:政府监管部门可以选择的策略空间为{K1 严格监督,K2 松弛监督},选择概率分别为 $(x, 1-x)$;第三方检测机构可以选择的策略空间为{M1 积极管理,M2 消极管理},选择概率分别为 $(y, 1-y)$;塔式起重机用户可选择的策略空间为{N1 安全操作,N2 违规操作},选择概率分别为 $(z, 1-z)$,其中, $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1$ 。

假设 3:三方利益相关者无论选择那一种策略,都会得到一定的收益回报,分别为 R_S 、 R_R 、 R_U

(考虑三方同时选择不利的安全管理策略的情况);而只有选择有利的策略才会得到安全绩效奖励,分别是 S_S 、 S_R 、 S_U 。

假设 4:在政府监管部门严格监督下,若第三方检测机构消极管理,会带给塔式起重机用户一定的使用成本 U ;塔式起重机用户的违规操作也会带给第三方检测机构额外的维修成本 R 。

假设 5:当政府监管部门松弛监督时,第三方检测机构和塔式起重机用户就会抱有一定的侥幸心理,对风险的感知出现偏差,本文用风险偏好系数 α 和 β 代表第三方检测机构和塔式起重机用户的风险感知程度,其中, $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$ 。第三方检测机构消极管理时,风险偏好系数为 α ,积极管理时风险偏好系数为 $1-\alpha$;塔式起重机用户违规操作时风险偏好系数为 β ,安全操作时的风险偏好系数为 $1-\beta$ 。

1.2 策略组合

根据以上假设,对政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户可能选择的策略进行组合,共得出 8 种策略组合方案,如表 1 所示,并基于这 8 种方案分别计算效益。

策略组合 1:政府监管部门选择严格监督,第三方检测机构选择积极管理,塔式起重机用户安全操作。三个利益相关者各自效益为 a_1 、 b_1 和 c_1 ,此时, $a_1 = R_S + S_S - C_S$ 、 $b_1 = R_R + S_R - C_R$ 、 $c_1 = R_U + S_U - O_U$ 。

策略组合 2:政府监管部门选择严格监督,第三方检测机构选择消极管理,塔式起重机用户使用安全操作。三个利益相关者各自的效益为 a_2 、 b_2 和 c_2 。此时,政府监管部门的效益为 $a_2 = R_S + S_S - C_S$ 。第三方检测机构由于消极管理需要承担惩罚成本 P_R ,即 $b_2 = R_R - P_R$ 。由于第三方检测机构的失职,塔式起重机用户需要额外承担运行成本 U ,即 $c_2 = R_U + S_U - O_U - U$ 。

策略组合 3:政府监管部门松弛监督,第三方检测机构积极管理,塔式起重机用户安全操作。三个利益相关者各自的效益为 a_3 、 b_3 和 c_3 。由于政府监管部门没有严格监督,造成公信力下降,影响正常工作,需要付出一定的信誉损失 P_S ,政府监管部门的效益为 $a_3 = R_S - P_S$ 。第三方检测机构积极管理,但缺少政府监管部门的严格监督,对应的风险偏好系数为 $1-\alpha$,即 $b_3 = R_R - (1-\alpha)C_R$ 。同理,此时塔式起重机用户的风险偏好系数为 $1-\beta$,效益为 $c_3 = R_U + S_R - (1-\beta)O_U$ 。

表 1 政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户的策略组合及其效益

Tab.1 Combination of strategies and their benefits for government regulators, third-party testing organisations and tower crane users

主体策略	政府监管部门严格监督 (x)		政府监管部门松弛监督 ($1-x$)	
	塔式起重机 用户安全操作 (z)	塔式起重机 用户违规操作 ($1-z$)	塔式起重机 用户安全操作 (z)	塔式起重机 用户违规操作 ($1-z$)
第三方检测机构积极管理 (y)	(a_1, b_1, c_1)	(a_5, b_5, c_5)	(a_3, b_3, c_3)	(a_7, b_7, c_7)
第三方检测机构消极管理 ($1-y$)	(a_2, b_2, c_2)	(a_6, b_6, c_6)	(a_4, b_4, c_4)	(a_8, b_8, c_8)

策略组合 4:政府监管部门松弛监督,第三方检测机构消极管理,塔式起重机用户使用时安全操作。三个利益相关者各自的效益为 a_4 、 b_4 和 c_4 。当政府监管部门松弛监督,第三方检测机构也没有积极管理时,发生安全事故的概率较大,一旦发生安全事故,政府监管部门就会面临一定的声誉损失 D_S ,此时 $a_4=R_S-P_S-D_S$ 。第三方检测机构在发生安全事故时,同样也面临着声誉损失 D_R ,事故发生后还会带来一定的经济损失 L_R ,即 $b_4=R_R-P_R-(D_R+L_R)\alpha$ 。此时,塔式起重机用户也需要付出一定的声誉损失 D_U 和经济损失 L_U ,最终效益为 $c_4=R_U+S_U-O_U-(D_U+L_U)(1-\beta)$ 。

策略组合 5:政府监管部门严格监督,第三方检测机构积极管理,塔式起重机用户使用时违规操作。三个利益相关者各自的效益为 a_5 、 b_5 和 c_5 。此时政府监管部门的效益为 $a_5=R_S+S_S-C_S$ 。塔式起重机用户的违规使用会增加第三方检测机构的维护成本,设为 R ,则 $b_5=R_R+S_R-C_R-R$ 。用户在严格监督的情况下违规使用,政府监管部门

将对其进行违规处罚,设为 P_U ,即 $c_5=R_U-P_U$ 。

策略组合 6:政府监管部门严格监督,第三方检测机构消极管理,塔式起重机用户使用时违规使用。三个利益相关者各自的效益为 a_6 、 b_6 和 c_6 。此时,政府监管部门的效益为 $a_6=R_S+S_S-C_S$ 。在政府监管部门严格监督下,此时双方都会受到相应的处罚,即 $b_6=R_R-P_R$, $c_6=R_U-P_U$ 。

策略组合 7:政府监管部门松弛监督,第三方检测机构积极管理,塔式起重机用户违规使用。三个利益相关者各自的效益为 a_7 、 b_7 和 c_7 。同策略组合 4, $a_7=R_S-P_S-D_S$, $b_7=R_R+S_R-(D_R+L_R)(1-\alpha)$ 。塔式起重机用户也需要付出一定的声誉损失 D_U 和经济损失 L_U ,最终效益为 $c_7=R_U+S_U-O_U-(D_U+L_U)\beta$ 。

策略组合 8:政府监管部门松弛监督,第三方检测机构消极管理,塔式起重机用户违规使用。此时三个利益相关者各自的效益为 a_8 、 b_8 和 c_8 。 $a_8=R_S-P_S-D_S$, $b_8=R_R-P_R-(D_R+L_R)\alpha$, $c_8=R_U-O_U-P_U-(D_U+L_U)\beta$ 。所有策略组合涉及到的参数及其具体含义,如表 2 所示。

表 2 模型中主要参数及其含义

Tab.2 Main parameters in the model and their meanings

参数	参数对应的含义
x	政府监管部门选择“严格监督”策略的概率, $x\in[0,1]$
R_S	政府监管部门的回报收益
S_S	政府监管部门的安全绩效奖励
C_S	政府监管部门的监督成本
P_S	政府监管部门没有严格监督时的信誉损失
D_S	政府监管部门发生安全事故时的声誉损失
y	第三方检测机构选择“积极管理”策略的概率, $y\in[0,1]$
R_R	第三方检测机构的回报收益

续表

参数	参数对应的含义
S_R	第三方检测机构的安全绩效奖励
C_R	第三方检测机构的维修成本
P_R	第三方检测机构没有积极管理时的惩罚成本
D_R	第三方检测机构发生安全事故时的声誉损失
L_R	第三方检测机构在发生安全事故时的经济损失
R	由于塔式起重机用户的违规操作,第三方检测机构在发生安全事故时花费的额外的成本
α	第三方检测机构对应的风险偏好系数, $\alpha \in [0,1]$
z	塔式起重机用户选择“安全操作”策略的概率, $z \in [0,1]$
R_U	塔式起重机用户的奖励收入
S_U	塔式起重机用户的安全绩效奖励
O_U	塔式起重机用户使用塔式起重机的运行成本
P_U	塔式起重机用户违规使用的惩罚成本
D_U	塔式起重机用户发生安全事故时的声誉损失
L_U	塔式起重机用户在发生安全事故时的经济损失
U	由于第三方检测机构的违规操作,塔式起重机用户在发生安全事故时花费的额外的成本
β	塔式起重机用户对应的风险偏好系数, $\beta \in [0,1]$

1.3 三方演化博弈的复制动态方程

1.3.1 复制动态方程

设政府监管部门选择 K1 的期望收益为 E_{11} 、选择 K2 的期望收益为 E_{12} ,平均期望收益为 E_1 ,则有:

$$E_{11} = (R_S + S_S - C_S)yz + (R_S + S_S - C_S)(1-y)z + (R_S + S_S - C_S)y(1-z) + (R_S + S_S - C_S)(1-y)(1-z) \tag{1}$$

$$E_{12} = (R_S - P_S - D_S)(1-y)z + (R_S - P_S - D_S)(1-y)(1-z) + (R_S - P_S)yz + (R_S - P_S - D_S)y(1-z) \tag{2}$$

$$E_1 = xE_{11} + (1-x)E_{12} \tag{3}$$

即政府监管部门选择策略的复制动态方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{11} - E_1) = x[xE_{11} + (1-x)E_{12}] = x(1-x)(E_{11} - E_{12}) \tag{4}$$

设第三方检测机构选择 M1 的期望收益为 E_{21} 、选择 M2 的期望收益为 E_{22} ,平均期望收益为 E_2 ,则有:

$$E_{21} = (R_R + S_R - C_R)xz + (R_R - C_R(1-\alpha))(1-x)z + (R_R + S_R - C_R - R)x(1-z) + (R_R + S_R - (D_R - L_R)(1-$$

$$\alpha))(1-x)(1-z) \tag{5}$$

$$E_{22} = (R_R - P_R)xz + (R_R - P_R - (D_R + L_R)\alpha)(1-x)z + (R_R - P_R)x(1-z) + (R_R - P_R - (D_R + L_R)\alpha)(1-x)(1-z) \tag{6}$$

$$E_2 = yE_{21} + (1-y)E_{22} \tag{7}$$

第三方检测机构选择策略的复制动态方程为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{21} - E_2) = y[yE_{21} + (1-y)E_{22}] = y(1-y)(E_{21} - E_{22}) \tag{8}$$

设塔式起重机用户选择 N1 的期望收益为 E_{31} 、选择 N2 的期望收益为 E_{32} ,平均期望收益为 E_3 ,则有:

$$E_{31} = (R_U + S_U - O_U - (D_U - L_U)(1-\beta))(1-x)(1-y) + (R_U + S_U - O_U - U)x(1-y) + (R_U + S_R - (1-\beta)O_U)(1-x)y + (R_U + S_U - O_U)xy \tag{9}$$

$$E_{32} = (R_U - P_U)xy + (R_U - P_U)x(1-y) + (R_U + S_U - O_U - (D_U + L_U)\beta)(1-x)y + (R_U - O_U - P_U - (D_U + L_U)\beta)(1-x)(1-y) \tag{10}$$

$$E_3 = zE_{31} + (1-z)E_{32} \tag{11}$$

塔式起重机用户选择策略的复制动态方

程为:

$$F(z)=\frac{dz}{dt}=z(E_{31}-E_3)=z[zE_{31}+(1-z)E_{32}]=z(1-z)(E_{31}-E_{32}) \tag{12}$$

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} (1-2x)J(y,z) & x(1-x)\frac{\partial J(y,z)}{\partial y} & x(1-x)\frac{\partial J(y,z)}{\partial x} \\ y(1-y)\frac{\partial W(x,z)}{\partial x} & (1-2y)W(x,z) & y(1-y)\frac{\partial W(x,z)}{\partial z} \\ z(1-z)\frac{\partial S(x,y)}{\partial x} & z(1-z)\frac{\partial S(x,y)}{\partial y} & (1-2z)S(x,y) \end{bmatrix}$$

1.3.3 均衡点分析

令涵盖三维动力系统中 $F(x)=F(y)=F(z)=0$, 可得到 8 个纯策略纳什均衡点。也就是 $E_1(0,0,0), E_2(1,0,0), E_3(0,1,0), E_4(0,0,1), E_5(1,1,0), E_6(1,0,1), E_7(0,1,1)$ 和 $E_8(1,1,1)$ 。根

1.3.2 构建雅可比矩阵

根据 Friedman 提出的方法,通过系统的 Jacobian 矩阵分析均衡点的局部稳定性^[12],构建出三方演化博弈模型的 Jacobian 矩阵如下:

据 Ritzberger 的研究结论^[12],在分析三方演化博弈时,只需分析以上 8 个均衡点的稳定性即可。

1.4 三方演化博弈的稳定点分析

根据李雅普诺夫第一法确定各均衡点的稳定性,如表 3 所示。

表 3 矩阵特征值
Tab.3 Matrix eigenvalues

均衡点	矩阵特征值
$E_1(0,0,0)$	$D_S-C_S+P_S+S_S; L_R-D_R+P_R+S_R+2\alpha D_R; L_U-D_U+P_U+S_U+2\beta D_U$
$E_2(1,0,0)$	$P_R-C_R-R+S_R; P_U-O_U+S_U-U; C_S-D_S-P_S-S_S$
$E_3(0,1,0)$	$D_S-C_S+P_S+S_S; \beta D_U-S_U-P_U+\beta L_U+\beta P_U; D_R-L_R-P_R-S_R-2\alpha D_R$
$E_4(0,0,1)$	$D_U-L_U-P_U-S_U-2\beta D_U; P_R-C_R+\alpha C_R+\alpha D_R+\alpha L_R; D_S-C_S+P_S+S_S$
$E_5(1,1,0)$	$C_S-D_S-P_S-S_S; C_R-P_R+R-S_R; P_U-O_U+S_U$
$E_6(1,0,1)$	$P_R-C_R+S_R; O_U-P_U-S_U+U; C_S-D_S-P_S-S_S$
$E_7(0,1,1)$	$P_S-C_S+S_S; C_R-P_R-\alpha C_R-\alpha D_R-\alpha L_R; P_U+S_U-\beta D_U-\beta L_U-\beta P_U$
$E_8(1,1,1)$	$C_R-P_R-S_R; C_S-P_S-S_S; O_U-P_U-S_U$

由表 3 可知,该博弈系统均衡解的演化稳定性组合有以下 8 种情况:

- (1) $(1-\beta)D_U > L_U + P_U + S_U + D_U, (1-\alpha)D_R > L_R + P_R + S_R + D_R, C_S > D_S + P_S + S_S$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 8;
- (2) $C_R + R > P_R + S_R, O_U + U > P_U + S_U, C_S < D_S + P_S + S_S$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 6;
- (3) $C_S > D_S + P_S + S_S, S_U + (1-\beta)P_U > \beta(D_U + L_U), (1-\alpha)D_R < L_R + P_R + S_R + D_R$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 7;
- (4) $(1-\beta)D_U < L_U + P_U + S_U + D_U, (1-\alpha)C_R > P_R + \alpha(D_R + L_R), C_S > D_S + P_S + S_S$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 4;

- (5) $C_S < D_S + P_S + S_S, C_R + R < P_R + S_R, O_U > P_U + S_U$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 5;
- (6) $C_R > P_R + S_R, O_U + U < P_U + S_U, C_S < D_S + P_S + S_S$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 2;
- (7) $C_S > P_S + S_S, (1-\alpha)C_R < P_R + \alpha(D_R + L_R), (1-\beta)P_U + S_U < \beta(D_U + L_U)$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 3;
- (8) $C_R < P_R + S_R, C_S < P_S + S_S, O_U < P_U + S_U$ 时,三个利益相关者行为将演化为策略组合 1。

分析以上 8 种情况,如表 4 所示。可以看出,在一定的条件下,每种策略组合都可能成为稳定点。

表 4 稳定点分析
Tab.4 Stability point analysis

稳定点	稳态条件	解释
$(0,0,0)$	$C_S>D_S+P_S+S_S$ $(1-\alpha)D_R>L_R+P_R+S_R+D_R(1-\beta)$ $D_U>L_U+P_U+S_U+D_U$	如果政府监管部门的监督成本过大,那么政府监管部门就会采取不利于塔式起重机运行的策略。对于第三方检测机构和塔式起重机用户来说,发生事故的损失大于积极管理时可以获得利益,也会选择不利的安全管理策略
$(1,0,0)$	$C_R+R>P_R+S_R$ $O_U+U>P_U+S_U$ $C_S<D_S+P_S+S_S$	政府监管部门的监督成本小于发生事故的损失时,政府监管部门必定会采取有利的安全管理策略。对于第三方检测机构和塔式起重机用户,投入成本大于事故发生后的损失时,二者会选择不利的安全管理策略
$(0,1,0)$	$C_S>D_S+P_S+S$ $S_U+(1-\beta)P_U>\beta(D_U+L_U)$ $(1-\alpha)D_R<L_R+P_R+S_R+D_R$	政府监管部门的监督成本过大时,会采取不利于安全管理的策略。第三方检测机构积极管理时的损失小于消极管理时的惩罚成本,会选择有利的安全管理策略。塔式起重机用户的在积极管理时发生安全事故的惩罚成本大于消极管理时的损失,在监理松懈时会选择不利的安全管理策略
$(0,0,1)$	$C_S>D_S+P_S+S_S$ $(1-\alpha)C_R>P_R+\alpha(D_R+L_R)$ $(1-\beta)D_U<L_U+P_U+S_U+D_U$	政府监管部门和第三方检测机构的监督成本过大时,会采取不利于安全管理的策略。塔式起重机用户的安全绩效奖励大于声誉损失,会采取有利的安全管理策略
$(1,1,0)$	$C_S<D_S+P_S+S_S$ $C_R+R<P_R+S_R$ $O_U>P_U+S_U$	政府监管部门和第三方检测机构的投入成本小于信誉损失或惩罚成本,会认真监督和维护。塔式起重机用户的运行成本过大,会选择不利的安全管理策略
$(1,0,1)$	$C_R>P_R+S_R$ $O_U+U<P_U+S_U$ $C_S<D_S+P_S+S_S$	第三方检测机构投入成本过大,大于惩罚成本和安全绩效奖励,会导致塔式起重机的消极管理。政府监管部门和用户的投入成本小于惩罚成本,会选择有利的安全管理策略
$(0,1,1)$	$C_S>P_S+S_S$ $(1-\alpha)C_R<P_R+\alpha(D_R+L_R)$ $(1-\beta)P_U+S_U<\beta(D_U+L_U)$	政府监管部门的监督成本过大,会导致其不认真监督。但此时第三方检测机构和塔式起重机用户在选择不利策略时的声誉损失和经济损失过大,反而会选择有利的安全管理策略
$(1,1,1)$	$C_R<P_R+S_R$ $C_S<P_S+S_S$ $O_U<P_U+S_U$	三个利益相关者的安全投入成本均在可接受范围内,三个利益相关者不会选择违规策略

从表 4 可知,当监督、维修和运行成本过大时,三方均有可能选择不利的安全管理策略,但当三方主体对收益评估后,认为可获取的利益大于发生事故造成的损失时,会选择有利的安全管理策略。同时,由于风险偏好系数的存在,当监管部门没有严格监督时,第三方检测机构和塔式起重机用户会由于缺乏事故安全风险意识,倾向于选择不利的安全管理策略。

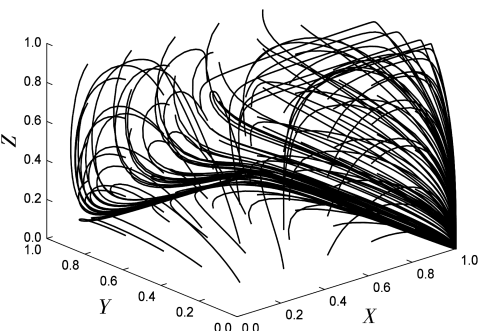
2 策略分析

2.1 构建初始参数仿真分析

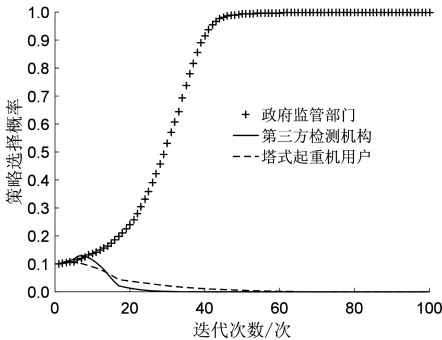
由玉林市玉林碧桂园“5.16”建筑施工事故可知,该项目房地产开发公司和建筑工程单位签订施工合同,合同价款为 9 053.17 万元,房地产开发公司和咨询公司签署了监理合同,事故发生后造

成的直接经济损失为 873 万元,其中施工方经济损失约为 299 万元,对施工单位和监理单位处以 70 万元的罚款,涉及到的责任人员处以 4~5 万元的罚款,同时将各单位列入“黑名单”。基于此并结合文献[13],对参数赋值为 $R_S=15, R_R=4, R_U=4, P_S=3, P_R=4, P_U=5, D_S=3, D_R=3, D_U=3, R=6, U=2, \alpha=0.3, \beta=0.3$ 。初始值 x, y 和 z 设置为 0.1,采用数值模拟技术,利用 MATLAB 软件对进化过程进行仿真分析,政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户的策略演化结果如图 2 所示。

由图 2(a)可见,在初始参数条件下,政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户的行为策略会演化为策略组合 6:政府监管部门对塔式起重机的使用选择了严格监督,第三方检测机



(a) 三个利益相关者策略演化过程



(b) 博弈主体概率演化过程

图 2 策略组合演化过程 1

Fig.2 Strategy portfolio evolution process 1

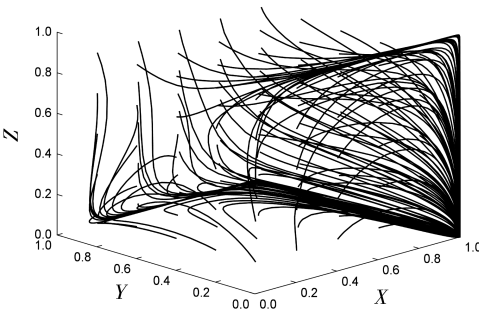
构消极管理,塔式起重机用户使用塔式起重机时违规使用,也就是均衡点 ESS 为 $E_2(1,0,0)$,图 2 (b)为参与主体三方各自的概率选择变化趋势。

2.2 风险偏好系数对演化结果的影响

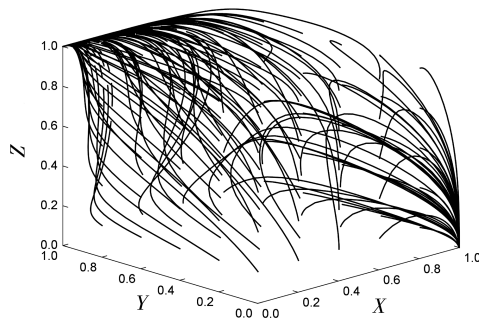
改变风险偏好系数的值,其余参数相同,假设 α, β 同时为 0 或 1,此时第三方检测机构和塔式起重机用户同时为事故安全风险偏好型或事故安全风险规避型,演化结果如图 3 所示。

图 3 为两种极端风险偏好系数下的策略演化结果图。由图 3(a)可看出,当 $\alpha=0, \beta=0$ 时,第三方检测机构和建筑机械用户表现为事故安全风险偏好型,与图 2 相比,演化结果发生了变化,不再是单一的均衡点 $E_2(1,0,0)$,出现了向均衡点 $E_6(1,0,1)$ 推进的倾向,对应的行为是策略组合 2:政府监管部门对塔式起重机的使用选择了严格监督,第三方检测机构对其消极管理,塔式起重机用户使用安全操作。

由图 3(b)可看出,均衡点 ESS 表现为多种结果,当 $\alpha=1, \beta=1$ 时,演化均衡点分别是 $E_2(1,0,0)$ 、 $E_7(0,1,1)$,均衡点 E_2 对应策略组合 6;均衡点 E_7 对应策略组合 3:政府监管部门对塔式起重机的利益相关者不进行严格监督,第三方检测机



(a) $\alpha=0, \beta=0$



(b) $\alpha=1, \beta=1$

图 3 相同风险偏好系数对博弈三方策略演化的影响
Fig.3 Effects of the same risk preference coefficient on strategy evolution of the game's three parties

构积极管理,塔式起重机用户使用塔式起重机时安全操作。

策略组合结果变化的主要原因是形成稳定点的条件被打破,风险偏好系数从 0 向 1 变化,策略演化朝不同的方向推进,说明在安全监管博弈中必须考虑事故偏好系数。在此基础上,基本参数不变,对双方利益相关者设置相反的风险偏好系数,分析三个利益相关者的策略演化。当 $\alpha=1, \beta=0$ 时或 $\alpha=0, \beta=1$ 时,三方策略的演化结果见图 4。

由图 4 可看出,当 $\alpha=1, \beta=0$ 时,演化结果与基本假设的演化结果相同,风险偏好系数的改变没有带来太大的影响;当 $\alpha=0, \beta=1$ 时,演化结果图向两个方向进行了演化,均衡点 ESS 分别是 $E_2(1,0,0)$ 、 $E_6(1,0,1)$,打破了均衡点 $E_2(1,0,0)$ 的稳定条件,塔式起重机用户呈现出向事故安全风险规避型演化的明显趋势。通过对比上述图可以看出,塔式起重机用户风险偏好系数的改变对演化结果的影响较大。也就是说,应该更关注塔式起重机用户的风险偏好。

2.3 对均衡点 $E_2(1,0,0)$ 进行参数优化

假设 $\alpha=0.5, \beta=0.5$,初始值 x, y 和 z 设置为 0.1,其余参数不变,探讨均衡点 $E_2(1,0,0)$ 向 E_8

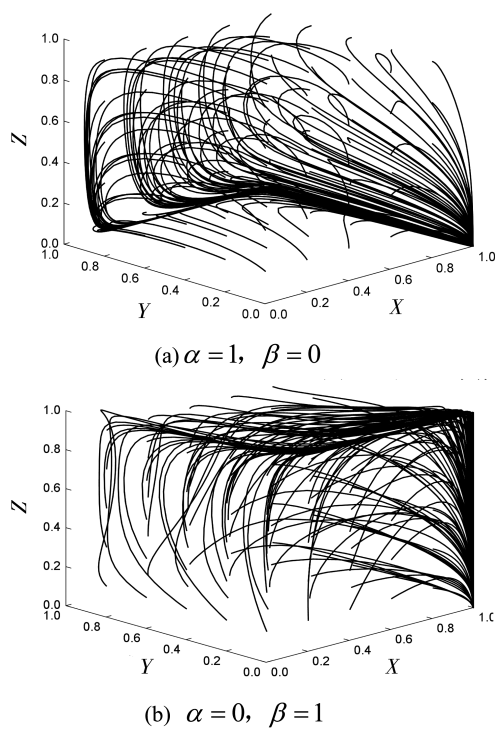


图 4 不同风险偏好系数对策略演化的影响

Fig.4 Effects of different risk preference coefficients on strategy evolution

(1,1,1)的演化过程,利用 MATLAB 软件对进化过程进行仿真分析,改变参数之后三个利益相关者的策略演化结果如图 5 所示。

由图 5(a)可看出,政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户的行为策略演化为策略组合 1; $E_8(1,1,1)$,即在上述条件下,政府监管部门会选择严格监督、第三方检测机构选择积极管理、塔式起重机用户选择安全操作,图 5(b)为参与主体三方各自的概率选择变化趋势。

2.4 不同参数对均衡点的影响

2.4.1 投入成本对博弈演化结果的影响

在满足最理想的行为策略的情况下,从政府监管部门的角度出发,分析政府监管部门的监督成本 C_s 变化对演化博弈过程和结果的影响,当 C_s 分别为 5、10、20、30 时,对应的演化博弈结果如图 6 所示。

由图 6(a)可知,随着监督成本的增加,均衡点 ESS 从 $E_8(1,1,1)$ 变为 $E_3(0,1,0)$ 。从图 6(b)~(d)中可以看出,监督成本 C_s 增加幅度变化不大时,政府监管部门仍然会选择严格监督,当增大到 $C_s = 20$ 时,政府监管部门的策略选择出现倾向于松弛监督的情况,并且反复波动,意味着政

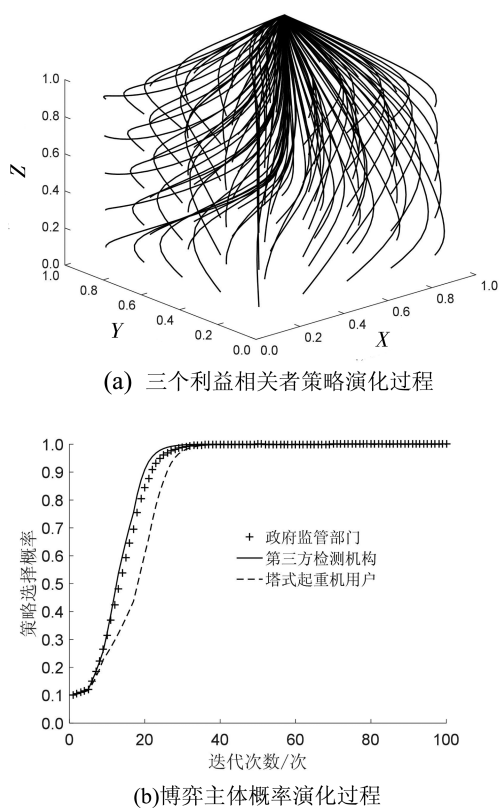


图 5 策略组合演化过程 2

Fig.5 Strategy portfolio evolution process 2

府监管部门选择严格监督的意愿变低。当 $C_s = 30$ 时,政府监管部门选择严格监督投入成本过大,得到的收益已经不足以弥补成本,政府监管部门将选择松弛监督。政府监管部门的监督成本 C_s 对第三方检测机构的影响不大,对塔式起重机用户的影响较大,总体的变化趋势和对政府监管部门变化趋势相同。

因此,政府监管部门投入的监督成本不宜过大,应适当调整,积极促进政府监管部门严格监督,同时应关注塔式起重机用户的策略选择。

2.4.2 信誉损失、惩罚成本对博弈演化结果的影响

不同惩罚成本对博弈演化结果的影响如图 7。从图 7(a)可看出,当信誉损失较小,即 $P_s = 1$ 时,政府监管部门随着时间的推移选择严格监督的概率变低,而随着信誉损失的增大,政府监管部门对损失的敏感程度变大,其策略选择倾向于严格监督,当 $P_s = 30$ 时,曲线基本与 $P_s = 20$ 重合,表明信誉损失过大,政府监管部门选择严格监督的意愿也不再增强。从图 7(b)可看出, P_U 过小时,塔式起重机

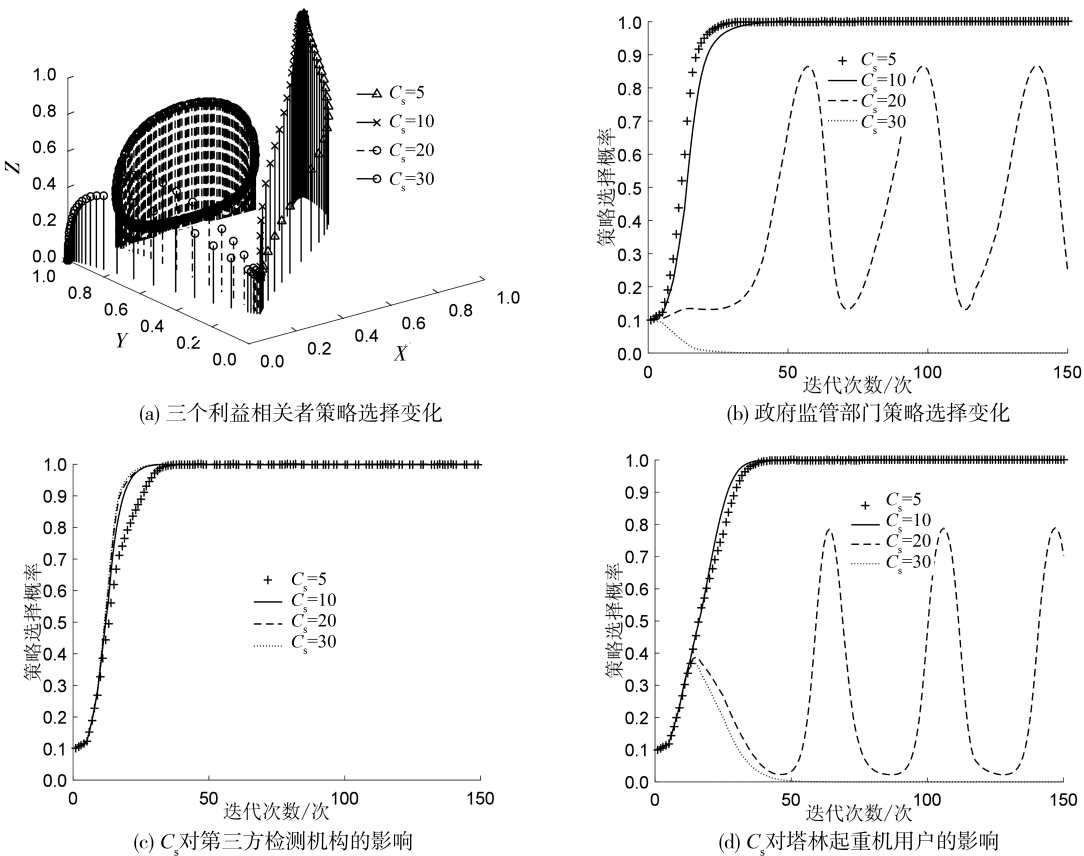


图 6 不同监督成本 C_s 对博弈三方主体的影响

Fig.6 Effects of different supervision cost C_s on the three subjects of the game

用户选择违规操作的意愿十分强烈,随着惩罚成本的增加,策略选择开始倾向于安全操作,在 P_U 由 1 向 5 时的变化中,选择安全操作的意愿呈现出巨大

的增加,在增加过大时,开始不再变化。因此,适当的声誉处罚和经济处罚,可以更好地引导利益相关者选择对安全管理有利的策略。

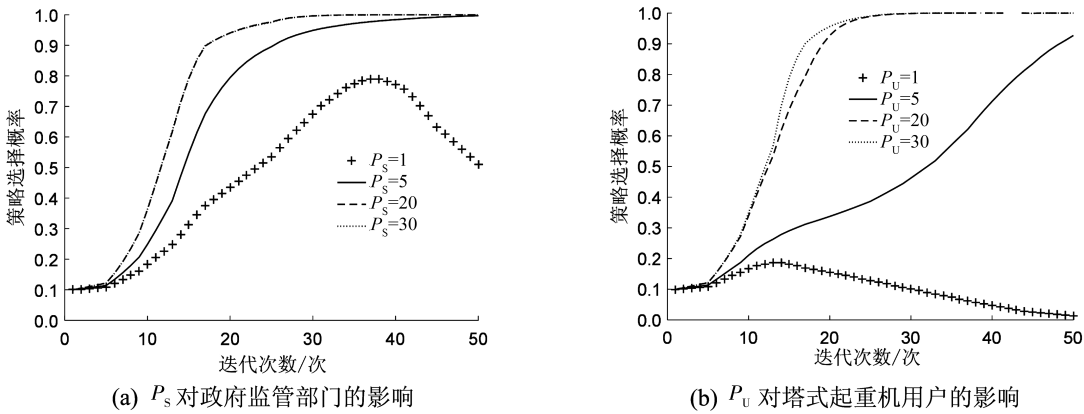


图 7 不同惩罚成本对政府监管部门和塔式起重机用户的影响

Fig.7 Impacts of different penalty costs on government regulators and tower crane users

3 结论

1)对于政府监管部门、第三方检测机构和塔式起重机用户来说,当维护施工安全投入的成本

过大,甚至大于发生安全事故时三方所需承担的的损失,那么三方选择不利的安全管理策略的概率就会增大。应该合理规划投入成本,减少不必要的支出。

2) 政府监管部门松弛监督是导致第三方检测机构消极维护、塔式起重机用户违规操作的重要诱因。为了避免安全事故的发生,相关部门应该建立完善的安全风险排查制度和安全管理机制。监管部门还可以设立专门的打卡点,定人定岗,统一管理,监督每日的工作情况,防止无关人员影响机械操作,造成安全事故的发生。

3) 绩效奖励、惩罚成本和声誉损失等是影响三方利益相关者的重要因素。建立适当的奖惩制度,完善信用评价标准,营造守信激励、失信惩戒

的信用环境,进一步规范建筑施工企业相关行为,减少安全事故的发生。

4) 相比于第三方检测机构,塔式起重机用户的风险偏好系数易受外界影响发生改变,变化的结果对博弈演化结果影响较大,在现实中需要格外关注塔式起重机用户的风险偏好。因此,需要定期组织人员进行事故安全培训,锻炼操作人员应对意外事故发生时的处理能力,同时对违反安全行为的操作进行惩罚,防止其他人员存在侥幸心理,避免建筑现场安全事故的发生。

参考文献:

- [1] 姚浩,陈超逸,宋丹妮. 基于复杂网络的超高层建筑施工安全风险耦合评估方法[J]. 安全与环境学报,2021,21(3): 957-968.
- [2] SHIN I J. Factors that affect safety of tower crane installation/dismantling in construction industry[J]. Safety Science, 2015, 72: 379-390.
- [3] 周红波,杨奇,杨振国,等. 基于复杂网络和 N-K 模型的塔吊安全风险因素分析与控制[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 816-823.
- [4] ZHOU W, ZHAO T S, LIU W, et al. Tower crane safety on construction sites: a complex sociotechnical system perspective [J]. Safety Science, 2018, 109: 95-108.
- [5] LINGARD H, COOKE T, ZELIC G, et al. A qualitative analysis of crane safety incident causation in the Australian construction industry[J]. Safety Science, 2021, 133: 105028.
- [6] 赵挺生,胡俊杰,师玉栋,等. 塔吊安装与拆卸作业安全性分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 32-38.
- [7] 张伟,廖阳新,蒋灵,等. 基于物联网的塔式起重机安全监控系统[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 55-62.
- [8] FANG Y H, CHO Y K, CHEN J D. A framework for real-time pro-active safety assistance for mobile crane lifting operations [J]. Automation in Construction, 2016, 72: 367-379.
- [9] 赵挺生,庞奇志,姜雯茜. 基于数据库与支持向量机的施工升降机安全风险预测[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 11-17.
- [10] 况宇琦,赵挺生,蒋灵,等. 塔式起重机事故案例关联规则挖掘与分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(7): 137-142.
- [11] 黄莺,珊瑚,姚思梦. 施工塔吊安全管理的系统动力学分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6): 2060-2068.
- [12] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637.
- [13] 何寿奎,梁功雯,蒙建波. 基于前景理论的重大工程多主体利益博弈与行为演化机理[J]. 科技管理研究, 2020, 40(5): 207-214.

(责任编辑:陈雯)