

文章编号:1673-9469(2021)02-0104-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.02.017

## 成本信息不对称下 PPP 项目激励机制研究

周威<sup>1</sup>,王飞<sup>1\*</sup>,晏凌峰<sup>2</sup>,黄晶<sup>3</sup>,吕如兰<sup>4</sup>

(1. 河北工程大学 管理工程与商学院,河北 邯郸 056038;2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京 100082;  
3. 中国航空规划设计研究总院有限公司,北京 100120;4. 南水北调中线干线工程建设管理局河北分局,河北 石家庄 050035)

**摘要:** 针对 PPP 项目中私营企业运营成本存在异质性的特点,研究了抑制私营企业谎报成本信息的激励机制设计问题。通过建立委托代理模型,设计以价格补偿为激励措施的最优激励合同,使得私营企业谎报成本信息获得的收益不高于实报成本信息获得的收益,从而激励私营企业显示其真实的成本信息,进一步分析企业类型分布对最优激励合同的影响。研究表明:该激励机制能够实现对私营企业成本信息的甄别,且私营企业的收费价格和政府部门的价格补偿与企业类型分布有关,促进企业之间的竞争有利于抑制私营企业攫取信息租金。

**关键词:** PPP 项目;成本信息不对称;价格补偿;激励机制

中图分类号:F283

文献标识码:A

## Research on the Incentive Mechanism of PPP Project under Cost Information Asymmetry

ZHOU Wei<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1\*</sup>, YAN Lingfeng<sup>2</sup>, HUANG Jing<sup>3</sup>, LV Rulan<sup>4</sup>

(1. School of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;  
2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute CO., LTD, Beijing 100082, China;  
3. China Aviation Planning and Design Institute(Group)CO., LTD, Beijing 100120, China;4. Hebei Branch of the Central Route Construction Management Bureau of South to North Water Transfer Project, Shijiazhuang 050035, China)

**Abstract:** Aiming at the heterogeneity of operation costs around private enterprises in PPP projects, this study designs the incentive mechanism to restrain private enterprises from misreporting cost information. This study establishes a principal-agent model. Through designing of the optimal contract that takes price compensation as the incentive measure, the gain of private enterprises by claiming false cost information is not greater than that of reporting his true cost information, which can encourage private enterprises to show their true cost information. Then, we further analyze the influence of enterprise type distribution on the optimal incentive contract. Results show that the incentive mechanism can screen the cost information of private enterprises. In addition, the charge price of private enterprises and the price compensation of government departments are related to the distribution of enterprise types. And the promotion of competition among enterprises will inhibit private enterprises from seizing information rent.

**Key words:** PPP project; asymmetric cost information; price compensation; incentive mechanism

PPP (Public-Private-Partnership) 是指政府部门通过与私营企业建立伙伴关系提供公共产品或服务的方式<sup>[1]</sup>,它的主要优点是可以吸引私营企业投资缓解政府部门的财政压力,增强公共产品和服务的供给能力和效率<sup>[2]</sup>。然而,在参与 PPP 项目实施的过程中,私营企业会比政府部门掌握更充分的信息(如项目质量、市场需求、运营

成本等信息),由此产生信息不对称问题。私营企业在进行 PPP 项目投标时,为了谋取自身利益可能会利用信息不对称从事一些机会主义行为,损害政府部门和消费者利益。因此在信息不对称条件下,如何设计一种抑制私营企业机会主义行为的激励机制成为目前亟需解决的问题。

国内外学者对 PPP 项目中信息不对称问题的

收稿日期:2020-12-23

基金项目:河北省科学技术厅项目(2020IM030200);河北省社会科学基金资助项目(SJ200140424);河北省社会发展研究课题(2019041202003)

作者简介:周威(1994-)男,河北辛集人,硕士研究生,主要研究方向为建筑工程经济与施工项目管理。

\* 通讯作者:王飞(1963-),女,辽宁黑山人,硕士,教授,主要研究方向为工程项目管理。

研究取得了一定成果。Liu<sup>[3]</sup>等研究了抑制投资者机会主义倾向的激励机制,认为存在一个最优的机会主义行为水平。Hajje<sup>[4]</sup>等描述了公私双方信息不对称下的最优 PPP 合同,认为最优信息租金不是努力的线性函数。Li<sup>[5]</sup>等构建了城市水环境治理工程 PPP 项目的两期动态激励模型。Xu<sup>[6]</sup>等研究了投资者在城市固体废物处置 PPP 项目中的激励机制,认为增加激励和治理强度会鼓励投资者付出更多努力。Xiong<sup>[7]</sup>等分析了信息不对称对 PPP 项目再谈判决策的影响,认为共享私人信息可以获得最佳结果。Xing<sup>[8]</sup>等建立了政府与投资者再谈判策略的演化博弈模型,认为 PPP 项目中的合作利益可以抑制机会主义行为。徐飞和宋波<sup>[9]</sup>分析了企业最优努力水平和政府监督奖惩因子在两阶段决策中的动态影响。毕然<sup>[10]</sup>建立了激励监督模型,认为企业的最优努力水平与政府的激励和监督水平呈正相关。何寿奎<sup>[11]</sup>研究了 PPP 项目中的公私合作伙伴选择和投资激励契约问题,设计了使合作双方显示努力和管理水平信息的最优契约。王先甲<sup>[12]</sup>等研究了 PPP 项目中双重信息不对称下的激励机制设计问题,认为该激励机制能够实现对社会资本的信息甄别和激励其付出最优努力的双重目的。目前关于 PPP 项目中私营企业运营成本信息不对称问题的研究较少,因此,本文以两类运营成本不同的私营企业为研究对象,从运营成本信息不对称的角度,探讨如何设计一个激励机制来实现对私营企业运营成本信息的甄别,以及分析两类企业的分布对该激励机制的影响。

## 1 问题描述

### 1.1 模型符号

本文模型中主要引入的符号如表 1 所示。

### 1.2 问题假设

本文考虑由政府部门和私营企业构成的委托代理关系,其中政府部门为委托人,私营企业为代理人。根据招标投标程序,政府部门(G)与私营企业(P)签订合同的流程如图 1 所示:(1)首先由政府

表 1 符号说明

Tab. 1 Notations Illustration

符号	含义	符号	含义
$I$	投资规模	$r$	贴现系数
$a$	市场规模	$\pi$	私营企业利润
$b$	价格敏感系数	CS	消费者剩余
$p$	收费价格	$W$	社会福利
$c$	边际运营成本	$\omega$	企业保留效用
$s$	单位需求补贴价格	H	高运营成本企业
$d$	需求函数	L	低运营成本企业
$\varepsilon$	随机变量	$q$	L 型企业占比
$T$	特许期	$\varphi$	信息租金
$\lambda$	税收成本系数	*	最优解情形

部门确定 PPP 项目的服务能力;(2) 私营企业根据项目服务能力确定项目投资规模  $I$ ;(3) 政府部门据此确定特许期  $T$ ;(4) 私营企业提供自己的边际运营成本信息  $c$ ;(5) 政府部门据此提供项目运营激励合同,约定收费价格  $p$  和价格补偿  $s$ ;(6) 私营企业选择接受或拒绝,若私营企业接受该合同,由私营企业投资建设并运营;(7) 政府部门按照合同约定向私营企业提供相应补偿。在这个过程中,为抑制私营企业谎报运营成本来寻租,政府部门需要设计一揽子合同菜单以实现对其运营成本信息的甄别,并激励私营企业显示其真实的运营成本信息。

结合 PPP 项目运营阶段的现实情况,对模型提出以下假设:

假设 1:政府部门和私营企业均为完全理性人,且双方均为风险中性的。

假设 2:投资规模  $I$  和特许期  $T$  是预先确定的。

假设 3:项目单位时间内的需求函数为价格的线性函数  $d = a - bp$ ,令  $a \equiv a + \varepsilon$ ,其中  $\varepsilon$  是描述需求不确定性的随机变量,并且  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ <sup>[13]</sup>。

假设 4:考虑通货膨胀对未来运营收益的影响,假设私营企业未来收益的贴现系数服从  $e^{-rt}$  的变化规律<sup>[14]</sup>。

假设 5:政府部门通过转移支付向私营企业提供价格补偿,即这部分补贴由消费者承担,且每提供一单位的补贴,消费者需要支付额外  $\lambda$  单位的补贴成本<sup>[15]</sup>。

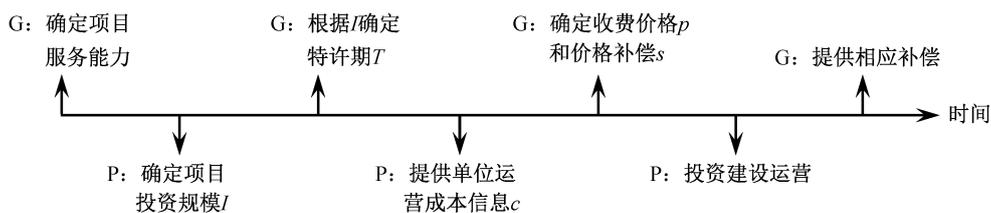


图 1 PPP 合同签订流程

Fig. 1 PPP contract signing process

## 2 成本信息不对称下的激励机制模型

### 2.1 效用函数

私营部门的目标是实现自身利润的最大化,其利润函数为运营收益和补偿收益之和减去建设成本和运营成本,因此私营企业的期望利润函数表达式为

$$E\pi = \int_0^T ((a - bp)(p + s - c))e^{-rt} dt - I \quad (1)$$

政府部门通过对消费者征税来给予私营部门价格补偿,这部分补偿及其成本由消费者支付,因此消费者剩余函数表达式为

$$ECS = E \left\{ \int_0^T \left( \int_0^d \left( \frac{a-x}{b} \right) dx - pd - (1+\lambda)ds \right) e^{-rt} dt \right\} = \int_0^T \left( \frac{(a-bp)^2 + \sigma^2}{2b} - (1+\lambda)(a-bp)s \right) e^{-rt} dt \quad (2)$$

政府部门的目的是实现社会福利最大化,根据经济学原理,社会福利包括私营企业收益和消费者剩余,因此社会福利 EW 的期望表达式为

$$EW = E\pi + ECS = \int_0^T \left( (a - bp)(p - \lambda s - c) + \frac{(a - bp)^2 + \sigma^2}{2b} \right) e^{-rt} dt - I \quad (3)$$

### 2.2 模型构建

在现实情况中,由于资源、环境、技术和管理水平的差异,私营企业在运营成本方面存在异质性,根据边际运营成本的高低将私营企业分为高运营成本企业(下称 H 型企业)和低运营成本企业(下称 L 型企业),企业类型为各自的私人信息。政府部门分别对 L 型企业和 H 型企业拥有先验概率  $q$  和  $1 - q$ , 其中  $q \in (0, 1)$ , 提供一单位相同的服务, L 型企业需要支付的边际运营成本为  $c$ , H 型企业需要支付的边际运营成本为  $\bar{c}$ , 其中  $0 < c < \bar{c}$ , 记  $\Delta c = \bar{c} - c$ 。

在成本信息不对称下,政府向私营企业提供两种合同  $(p(c), s(c))$  和  $(p(\bar{c}), s(\bar{c}))$ , 使得 L 型企业主动选择合同  $(p(c), s(c))$ , H 型企业主动选择合同  $(p(\bar{c}), s(\bar{c}))$ 。因此,该激励机制应保证私营企业谎报成本信息时的收益不高于其真实报成本信息时的收益。为简便计算,令  $R = \int_0^T e^{-rt} dt = \frac{1 - e^{-rT}}{r}$ , 构建如下模型:

$$\max_{p(c), s(c), p(\bar{c}), s(\bar{c})} EW = q \left( R((a - bp(c))(p(c) - \lambda s(c) - c) + \frac{(a - bp(c))^2 + \sigma^2}{2b}) - I \right) +$$

$$(1 - q) \left( R((a - bp(\bar{c}))(p(\bar{c}) - \lambda s(\bar{c}) - \bar{c}) + \frac{(a - bp(\bar{c}))^2 + \sigma^2}{2b}) - I \right) \quad (4)$$

$$s. t. (IC_1) E\pi(c) = R(a - bp(c))(p(c) + s(c) - c) - I \geq E\pi(c, \bar{c}) = R(a - bp(\bar{c}))(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - c) - I \quad (5)$$

$$(IC_2) E\pi(\bar{c}) = R(a - bp(\bar{c}))(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - \bar{c}) - I \geq E\pi(\bar{c}, c) = R(a - bp(c))(p(c) + s(c) - \bar{c}) - I \quad (6)$$

$$(IR_1) E\pi(c) \geq \omega \quad (7)$$

$$(IR_2) E\pi(\bar{c}) \geq \omega \quad (8)$$

上述模型中,  $\omega$  为私营企业的保留效用,表示私营企业能够获得的最低收益水平。激励相容约束  $IC_1, IC_2$  成立意味着私营企业弱偏好于如实报告企业真实成本信息,参与约束  $IR_1, IR_2$  成立,保证私营企业能够接受该激励合同。由式(5)~(8),结合  $\bar{c} > c$ ,有  $E\pi(c) \geq E\pi(c, \bar{c}) \geq E\pi(\bar{c}) \geq \omega$ , 故可省略式(7)。根据 K-T 定理,记  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  分别为约束条件(5)、(6)和(8)的非负拉格朗日乘子,构建拉格朗日函数如下:

$$\begin{cases} L(p(c), s(c), p(\bar{c}), s(\bar{c}), \mu_1, \mu_2, \mu_3) = \\ EW + \mu_1 [E\pi(c) - E\pi(c, \bar{c})] + \\ \mu_2 [E\pi(\bar{c}) - E\pi(\bar{c}, c)] + \mu_3 [E\pi(\bar{c}) - \omega] \\ s. t. \quad p(c) \geq 0, s(c) \geq 0, p(\bar{c}) \geq 0, s(\bar{c}) \geq \\ 0, \mu_1 \geq 0, \mu_2 \geq 0, \mu_3 \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

### 2.3 模型求解

通过对上述模型求解可得引理 1 和命题 1 如下:

**引理 1:** 通过对  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  求解,可以得到  $E\pi(\bar{c})$  和  $E\pi(c)$  的最优解:

$$E\pi^*(\bar{c}) = \omega \quad (10)$$

$$E\pi^*(c) = \omega + RE d^*(\bar{c}) \Delta c \quad (11)$$

**证明:** 对式(9)关于  $p(c), s(c), p(\bar{c})$  和  $s(\bar{c})$  求一阶导,有

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial p(c)} \\ \frac{\partial L}{\partial s(c)} \\ \frac{\partial L}{\partial p(\bar{c})} \\ \frac{\partial L}{\partial s(\bar{c})} \end{cases} = \begin{cases} -Rqb(p(c) - \lambda s(c) - c) \\ -\lambda Rq(a - bp(c)) \\ -R(1 - q)b(p(\bar{c}) - \lambda s(\bar{c}) - \bar{c}) \\ -\lambda R(1 - q)(a - bp(\bar{c})) \end{cases} +$$

$$\left. \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} & R((a - bp(\underline{c})) - b(p(\underline{c}) + s(\underline{c}) - \underline{c})) \\ & R(a - bp(\underline{c})) \\ & - R((a - bp(\bar{c})) - b(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - \underline{c})) \\ & - R(a - bp(\bar{c})) \end{aligned} \right\} + \\ & \left. \begin{aligned} & - R((a - bp(\underline{c})) - b(p(\underline{c}) + s(\underline{c}) - \bar{c})) \\ & - R(a - bp(\underline{c})) \\ & R((a - bp(\bar{c})) - b(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - \bar{c})) \\ & R(a - bp(\bar{c})) \end{aligned} \right\} + \\ & \left. \begin{aligned} & 0 \\ & 0 \\ & R((a - bp(\bar{c})) - b(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - \bar{c})) \\ & R(a - bp(\bar{c})) \end{aligned} \right\} = 0 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

由  $\frac{\partial L}{\partial s(\underline{c})} = 0$ , 有  $\mu_1 = q\lambda + \mu_2 > 0$ ; 由  $\frac{\partial L}{\partial s(\bar{c})} = 0$ , 并代

入  $\mu_1$ , 有  $\mu_3 = \lambda > 0$ 。现假设约束条件(5)取等, 同时由  $\mu_1 > 0$ , 即约束条件(6)也取等, 进一步有  $s(\underline{c}) = s(\bar{c}), p(\underline{c}) = p(\bar{c})$ , 这意味着两种类型的私营企业所面临的合同结构是相同的, 则该激励机制就无法实现信息甄别作用, 因此假设不成立, 故  $\mu_2 = 0$ , 则  $\mu_1 = q\lambda$ 。由  $\mu_3 = \lambda > 0$ , 则  $\mu_3$  对应的约束条件(8)取等, 即有式(11); 由约束条件(5)取等, 结合式(11), 即有式(12)。

**命题 1:** 当  $\lambda$  满足  $\frac{\lambda(1 + \lambda)}{(1 + 2\lambda)^2} \leq \frac{b(\omega + I)}{R(a - bc)^2} \leq$

$\frac{(1 + \lambda)}{2(1 + 2\lambda)}$  时, 政府向私营企业提供的最优激励合同  $(p^*(\underline{c}), s^*(\underline{c}))$  和  $(p^*(\bar{c}), s^*(\bar{c}))$  分别满足如下最优解, 见式(13)、式(14):

**证明:** 将  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  带入式(10), 有

$$\left\{ \begin{aligned} p^*(\underline{c}) &= \frac{\lambda a + (1 + \lambda)b\underline{c}}{(1 + 2\lambda)b} \\ d^*(\underline{c}) &= \frac{(1 + \lambda)(a - b\underline{c})}{1 + 2\lambda} \\ s^*(\underline{c}) &= \frac{(1 + 2\lambda)(\omega + I)}{R(1 + \lambda)(a - b\underline{c})} + \Delta c - \frac{(1 + \lambda - q)b(\Delta c)^2}{(1 - q)(1 + \lambda)(a - b\underline{c})} - \frac{\lambda(a - b\underline{c})}{(1 + 2\lambda)b} \\ E\pi^*(\underline{c}) &= \omega + \frac{R[(1 - q)(1 + \lambda)(a - b\underline{c})\Delta c - q\lambda b(\Delta c)^2]}{(1 - q)(1 + 2\lambda)} \\ ECS^*(\underline{c}) &= R \left[ \frac{(1 + \lambda)^2(a - b\underline{c})^2}{2b(1 + 2\lambda)} + \frac{(1 + \lambda - q)(1 + \lambda)b(\Delta c)^2}{(1 - q)(1 + 2\lambda)} - \frac{(1 + \lambda)^2(a - b\underline{c})\Delta c}{(1 + 2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b} \right] \\ &\quad - (1 + \lambda)(\omega + I) \\ EW^*(\underline{c}) &= R \left[ \frac{(1 + \lambda)^2(a - b\underline{c})^2}{2b(1 + 2\lambda)} + \frac{(1 + \lambda - q)\lambda b(\Delta c)^2 - (1 - q)(1 + \lambda)(a - b\underline{c})\lambda \Delta c}{(1 - q)(1 + 2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b} \right] \\ &\quad - (1 + \lambda)I - \lambda\omega \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} p^*(\bar{c}) &= \frac{(1 - q)(\lambda a + (1 + \lambda)b\bar{c}) + q\lambda b\Delta c}{b(1 - q)(2\lambda + 1)} \\ d^*(\bar{c}) &= \frac{(1 - q)(1 + \lambda)(a - b\bar{c}) - q\lambda b\Delta c}{(1 - q)(1 + 2\lambda)} \\ s^*(\bar{c}) &= \frac{(1 - q)(2\lambda + 1)(\omega + I)}{R[(1 - q)(1 + \lambda)(a - b\bar{c}) - q\lambda b\Delta c]} - \frac{\lambda(1 - q)(a - b\bar{c}) + q\lambda b\Delta c}{(1 - q)(2\lambda + 1)b} \\ E\pi^*(\bar{c}) &= \omega \\ ECS^*(\bar{c}) &= R \left[ \frac{(1 + \lambda)^2(a - b\bar{c})^2}{2b(1 + 2\lambda)} - \frac{q^2\lambda^2 b^2(\Delta c)^2}{2b(1 - q)^2(1 + 2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b} \right] - (1 + \lambda)(\omega + I) \\ EW^*(\bar{c}) &= R \left[ \frac{(1 + \lambda)^2(a - b\bar{c})^2}{2b(1 + 2\lambda)} - \frac{q^2\lambda^2 b^2(\Delta c)^2}{2b(1 - q)^2(1 + 2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b} \right] - (1 + \lambda)I - \lambda\omega \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial p(\underline{c})} \\ \frac{\partial L}{\partial s(\underline{c})} \\ \frac{\partial L}{\partial p(\bar{c})} \\ \frac{\partial L}{\partial s(\bar{c})} \end{cases} = \begin{cases} -Rqb(p(\underline{c}) - \lambda s(\underline{c}) - \underline{c}) \\ -\lambda Rq(a - bp(\underline{c})) \\ -R(1 - q)b(p(\bar{c}) - \lambda s(\bar{c}) - \bar{c}) \\ -\lambda R(1 - q)(a - bp(\bar{c})) \end{cases} + \begin{cases} R((a - bp(\underline{c})) - b(p(\underline{c}) + s(\underline{c}) - \underline{c})) \\ R(a - bp(\underline{c})) \\ -R((a - bp(\bar{c})) - b(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - \underline{c})) \\ -R(a - bp(\bar{c})) \end{cases} + \begin{cases} 0 \\ 0 \\ R((a - bp(\bar{c})) - b(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - \bar{c})) \\ R(a - bp(\bar{c})) \end{cases} = 0 \quad (15)$$

由  $\frac{\partial L}{\partial p(\underline{c})} = 0$ , 有  $p^*(\underline{c})$  和  $d^*(\underline{c})$ ; 由  $\frac{\partial L}{\partial p(\bar{c})} = 0$ , 有  $p^*(\bar{c})$  和  $d^*(\bar{c})$ 。

由  $\frac{\partial L}{\partial \mu_3} = R(a - bp(\bar{c}))(p(\bar{c}) + s(\bar{c}) - \bar{c}) - I - \omega = 0$ , 将  $p^*(\bar{c})$  代入, 有  $s^*(\bar{c})$ 。

由引理1, 有  $E\pi^*(\underline{c}) = R(a - bp^*(\underline{c}))(p^*(\underline{c}) + s^*(\underline{c}) - \underline{c}) - I = \omega + R(a - bp^*(\bar{c}))\Delta c$ , 将  $p^*(\underline{c})$  和  $p^*(\bar{c})$  代入, 有  $s^*(\underline{c})$ ; 将  $p^*(\underline{c})$  和  $s^*(\underline{c})$  代入  $ECS(\underline{c})$  和  $EW(\underline{c})$ , 有  $ECS^*(\underline{c})$  和  $EW^*(\underline{c})$ , 将  $p^*(\bar{c})$  和  $s^*(\bar{c})$  代入  $ECS(\bar{c})$  和  $EW(\bar{c})$ , 有  $ECS^*(\bar{c})$  和  $EW^*(\bar{c})$ 。为了保证研究具有意义, 所有最优解应满足非负条件, 因此有  $\frac{R(1 + \lambda)^2(a - b\bar{c})^2}{2b(1 + 2\lambda)} - (1 + \lambda)(\omega + I) \geq 0$ , 且

$$\frac{(1 + 2\lambda)(\omega + I)}{R(1 + \lambda)(a - b\bar{c})} - \frac{\lambda(a - b\bar{c})}{(1 + 2\lambda)b} \geq 0, \text{ 即有 } \frac{\lambda(1 + \lambda)}{(1 + 2\lambda)^2} \leq \frac{b(\omega + I)}{R(a - b\bar{c})^2} \leq \frac{(1 + \lambda)}{2(1 + 2\lambda)}。$$

### 3 激励模型性质分析

本节将从以下两方面进行分析: 所构建的激励机制模型能否抑制私营企业谎报成本信息, 最优激励合同和私营企业类型分布之间具有怎样的影响机制。

#### 3.1 成本信息甄别分析

**推论 1:** 成本信息不对称下政府部门提供的最优激励合同能够实现成本信息甄别, L 型企业和 H

型企业均没有谎报自身企业成本信息的动机。

**证明:** 由引理 1, L 型企业如实汇报企业信息和伪装为 H 型企业的收益相同, 即  $E\pi^*(\underline{c}) = E\pi^*(\underline{c}, \bar{c}) = \omega + RE d^*(\bar{c})\Delta c$ 。H 型企业如实汇报企业信息时的收益为  $E\pi^*(\bar{c}) = \omega$ ; 而伪装成 L 型企业时的收益为  $E\pi^*(\bar{c}, \underline{c}) = \omega + R(Ed^*(\bar{c}) - Ed^*(\underline{c}))\Delta c$ , 显然  $E\pi^*(\bar{c}, \underline{c}) < E\pi^*(\bar{c})$ , 即 H 型企业如实汇报企业信息所得收益高于撒谎所得收益。因此, 在该机制下, L 型企业和 H 型企业均没有谎报自身企业信息的动机, 即能够实现信息甄别的目标。

#### 3.2 最优解单调性分析

**推论 2:** L 型企业的收费价格与  $q$  和  $\Delta c$  无关, 而 H 型企业的收费价格分别关于  $q \in (0, 1)$  和  $\Delta c$  单调递增。

**证明:** 由式(13), 有  $\frac{\partial p^*(\underline{c})}{\partial q} = 0$ , 且有  $\frac{\partial p^*(\underline{c})}{\partial \Delta c} = 0$ , 即  $p^*(\underline{c})$  与  $q$  无关; 由式(14), 有  $\frac{\partial p^*(\bar{c})}{\partial q} = \frac{\lambda b \Delta c}{b(1 + 2\lambda)(1 - q)^2} > 0$ , 且有  $\frac{\partial p^*(\bar{c})}{\partial \Delta c} = \frac{q \lambda b}{b(1 - q)(2\lambda + 1)} > 0$ , 即  $p^*(\bar{c})$  分别关于  $q \in (0, 1)$  和  $\Delta c$  单调递增。

**推论 3:** (1) 当  $0 < q \leq q''$  时, L 型企业获得的价格补偿关于  $q$  单调递减, 当  $q'' < q < 1$  时, L 型企业获得的价格补偿为  $\frac{(1 + 2\lambda)(\omega + I)}{R(1 + \lambda)(a - b\bar{c})} - \frac{\lambda(a - b\bar{c})}{(1 + 2\lambda)b}$ 。

(2) 若  $q' \geq q''$ , 则当  $0 < q \leq q''$  时, H 型企业获得的价格补偿关于  $q$  单调递减, 当  $q'' < q < 1$  时, H 型企业获得的价格补偿恒为 0; 若  $q' < q''$ , 则当  $0 < q \leq q'$  时, H 型企业获得的价格补偿关于  $q$  单调递减, 当  $q' < q \leq q''$  时, H 型企业获得的价格补偿关于  $q$  单调递增, 当  $q'' < q < 1$  时, H 型企业获得的价格补偿为 0。

**证明:** 由式(13), 有  $\frac{\partial s^*(\underline{c})}{\partial q} = -\frac{\lambda b(\Delta c)^2}{(1 - q)^2(1 + \lambda)(a - b\bar{c})} < 0$ , 即  $s^*(\underline{c})$  关于  $q \in (0, 1)$  单调递减, 由推论 5, 当  $q > q''$  时, H 型企业将被逐出市场, 此时有  $s^*(\underline{c}) = \frac{(1 + 2\lambda)(\omega + I)}{R(1 + \lambda)(a - b\bar{c})} - \frac{\lambda(a - b\bar{c})}{(1 + 2\lambda)b}$ , 则当  $0 < q \leq q''$  时,  $s^*(\underline{c})$  关于  $q$  单调递

减,当  $q'' < q < 1$  时,  $s^*(c) = \frac{(1+2\lambda)(\omega+I)}{R(1+\lambda)(a-b\bar{c})} - \frac{\lambda(a-b\bar{c})}{(1+2\lambda)b}$ 。由式(14),有  $\partial s_2^*(\bar{c})/\partial q = (\omega+I)(1+2\lambda)\lambda b\Delta c / \{R[(1-q)(1+\lambda)(a-b\bar{c}) - q\lambda b\Delta c]^2\} - \lambda\Delta c / [(1-q)^2(1+2\lambda)]$ , 令  $\frac{\partial s_2^*(\bar{c})}{\partial q} = 0$ , 有  $q = q' = \frac{(1+\lambda)(a-b\bar{c}) - \sqrt{\frac{(\omega+I)(1+2\lambda)^2 b}{R}}}{(1+\lambda)(a-b\bar{c}) + \lambda b\Delta c - \sqrt{\frac{(\omega+I)(1+2\lambda)^2 b}{R}}}$ , 则

当  $0 < q < q'$  时,  $s^*(\bar{c})$  关于  $q$  单调递减, 当  $q' < q < 1$  时,  $s^*(\bar{c})$  关于  $q$  单调递增, 当  $q = q'$  时,  $s^*(\bar{c})$  取得极小值, 又由推论 5, 当  $q > q''$  时, H 型企业将被逐出市场, 此时有  $s^*(\bar{c}) = 0$ , 如果  $q' \geq q''$ , 则当  $0 < q \leq q''$  时,  $s^*(\bar{c})$  关于  $q$  单调递减, 当  $q'' < q < 1$  时,  $s^*(\bar{c}) = 0$ ; 如果  $q' < q''$ , 则当  $0 < q \leq q'$  时,  $s^*(\bar{c})$  关于  $q$  单调递减, 当  $q' < q \leq q''$  时,  $s^*(\bar{c})$  关于  $q$  单调递增, 当  $q'' < q < 1$  时,  $s^*(\bar{c}) = 0$ 。

**推论 4:** H 型企业获得保留效用, 而 L 型企业在获得保留效用的同时获得额外的信息租金  $REd^*(\bar{c})\Delta c$ , 当  $0 < q \leq q''$  时, 该信息租金关于  $q$  单调递减, 当  $q'' < q < 1$  时, 该信息租金为 0。

**证明:** 由式(11)和式(12), H 型企业获得的最优收益为  $\omega$ , L 型企业得到额外的信息租金  $\varphi = REd^*(\bar{c})\Delta c$ , 由推论 2,  $d^*(\bar{c})$  关于  $q \in (0, 1)$  单调递减, 即  $\varphi$  关于  $q \in (0, 1)$  单调递减, 又由推论 5, 当  $q > q''$  时, H 型企业将被逐出市场, 此时  $\varphi = 0$ 。因此, 当  $0 < q \leq q''$  时,  $\varphi$  关于  $q$  单调递减, 当  $q > q''$  时,  $\varphi = 0$ 。

**推论 5:** 当  $0 < q \leq q''$  时, H 型企业的消费者剩余关于  $q$  单调递减, L 型企业的消费者剩余关于  $q$  单调递增, 当  $q'' < q < 1$  时, H 型企业被政府部门排除出签约对象, 即被逐出市场, 其消费者剩余为 0, L 型企业的消费者剩余为  $R\left[\frac{(1+\lambda)^2(a-b\bar{c})^2}{2b(1+2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b}\right] - (1+\lambda)(\omega+I)$ 。

**证明:** 由式(13), 有  $\frac{\partial ECS^*(c)}{\partial q} = \frac{R\lambda(1+\lambda)b(\Delta c)^2}{(1-q)^2(1+2\lambda)} > 0$ , 即  $ECS^*(c)$  关于  $q \in (0,$

1) 单调递增; 由式(14), 有  $\frac{\partial ECS^*(\bar{c})}{\partial q} = -\frac{Rq\lambda^2 b(\Delta c)^2}{(1-q)^3(1+2\lambda)} < 0$ , 即  $ECS^*(\bar{c})$  关于  $q \in (0,$

1) 单调递减, 且有  $\lim_{q \rightarrow 0} ECS^*(\bar{c}) = R\left[\frac{(1+\lambda)^2(a-b\bar{c})^2}{2b(1+2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b}\right] - (1+\lambda)(\omega+I) > 0$ ,  $\lim_{q \rightarrow 1} ECS^*(\bar{c}) = -\infty < 0$ , 又函数  $ECS^*(\bar{c})$  关于  $q \in (0, 1)$  连续可导, 则必然存在某一  $q = q''$  使得  $ECS^*(\bar{c}) = 0$ , 而当  $q > q''$  时,  $ECS^*(\bar{c}) < 0$ , 消费者失去支付意愿, H 型企业会被政府部门排除出签约对象, 此时 L 型企业的消费者剩余为  $ECS^*(c) = R\left[\frac{(1+\lambda)^2(a-b\bar{c})^2}{2b(1+2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b}\right] - (1+\lambda)(\omega+I)$ 。

**推论 6:** 当  $0 < q \leq q''$  时, 政府部门签约 L 型企业产生的社会福利关于  $q$  单调递增, 而签约 H 型企业产生的社会福利关于  $q$  单调递减, 当  $q'' < q < 1$  时, 政府部门签约 L 型企业产生的社会福利为  $R\left[\frac{(1+\lambda)^2(a-b\bar{c})^2}{2b(1+2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b}\right] - (1+\lambda)I - \lambda\omega$ , 签约 H 型企业产生的社会福利为 0。

**证明:** 由式(13), 有  $\frac{\partial EW^*(c)}{\partial q} = \frac{\lambda^2 b(\Delta c)^2}{(1-q)^2(1+2\lambda)} > 0$ , 即  $EW^*(c)$  关于  $q \in (0, 1)$  单调递增, 由推论 5, 当  $q > q''$  时, H 型企业被逐出市场, 此时  $EW^*(c) = R\left[\frac{(1+\lambda)^2(a-b\bar{c})^2}{2b(1+2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b}\right] - (1+\lambda)I - \lambda\omega$ , 则当  $0 < q \leq q''$  时,  $EW^*(c)$  关于  $q$  单调递增, 当  $q'' < q < 1$  时,  $EW^*(c) = R\left[\frac{(1+\lambda)^2(a-b\bar{c})^2}{2b(1+2\lambda)} + \frac{\sigma^2}{2b}\right] - (1+\lambda)I - \lambda\omega$ ; 由式(14), 有  $\frac{\partial EW^*(\bar{c})}{\partial q} = -\frac{Rq\lambda^2 b(\Delta c)^2}{(1-q)^3(1+2\lambda)} < 0$ , 即  $EW^*(\bar{c})$  关于  $q \in (0, 1)$  单调递减, 又由推论 5, 当  $q > q''$  时, H 型企业将被逐出市场, 此时  $EW^*(\bar{c}) = 0$ , 则当  $0 < q \leq q''$  时,  $EW^*(\bar{c})$  关于  $q$  单调递减, 当  $q'' < q < 1$  时,  $EW^*(\bar{c}) = 0$ 。

#### 4 仿真模拟分析

由于缺乏实际生产数据, 本文通过仿真模拟和计算实验对上述理论进行检验。假设某一轨道交通类项目通过 PPP 模式建设并运营, 其中收费价格、价格补偿、运营成本的单位均是元, 每年项目需求量的单位为亿人次, 投资规模、私营企业利润、消费者剩余和社会福利的单位是亿元。项目的运营期为 30 年, 贴现系数为 5%, 因此  $R =$

$$\int_0^T e^{-rt} dt = \frac{1 - e^{-rT}}{r} \approx 15.54; \text{假设投资规模 } I = 160$$

亿元, 私营企业投资最低收益率为 10%, 因此保留效用  $\omega = 16$  亿元, 运营期内需求函数按照  $d = 5 - 0.4p$ , 即  $a = 5, b = 0.4$ , 取  $\sigma = 1$ , 税收成本系数  $\lambda$  值取 0.2, L 型企业的边际运营成本  $c = 1.5$ , H 型企业的边际运营成本  $\bar{c} = 3.2$ , 具体赋值如表 2 所示。在此基础上运用 MATLAB 计算实验平台对模型结果进行仿真模拟分析, 进一步探究私营企业类型分布对项目收费价格、价格补偿、私营企业利润、消费者剩余和社会福利的影响。

表 2 仿真模拟赋值表

Tab. 2 Assignment table for simulation analysis

$I$	$a$	$b$	$T$	$\lambda$	$c$	$\bar{c}$	$r$	$\omega$
160	5	0.4	30	0.2	1.5	3.2	0.05	16

#### 4.1 $q$ 对收费价格和需求量的影响分析

图 2、图 3 表明, 由于具有较高的运营成本, H 型企业被淘汰之前其收费价格始终高于 L 型企业, 而且 H 型企业的需求量随 L 型企业占比的增加而减小。如果政府部门与 H 型企业签约, 需要对其制定一个较高的收费价格, 才能保证 H 型企业能够获得保留效用, 然而这会损害消费者利益, 从而导致社会福利降低。政府部门为了最大化社会福利, 将更倾向于与 L 型企业签约。因此在两类企业的竞争过程中, H 型企业必须降低自身的运营成本, 才能在投标时提高自身的竞争力。

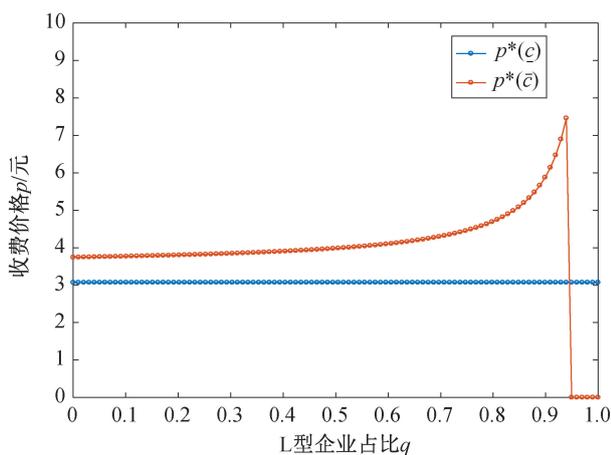


图 2  $q$  对两类企业收费价格的影响

Fig. 2 The impact of parameter  $q$  on the charged prices of two types of enterprises

#### 4.2 $q$ 对价格补偿和企业利润的影响

图 4 表明, 随着 L 型企业占比的增加, 政府部

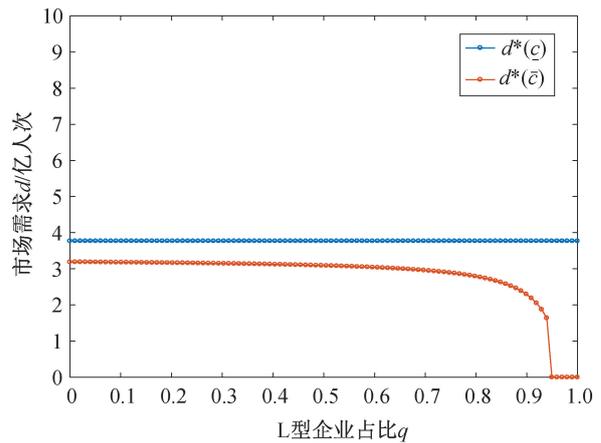


图 3  $q$  对两类企业市场需求的影响

Fig. 3 The impact of parameter  $q$  on the market demand of two types of enterprises

门向 L 型企业支付的价格补偿会不断减小, 意味着 L 型企业获得的信息租金不断减小。由图 2 可知, 当 H 型企业的收费价格不断增大时, 为保证 H 型企业不会获得超额利润, 政府部门会对其降低价格补偿; 当 H 型企业的收费价格继续提高不能增加其利润时, 政府部门将通过提高价格补偿来保证 H 型企业获得保留效用; 当 H 型企业的收费价格继续增大超过消费者支付意愿时, H 型企业会被逐出市场。

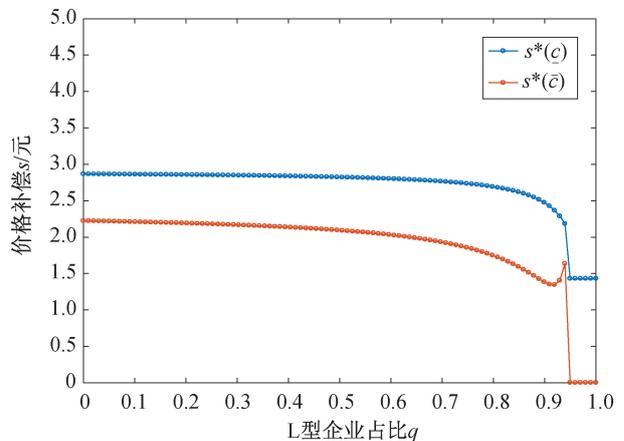


图 4  $q$  对两类企业价格补偿的影响

Fig. 4 The impact of parameter  $q$  on the price compensation of two types of enterprises

由图 5 可知, 政府部门不需要向 H 型企业支付信息租金, 而需要向 L 型企业支付额外的信息租金, 以防止其伪装成 H 型企业寻租, 而且这部分租金远远超过了其保留效用, 但它会随着 L 型企业占比的增加而减小。具体而言, L 型企业获得的信息租金与 H 型企业的需求和两类企业的边际运营成本差额成正比, 这为政府抑制企业攫取信息

租金提供了两种途径:一方面是吸引更多 L 型企业参与 PPP 项目来驱逐 H 型企业,直到 H 型企业完全被逐出市场,另一方面是鼓励 H 型企业不断降低运营成本,减小与 L 型企业之间的运营成本差额,逐渐向 L 型企业看齐,这两种情况的结果都会导致 H 型企业占比不断减小,L 型企业占比不断增加,从而进一步抑制 L 型企业攫取信息租金,当 H 型企业完全转化为 L 型企业时,L 型企业将不再获得信息租金,这间接表明两类企业之间的竞争对政府来说是有利的,一方面企业提高运营能力可以提高产品或服务的质量,另一方面 H 型企业占比的减少会抑制 L 型企业攫取信息租金,这一结论与推论 4 是一致的。

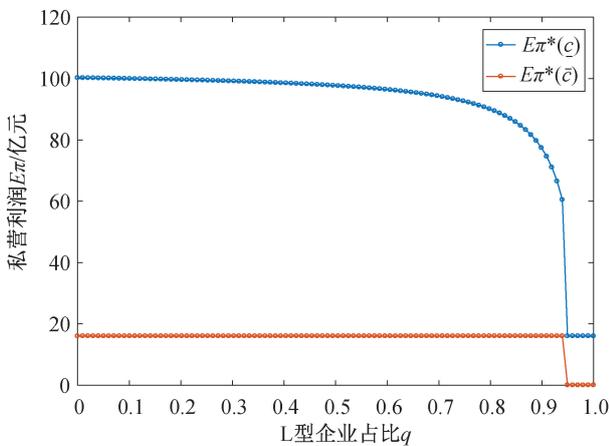


图 5  $q$  对两类企业私营利润的影响

Fig. 5 The impact of parameter  $q$  on the private profits of two types of enterprises

#### 4.3 $q$ 对消费者剩余和社会福利的影响

图 6 表明,L 型企业占比的增加会导致其攫取信息租金的能力不断减小,从而使消费者承担的价格补偿及成本不断减小,因此 L 型企业的消费者剩余会不断提高。然而,随着 L 型企业占比的增加,H 型企业会不断受到 L 型企业的驱逐,使其市场需求不断减小,政府部门对其提供价格补偿不会抑制这种趋势,反而需要提高收费价格来保证其获得保留效用,这会进一步促进其市场需求的减小,导致其消费者剩余不断减小,当消费者失去支付意愿时,H 型企业将会被逐出市场。

图 7 表明,政府与 H 型企业签约会产生“单赢”的结果,即政府为保证 H 型企业获得保留效用会损害消费者剩余,进一步降低社会福利;而政府与 L 型企业签约则会产生“双赢”的结果,即政府部门既能保证 L 型企业获得保留效用,同时能够提高消费者剩余,从而提高社会福利。

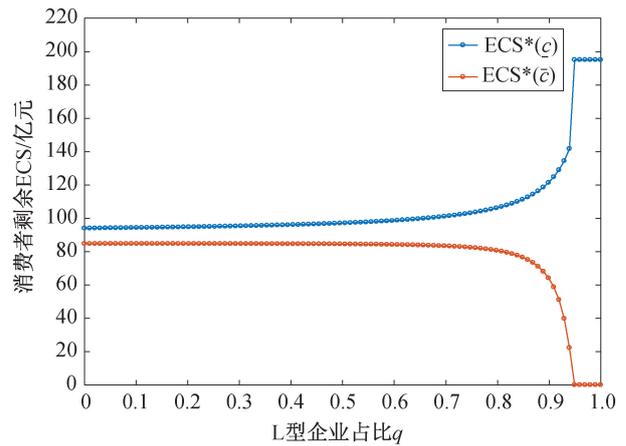


图 6  $q$  对两类企业消费者剩余的影响

Fig. 6 The impact of parameter  $q$  on the consumer surplus of two types of enterprises

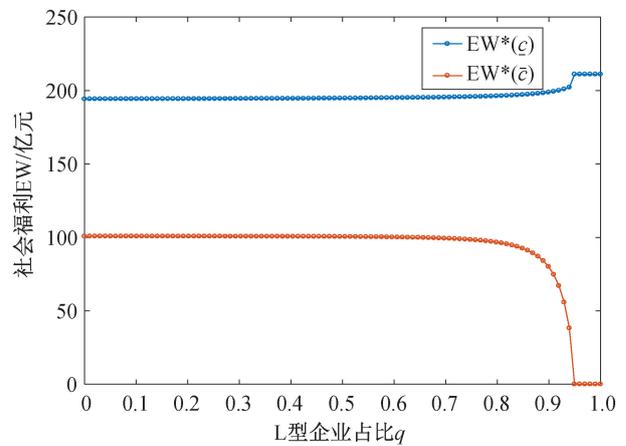


图 7  $q$  对两类企业社会福利的影响

Fig. 7 The impact of parameter  $q$  on the social welfare of two types of enterprises

## 5 结论

本文考虑了私营企业运营成本的异质性,针对政府部门和私营企业之间成本信息不对称的问题,研究了 PPP 项目的激励机制设计问题,分析了私营企业类型分布对最优激励合同的影响。通过理论推导和仿真模拟分析,可以总结得到:(1)模型构建的激励机制能够实现私营企业成本信息的甄别。(2)该激励机制能够通过促进私营企业之间的竞争不断驱逐 H 型企业,同时抑制 L 型企业攫取信息租金。(3)随着两类企业之间竞争的不断加剧,L 型企业会逐渐占据市场主导地位,其分布比例对该机制的影响逐渐显著。(4)政府部门与 H 型企业签约能够保证其获得保留效用,但会损害消费者剩余,而政府部门与 L 型企业签约,既能保证其保留效用,同时会提高消费者剩余。

在PPP项目实施过程中,政府部门与私营企业之间的委托代理关系复杂,既存在合作又存在对立,因此交通设施PPP项目的治理问题一直是一个复杂的问题,本文也存在一定的局限性:(1)为方便求解,本文假设私营企业是风险中性的,而现实情况中私营企业可能具有风险偏好和风险规避的特征;(2)本文只考虑了私营企业可能会采取机会主义行为的情形,而政府部门也可能凭借自己在PPP项目中的主导地位采取一些机会主义行为,将来可以进一步研究抑制政府部门机会主义行为的PPP项目激励机制问题。

#### 参考文献:

- [1] 吴孝灵,黄丹丹,刘小峰. 考虑私人不同风险投资行为的PPP项目补偿契约研究[J]. 运筹与管理, 2016, 25(04):179-186.
- [2] DERICK B W, JENNIFER B M. Public-private Partnerships: Perspectives on Purpose, Publicness, and Good Governances[J]. Public Administration and Development, 2011, 31(1): 2-14.
- [3] LIU J, GAO R, CHEAH C Y J, et al. Incentive Mechanism for Inhibiting Investors' Opportunistic Behavior in PPP Projects[J]. International Journal of Project Management, 2016, 34(7):1102-1111.
- [4] HAJJEJ I, HILLAIRET C, MNIF M, et al. Optimal Contract with Moral Hazard for Public Private Partnerships[J]. Stochastics, 2017, 89(6-7):1015-1038.
- [5] LI H, LV L, ZUO J, et al. Dynamic Reputation Incentive Mechanism for Urban Water Environment Treatment PPP Projects[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, 146(8): 04020088.
- [6] XU X, XU T, GUI M. Incentive Mechanism for Municipal Solid Waste Disposal PPP Projects in China[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7686.
- [7] XIONG W, ZHAO X, WANG H. Information Asymmetry in Renegotiation of Public-Private Partnership Projects[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32(4):04018028. 1-04018028. 11.
- [8] XING H, LI Y, LI H. Renegotiation Strategy of Public-Private Partnership Projects with Asymmetric Information—An Evolutionary Game Approach[J]. Sustainability, 2020, 12(7):2646.
- [9] 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(003):165-173.
- [10] 毕然. 海绵城市PPP项目中政府与企业的博弈分析[J]. 工业技术经济, 2020, 39(05):144-151.
- [11] 何寿奎. 基于管理效率的公私合作项目伙伴选择与激励机制[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(08):1-7.
- [12] 王先甲, 袁睢秋, 林镇周, 等. 考虑公平偏好的双重信息不对称下PPP项目激励机制研究[J]. 中国管理科学, 2019:1-12.
- [13] ZHANG Y, FENG Z, ZHANG S, et al. The Effects of Service Level on BOT Transport Project Contract[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 118:184-206.
- [14] CHEN X, SIMCHI-LEVI D. Coordinating Inventory Control and Pricing Strategies: The Continuous Review Model[J]. Operations Research Letters, 2006, 34(3): 323-332.
- [15] BARON D P, ROGER B M. Regulating a Monopolist with Unknown Costs[J]. Econometrica, 1982, 50(4): 911-30.

(责任编辑 王利君)