

基于质量验收模型的策略分析与评估

易晨光， 谭 燕， 王淑婧

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**摘 要:** 在建设工程质量验收过程中,运用博弈理论研究施工单位与监理单位行为策略,有助于提高施工效益,保障工程质量。本文首先建立施工单位与监理单位的质量验收模型,利用复制动态方程得到策略变化趋势图,分析博弈双方策略演化过程,确定稳定平衡状态。然后以博弈成本和工程质量作为衡量标准,借助 Matlab 数值仿真,对七种变化趋势进行优劣评估,提出符合最优策略的改进措施。研究表明:经过长期策略演化,验收博弈最终稳定于多个平衡状态;一方面,监理单位过高的检查比例容易使施工单位反应疲劳,导致质量风险提升;另一方面,以验收过程中策略变化趋势确定奖罚力度,调整检查比例,不仅节约博弈成本,更能提高工程质量。

**关键词:** 建筑工程; 博弈论; 质量验收; 复制动态方程

**中图分类号:** TU712<sup>+</sup>.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0130-06

Strategy Analysis and Evaluation Based on Quality Acceptance Model

YI Chen-guang, TAN Yan, WANG Shu-qiang

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology,  
Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In the process of quality acceptance of construction, the game theory is used to study the behavior strategy of construction unit and supervision unit, which is helpful to improve construction efficiency and guarantee the project quality. Firstly, this paper establishes the quality acceptance model of the construction company and the supervision company, obtains the trend chart of the strategy change by copying the dynamic equation, analyzes the strategy evolution process of both sides of the game, and determines the stable and balanced state. Then, taking the game cost and engineering quality as the measurement standard, with the help of MATLAB numerical simulation, the paper evaluates the seven trends and puts forward the improvement measures in line with the optimal strategy. The results show that the acceptance game is stable in many equilibrium states after long-term strategy evolution. On the one hand, the excessive inspection proportion of the supervision unit is easy to make the construction unit response fatigue, and increases the construction quality risk. On the other hand, using strategies trend to determine the criterion of reward and punishment system and adjust the proportion of inspection can not only save the game cost, but also improve the construction quality.

**Key words:** construction project; game theory; quality acceptance; replication of dynamic equation

建筑业是我国国民经济的支柱产业,建筑质量牵涉广大人民切身利益,影响国民经济的持续、稳定发展。目前,随国家供给侧改革逐步深化,政

府对建筑工程质量监管的力度不断提高,但施工过程中存在一些质量问题,较为常见的有裂缝、空鼓、阴阳角开裂等<sup>[1]</sup>。从施工角度看,工程质量

收稿日期: 2019-09-06    修回日期: 2019-10-25

作者简介: 易晨光(1995-),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为工程项目管理(Email: 857309408@qq.com)

通讯作者: 谭 燕(1981-),女,湖南娄底人,博士,讲师,研究方向为项目管理信息化与材料力学性能(Email: 42843907@qq.com)

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51408203);湖北省教学研究项目(省 2017314;省 2016288;省 2016299)

问题主要与两方面有关:其一是由于施工单位与监理单位为寻求更高的经济效益,选择企业合谋相互包庇,促使施工过程中偷工减料;其二是监理单位缺少科学有效的管控方法,不合理的管理力度,不仅令工程质量难以保证,经济效益也会随整改次数增多而降低。因此,研究质量监管中的验收过程对提高工程质量具有重要的现实意义。针对建筑工程质量验收环节,许多研究致力于提高从业人员专业水平,认为一定水平的专业能力和施工经验能帮助提高施工质量<sup>[2]</sup>。也有研究<sup>[3,4]</sup>认为工程质量受监理单位检查成本、建设单位奖罚力度等管理因素影响较大,制定有效的管理策略至关重要。Brito 等<sup>[5]</sup>通过对香港建设工程项目的研究,发现质量问题主要来源于工程环境、管理情况和合同条款等。Chan 等<sup>[6]</sup>在研究报告中指出,项目管理团队的管理行为、建设团队的领导力和客户对质量的重视等是影响工程质量的主要因素。针对专业水平和管理策略的影响,若从有限理性角度出发,将博弈理论运用到验收过程中,能为策略选择提供有效依据。

近年来,博弈理论被广泛应用于策略选择、行为采纳、风险评估等<sup>[7-9]</sup>问题。经典博弈理论从完全理性出发,假设博弈过程中的当局者都在追求最大利益<sup>[10]</sup>。而演化博弈理论在经典博弈理论的基础上对时间微分,研究动态变化过程<sup>[11]</sup>。国内对博弈理论的应用起步较晚。张飞涟等<sup>[12]</sup>用经济期望分析验收过程中参与双方纯策略纳什平衡和混合策略纳什平衡,对质量失控的负面效应进行了初步研究。王晓燕等<sup>[13]</sup>以演化博弈论为基础,运用复制动态方程分析验收过程中的策略选择,认为建筑工程质量验收过程是一个循环反复的博弈过程并不存在纳什平衡。张攀和郭圣煜<sup>[14]</sup>引用系统动力学模型对各影响因素进行仿真模拟,确定影响验收模型的关键内部因素。目前,在各博弈分析中,以微分方程稳定性原理确定策略稳定状态已经得到广泛应用<sup>[15,16]</sup>,但针对博弈策略变化趋势的研究略有不足。在建筑工程验收环节,对钢筋、模板、混凝土等工序进行检查时,因楼层层数有限,博弈次数仅十到五十次不等,可能双方都未达到策略稳定,博弈就已经结束。该情况表明,短期博弈中,过程分析远比结果预测重要。

本文采用演化博弈理论分析建设项目质量验收过程,构建施工单位与监理单位博弈模型,从策略变化趋势出发,以博弈路径和工程质量作为衡量标准,借助 Matlab 数值仿真,对各种博弈变化

情况进行优劣评估,通过最优策略调整奖罚力度,保障工程质量。

## 1 建立质量验收模型

### 1.1 基本理论假设

为建立有限理性模型,在认为施工单位具备一定的管理能力和丰富的经济知识前提下,令监理单位为“局中人 1”,施工单位为“局中人 2”,做出如下假设:

假设一:监理单位在施工监督过程中由于资金和人力因素影响,非关键工序采取抽检模式,检查工序中有两种策略选择:a1:检查合格,继续下一步工序;a2:检查不合格,队伍进行整改。设选择策略 a2 情况下,复检合格率为 100%,每次检查的成本期望为  $n$ 。

假设二:由于施工单位管理力度参差不齐,施工单位有两种策略选择:b1:按规范要求施工;b2:不按规范要求施工,同时规定监理单位验收不合格。设选择策略 b2 情况下,施工单位需要缴纳罚金为  $i$ ,并按照监理单位要求逐一整改,整改过程中产生的费用及工期延误损失总计为  $g$ ,假设施工单位经过整改一次后能达到监理方要求并进入下一步工序。施工单位选择策略 b1 的经济效益为  $m_1$ ,施工单位选择策略 b2 的经济效益为  $m_2$ 。

假设三:若监理单位选择不检查,施工单位选择违规施工,存在一定的质量风险期望  $E$ ,若监理单位检查合格,或施工单位整改完成,则不存在质量风险。

假设四:施工单位按照规范要求施工的概率为  $x(0 < x < 1)$ ,监理单位检查比例为  $y(0 < y < 1)$ ,监理单位检查过程中的合格率为关于  $x$  的函数  $f(x)$ ,基于  $f(x)$  函数的性质为增函数,本模型中近似取  $f(x) = x$ 。

### 1.2 策略集合与博弈矩阵

根据以上假设,局中人 1 的策略空间  $S_1$  中有  $T_1$ (主动检查(质量合格)), $T_2$ (主动检查(质量不合格)), $T_3$ (不检查(存在一定的质量风险))等三种策略,即  $S_1 = \{T_1, T_2, T_3\}$ 。局中人 2 的策略空间  $S_2$  中有  $U_1$ (按规范要求施工), $U_2$ (不按规范要求施工)两种策略,即  $S_2 = \{U_1, U_2\}$ 。

通过  $S_1, S_2$  的策略空间计算各博弈策略相应比例,得质量控制博弈矩阵,如表 1 所示。

表 1 质量验收博弈矩阵

施工单位		监理单位		
		$T_1$	$T_2$	$T_3$
		$y f(x)$	$y(1-f(x))$	$1-y$
$U_1$	$x$	$m_1;-n$	$m_1-i-g;-2n+i$	$m_1;0$
$U_2$	$1-x$	$m_2-E;-n-E$	$m_2-i-g;-2n+i$	$m_2-E;-E$

注:分号前为施工单位经济效益,分号后为监理单位经济效益

2 博弈双方动态趋势分析

2.1 构建博弈双方复制动态方程

演化博弈论<sup>[17]</sup>认为博弈过程如同生物进化中的优胜劣汰,结果比平均水平好的策略会逐步取代低于平均水平的策略,经长期试错淘汰后,博弈结果最终达到一个稳定平衡状态。设施工单位选择按规范施工的经济效益期望为  $U_{a1}$ ,施工单位选择不按规范施工的经济期望为  $U_{a2}$ ,平均适应度为  $\overline{U}_a$ ,则

$$U_{a1}=yf(x)m_1+y(1-f(x))(m_1-i-g)+(1-y)\cdot m_1=y(i+g)(x-1)+m_1;$$

$$U_{a2}=yf(x)(m_2-E)+y(1-f(x))(m_2-i-g)+(1-y)(m_2-E)=(xy-y)(i+g-E)+m_2-E;$$

$$\overline{U}_a=U_{a1}x+U_{a2}(1-x)=(xy-y)(i+g)+(m_1-m_2)x+(x^2y-2xy+x+y-1)E+m_2。$$

根据  $U_{a1}, U_{a2}, \overline{U}_a$  得施工单位复制动态方程为:

$$\frac{dx}{dt}=x(U_{a1}-\overline{U}_a)=x(1-x)[m_1-m_2+(xy-y+1)E]$$

(1)

同理设监理单位选择全部检查的经济期望为  $U_{b1}$ ,选择完全不检查的经济期望为  $U_{b2}$ ,平均适应度为  $\overline{U}_b$ ,监理单位复制动态方程为:

$$\frac{dy}{dt}=y(U_{b1}-\overline{U}_b)=y(1-y)(Ex^2-xi+xn-2n+i-2Ex+E)$$

(2)

式(1)(2)反应了施工单位与监理单位策略选择的速度的方向,当  $dy/dt=dx/dt=0$  时为策略平衡状态,表示策略不再发生改变。

2.2 施工单位与监理单位单向策略变化趋势分析

在复制动态方程的基础上对施工单位进行分析,令  $dx/dt=0$ ,得  $x=0, x=1$  或  $y=(m_2-m_1-E)\div[E(x-1)]$ 。设  $\Delta_1=(m_2-m_1-E)/E$  在定义域  $(0, 1)$  内,施工单位规范施工比例  $x$  随时间变化趋势存在 3 种情况,见图 1(图中任一时刻的博弈状态

都对应平面区域内某一点,将该点简称为变化因子)。

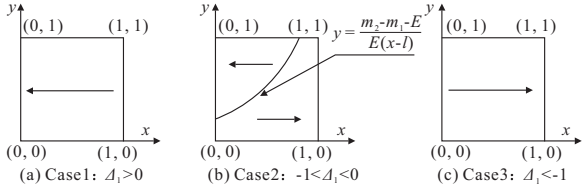


图 1 施工单位规范施工比例  $x$  随时间变化趋势

Case 1 中  $\Delta_1>0, m_2-m_1>E$ ,质量风险期望较小,低于施工单位效益差,施工方规范施工比例不断降低。

Case 2 中  $-1<\Delta_1<0, m_2-m_1<E$ ,质量风险期望较大,高于施工单位效益差,此时存在一条平衡曲线  $y=\Delta_1/(x-1)$ ,曲线两侧的变化因子会随时间推移背离曲线,碰撞区域两侧边界后达到平衡。施工过程中为避免博弈平衡出现在  $x=0$ (完全违规施工状态),一方面可以调整管理参数  $\Delta_1$ ,缩小该部分变化区域;另一方面,初始博弈策略会直接影响博弈结果。对曲线截距分析,施工单位规范施工比例较低时,监理单位不宜选择过高的检查比例,施工单位疲劳反应现象并不利于工程质量。

Case 3 中  $\Delta_1>-1, m_1>m_2$ 。该情况说明,当违规施工所得经济效益低于规范施工时,施工单位会逐步提高施工质量。

综上所述,施工单位博弈平衡主要受质量风险期望与效益差影响。施工单位在非关键工序中出于经济效率考虑,很难保证施工质量。而关键工序中工程质量受监理单位检查比例影响趋于两极分化。

对监理单位复制动态方程进行分析,令  $dy/dt=0$ ,解得  $y=0$  或  $y=1$  或  $x$  满足等式  $Ex^2+(n-i-2E)x+E-2n+i=0$ ,设方程的解分别为  $x_1, x_2(x_1<x_2)$ ,则

$$x=\frac{2E+i-n\pm\sqrt{(2E+i-n)^2-4E(E-2n+i)}}{2E}$$

(3)

由式(3)可知  $x_1<1<x_2$ 。设  $\Delta_2=x_1$ 。在定义域  $(0, 1)$  内,因  $x_1, x_2$  取值不同,监理单位变化趋势存在图 2 中两种情况。

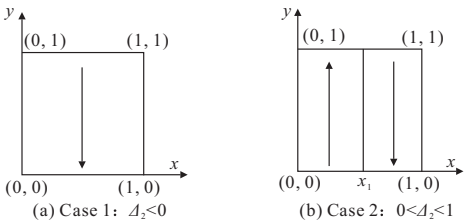


图 2 监理单位检查比例  $y$  随时间变化趋势

根据图 2 中监理单位变化趋势,施工单位规

范施工比例高于  $\Delta_2$  时,监理单位检查比例降低,低于  $\Delta_2$  时,监理单位检查比例提高。 $\Delta_2$  是决定监理单位检查比例变化的关键因素,也代表了监理单位检查标准。

2.3 混合策略变化趋势分析

由于施工单位规范施工比例  $x$  与监理单位检查比例  $y$  是同一区域内的变化情况,可以将两个变化趋势反应到同一坐标系中,得到混合变化趋势图。经计算,混合变化趋势图共 7 种,见图 3 (图中,实线为监理单位策略稳定状态,虚线为施工单位策略稳定状态,实线与虚线的交点为混合情况下的平衡点)。

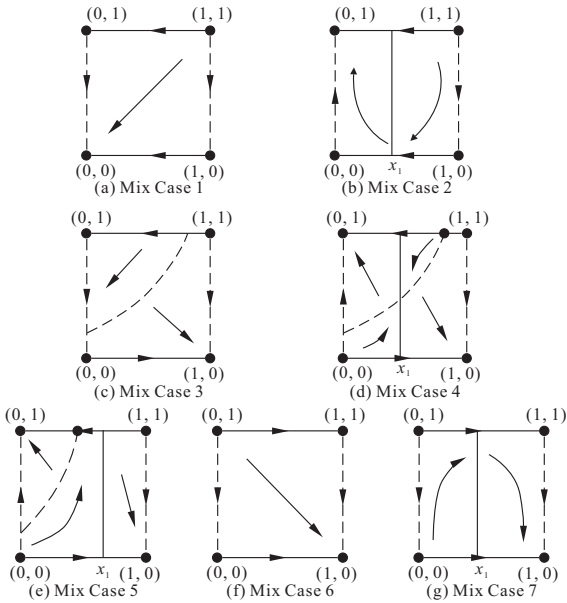


图 3 施工单位与监理单位复合变化趋势

由图 3 可知,博弈过程因项目参数影响会出现多个平衡状态。当平衡状态受外界干扰发生微小偏移,能重新回到原平衡状态的平衡点为稳定平衡点。各混合情况稳定平衡点见表 2。

表 2 混合情况稳定平衡点

混合情况	外部状态	稳定平衡点
MC1	$\Delta_1 > 0, \Delta_2 < 0$	(0,0)
MC2	$\Delta_1 > 0, 0 < \Delta_2 < 1$	(0,1)
MC3	$-1 < \Delta_1 < 0, \Delta_2 < 0$	(1,0)
MC4	$-1 < \Delta_1 < 0, 0 < \Delta_2 < 1$	(0,1), (1,0)
MC5	$-1 < \Delta_1 < 0, 0 < \Delta_2 < 1$	(0,1), (1,0)
MC6	$\Delta_1 < -1, \Delta_2 < 0$	(1,0)
MC7	$\Delta_1 < -1, 0 < \Delta_2 < 1$	(1,0)

注:MC 为 Mix Case 缩写,表示混合情况

对比 MC1,MC2,由于  $\Delta_1 > 0$ ,项目质量风险期望较低,施工单位最终演化为完全违规施工,监理单位质量管理行为失效。MC3,MC4,MC5 中  $-1 < \Delta_1 < 0$ ,项目质量风险较高。MC3 的演化结果为施工单位规范施工,监理单位不进行检查,是较为理

想的博弈趋势。针对 MC4,MC5 两种变化趋势,  $x_1$  左侧变化区域内,监理单位检查比例提高过快会促使该区域内变化因子稳定于点 (0,1),不利于施工质量,  $x_1$  右侧区域监理单位检查比例不断下降,下降速度越快,稳定于点 (1,0) 的比例越高,监理单位提高检查比例不宜变化过快,而降低检查比例时越快越好。MC6,MC7 中  $\Delta_1 < -1$ ,施工单位规范施工能获得更高的经济效益,监理单位检查标准  $\Delta_2$  仅影响自身策略选择。MC6,MC7 的平衡状态有利于建筑工程施工质量,建议业主单位在结算工程价款时,在以往按量计价的基础上增设一定权重的施工情况附加价款,使施工单位规范施工能获得更高的经济效益,实现 MC6,MC7 中的良性循环。

3 工程案例分析

3.1 数值校核与仿真

在微分方程稳定性计算中,Friendman<sup>[18]</sup> 提出通过判断雅克比矩阵的行列式和迹,可以直接确定稳定点,便于验证变化趋势图中平衡点的稳定情况。由于施工单位与监理单位博弈过程中并不存在具有普遍代表意义的稳定平衡点,不同项目参数的博弈情况大不相同。为分析项目参数的影响情况,用建筑工程中某层 400 m<sup>2</sup> 楼板混凝土浇筑为例。以 5000 元质量风险期望,500 元罚款,2000 元额外损失作为项目管理参数,见表 3。

表 3 某层混凝土楼板浇筑项目管理参数 元

参数	规范施工 经济效益 $m_1$	违规施工 经济效益 $m_2$	质量风 险期望 $E$	罚款 金额 $i$	额外经 济损失 $g$	监理单位 检查成本 $n$
金额	8000	12000	5000	500	2000	300

经计算,该项目验收过程满足 MC4 中博弈情况,除四个角部平衡点外还有边界平衡点 (0.8,1) 及内部平衡点 (0.76,0.85)。为确定各平衡点稳定性,式(1)(2)分别对  $x, y$  求偏导,得雅可比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dx/dt}{\partial x} & \frac{dx/dt}{\partial y} \\ \frac{dy/dt}{\partial x} & \frac{dy/dt}{\partial y} \end{bmatrix}。$$

将项目基本参数带入雅克比矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 20000xy - 15000x^2y - 2000x - 5000y + 1000 & -5000x(x-1)^2 \\ y(1-y)(10000x - 10200) & (1-2y)(5000x^2 - 10200x + 4900) \end{bmatrix}。$$

当雅克比矩阵的行列式  $\text{Det}(J) > 0$ ,迹  $\text{Tr}(J) < 0$  时,为系统稳定点。经校核,六个平衡点中仅



(0,1)和(1,0)是稳定平衡状态,对数据进行验算后发现边界平衡点与内部平衡点任何情况下都不可能是系统稳定点,博弈终点仅出现在(0,0),(0,1),(1,0)三点之中,符合MC4变化趋势。

3.2 混合情况评估与对策建议

结合该案例,分别放大或缩小项目参数  $m_1$ ,  $E, i, n$ , 判断  $\Delta_1, \Delta_2$  的变化情况,确定混合博弈情况的变化趋势(如图4)。各参数变化过程从0增大至无穷大时,混合趋势变化如表4所示。

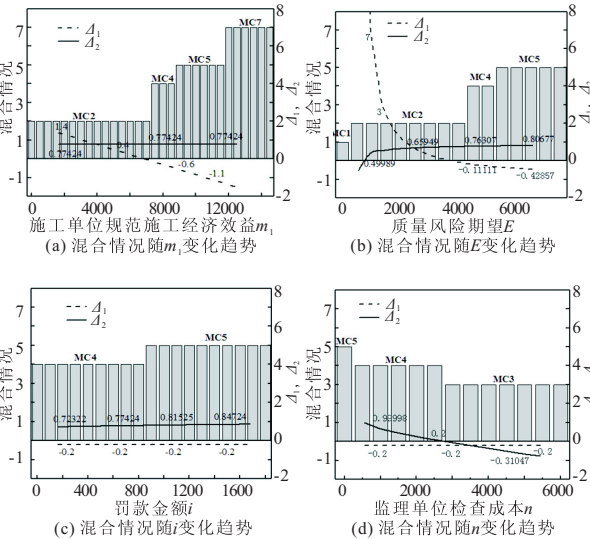


图4 混合变化趋势随四种项目参数变化情况

表4 混合情况变化趋势

变化因素	$\Delta_1$	$\Delta_2$	混合情况变化
$m_1$	↓	不变	MC2→MC4→MC5→MC7
$E$	↓	↑	MC1→MC2→MC4→MC5
$i$	不变	↑	MC4→MC5
$n$	不变	↓	MC5→MC4→MC3

注: ↑表示增加; ↓表示减小

在假设一的基础上,施工单位不按规范施工,经一次整改后,也能通过验收。但该行为会产生极大的质量隐患。从工程质量考虑,认为平衡于点(1,0)的混合情况质量评估均高于平衡于点(0,0)与(0,1)的混合情况;从经济成本考虑,博弈路径出现往复时,会延长博弈周期,提高博弈成本。综上所述,对该项目可能发生的七种混合博弈情况进行优劣对比得:MC6>MC3, MC7>MC4, MC5>MC1>MC2。

MC4与MC5两种混合情况无法直接从趋势变化比较经济成本或工程质量情况,因此借助Matlab软件,以趋近于0的时间精度  $t$  分别对式(1)(2)进行迭代赋值,模拟策略演化路径。将平衡于点(1,0)的区域面积为  $S_1$  作为衡量标准评估工程质量。该项目博弈路径如图5a,插值法细化边界后如图5b。

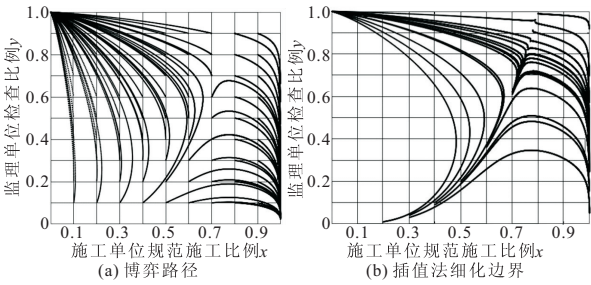


图5 楼板浇筑项目策略演化路径

三阶多项式拟合变化边界得:

$$y = 3.70203x^3 - 2.14447x^2 + 0.6802x - 0.07257, R^2 = 0.99.$$

平衡于点(1,0)的区域面积为  $S_1$  为:

$$S_1 = \int_0^{0.8} (3.70203x^3 - 2.14447x^2 + 0.6802x - 0.07257) dx + \int_{0.8}^1 dx = 0.373.$$

出于罚款力度考虑,当罚款金额依次增大,高于800元时,MC4→MC5,边界变化如图6。

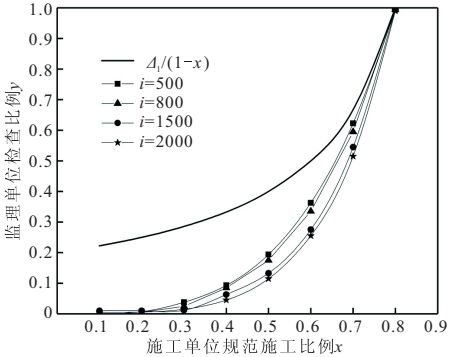


图6 罚款金额与变化边界

由图6所示罚款金额由500元提高至2000元的过程中,变化边界不断向右偏移,平衡于点(1,0)的区域面积  $S_1$  略有减小。基于罚款金额  $i$  考虑MC4优于MC5。

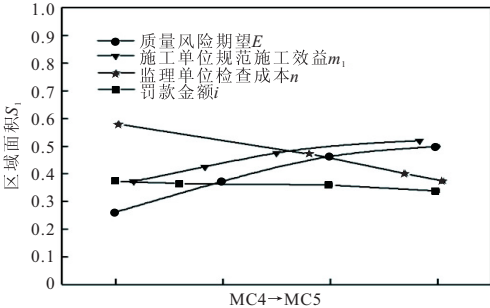


图7 MC4→MC5过程区域面积  $S_1$  变化趋势

同样对施工单位规范施工经济效益  $m_1$ 、质量风险期望  $E$ 、监理单位检查成本  $n$  分析,得如图7所示变化趋势。其中  $E, m_1$  在MC4→MC5的过程中  $S_1$  面积变大,施工质量提高,而监理单位检查成本  $n$  对应的  $S_1$  减小,工程质量水平降低。因此。基于  $E, m_1$  考虑,MC5优于MC4;基于监理单位

位检查成本  $n$  考虑,MC4 优于 MC5。

根据表 4 中混合情况变化过程与图 4,6,7 所示评估标准,提出如下改进意见:

(1)若建设单位对工程质量有较高要求,可设置奖励机制,当规范施工经济效益高于违规施工时,如图 4a 中 MC4→MC7,质量隐患必然减少;

(2)罚款力度对当前项目来说影响较小,罚款金额超过 800 元时,如图 4c 中 MC4→MC5,工程质量略有下降;

(3)建设单位可适当降低监理单位合同价款,当施工单位与监理单位的管理人员都具备较高的专业水平时,施工单位能自发保证施工质量,从而监理单位可适当降低检查比例以节约成本;

(4)初始博弈策略对博弈路径和博弈结果影响极大,若项目开始时施工单位就以高标准规范施工,不仅能提高经济效益,更能保障工程质量。

4 结 论

本文构建施工单位与监理单位验收模型,运用演化博弈理论,比较五种单向变化趋势和七种混合变化趋势,评估不同博弈过程工程质量水平,得到以下结论:

(1)施工单位规范施工情况主要受经济效益和质量风险影响。在关键工序中施工单位由于较高的质量风险,会提高规范施工比例。在非关键工序中,监理单位检查比例与惩罚力度对施工单位影响较小。

(2)针对不同质量风险的工程项目,以博弈成本和工程质量作为衡量标准,评估混合变化情况,能科学有效地设置奖励机制,调整惩罚力度。

(3)验收博弈初始阶段的行为策略对博弈结果影响较大,若施工单位入场时就以较高的质量标准施工,整体工程质量都会有所提高。

施工单位复制动态方程构建过程中抵消了额外损失价款  $g$ ,这表示基于复制动态方程的理论体系,该变量不会干扰博弈过程。但实际情况是施工单位额外损失  $g$  会提高施工成本,必然影响博弈状态。该矛盾说明复制动态方程在研究某些管理参数时存在一定缺陷,后续研究考虑为复制动态方程增设调整系数,以满足更高的理性层次。

参 考 文 献

[1] 陆智铭. 建筑装饰装修工程质量控制及通病防治[J]. 建材与装饰, 2019, (24): 18-19.  
[2] Alwi S, Keith H, Sherif M. Effect of quality supervi-

sion on rework in the Indonesian context[J]. Asia-Pacific Building and Construction Management Journal, 2001, 6: 1-9.  
[3] 曹 伟. 建设工程项目参与主体对工程质量问题的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
[4] 吴泽民. 工程责任主体质量行为分析及政府监管模式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.  
[5] Brito A J, De Almeida A T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94: 187-198.  
[6] Chan A P, Tam C M. Factors affecting the quality of building projects in Hong Kong[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2000, 17 (4): 423-441.  
[7] 王 薇, 张守健, 孙 智. 基于演化博弈的工程建设标准采纳行为研究[J]. 科技管理研究, 2018, (20): 243-248.  
[8] 陈宝春, 陈建国, 黄素萍. 微分博弈视角下政府建筑安全监管策略分析[J]. 建筑经济, 2018, 39 (8): 107-111.  
[9] 杨晓冬, 张家玉. 既有建筑绿色改造的 PPP 模式研究: 演化博弈视角[J]. 中国软科学, 2019, (3): 183-192.  
[10] Ahmed E, Hegazi A S, Elgazzar A S. Sato-crutchfield formulation for some evolutionary games[J]. International Journal of Modern Physics C, 2003, 14 (7): 963-971.  
[11] Nowak M A, Sigmund K. Evolutionary dynamics of biological games[J]. Science, 2004, 303 (5659): 793-799.  
[12] 张飞涟, 王孟钧, 周继祖, 等. 运用博弈对策理论进行工程项目质量控制[J]. 长沙铁道学院学报, 2000, 18 (2): 27-30.  
[13] 王晓燕. 基于进化博弈分析的建筑工程质量监管研究[J]. 项目管理技术, 2013, 11 (6): 71-74.  
[14] 张 攀, 郭圣煜. 基于进化博弈理论的建筑工程质量监管 SD 模型[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35 (6): 178-185.  
[15] 陈 伟, 易 莎, 邹 松, 等. 建筑固体废弃物资源化利用的三方非对称演化博弈[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36 (3): 54-59.  
[16] 伍红民, 郭汉丁, 李柏桐. 多方博弈视角下既有建筑节能改造市场主体行为策略[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36 (1): 156-162.  
[17] Smith J M. Evolution and the Theory of Games[M]. Cambridge University Press, 1982.  
[18] Friedman D E. Evolutionary games in economics[J]. Econometric: Journal of the Econometric Society, 1991: 59 (3): 637-666.