

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.010

基于奖惩的政府付费 PPP 项目支付机制研究

吕俊娜, 陈博雅

(重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

摘要: 为解决政府付费 PPP 项目因公私双方信息不对称引发的偷懒问题和政府激励不足引发的整体次优问题, 本文基于演化博弈理论, 研究了不同奖惩制度对政府和私营部门的稳定策略的影响, 并确定了最优奖惩系数的阈值。结果表明: 在私营部门具有信息优势和政府激励不足的情形下, 缺乏奖惩制度的支付机制会导致偷懒问题和整体次优问题, 而引入奖惩制度、确定合适奖惩系数的支付机制可有效解决偷懒问题和整体次优问题。

关键词: 政府付费 PPP 项目; 奖惩系数; 支付机制; 激励相容

中图分类号: F572

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)02-0223-08

Research on the payment mechanism for government-paid PPP projects based on reward and punishment

LÜ Junna, CHEN Boya

(School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To solve the laziness problem caused by the information asymmetry between the public and private sector and the overall suboptimal problem caused by the insufficient government incentive in the existing government-paid PPP projects. On account of EGT, the influence of different reward and punishment mechanisms on government and private sector system stability strategies is studied in this paper, with the optimal threshold of reward and punishment coefficients determined. The results show that: when the private sector has the information advantage and the government has an insufficient incentive, the payment mechanism without reward and punishment system can lead to the laziness problem and the overall suboptimal problem, while introducing the reward and punishment mechanism and determining the appropriate reward and punishment coefficients of payment mechanism can effectively solve the laziness problem and the overall suboptimal problem.

Key words: government-paid PPP projects; reward and punishment coefficients; payment mechanism; incentive compatibility

PPP 模式通过引入私营部门的先进技术和高效管理, 对提高项目开发和运营的效率大有裨益, 被广泛应用于交通运输领域^[1]。支付机制作为 PPP 合同的核心, 对项目是否成功至关重要^[2]。在使用量付费模式下, 由于私营部门具有信息优势, 当政府难以有效监管项目的建设质量和运营质量时, 私营部门可能会为了减少建设成本而偷工减料, 或为了

减少运营成本而降低项目的养护标准及养护频率, 从而造成偷懒问题^[3]。更为不利的是, 由于政府的支付金额仅与项目的实际使用量挂钩, 未与项目的建设质量水平和运营服务水平挂钩, 故私营部门缺少提高建设质量水平和运营服务水平的动力, 从而造成项目的整体次优问题^[4]。而偷懒问题和整体次优问题作为使用量付费模式的隐性弊端, 若得不到

收稿日期: 2021-09-09; 网络出版日期: 2022-01-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220127.1133.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71701028); 国家社会科学基金资助项目(16CJL054); 教育部人文社科基金资助项目(15YJCZH105)

通信作者: 吕俊娜, 女, 博士, 副教授, 研究方向为 PPP 项目投融资决策与管理。E-mail: wqljn@126.com

妥善解决,将会造成项目的寿命周期缩短、项目的建设质量和运营服务质量低下,社会的总体效率降低。因此,如何有效地解决偷懒问题和整体次优问题具有重要的理论和实践意义。

为解决 PPP 项目因公私双方信息不对称导致的偷懒问题,现有学者大多从强化绩效监管方面提出建议。部分学者认为政府监管是必要的,通过加强 PPP 项目的绩效监管能避免公共利益受损^[5-7]。Liu 等^[8]运用演化博弈理论分析了政府监管对私营部门策略选择的影响,发现政府和私营部门不存在单一的演化稳定策略,私营部门会出现周期性的偷懒问题。高若兰等^[9]运用演化博弈理论分析了政府不同监管方式对私营部门策略选择的影响,指出降低监管成本、增大惩罚力度有助于减轻私营部门的偷懒问题。周亦宁等^[10]运用前景理论和演化博弈理论分析了政府监管对私营部门策略选择的影响,认为提高项目的绩效标准、增大偷懒的惩罚系数和提高政府的监管概率可抑制私营部门的偷懒问题。

同时,为解决 PPP 项目因政府激励不足导致的整体次优问题,现有学者大多从优化绩效激励方面提出建议。部分学者认为合适的激励机制能诱使私营部门提高努力水平,从而提高公共利益^[11-13]。赵卓等^[14]基于委托代理理论构建了公私双方合作的激励模型,指出设计合适的补贴政策和绩效考核机制能提高私营部门的努力水平。肖万等^[15]构建了两阶段委托代理模型和绩效激励模型,分析了政府补贴和收益分配对私营部门最优努力水平的影响,认为可通过绩效激励来提升私营部门的努力程度。Shang 等^[2]构建了斯塔伯格博弈模型,研究了政府不同支付方式对整体绩效的影响,提出合适的绩效支付比例有助于实现整体最优。

综上所述,国内外学者对 PPP 项目中的偷懒问题和整体次优问题均已进行了较为充分和深入的研究,但仍有提升的空间。首先,现有研究大多将 PPP 项目中的偷懒问题和整体次优问题分开研究,并未考虑到偷懒问题和整体次优问题在 PPP 项目中常常伴随出现,具有一定的共生性;其次,现有研究认为,绩效惩罚和绩效激励有助于解决 PPP 项目中的偷懒问题和整体次优问题,但并未对奖惩系数的阈值进行定量分析。

鉴于此,本文基于演化博弈模型,定量地分析不同的奖惩制度如何影响政府付费 PPP 项目中政府和私营部门的演化稳定策略,以期解决使用量付费模式存在的偷懒问题和整体次优问题,为政府完善支付机制设计提供理论支持。

1 基准模型

1.1 模型假设及得益矩阵

某市计划投资建设某交通 PPP 项目,拟采用政府付费模式,PPP 合同中关于支付机制的约定:政府每季度按影子通行费率和实际通行量来支付影子通行费。假设政府和私营部门均为有限理性,双方可通过持续地学习、模仿来优化各自的策略抉择。在合同履行过程中,由于政府和私营部门的目标不同,且私营部门具有信息优势,私营部门出于自身利益最大化的考虑,可能会选择偷懒、正常运营和努力运营这三种策略。假定私营部门的三种策略不影响道路的交通量,仅影响道路的服务水平。与此对应,政府出于公共利益最大化的考虑,可能会选择正常监管和严格监管这两种策略。因此,总共有六种可能发生的情形。

1) 当私营部门正常运营、政府正常监管时,双方均获取正常收益,其中政府的收益为 R_1 ,私营部门的收益为 R_2 ,双方整体收益为 $R_1 + R_2$ 。

2) 当私营部门正常运营、政府严格监管时,政府严格监管会增加额外的费用 F_1 。此时政府的收益为 $R_1 - F_1$,私营部门的收益为 R_2 ,双方整体收益为 $R_1 + R_2 - F_1$ 。

3) 当私营部门偷懒、政府正常监管时,偷懒体现为私营部门减少道路维护次数或降低道路维护标准,导致运营服务水平及公众满意度降低。私营部门偷懒能节约成本 G ,同时会造成政府损失 L ,一般来说, $G < L$ 。在政府正常监管下,私营部门偷懒被发现的概率为 a ($0 < a < 1$),被发现后会被处以罚款 F_2 。为威慑私营部门选择偷懒策略,令 $G < F_2$ 。此时政府的收益为 $R_1 - L + aF_2$,私营部门的收益为 $R_2 + G - aF_2$,双方整体收益为 $R_1 + R_2 + G - L$ 。

4) 当私营部门偷懒、政府严格监管时,在政府严格监管下,偷懒被发现的概率提升为 b ($0 < a < b < 1$)。此时政府的收益为 $R_1 - L - F_1 + bF_2$,私营部门的收益为 $R_2 + G - bF_2$,双方整体收益为 $R_1 + R_2 + G - L - F_1$ 。

5) 当私营部门努力运营、政府正常监管时,努力运营体现为私营部门优化通行设计以提高道路的通行能力,或在保障相同通行能力的前提下提高运营服务水平,使得运营服务水平及公众满意度提升。私营部门努力运营会增加额外的费用 F_3 ,同时给政府带来额外收益 R_3 。此时政府的收益为 $R_1 + R_3$,私营部门的收益为 $R_2 - F_3$,双方整体收益为 $R_1 + R_2 + R_3 - F_3$ 。

6) 当私营部门努力运营、政府严格监管时,政府严格监管会增加额外的费用 F_1 。此时政府的收益为 $R_1 + R_3 - F_1$, 私营部门的收益为 $R_2 - F_3$, 双方整体收益为 $R_1 + R_2 + R_3 - F_3 - F_1$ 。

分析以上六种情形可知:当 $R_3 - F_3 > 0$, 即私营部门努力运营增加的政府收益大于私营部门努力运营增加的额外费用时,整体最优策略为私营部门努力运营、政府正常监管。当 $R_3 - F_3 < 0$, 即私营部门努力运营增加的政府收益小于私营部门努力运营增加的额外费用时,整体最优策略为私营部门正常运营、政府正常监管。

基于上述分析,基准模型中私营部门和政府的策略及得益情况见表 1。

表 1 基准模型的得益矩阵

Tab. 1 Payoff matrix of the benchmark model

私营部门	政府	
	正常监管	严格监管
偷懒	$R_2 + G - aF_2$, $R_1 - L + aF_2$	$R_2 + G - bF_2$, $R_1 - L - F_1 + bF_2$
正常运营	R_2, R_1	$R_2, R_1 - F_1$
努力运营	$R_2 - F_3$, $R_1 + R_3$	$R_2 - F_3$, $R_1 + R_3 - F_1$

假定私营部门偷懒、努力运营的比率分别为 x_1 和 x_2 , 其中 $0 < x_1 < 1, 0 < x_2 < 1$, 则正常运营的比率为 $1 - x_1 - x_2$; 政府正常、严格监管的比率分别为 y_1 和 $1 - y_1$, 其中 $0 < y_1 < 1$ 。由表 1 可知,对私营部门而言,努力运营相较正常运营是严格劣策略,经过长期演化, $x_2 \rightarrow 0$ 。

表 2 基准模型均衡点的稳定性

Tab. 2 Stability of equilibrium point of the benchmark model

均衡点 (x_1, y_1)	$G - F_2b > 0$						$G - F_2b < 0$					
	$F_1 - (b-a)F_2 > 0$			$F_1 - (b-a)F_2 < 0$			$G - F_2a > 0$			$G - F_2a < 0$		
	trJ	detJ	LS	trJ	detJ	LS	trJ	detJ	LS	trJ	detJ	LS
(0,0)	+	+	不稳定点	+	+	不稳定点	±	-	鞍点	±	-	鞍点
(0,1)	±	-	鞍点	±	-	鞍点	±	-	鞍点	-	+	ESS
(1,0)	±	-	鞍点	-	+	ESS	+	+	不稳定点	±	+	不稳定点
(1,1)	-	+	ESS	±	-	鞍点	-	+	ESS	±	-	鞍点
(x_1^*, y_1^*)	不存在			不存在			不存在	0	+	中心点	不存在	不存在

注:LS 为局部稳定性,下同。

1.3 演化稳定策略分析

由于私营部门和政府在博弈过程中逐步了解对方的信息,因而双方的策略选择将不断调整,直至最

1.2 复制动态系统

私营部门偷懒、正常运营的适应度 u_{11} 、 u_{12} 和私营部门的平均适应度 $\bar{u}_1$ 分别为:

$$\begin{cases} u_{11} = R_2 + G - y_1 a F_2 - (1 - y_1) b F_2 \\ u_{12} = R_2 \\ \bar{u}_1 = x_1 u_{11} + (1 - x_1) u_{12} \end{cases} \quad (1)$$

政府正常、严格监管的适应度 u_{21} 、 u_{22} 和政府的平均适应度 $\bar{u}_2$ 分别为:

$$\begin{cases} u_{21} = R_1 - x_1 L + x_1 a F_2 \\ u_{22} = R_1 - F_1 - x_1 L + x_1 b F_2 \\ \bar{u}_2 = y_1 u_{21} + (1 - y_1) u_{22} \end{cases} \quad (2)$$

由于私营部门和政府在博弈过程中会随着对方策略的改变而随时调整自身策略,故两者构成的系统的动态微分方程组为:

$$\begin{cases} dx_1/dt = x_1(u_{11} - \bar{u}_1) = x_1(1 - x_1) \cdot [G - F_2b + y_1 F_2(b - a)] \\ dy_1/dt = y_1(u_{21} - \bar{u}_2) = y_1(1 - y_1) \cdot [F_1 - x_1 F_2(b - a)] \end{cases} \quad (3)$$

由 $dx_1/dt = 0$, 得 $x_1 = 0$, $x_1 = 1$ 或 $y_1^* = (bF_2 - G)/((b - a)F_2)$; 由 $dy_1/dt = 0$, 得 $y_1 = 0$, $y_1 = 1$ 或 $x_1^* = F_1/((b - a)F_2)$ 。由 $dx_1/dt = 0$, $dy_1/dt = 0$, 得到五个均衡点: (0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)、(x_1^*, y_1^*)。Friedman^[16]认为,系统的演化稳定策略(ESS)需同时满足 Jacobi 矩阵的迹 $\text{tr}J < 0$ 和行列式 $\det J > 0$ 。通过判定,最终得到五个 ESS,基准模型不同情形下均衡点的稳定性见表 2。

后达到稳定状态。通过对系统的稳定性判别,得知以下五种情形存在 ESS。

情形 1: 当 $G - F_2b > 0$, $F_1 - (b - a)F_2 > 0$ 时,

在政府严格监管下,私营部门偷懒的收益大于损失;政府严格监管增加的费用大于增加的收益。故私营部门偷懒、政府正常监管是 ESS,见图 1(a)。

情形 2:当 $G - F_2b > 0$, $F_1 - (b - a)F_2 < 0$ 时,在政府严格监管下,私营部门偷懒的收益大于损失;政府严格监管增加的费用小于增加的收益。故私营部门偷懒、政府严格监管是 ESS,见图 1(b)。

情形 3:当 $G - F_2b < 0$, $G - F_2a > 0$, $F_1 - (b - a)F_2 > 0$ 时,在政府严格监管下,私营部门偷懒的收益小于损失;在政府正常监管下,私营部门偷懒的收益大于损失;政府严格监管增加的费用大于增加的收益。故私营部门偷懒、政府正常监管是 ESS,见图 1(c)。

情形 4:当 $G - F_2b < 0$, $G - F_2a > 0$, $F_1 - (b - a)F_2 < 0$ 时,在政府严格监管下,私营部门偷懒的收益小于损失;在政府正常监管下,私营部门偷懒的收益大于损失;政府严格监管增加的费用小于增加的收益。故系统没有 ESS,见图 1(d)。

情形 5:当 $G - F_2a < 0$ 时,在政府正常监管下,私营部门偷懒的收益小于损失,且政府严格监管有额外的费用。故私营部门正常运营、政府正常监管是 ESS,见图 1(e)和(f)。

通过分析以上五种不同情形,命题如下。

命题 1:当偷懒策略为私营部门的演化稳定策略时,政府提高监管的成功率和增加私营部门偷懒的罚款能在一定程度上抑制私营部门选择偷懒策

略。但当私营部门偷懒节约的成本很大时,政府提高监管的成功率和增加私营部门偷懒的罚款无法根治私营部门的偷懒问题。

证明:在情形 1、情形 2、情形 3 下,假定其他参数不变,仅提高了监管的成功率 a 、 b ,私营部门偷懒的门槛 $G > F_2a$ 、 $G > F_2b$ 会提高,说明提高监管的成功率能在一定程度上抑制私营部门选择偷懒策略。假定其他参数不变,仅增大了偷懒的罚款 F_2 ,私营部门偷懒的门槛 $G > F_2a$ 、 $G > F_2b$ 也会提高,说明政府增加私营部门的罚款能在一定程度上抑制私营部门选择偷懒策略。但当私营部门偷懒节约的成本 G 很大时,即使提高监管的成功率和增加私营部门偷懒的罚款,仍存在 $G > F_2a$ 、 $G > F_2b$,此时私营部门还是会选择偷懒策略,见图 1(a)、(b)、(c),即无法根治偷懒问题。

命题 2:政府选择严格监管策略和私营部门选择偷懒策略均会产生整体次优问题。

证明:对双方整体而言,当 $R_3 - F_3 > 0$,整体最优策略为私营部门努力运营、政府正常监管。当 $R_3 - F_3 < 0$,整体最优策略为私营部门正常运营、政府正常监管。由于整体最优策略的集合并不涉及政府严格监管和私营部门偷懒,且政府严格监管有额外的费用 F_1 ,私营部门偷懒节约的成本 G 小于政府的损失 L ,故政府选择严格监管策略和私营部门选择偷懒策略均会产生整体次优问题。

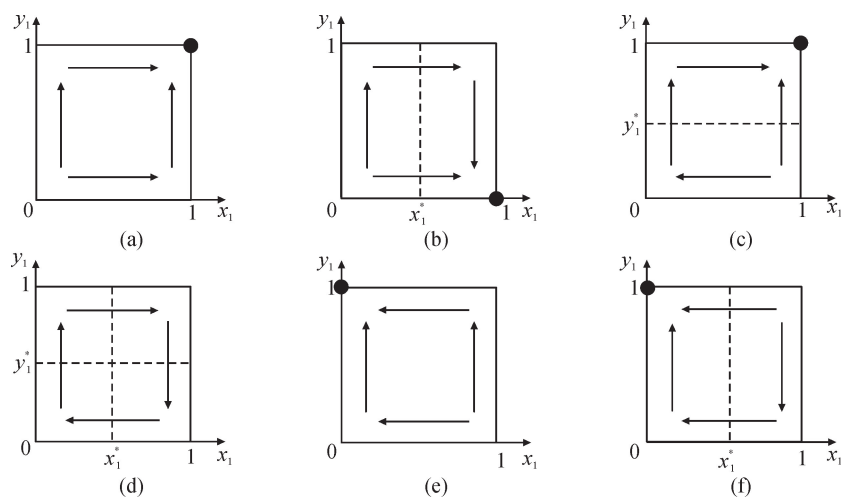


图 1 基准模型的相位图

Fig. 1 Phase diagram of the benchmark model

2 改进模型

2.1 模型假设及得益矩阵

为解决交通 PPP 项目使用量付费模式存在的偷懒问题和整体次优问题,改进模型在绩效评价的

基础上引入奖惩制度以实现激励相容。具体如下:首先,确定项目的核心运营绩效指标(包括养护核心绩效指标、使用量指标、安全绩效指标、拥堵核心绩效指标、公众满意度指标等^[17]);其次,根据类似项目运营情况及本项目试运营情况,确定正常运营的

绩效范围 $z \in [z_1, z_2]$; 最后, 基于绩效评价的结果(百分制)和“奖优惩劣”的激励原则, 以项目的实际运营绩效(z)来决定私营部门的收益。

私营部门偷懒使得其实际运营绩效低于正常运营绩效($z < z_1$), 此时政府给予私营部门罚金 $A = k_1(z_1 - z)$, 其中惩罚系数 $k_1 > 0$ 。私营部门努力运营使得其实际运营绩效高于正常运营绩效($z > z_2$), 此时政府给予私营部门奖金 $B = k_2(z - z_2)$, 其中奖励系数 $k_2 > 0$ 。私营部门正常运营使得其实际运营绩效符合正常运营绩效($z_1 \leq z \leq z_2$), 此时政府不罚不奖。

惩罚机制会影响私营部门偷懒、政府正常监管和私营部门偷懒、政府严格监管这两种情形。在政府正常监管下, 私营部门偷懒在运营过程中未被发现的概率为 $1 - a$, 由于惩罚机制的存在, 私营部门偷懒会被处以罚金 A 。此时政府获得收益 $R_1 - L +$

$aF_2 + (1 - a)A$, 私营部门获得收益 $R_2 + G - aF_2 - (1 - a)A$ 。在政府严格监管下, 私营部门偷懒在运营过程中未被发现的概率为 $1 - b$, 由于惩罚机制的存在, 私营部门偷懒会被处以罚金 A 。此时政府获得收益 $R_1 - L - F_1 + bF_2 + (1 - b)A$, 私营部门获得收益 $R_2 + G - bF_2 - (1 - b)A$ 。

奖励机制会影响私营部门努力运营、政府正常监管和私营部门努力运营、政府严格监管这两种情形。在政府正常监管下, 由于奖励机制的存在, 私营部门努力运营会获得奖金 B 。此时政府获得收益 $R_1 + R_3 - B$, 私营部门获得收益 $R_2 - F_3 + B$ 。在政府严格监管下, 由于奖励机制的存在, 私营部门努力运营会获得奖金 B 。此时政府获得收益 $R_1 + R_3 - F_1 - B$, 私营部门获得收益 $R_2 - F_3 + B$ 。

基于上述分析, 改进模型中私营部门和政府的策略及得益情况见表 3。

表 3 改进模型的得益矩阵

Tab. 3 Payoff matrix of the improved model

私营部门	政府	
	正常监管	严格监管
偷懒	$R_2 + G - aF_2 - (1 - a)A, R_1 - L + aF_2 + (1 - a)A$	$R_2 + G - bF_2 - (1 - b)A, R_1 - L - F_1 + bF_2 + (1 - b)A$
正常运营	R_2, R_1	$R_2, R_1 - F_1$
努力运营	$R_2 - F_3 + B, R_1 + R_3 - B$	$R_2 - F_3 + B, R_1 + R_3 - F_1 - B$

假定私营部门偷懒、努力运营的比率分别为 x_3 和 x_4 , 其中 $0 < x_3 < 1, 0 < x_4 < 1$, 则正常运营的比率为 $1 - x_3 - x_4$; 政府正常、严格监管的比率分别为 y_2 和 $1 - y_2$, 其中 $0 < y_2 < 1$ 。已知 $G < F_2$, 为威慑私营部门选择偷懒策略, 令 $G < A$, 即惩罚系数 $k_1 > G/(z_1 - z)$ 。即使私营部门偷懒在运营过程中未被发现, 在引入惩罚机制后, 私营部门偷懒的收益依然小于损失, 故私营部门没有选择偷懒策略的动机。由表 3 可知, 对私营部门而言, 偷懒相较正常运营是严格劣策略, 经过长期演化, $x_3 \rightarrow 0$ 。

2.2 复制动态系统

私营部门正常、努力运营的适应度 u_{31} 、 u_{32} 和私营部门的平均适应度 $\bar{u}_3$ 分别为:

$$\begin{cases} u_{31} = R_2 \\ u_{32} = R_2 - F_3 + B \\ \bar{u}_3 = (1 - x_4)u_{31} + x_4 u_{32} \end{cases} \quad (4)$$

政府正常、严格监管的适应度 u_{41} 、 u_{42} 和政府的平均适应度 $\bar{u}_4$ 分别为:

$$\begin{cases} u_{41} = R_1 + (R_3 - B)x_4 \\ u_{42} = R_1 - F_1 + (R_3 - B)x_4 \\ \bar{u}_4 = y_2 u_{41} + (1 - y_2)u_{42} \end{cases} \quad (5)$$

两者构成的系统的动态微分方程组为:

$$\begin{cases} dx_4/dt = x_4(1 - x_4)(B - F_3) \\ dy_2/dt = y_2(1 - y_2)F_1 \end{cases} \quad (6)$$

由 $dx_4/dt = 0$, 得 $x_4 = 0, x_4 = 1$; 由 $dy_2/dt = 0$, 得 $y_2 = 0, y_2 = 1$ 。由 $dx_4/dt = 0, dy_2/dt = 0$, 得到四个均衡点: $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 。根据 Jacobi 矩阵的迹 $\text{tr}J < 0$ 和行列式 $\det J > 0$ 来判定, 最终得到两个 ESS, 改进模型不同情形下均衡点的稳定性见表 4。

表 4 改进模型均衡点的稳定性

Tab. 4 Stability of equilibrium point of the improved model

均衡点 (x_4, y_2)	$B - F_3 > 0$			$B - F_3 < 0$		
	$\text{tr}J$	$\det J$	LS	$\text{tr}J$	$\det J$	LS
$(0, 0)$	+	+	不稳定点	±	-	鞍点
$(0, 1)$	±	-	鞍点	-	+	ESS
$(1, 0)$	±	-	鞍点	+	+	不稳定点
$(1, 1)$	-	+	ESS	±	-	鞍点

2.3 演化稳定策略分析

由于私营部门和政府在博弈过程中逐步了解对方的信息, 因而双方的策略选择将不断调整, 直至最

后达到稳定状态。通过对系统的稳定性判别,得知以下两种情形存在 ESS。

情形 1: 当 $B - F_3 > 0$, 即奖励系数 $k_2 > F_3 / (z - z_2)$ 时, 此时政府支付的奖金足以补偿私营部门努力运营增加的额外费用。故私营部门努力运营、政府正常监管是 ESS, 见图 2(a)。

情形 2: 当 $B - F_3 < 0$, 即奖励系数 $k_2 < F_3 / (z - z_2)$ 时, 此时政府支付的奖金不足以补偿私营部门努力运营增加的额外费用。故私营部门正常运营、政府正常监管是 ESS, 见图 2(b)。

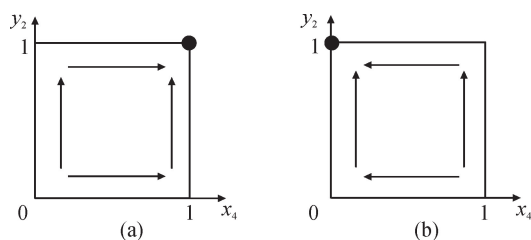


图 2 改进模型的相位图

Fig. 2 Phase diagram of the improved model

通过分析以上两种不同情形,命题如下。

命题 3: 当政府设置惩罚系数 $k_1 > G / (z_1 - z)$ 时,能解决双方因信息不对称导致的私营部门偷懒问题。

证明: 在引入惩罚机制后,政府设置惩罚系数 $k_1 > G / (z_1 - z)$, 使得私营部门选择偷懒策略的收益小于选择正常运营策略的收益,则私营部门没有选择偷懒策略的动机。因此,设置合理的惩罚系数能解决私营部门的偷懒问题。

命题 4: 当 $R_3 - F_3 > 0$ 时,政府设置奖励系数 $k_2 > F_3 / (z - z_2)$; 当 $R_3 - F_3 < 0$ 时,政府设置奖励系数 $k_2 < F_3 / (z - z_2)$, 能解决政府激励不足导致的整体次优问题。

证明: 在引入奖励机制后,当 $R_3 - F_3 > 0$ 时,政府设置奖励系数 $k_2 > F_3 / (z - z_2)$, 此时博弈将收敛于整体最优策略: 私营部门努力运营、政府正常监管, 见图 2(a); 当 $R_3 - F_3 < 0$ 时,设置奖励系数 $k_2 < F_3 / (z - z_2)$, 此时博弈将收敛于整体最优策略: 私营部门正常运营、政府正常监管, 见图 2(b)。因此,设置合理的奖励系数能解决整体次优问题。

3 数值仿真

为了验证上述四个命题,直观地反映政府和私营部门的动态演化过程,本文以重庆市某交通 PPP 项目为例,探讨不同奖惩制度的支付机制如何影响政府和私营部门的策略选择,并利用 MATLAB 进行数值仿真。

3.1 项目概况

项目 A 是国家级示范 PPP 项目,全长 5.51 km,为城市主干路,主桥为 6 车道,两端接线为 4 车道。该项目总投资 32.78 亿元,项目建设期 3 年,运营期 20 年。项目合同约定: 当季应付影子通行费 = 日均通行车辆数 $\times$ 影子通行费率 $\times$ 当季实际通行天数,政府在每个季度末付费。经测算的日均通行车辆数约为 10.5 万辆/天,经测算的社会效益约为 0.93 元/辆。上述影子通行费率为通过招标确定的中标费率 8.36 元/辆。假定私营部门努力运营能增加社会效益 0.2 元/辆,私营部门偷懒运营会减少社会效益 0.2 元/辆。由此,得到仿真数据如下:

$R_1 = 890$ 万元/季度, $R_2 = 8\,000$ 万元/季度, $R_3 = 190$ 万元/季度, $F_1 = 20$ 万元/季度, $F_2 = 100$ 万元/季度, $F_3 = 90$ 万元/季度, $G = 90$ 万元/季度, $L = 190$ 万元/季度, $a = 0.3$, $b = 0.6$ 。假定私营部门选择偷懒策略的初始比率 $x_0 = 0.5$, 政府选择正常监管策略的初始比率 $y_0 = 0.5$ 。

3.2 参数变化的敏感性分析

在基准模型中,假定其他参数保持不变,研究 b 的变化对政府和私营部门的影响。从图 3(a)中可知,提高政府严格监管的成功率 b ,使得 y_1 更快地收敛于 0,即提高政府严格监管的成功率能促进政府选择严格监管策略。从图 3(b)中可知,提高政府严格监管的成功率 b ,使得 x_1 更慢地收敛于 1,即提高政府严格监管的成功率能抑制私营部门选择偷懒策略。

在基准模型中,假定其他参数保持不变,研究 F_2 的变化对政府和私营部门的影响。从图 4(a)中可知,增加私营部门偷懒的罚款 F_2 ,使得 y_1 更快地收敛于 0,即增加私营部门偷懒的罚款能促进政府选择严格监管策略。从图 4(b)中可知,增加私营部门偷懒的罚款 F_2 ,使得 x_1 更慢地收敛于 1,即增加私营部门偷懒的罚款能抑制私营部门选择偷懒策略。

通过上述仿真模拟,发现提高政府监管成功率和增加私营部门偷懒的罚款能在一定程度上抑制私营部门选择偷懒策略,但并不能改变私营部门的策略选择,即无法根治偷懒问题,命题 1 得证。

3.3 基准模型、改进模型中政府和私营部门的演化路径

将初始参数和不同的初始比率代入基准模型的复制动态方程中,可得政府和私营部门的演化路径,见图 5(a)。不论政府和私营部门的初始比率为多少,最终都会演化稳定为 $x_1 \rightarrow 1$, $y_1 \rightarrow 0$,即私营部

门和政府的稳定策略分别为偷懒和严格监管。此时,缺乏奖惩的支付机制存在偷懒问题和整体次优问题,命题 2 得证。

在引入奖惩制度后,设置惩罚系数 $k_1 = 18$, 奖励系数 $k_2 = 18$, 绩效差 $\Delta z = 10$ 。将以上参数和不同的初始比率代入改进模型的复制动态方程中,可得政府和私营部门的演化路径,见图 5(b)。不论政

府和私营部门的初始比率为多少,最终都会演化稳定为 $x_1 \rightarrow 1, y_2 \rightarrow 1$, 即私营部门选择努力运营策略,政府选择正常监管策略。此时,引入惩罚机制并确定合适的惩罚系数可避免偷懒问题,引入奖励机制并确定合适的奖励系数可实现整体最优,命题 3、命题 4 得证。

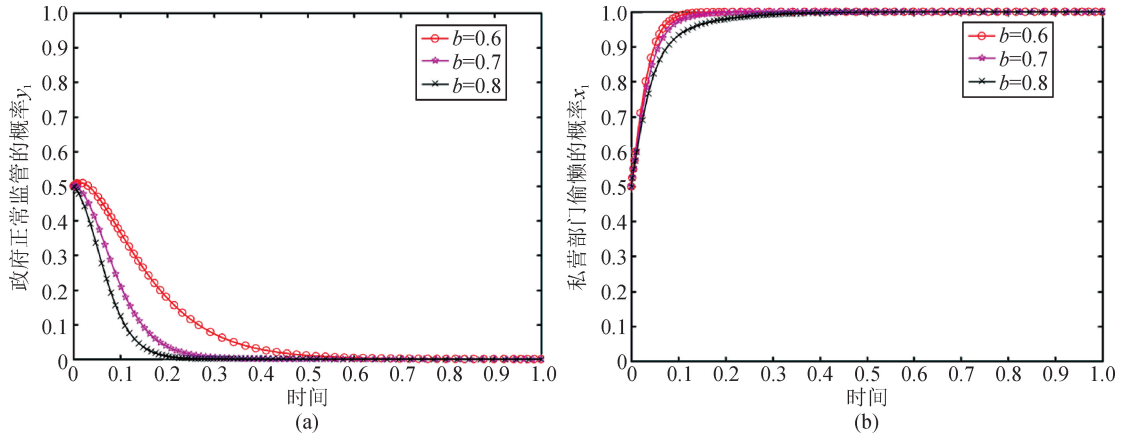


图 3 监管成功率 b 的变化

Fig. 3 Changes of regulatory success rate b

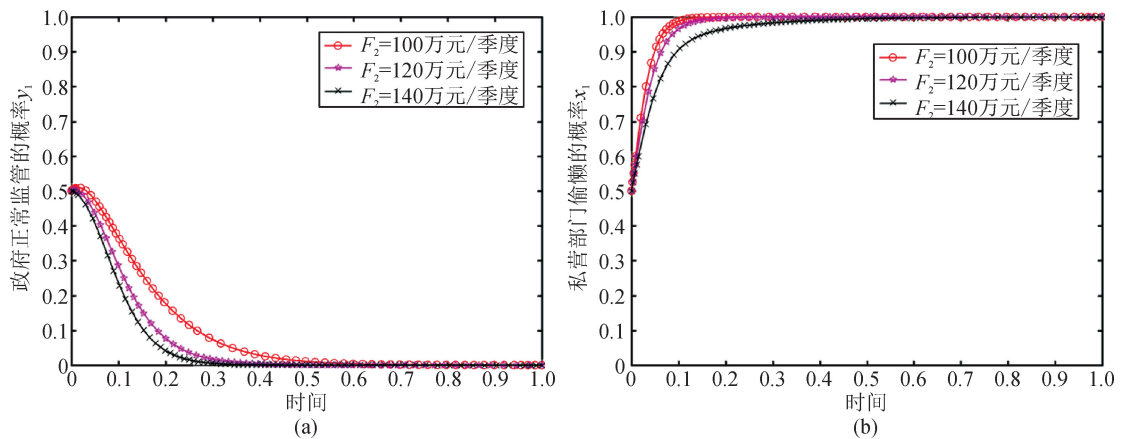


图 4 罚款 F_2 的变化

Fig. 4 Changes of fine F_2

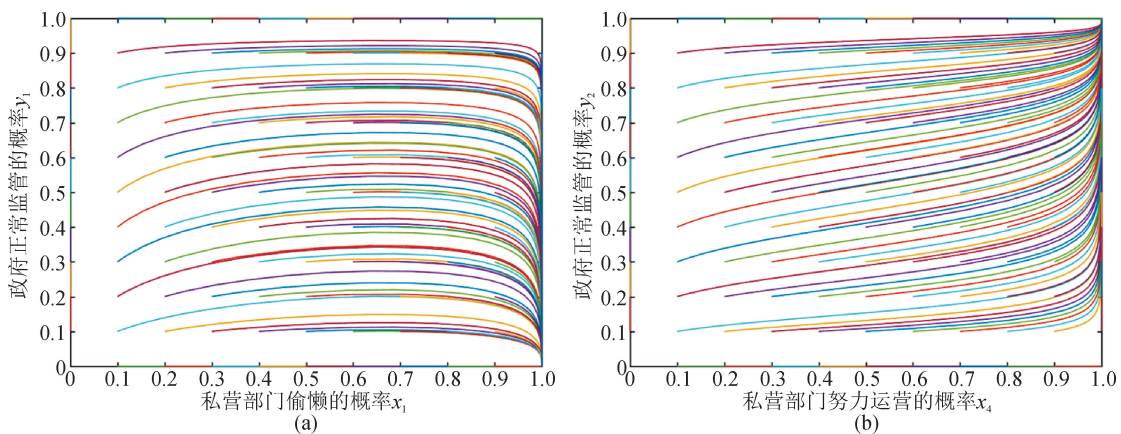


图 5 基准模型、改进模型的演化路径

Fig. 5 Evolution path of the benchmark model and the improved model

4 结论及建议

本文以政府付费 PPP 项目为研究对象,在政府和私营部门有限理性的情形下,基于演化博弈理论和激励相容理论,研究了不同奖惩制度的支付机制对政府和私营部门策略选择的影响。研究发现:在私营部门具有信息优势和政府激励不足的情形下,缺乏奖惩制度的支付机制会导致偷懒问题和整体次优问题,而引入奖惩制度,确定合适奖惩系数的支付机制可有效解决偷懒问题和整体次优问题。基于模型推演及仿真验证,提出如下建议。

1) 政府方面:对于政府付费 PPP 项目,政府应明确项目的产出绩效,建立以运营为核心的绩效评价体系,加强绩效监管和绩效考核,建立信息公开平台并定期公布项目运营信息以减少信息不对称。根据绩效考核的结果,基于“奖优惩劣”的激励原则实施调整,低于绩效标准的,通过惩罚系数调减支付;高于绩效标准的,通过奖励系数调增支付;政府可通过设置合适的奖惩系数来规范私营部门的行为,从而有效规避偷懒问题,达到整体最优的目的。

2) 私营部门方面:对于政府付费 PPP 项目,私营部门应主动参与绩效评价体系的建立,积极配合政府的绩效监管和绩效考核,定期公开项目运营数据并保证数据的真实性和准确性。根据绩效考核的结果,基于 PDCA 循环实施调整,低于绩效标准的,需及时整改;高于绩效标准的,可继续加强;私营部门应减少偷懒行为以避免绩效惩罚损失,努力提升项目运营服务水平以获得绩效激励收益,全面提升项目运营绩效,从而实现项目整体最优。

参考文献:

- [1] LÜ Junna, LIN Mingqing, ZHOU Wen, et al. How PPP renegotiation behaviors evolve with traffic changes: evolutionary game approach[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(5): 04021032.
- [2] SHANG L M, AZIZ A M A. Stackelberg game theory-based optimization model for design of payment mechanism in performance-based PPPs[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, 146(4): 04020029.
- [3] XIANG Pengcheng, ZHOU Jin, ZHOU Xiaoyu, et al. Construction project risk management based on the view of asymmetric information[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138

(11): 1303-1311.

- [4] LI Shuai, CAI Hubo. Government incentive impacts on private investment behaviors under demand uncertainty [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 101: 115-129.
- [5] MARQUES R C, BERG S V. Revisiting the strengths and limitations of regulatory contracts in infrastructure industries [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2010, 16(4): 334-342.
- [6] 王守清,刘婷. PPP 项目监管:国内外经验和政策建议[J]. 地方财政研究, 2014 (9): 7-12, 25.
- [7] 向鹏成,邓青,王一鸣. 基于激励相容视角的 PPP 项目监管研究[J]. 建筑经济, 2017, 38(7): 34-39.
XIANG Pengcheng, DENG Qing, WANG Yiming. Research on PPP project supervision based on the perspective of incentive compatibility [J]. Construction Economy, 2017, 38(7): 34-39.
- [8] LIU Jicai, GAO Ruolan, CHEAH C Y J, et al. Evolutionary game of investors' opportunistic behaviour during the operational period in PPP projects[J]. Construction Management and Economics, 2016, 35(3): 137-153.
- [9] 高若兰,鲍琴. 基于演化博弈的 PPP 项目运营期政府监管方式选择研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(4): 155-162.
GAO Ruolan, BAO Qin. Selection of government supervision mode during the operational period in PPP projects based on evolutionary game theory[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(4): 155-162.
- [10] 周亦宁,刘继才. 考虑上级政府参与的 PPP 项目监管策略研究[J/OL]. 中国管理科学. (2020-10-16) [2021-12-27]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0801>.
ZHOU Yining, LIU Jicai. Study on supervision strategy of PPP project considering the participation of higher-level government[J]. Chinese Journal of Management Science. (2020-10-16)[2021-12-27]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0801>.
- [11] 徐飞,宋波. 公私合作制(PPP)项目的政府动态激励与监督机制[J]. 中国管理科学, 2010, 18(3): 165-173.
XU Fei, SONG Bo. The dynamic incentive and monitor mechanism of government in public-private partnership projects[J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 18(3): 165-173.

(下转第 235 页)

- B, 2006, 23(12): 2597-2600.
- [12] WANG Q, JIANG L Y, QUINET P, et al. TR-LIF lifetime measurements and HFR + CPOL calculations of radiative parameters in vanadium atom (VI) [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2014, 211: 31-37.
- [13] DEN HARTOG E A, LAWLER J E, WOOD M P, et al. Radiative lifetimes of V I and V II [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2014, 215: 7-13.
- [14] NILSSON H, ANDERSSON J, ENGSTRÖM L, et al. Experimental transition probabilities for $4p - 4d$ spectral lines in V II [J]. Astronomy & Astrophysics, 2019, 622: A154.
- [15] AGGARWAL K. Energy levels and radiative rates for transitions in S-like Sc VI, V VIII, Cr IX, and Mn X [J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2020 131: 101284.
- [16] PÉREZ-CALLEJO G, JARROTT L C, LIEHAHL D A, et al. Measuring the oscillator strength of inter-combination lines of helium-like V ions in a laser-produced-plasma [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 256: 107326.
- [17] SUGAR J, CORLISS C. Atomic energy levels of the iron-period elements: potassium through nickel [R]. 1985.
- [18] FENG Yanyan, JIANG Liyun, WANG Qian, et al. Radiative lifetimes of highly excited even-parity levels in Gd I and Gd II [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 418(2): 998-1003.
- [19] LI Yongfan, GENG Yidan, LIU Meina, et al. Radiative parameters of high-lying levels in neutral rhodium [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 503(4): 5085-5090.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 230 页)

- [12] 易欣. PPP 轨道交通项目多任务委托代理监管激励机制 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 1-7.
YI Xin. Incentive mechanism of public-private partnership rail transit project from the perspective of multi-task principal-agent model [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(3): 1-7.
- [13] YAO Min, WANG Fang, CHEN Zhiyuan, et al. Optimal incentive contract with asymmetric cost information [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, 146(6): 04020054.
- [14] 赵卓, 李玖灵. 政府与社会资本合作中的激励机制研究——基于委托代理理论 [J]. 改革与战略, 2018, 34(11): 35-40.
ZHAO Zhuo, LI Jiuling. Research on incentive mechanism of PPP project in the cooperation between government and social capital—based on principal agent theory [J]. Reformation & Strategy, 2018, 34(11): 35-40.
- [15] 肖万, 孔潇. 政府补贴、绩效激励与 PPP 模式的收益分配 [J]. 工业技术经济, 2020, 39(12): 3-12.
XIAO Wan, KONG Xiao. Government subsidy, performance incentive and income distribution of PPP model [J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2020, 39(12): 3-12.
- [16] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics [J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637-666.
- [17] 肖光睿. 国外道路 PPP 项目失败案例剖析 [EB/OL]. (2016-03-25) [2021-12-27]. <https://www.cpppc.org/opt/pmo/nfs/images/www/201604/011846468du0.pdf>.
XIAO Guangrui. Study on failures of international road PPP projects [EB/OL]. (2016-03-25) [2021-12-27]. <https://www.cpppc.org/opt/pmo/nfs/images/www/201604/011846468du0.pdf>.

(责任编辑 周 蓓)