

Evolutionary Game Analysis on Application and Promotion of BIM Technology in International Railway Construction Project Management

Yifei Lai¹, Shicheng Zhu¹, Xiaoyong Hu²

1. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province

2. China Railway International Co., Ltd, Beijing 100055

Email: lyf37319@163.com

Abstract

The application of BIM Technology can effectively improve the benefits of international railway construction projects. By constructing the evolutionary game model of the owner and the contractor, this paper studies the evolution mechanism of BIM Technology Promotion and application behavior of both parties, explores the conditions for both parties to reach the optimal stable state, and studies the evolution path and factors affecting the decision-making of both parties through simulation. The results show that promotion and use costs, incentives and subsidies, reputation gains and losses affect the behavior choices of both parties. Finally, according to the research results, corresponding suggestions are put forward for the owner and the contractor.

Keywords: International Railway; Building Information Modeling Evolutionary Game; Simulation

BIM 技术在国际铁路建设项目管理中的应用推广 演化博弈研究

赖一飞¹, 朱士诚¹, 胡小勇²

1 武汉大学 经济与管理学院, 湖北省 武汉市 430000

2 中国铁路国际有限公司, 北京市 100055

摘要: BIM 技术的应用可有效提高国际铁路建设项目的效益。通过构建业主、承包商双方演化博弈模型, 研究双方 BIM 技术推广与应用行为演化机理、探究双方达到最优稳定状态的条件, 并通过仿真模拟研究双方的演化路径和影响系统演化的因素。结果表明, 推广与使用成本、激励与补贴、声誉收益与损失等因素影响双方的行为选择。最终, 根据研究结果对业主与承包商提出了相应建议。

关键词: 国际铁路; BIM; 演化博弈; 仿真模拟

引言

自“一带一路”项目启动以来, 我国投入大量资金用于国际基础设施建设。其中, 国际铁路项目是我国对外基础设施投资建设的重点。因政策、经济、环境等原因, 国际铁路设计施工复杂、建设运营管理困难。将 BIM 技术运用到国际铁路项目中可实现劳务、物资、进度、质量、安全的统筹管理, 完成工程建设流程与工艺的可视化同时也能实现信息同步、减少变更、缩短工期并提高建设及运营的管理水平, 给项目各参与方带来不同程度收益。目前我国参与的国际铁路项目主要利益相关者为业主与承包商, 因此深入研究 BIM 技术在

业主与承包商之间推广与应用行为的内在影响因素，寻求促使业主积极推广、承包商积极应用的条件对我国“一带一路”工程建设推进意义重大。

研究现有的相关文献发现，当前阶段对 BIM 技术在铁路建设项目中的应用研究多集中在技术开发与方案设计层面。黄莹^[1]等探索了通过族样板和族嵌套实现铁路三维参数化建模的方法，结合实际工程验证了该方法对 BIM 在铁路工程的推广和应用的有效性。闵世平和林国庆^[2]提出了铁路隧道 BIM 三维模型动态建立的技术方案，设计了隧道施工管理空间大数据云平台框架并通过开发与应用验证了框架的可行性。马弯^[3]研发了基于 BIM 的铁路轨道三维数字化设计系统，促进了专业间协同，解决了专业变更引起的重复建模问题。迟敬来^[4]构建了基于 BIM 模型的工程量计算方法，对达索进行了二次开发，实现了 BIM 模型与概算软件的数据共享。胡文丽^[5]以某高速铁路为依托运用 BIM 技术进行了铁路工程声屏障模型构建，探究了 BIM 在高速铁路声屏障设计中的应用。马少雄^[6]等依托实际铁路工程应用对基于 BIM 的数字化协同管理平台展开了研究，并得出该平台的应用对项目成本节约与企业的行业影响力有显著作用。对 BIM 技术在项目管理中的推广与应用的研究方面，纪博雅^[7]等构建了完全信息动态博弈模型分析政府与企业间 BIM 应用的经济激励机制，提出奖惩并行、分阶段的 BIM 应用激励方案。贾崇^[8]等构建了演化博弈模型，分析政府与社会资本 BIM 技术协同应用行为，得到政府加强政策规制和督导力度并激发社会资本的积极性可有效推动 BIM 技术在 PPP 项目中的应用。当前研究很少涉及到 BIM 技术在国际铁路项目中业主与承包商之间推广与应用行为的内在机制分析。同时现有的研究采用的完全信息动态博弈模型有其缺点，现实中业主与承包商掌握的信息有限，演化博弈的有限理性经济人假设更能贴合国际铁路项目中业主与承包商在决策时的行为特征^[9]。因此本文构建演化博弈模型求解双方在国际铁路项目中推广与应用 BIM 技术的动态行为演化路径与影响系统演化的因素，并通过 MATLAB 进行了仿真模拟，最终对双方提出了相应建议。

1 模型假设与构建

本文构建双方演化博弈模型，博弈的参与方为国际铁路建设项目中的业主与承包商，依据演化博弈理论与博弈双方的行为特征作出如下假设：

假设 1：国际铁路项目中业主与承包商均具有有限理性的特征，双方围绕 BIM 技术的推广与应用展开博弈，双方根据自身认知与外界环境的变化不断调整策略。

假设 2：双方的决策依据其期望收益的高低。

假设 3：国际铁路项目中业主与承包商行为决策是离散的，业主可选择积极推广和消极推广，承包商可选择使用 BIM 技术与不使用 BIM 技术。

假设 4：国际铁路项目中业主选择积极推广的比例为 x ，消极推广的比例为 $1-x$ 。承包商选择使用 BIM 技术的比例为 y ，不使用 BIM 技术的比例为 $1-y$ 。

假设 5：在国际铁路项目中业主的保留收益为 A ，业主积极推广 BIM 技术的成本为 B ，业主消极推广的推广力度为 α ，且 $\alpha \in (0, 1)$ ，则业主消极推广 BIM 技术的成本为 αB 。业主积极推广 BIM 技术带来的声誉收益为 C_1 ，消极推广带来的声誉损失为 C_2 。国际铁路项目承包商的保留收益为 F ，其 BIM 使用成本为 G ，业主积极推广时对使用 BIM 技术的承包商的成本补贴系数为 β ，且 $\beta \in (0, 1)$ ，则业主补贴成本为 βG 。承包商使用 BIM 技术则声誉与竞争力收益为 I ，不使用 BIM 技术声誉与竞争力损失为 J ，使用 BIM 带来的直接经济收益为 H ，外部性系数为 λ ，且 $\lambda \in (0, 1)$ ，则承包商使用 BIM 技术时给业主带来的外部性收益为 λH 。业主积极推广时对使用 BIM 技术的承包商的激励奖励为 D ，对不使用 BIM 技术的承包商的惩罚为 E 。各参数设置见表 1，双方收益矩阵见表 2。

表 1 损益参数设置

参数	参数含义
x	国际铁路项目业主选择积极推广的比例
y	国际铁路项目承包商选择使用 BIM 技术的比例
A	国际铁路项目业主的保留收益
B	业主积极推广 BIM 技术的成本
α	业主消极推广的推广力度
C_1	业主积极推广的声誉收益
C_2	业主消极推广的声誉损失
F	国际铁路项目承包商的保留收益
G	承包商的 BIM 使用成本
β	业主积极推广时对承包商的成本补贴系数
I	承包商使用 BIM 的声誉与竞争力收益
J	承包商不使用 BIM 的声誉与竞争力损失
H	承包商使用 BIM 带来的直接经济收益
λ	直接经济效益外部性系数
D	业主对使用 BIM 的承包商激励奖励
E	业主对不使用 BIM 的承包商的惩罚

表 2 国际铁路项目博弈双方收益矩阵

博弈主体	业主	
	积极推广 x	消极推广 $(1-x)$
使用 BIM	$A-B+C_1-\beta G+\lambda H-D$	$A-\alpha B-C_2+\lambda H$
	$F-G+H+I+\beta G+D$	$F-G+H+I$
y 不使用 BIM	$A-B+C_1+E$	$A-\alpha B-C_2$
	$F-J-E$	$F-J$
$(1-y)$		

2 演化稳定策略分析

通过对收益矩阵的计算可得到国际铁路项目业主积极推广时的期望收益 U_{11} 、消极推广时的期望收益 U_{12} 和平均期望收益 \bar{U}_1 ：

$$U_{11}=y(A-B+C_1-\beta G+\lambda H-D)+(1-y)(A-B+C_1+E) \quad (1)$$

$$U_{12}=y(A-\alpha B-C_2+\lambda H)+(1-y)(A-\alpha B-C_2) \quad (2)$$

$$\bar{U}_1=xU_{11}+(1-x)U_{12} \quad (3)$$

同理，可以得到国际铁路项目承包商使用 BIM 技术时的期望收益 U_{21} 、不使用 BIM 技术时的期望收益 U_{22} 和平均期望收益 \bar{U}_2 ：

$$U_{21}=x(F-G+H+I+\beta G+D)+(1-x)(F-G+H+I) \quad (4)$$

$$U_{22}=x(F-J-E)+(1-x)(F-J) \quad (5)$$

$$\bar{U}_2=yU_{21}+(1-y)U_{22} \quad (6)$$

可求得国际铁路项目业主与承包商的复制动态方程分别为：

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{11} - \bar{U}_1) = x(1-x)(U_{11} - U_{12}) = x(1-x)[y(-D - \beta G - E) + C_1 + C_2 + \alpha B - B] \quad (7)$$

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{21} - \bar{U}_2) = y(1-y)(U_{21} - U_{22}) = y(1-y)[x(\beta G + D + E) + H + I + J - G] \quad (8)$$

令 $F(x)=0$ 可知，当 $x=0$ 、 $x=1$ 、 $y^* = \frac{B - \alpha B - C_2 - C_1}{-D - \beta G - E}$ 时业主方的 BIM 技术推广行为达到局部均衡。令

$F(y)=0$ 可知，当 $y=0$ 、 $y=1$ 、 $x^* = \frac{G - J - H - I}{\beta G + D + E}$ 时承包商方的 BIM 技术应用行为达到局部均衡。并得到五个

局部均衡点：(0, 0)、(0, 1)、(1, 0)、(1, 1)、(x^* , y^*)。

3 系统稳定性分析

根据 Friedman^[10]提出的方法，通过雅可比矩阵来分析系统的局部稳定性。由式(7)、(8)求得本系统的雅可比矩阵为：

$$\begin{Bmatrix} (1-2x)[y(-D-\beta G-E)+C_1+C_2+\alpha B-B] & x(1-x)(-D-\beta G-E) \\ y(1-y)(\beta G+D+E) & (1-2y)[x(\beta G+D+E)+H+I+J-G] \end{Bmatrix}$$

则矩阵的行列式

$$\det J = (1-2x)(1-2y)[y(-D-\beta G-E)+C_1+C_2+\alpha B-B][x(\beta G+D+E)+H+I+J-G] - xy(1-x)(1-y)(-D-\beta G-E)(\beta G+D+E) \quad (9)$$

$$\text{tr} J = (1-2x)[y(-D-\beta G-E)+C_1+C_2+\alpha B-B] + (1-2y)[x(\beta G+D+E)+H+I+J-G] \quad (10)$$

将(0, 0)、(0, 1)、(1, 0)、(1, 1)代入式(9)、(10)可得各点的雅可比矩阵行列式与迹，见表3。

表3 雅可比矩阵行列式($\det J$)与迹($\text{tr} J$)

均衡点	$\det J$	$\text{tr} J$
(0, 0)	$(C_1 + C_2 + \alpha B - B)(H + I + J - G)$	$(C_1 + C_2 + \alpha B - B) + (H + I + J - G)$
(0, 1)	$-(-D - \beta G - E + C_1 + C_2 + \alpha B - B)(H + I + J - G)$	$-(-D - \beta G - E + C_1 + C_2 + \alpha B - B) - (H + I + J - G)$
(1, 0)	$-(C_1 + C_2 + \alpha B - B)(\beta G + D + E + H + I + J - G)$	$-(C_1 + C_2 + \alpha B - B) + (\beta G + D + E + H + I + J - G)$
(1, 1)	$(-D - \beta G - E + C_1 + C_2 + \alpha B - B)(\beta G + D + E + H + I + J - G)$	$-(-D - \beta G - E + C_1 + C_2 + \alpha B - B) - (\beta G + D + E + H + I + J - G)$

BIM 技术对国际铁路建设项目建设效果、业主与承包商的利益以及公众利益都有重要意义，因此系统应追求向业主积极推广、承包商积极使用的方向演化。为达到此目标，各参数应满足： $C_1 + C_2 - D - \beta G - E - (1 - \alpha)B > 0$ 、 $\beta G + D + E + H + I + J - G > 0$ 、 $C_1 + C_2 - (1 - \alpha)B > 0$ 、 $H + I + J - G > 0$ 。即在国际铁路项目中，业主积极与消极推广的声誉损益差额大于积极与消极推广的成本之差加上补贴成本与激励和惩罚的数值之和；承包商使用 BIM 技术带来的直接经济效益加上业主的激励与惩罚数值之和再加其使用与不使用 BIM 带来的声誉与竞争力的损益差额大于其补贴后的使用成本；业主积极与消极推广的声誉损益差额大于积极推广与消极推广的成本之差；承包商使用 BIM 技术带来的直接经济效益加上其使用与不使用 BIM 带来的声誉与竞争力的损益差额大于其补贴前的使用成本。此时系统稳定于(1, 1)并达到最优状态，各局部均衡点的稳定性见表4，其中(x^* , y^*)超出范围无意义。系统演化相

位图见图 1。

表 4 均衡点稳定性

均衡点	$\det J$	$\text{tr} J$	稳定性
(0, 0)	+	+	不稳定
(0, 1)	-	不确定	鞍点
(1, 0)	-	不确定	鞍点
(1, 1)	+	-	稳定点

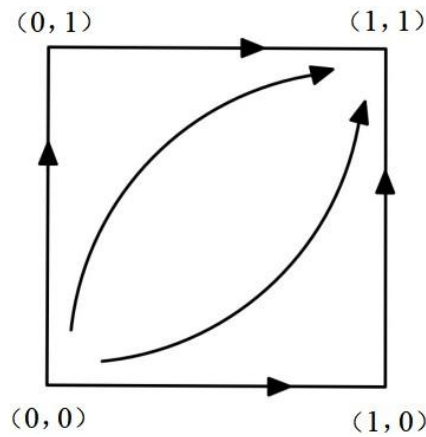


图 1 系统演化相位图

4 仿真模拟分析

通过 MATLAB 软件进行数值模拟，进一步研究系统的演化路径及各参数对双方决策的影响。假设双方在博弈初始 $x=0.5$ 、 $y=0.5$ ，并对其他参数进行合理赋值： $A=15$ 、 $B=5$ 、 $\alpha=0.4$ 、 $C_1=8$ 、 $C_2=8$ 、 $\beta=0.3$ 、 $H=8$ 、 $D=4$ 、 $E=4$ 、 $F=30$ 、 $G=12$ 、 $\lambda=0.6$ 、 $I=5$ 、 $J=4$ 。则初始参数下系统演化路径见图 2。由图可直观地看出，双方系统从初始状态向(1, 1)演化。此时各参数满足 $C_1+C_2-D-\beta G-E-(1-\alpha)B>0$ 、 $\beta G+D+E+H+I+J-G>0$ 、 $C_1+C_2-(1-\alpha)B>0$ 、 $H+I+J-G>0$ 的条件，与前文结果一致。

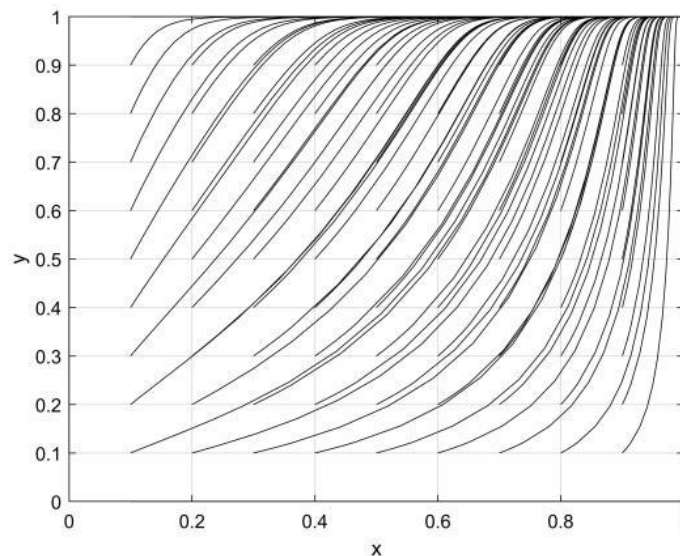


图 2 系统演化路径图

(1) 保持其他参数不变,在一定范围内分别改变 B 、 D 、 β 的值,由图 3、图 4、图 5 可知在国际铁路项目中,随着业主 BIM 技术推广成本、激励成本、补贴系数(补贴成本)的增加,业主选择积极推广 BIM 技术的概率逐渐降低,其策略选择逐渐由积极推广向消极推广方向演化。

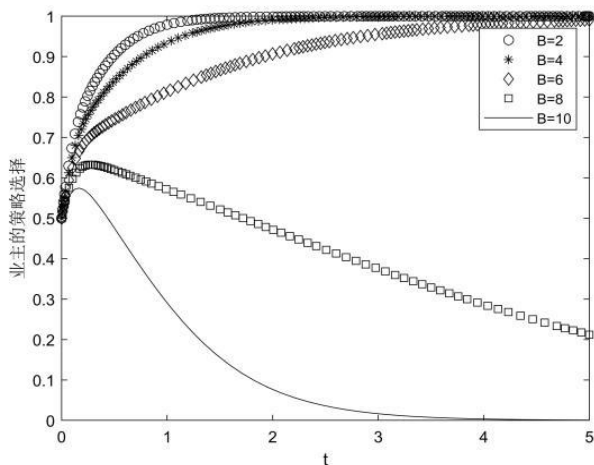


图 3 推广成本对业主策略选择的影响

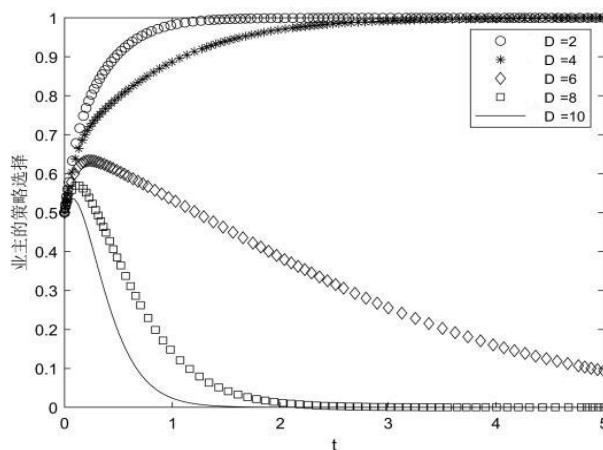


图 4 激励成本对业主策略选择的影响

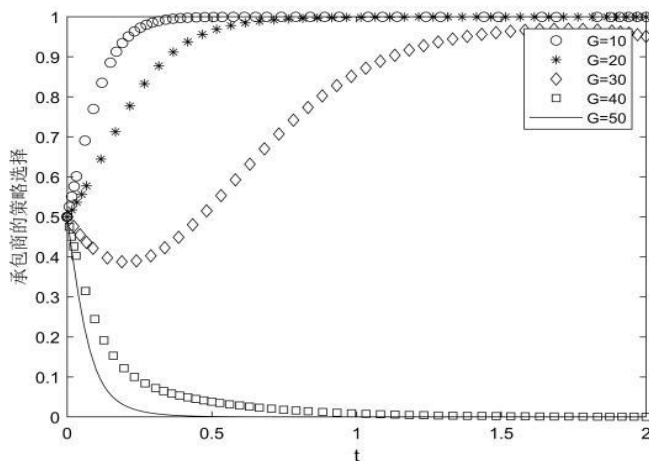


图 5 补贴系数对业主策略选择的影响

(2) 保持其他参数不变,在一定范围内分别改变 G 、 H 的值,由图 6、图 7 可知在国际铁路项目中,随着承包商 BIM 技术使用成本的增加,承包商选择使用 BIM 技术的概率逐渐降低,其策略选择逐渐由使用 BIM 向不使用 BIM 方向演化。承包商使用 BIM 技术带来的直接经济效益的变化不影响演化方向,随着 H 增大,承包商策略向使用 BIM 技术方向收敛的速度变快。

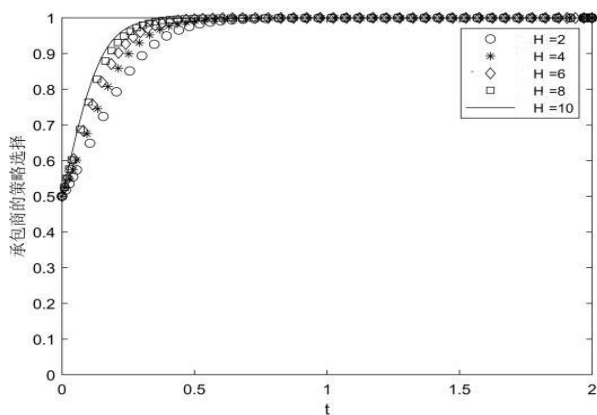


图 6 使用成本对承包商策略选择的影响

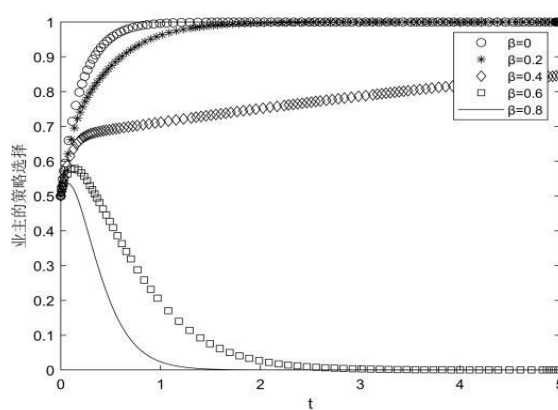


图 7 直接经济收益对承包商策略选择的影响

(3) 保持其他参数不变,在一定范围内分别改变 C_1 、 C_2 、 I 、 J 的值,由图 8、图 9、图 10、图 11 可知在国际铁路项目中,随着业主积极推广 BIM 技术带来的声誉收益和消极推广 BIM 技术造成的声誉损失的增加,业主选择推广 BIM 技术的概率逐渐增大,其策略选择逐渐由消极推广向积极推广方向演化。承包商使用 BIM 技术带来的声誉收益和不使用 BIM 技术带来的声誉损失的变化不影响演化方向,随着 I 、 J 增大,承包商策略向使用 BIM 技术方向收敛的速度变快。

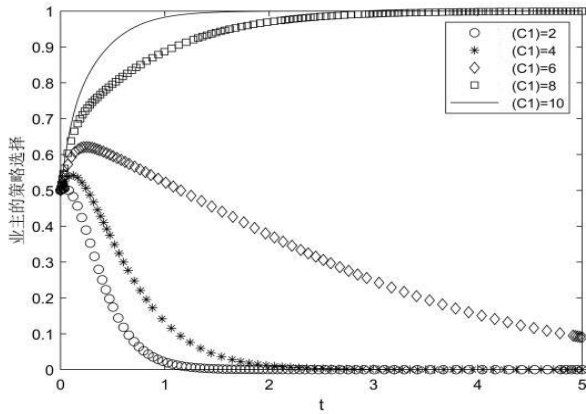


图 8 声誉收益对业主策略选择的影响

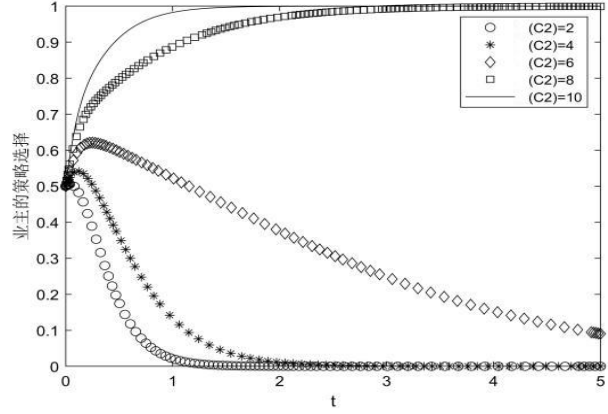


图 9 声誉损失对业主策略选择的影响

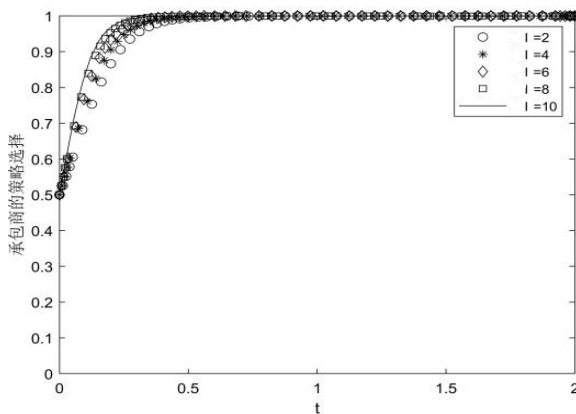


图 10 声誉收益对承包商策略选择的影响

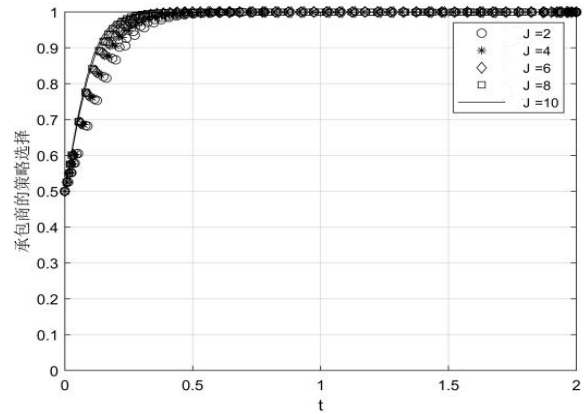


图 11 声誉损失对承包商策略选择的影响

5 结论与建议

演化博弈理论以有限理性假设为基础,更符合国际铁路项目业主与承包商双方在决策中有限理性的特征,通过复制动态方程求解双方的演化稳定策略以及影响 BIM 技术在国际铁路建设项目中推广与应用的因素。研究表明:业主的推广成本、激励成本、补贴系数、BIM 使用成本及其带来的直接经济收益、业主推广积极与否带来的声誉收益与损失、承包商方使用与否带来的声誉收益与损失等因素都会影响双方行为决策。因此,对博弈双方分别提出如下建议:

业主着眼于整个产业发展,充分认识到 BIM 技术在基础设施建设项目中发挥的重要作用,尤其是国际铁路项目之类的复杂工程,业主更应积极推广,采取措施引导承包商使用 BIM 技术。制定合适的补贴政策,在自身财政承受能力之内给予承包商相应的使用成本补贴,对承包商设计合理的奖惩措施,通过适当的激励与惩罚促使承包商快速向使用 BIM 技术方向收敛。此外业主也应从己身出发,改善冗杂的部门机构、采取适当推广方式以降低推广成本。完善相关档案记录,在招投标中向使用 BIM 技术的承包商做出适当倾斜,促使承包商认识到使用 BIM 技术对其行业声誉及经济效益的影响,必要时可以在招投标环节严格限制投标条件,筛出不满足 BIM 技术使用要求的承包商。同时在合同明确 BIM 技术使用相关条款。

承包商应充分认识到声誉对其长期经济效益的影响。转变思路，将 BIM 技术应用视为其价值提升点而非单纯的投入，采取试点项目形式将 BIM 技术使用成本、节约支出与其他财务指标区分开，评估 BIM 技术投资回报率。通过 BIM 技术前期投资与培训，在国际铁路建设项目中积极使用 BIM 技术，以此获取较高的声誉和竞争力收益，获得更多的合作机会。同时不断积累 BIM 培训及应用的经验，提高技术与管理水平，严格控制培训及使用过程中的支出，降低使用成本。并充分发挥 BIM 技术优势来节约材料、缩短工期、提高质量，通过价值工程及业主奖励间接提升项目经济效益。此外 BIM 的应用与推广依赖网络效益，承包商可加强与设计院或其他承包商等利益相关方之间的 BIM 培训与应用的合作，以此降低培训与使用成本，实现行业层面的推广应用效益。当前环境下，建筑行业竞争愈发激烈，为防止被市场淘汰，积极应用 BIM 等先进信息技术势在必行。要充分认识到使用 BIM 带来的直接经济收益与来自业主的激励奖励、财政补贴、招标倾斜等带来的收益，并据此作出明智的决策。

参考文献

- [1] 黄莹, 李雷, 蒋明轩, 余波.基于 Revit 的铁路构件三维建模方法研究与应用[J].铁道科学与工程学报, 2021, 18(07):1732-1739.
- [2] 闵世平, 林国庆.BIM 及空间大数据技术支持下的铁路隧道施工数据管理[J].测绘通报, 2021(08):144-149+153.
- [3] 马弯.基于 BIM 的铁路轨道三维数字化设计系统研究[J].铁道工程学报, 2021, 38(04):90-96.
- [4] 迟敬来.BIM 技术在铁路工程造价管理中的应用[J].建筑经济, 2021, 42(04):117-120.
- [5] 胡文丽.BIM 技术在高速铁路工程声屏障设计中的应用研究[J].铁道标准设计, 2021, 65(08):166-170.
- [6] 马少雄, 李昌宁, 徐宏, 徐飞, 赵钦.基于 BIM 的铁路隧道工程施工协同管理平台研究[J].铁道标准设计, 2021, 65(08):113-117.
- [7] 纪博雅, 戚振强, 金占勇.中国建筑业 BIM 应用经济政策设计[J].施工技术, 2014, 43(24):58-62.
- [8] 贾崇, 王志宏, 赵雷.PPP 项目 BIM 技术协同应用演化博弈分析与仿真[J].辽宁工程技术大学学报(社会科学版), 2020, 22(04):270-277.
- [9] 蒋学海, 裴锋, 牛文娟.基于寻租理论的工程项目主体三方演化博弈分析[J].工程管理学报, 2017, 31(03):108-113.
- [10] Friedman D. Evolutionary Game in Economics[J]. Econometrica, 1991(3):637-666.
- [11] 赖一飞, 胡小勇, 陈文磊, 项目管理概论, 北京: 清华大学出版社(第二版), 2017.05.