

既有民用建筑节能改造 EPC 主体激励演化博弈分析

杨艳平^{1,3}, 刘晓君³, 王博俊^{2,3}, 刘晓丹³, 胡 伟^{3,4}

(1. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212005; 2. 江苏科技大学张家港校区 船建学院, 江苏 苏州 215600;
3. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055; 4. 伊利诺伊州立大学应用科学与技术学院, 伊利诺伊州布卢明顿 61790)

摘要: 既有民用建筑节能改造的外部性引起市场配置失灵, 阻碍了 EPC 模式在我国的推广应用. 为此, 文章系统分析了节能改造外部性机理并定量计算外部性的大小, 指出政府利用经济激励促进节能改造的可行性; 并构建了政府对 EPC 合同主体激励的演化博弈模型, 通过模型参数建立相应的复制动态方程, 解析得到各主体策略选择的稳态点. 结果表明, 业主和 ESCO 选择进行节能改造的比例随预期收益及政府的激励力度提高而提高, 但要满足激励公平原则; 政府立足于可持续发展及社会收益最大化的视角, 适当加大激励力度, 可以激发 EPC 合同主体节能改造的积极性, 有利于 EPC 模式的市场培育.

关键词: 既有民用建筑; 节能改造; EPC 主体激励; 演化博弈

中图分类号: TU111.19⁺5.9, F294

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0763-08

Game analysis by EPC stimulation evolution on energy constrvation of existing civil buildings

YANG Yanping^{1,3}, LIU Xiaojun³, WANG Bojun^{2,3}, LIU Xiaodan³, HU Wei^{3,4}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212005, China;

2. College of Zhangjiagang, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Suzhou 215600, China;

3. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. Tech., Xi'an 710055, China;

4. College of Applied Science and Technology, Illinois State University, Bloomington-Normal 61790, USA.)

Abstract: The externalities of existing energy-saving renovation of civil buildings cause the failure of market allocation and hinder the popularization and application of EPC model in China. For this reason, the externality mechanism of energy conservation reform is analyzed systematically and the size of externality is calculated, which proves the feasibility of government using economic incentives to promote energy conservation reform. On this basis, an evolutionary game model of the government's incentive to the EPC contract subject is constructed, and the replication dynamic equation is established for the strategy selection of each subject obtained through analysis. Results show that the proportion of owners and ESCO choosing to carry out energy saving transformation increases with the expected return and the government's incentive strength, but the incentive fairness principle should be satisfied. Based on the perspective of sustainable development and maximization of social benefits, the government should increase the incentives appropriately, which can stimulate the enthusiasm of the EPC contract subject in energy conservation reform and is conducive to the market cultivation of the EPC mode.

Key words: existing civil buildings; energy efficiency renovations; EPC subjects' incentive; evolutionary game

实施既有民用建筑节能改造, 可以减少能源消耗, 减轻大气污染, 改善环境质量; 还可以改善居住和工作环境, 带动与节能相关的产业, 促进社会经济的发展^[1]. 由于既有民用建筑节能改造产生的部分环境收益、社会收益未能通过市场或价格体系反映出来^[2], 相关受体不会因此支付报酬, 节能行为所产生的社会效益大于实施者的私人收益, 即既有民用建筑节能改造具有显著的正

外部性^[3], 会导致该领域“市场失灵”. 若要达到更高的节能效果, 实现帕累托改进, 需要降低私人的节能成本, 这是市场力量所不能实现的^[4], 必须依靠政府的“有形之手”出台相应的经济激励政策, 将外部性收益内部化, 激发市场主体积极性, 促使其踊跃参与到既有民用建筑节能改造中来^[5].

目前, 学术界对既有民用建筑节能改造主体的相关研究主要聚焦于市场主体行为博弈、市场

收稿日期: 2018-11-07

修改稿日期: 2019-06-10

基金项目: 陕西省重点研发计划基金项目(2018ZDCXL-SF-03-04), 住建部软科学研究基金资助项目(2015R1010)

第一作者: 杨艳平(1975—), 女, 博士, 经济师, 研究方向为工程经济与管理. E-mail: yangyp@just.edu.cn

通讯作者: 王博俊(1969—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为工程经济与管理. E-mail: wbj7266996@163.com.

激励模式、契约关系治理等方面。邓建英^[6]等构建了政府和节能服务公司间的博弈模型,指出政府可以通过激励达到既有建筑节能改造市场资源的优化配置。Murphy^[7]等指出欧洲“政策领先”国家根据居住建筑节能改造市场发展特点制定了税收优惠、信息共享等经济激励政策,其中税收优惠是降低外部性影响的主要政策发展方向^[8]。Edoardo等^[9]评估了融资战略选择和采购程序对建筑改造结果的可能影响,以挖掘建筑节能改造市场的发展潜力。王星^[10]指出,多方参与主体利益需求的差异使得既有建筑节能改造市场发展需要采取协同激励机制,并从时间维、逻辑维和方法三个维度提出了协同激励路径优化方法。张印贤等^[11]在阐释协同激励有效性内涵的基础上,构建既有建筑节能改造市场主体协同激励有效性的评价指标体系,提出政策优化建议。王赬^[12]将节能改造管理过程从数量维度拓宽至质量维度,建立了约束节能服务企业和业主行为的质量保证契约^[12]。黄志辉等^[13]构建了一种基于合作和信任的关系契约,指出能够在解决节能服务企业融资困难的同时增加银行的投资效益。Dong Qian等^[14]设计了节能服务企业与用能单位之间的预测承诺契约,认为通过引入惩罚和承诺合同,可以在一定程度上消除不确定的能源节约对合同执行的影响。此外,也有学者对建筑节能改造外部性特征进行了定性分析。马兴能^[15]认为经济激励政策是将外部性进行“内部化”的有效手段;曹卫星等^[16]指出节能领域仅在市场机制调配下无法达到帕累托最优,需要政府通过宏观调控手段予以激励,从而有效引导市场机制发挥作用;尹波等^[17]分析了节能改造行为的外部性特征,提出利用行政及财政税收手段引导消除建筑节能外部性的政策措施。

合同能源管理(EPC)是业主委托节能服务公司(ESCO)进行既有建筑节能改造的主要方式,其中“节能效益分享型”合同是政府大力支持的EPC类型。政府是既有民用建筑节能改造外部性的主要受益者,该外部收益可作为EPC实施主体的业主和ESCO对政府的激励。同时,政府作为合同能源管理的委托方和行政管理方,应当制定相关政策以激励业主和ESCO等主体,提高其节能改造的积极性以适应市场优化配置的要求^[18];可见,政府、业主和ESCO各自的利益诉求、策略选择、努力程度及三者之间的协同激励效果决定着EPC实施的成败。

1 既有民用建筑节能改造外部性分析

如图1所示,假设区间 $M-N$ 为我国具有节能改造潜力的既有民用建筑总保有量,横坐标上任意一点 Q_X 到 M 的区间 Q_X-M 代表不进行节能改造的既有民用建筑数量,到 N 的区间 Q_X-N 表示实施节能改造的既有民用建筑数量。曲线 $f(P_N)$ 和 $f(S_N)$ 分别表示不进行节能改造的私人边际收益和社会边际收益,此时 $f(S_N) < f(P_N)$,说明不进行节能改造具有负的外部性; $f(P_R)$ 和 $f(S_R)$ 分别为实施节能改造时的私人边际收益和社会边际收益,此时 $f(S_R) > f(P_R)$,说明进行节能改造具有正的外部性。在不考虑节能外部性的情况下,通过市场“无形之手”进行调控的节能改造建筑数量在 $f(P_N)$ 和 $f(P_R)$ 的交点 F 达到均衡,此时进行节能改造的既有民用建筑数量为区间 Q_F-N ;在考虑节能外部性条件下,按社会资源最优配置原则,均衡点在社会边际收益曲线 $f(S_N)$ 和 $f(S_R)$ 的交点 E 处,此时实施节能改造的既有民用建筑数量区间为 Q_E-N 。显然,在市场调控和社会资源最优配置两种情景下进行节能改造的既有民用建筑相差了 Q_E-Q_F 区间的数量;要想达到社会资源最优配置的既有民用建筑节能改造数量,需要将 Q_F 点左移到 Q_E 点,在此过程中各方收益数值变动可分别由式(1)~(3)表示。

如果 Q_X 点从 Q_F 点左移到 Q_E 点,增加的节能改造建筑数量为 $Q_E \sim Q_F$,政府增加的正外部性边际收益为图中交点 $F-4-E-2$ 包围的面积 S_{F4E2} ,同时减少了图中 $3-F-1-E$ 包围的面积为 S_{3F1E} 的负外部收益;政府总计获得的外部性边际收益为

$$\begin{aligned} F(W) &= S_{F4E2} + S_{3F1E} \\ &= \int_{Q_E}^{Q_F} [f(S_R) - f(P_R)] dQ + \int_{Q_E}^{Q_F} [f(P_N) - f(S_N)] dQ \end{aligned} \quad (1)$$

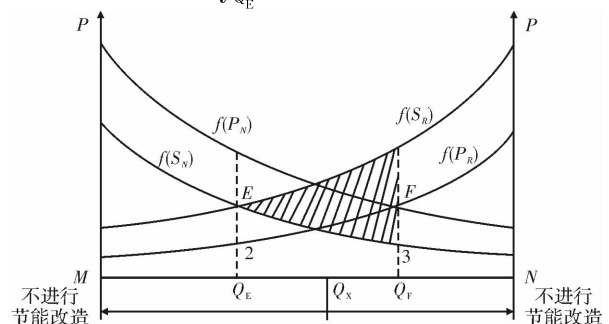


图1 有民用建筑节能改造外部性机理

Fig. 1 The externality mechanism of existing civil building energy conservation renovation

而实施节能改造的业主方(含 ESCO)需要增加节能改造成本 $I(o)$ 为图中点 F-1~E-2 包围的面积 S_{F1E2} .

$$I(o) = S_{F1E2} = \int_{Q_E}^{Q_F} [f(P_N) - f(P_R)] dQ \quad (2)$$

若政府对业主增加的节能改造成本 $I(o)$ 以等额补偿的方式进行激励,则政府在进行激励后剩余的正外部性收益为

$$F(W) - I(o) = \int_{Q_E}^{Q_F} [f(S_R) - f(S_N)] dQ = S_{E3F4} \quad (3)$$

该剩余的正外部性收益为图 1 中阴影部分的面积.

通过分析可知,政府通过经济补偿的方式对节能改造的实施者业主和 ESCO 进行激励,不仅可以利用经济政策将外部效益内部化,优化社会资源配置,实现帕累托最优,政府的正外部收益还可以剩余 S_{E3F4} . 上述分析证明了政府用经济激励方式来促进节能改造是可行的,能够达到协同共赢的良好效果.

2 EPC 主体演化博弈激励机制设计

由于既有民用建筑节能改造正外部性的存在导致市场失灵,需要由政府通过管理措施进行诱导,激励 EPC 合同主体的业主和 ESCO 群体提高努力程度,将市场均衡条件下的节能改造建筑数量从 Q_F 点左移到 Q_E 点,达到社会资源优化配置.

首先,政府在推进 EPC 的实施过程中,不仅要通过激励措施来提高业主和 ESCO 的努力程度,还要对他们的执行效果进行监督.其次,作为既有建筑节能改造 EPC 模式的主要参与者,业主和 ESCO 受社会比较心理^[19]的影响,其不仅关心自身所获得的收益的大小,还会关心收益的公平性,导致其决策行为具有有限理性.再者,政府与业主和 ESCO 之间存在信息不对称的逆向选择问题,容易诱发双边道德风险^[20].另外,业主对节能改造的认知和接受程度差,部分业主存在着“用能反弹”^[21]等“行为不节能”^[22]现象,以及 ESCO 出现“偷懒”和机会主义行为等,都会对 EPC 模式的实施带来负面影响.

政府和 EPC 合同主体的上述行为特征,符合演化博弈的约束条件,本文选择演化博弈模型来分析政府对 EPC 合同主体的激励以及各方的策略选择,模型中引进收益共享系数,以消除激励过程中各主体的不公平认知带来的负面影响.

2.1 EPC 主体演化博弈激励模型假设与参数设计

2.1.1 模型假设

(1)业主和 ESCO 的目标一致,在政府的激励契约约束下,一旦业主确定实施节能改造,会与 ESCO 签订 EPC 合同,促使 ESCO 完成合同目标;因此,业主与 ESCO 选择节能改造具有行为上的一致性.

(2)业主和 ESCO 是有限理性的群体,在博弈初期均追求收益最大化;但各主体同时又是具有社会认知以及学习能力的智能群体,能够在不断地观察、对比、总结中学习进步并调整自己的策略.

(3)政府在对业主和 ESCO 激励时,要考虑公平心理的影响,利用收益共享系数调整对双方激励力度的大小,提高激励效果,达到协同共赢的目的.

2.1.2 参数设计

假设没有外力作用,即政府不进行经济激励,业主和 ESCO 选择不节能改造,此时政府获得的正外部性收益为 F_g , 业主的收益为 R_o , ESCO 的收益为 S_c ; 当政府实施经济激励,业主和 ESCO 选择节能改造,则政府获得的正外部性收益为 $F_g + Z_g - C_i - C_g$, 业主的收益为 $R_o + Z_o + P_o - C_o$, ESCO 的收益为 $S_c + Z_c + P_c - C_c$. 其中,业主和 ESCO 选择节能改造后为政府增加的正外部收益为 Z_g , 业主获得的节能增量收益为 Z_o , ESCO 获得的增量收益为 Z_c . 业主和 ESCO 选择节能改造必然要增加相应的成本,分别为 C_o 和 C_c ; 政府为激励业主进行节能改造所付出的激励活动的推广、宣传、管理等成本为 C_i , 支出的直接经济激励金额为 C_g , 业主和 ESCO 因选择节能改造而获得政府的激励分别为 $P_o = (1 - \alpha)C_g$, $P_c = \alpha C_g$; α 为 ESCO 获得政府经济激励的收益共享系数. 如果政府不激励,而业主和 ESCO 主动选择节能改造时,给政府带来的外部性收益为 H_g , 显然 $H_g \leq Z_g$. 政府给予的经济激励是分期分批实施的,一般情况下,在确定了节能改造方案后,先按预估总额的一定比例支付部分激励款,剩余的激励资金需要在项目结束后验证节能改造成果再支付. 当政府选择激励,而业主和 ESCO 却没有选择节能改造时,政府只损失激励活动的推广、宣传、管理等成本 C_i , 不会支付经济激励金额 C_g .

政府在博弈过程中可以选择激励和不激励两种策略,选择激励的比例为 Y , 选择不激励的比例为 $(1 - Y)$; 业主和 ESCO 群体选择实施节能改造的比例为 X , 拒绝实施节能改造的比例为 $(1 - X)$. 构建政府与业主及 ESCO 的演化博弈模型,其博弈支付矩阵如表 1.

表1 政府与合同主体的博弈支付矩阵

Tab. 1 The game payment matrix between government and the subject of contract

EPC 合同主体		政府	
		激励(Y)	不激励($1-Y$)
业主	节改(X)	$(R_o + Z_o + P_o - C_o, F_g + Z_g - C_t - C_g)$	$(R_o + Z_o - C_o, F_g + H_g)$
	不节改($1-X$)	$(R_o, F_g - C_t)$	(R_o, F_g)
ESCO	节改(X)	$(S_c + Z_c + P_c - C_c, F_g + Z_g - C_t - C_g)$	$(S_c + Z_c - C_c, F_g + H_g)$
	不节改($1-X$)	$(S_c, F_g - C_t)$	(S_c, F_g)

2.2 EPC 主体演化博弈策略选择

(1) 业主的策略选择

业主群体中, 选择节能改造和不节能改造的比例分别为 X 和 $1-X$, 对应的收益效用期望值为 $E(U_o^e)$ 和 $E(U_o^n)$, 业主群体收益效用期望平均值为 $E(U_o)$, 分别如式(4)~(6)所示。

$$E(U_o^e) = Y(R_o + Z_o + P_o - C_o) + (1-Y)(R_o + Z_o - C_o) \quad (4)$$

$$E(U_o^n) = YR_o + (1-Y)R_o \quad (5)$$

$$E(U_o) = XE(U_o^e) + (1-X)E(U_o^n) \\ = X(YP_o + Z_o - C_o) + R_o \quad (6)$$

业主群体策略选择比例的复制动态方程为

$$F(X) = \frac{dx}{dt} = X[E(U_o^e) - E(U_o)] \\ = X(1-X)(YP_o + Z_o - C_o) \quad (7)$$

对业主来说, 如果节能改造成本 C_o 小于增量收益 Z_o , 即 $Z_o - C_o > 0$ 时, $YP_o + Z_o - C_o$ 恒为正; 令 $F(X) = dx/dt = 0$, 则必有 $X(1-X) = 0$, 此时有 $X_1^* = 0$ 和 $X_2^* = 1$ 两个可能的稳态点; 由 $F'(X) = (1-2X)(YP_o + Z_o - C_o)$, 则 $F'(0) > 0$, $F'(1) < 0$, 则 $X_2^* = 1$ 为演化博弈稳定策略, 说明在 $Z_o - C_o > 0$ 的情况下, 业主会选择节能改造策略, 增加既有民用建筑节能改造数量。

如果节能改造成本 C_o 大于增量收益 Z_o , 即 $Z_o - C_o < 0$, 当 $YP_o + Z_o - C_o = 0$ 时, 有 $Y = -(Z_o - C_o)/P_o = (C_o - Z_o)/P_o$, 则 $F(X)$ 恒等于 0, 意味着所有 X 值都是稳态。当 $YP_o + Z_o - C_o \neq 0$, 令 $F(X) = dx/dt = 0$, 必有 $X(1-X) = 0$, 则 $X_1^* = 0$ 和 $X_2^* = 1$ 为两个可能的稳态点, 此时可分为两种情况:

其一, 当 $YP_o + Z_o - C_o > 0$, 即 $Y > (C_o - Z_o)/P_o$ 时, 有 $F'(0) > 0$, $F'(1) < 0$, $X_2^* = 1$ 为演化博弈稳定策略, 即政府选择激励的比例 $Y > (C_o - Z_o)/P_o$ 时, 业主会选择节能改造策略, 显然, P_o 越大越容易满足这一条件。

其二, 当 $YP_o + Z_o - C_o < 0$, 即 $Y < (C_o - Z_o)/P_o$ 时, 由 $F'(X) = (1-2X)(YP_o + Z_o - C_o)$ 可知, $F'(0) < 0$, $F'(1) > 0$, $X_1^* = 0$ 是进化稳定策略, 就是说当政府选择激励的比例 $Y < (C_o - Z_o)/P_o$ 时,

业主会选择不节能改造策略, P_o 越小越容易满足这一条件。业主的演化博弈复制动态相位如图 2(a)、(b)、(c)、(d) 所示。

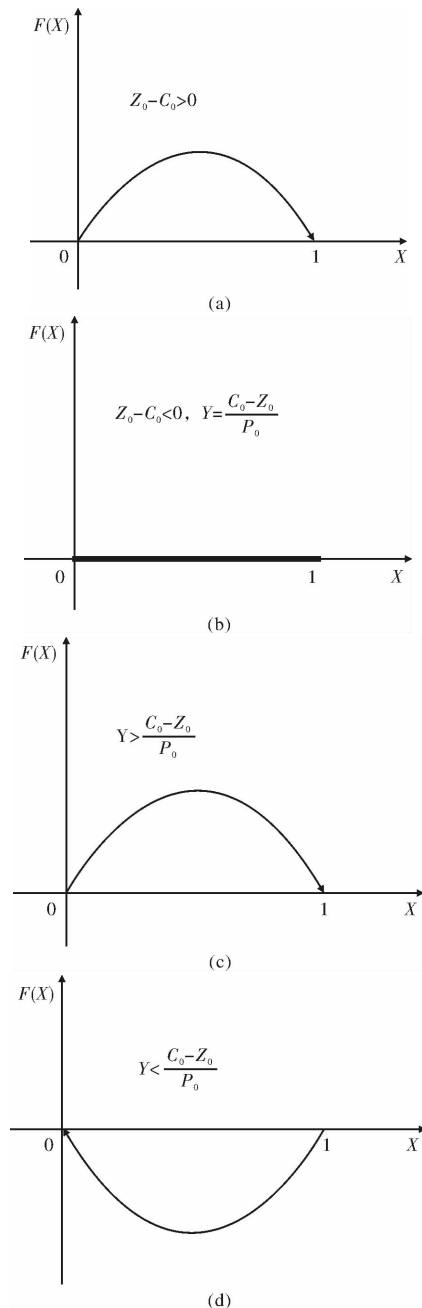


图2 业主的演化博弈复制动态相位图

Fig. 2 The owner's evolutionary game duplicates the dynamic phase diagram

(2)ESCO 的策略选择

ESCO 群体中,选择节能改造和不节能改造的比例同样为 X 和 $1-X$,对应收益效用期望值为 $E(U_c^e)$ 和 $E(U_c^n)$,ESCO 群体收益效用期望平均值为 $E(U_c)$,如式(8)~(10)所示.

$$E(U_c^e) = Y(S_c + Z_c + P_c - C_c) + (1-Y)(S_c + Z_c - C_c) \quad (8)$$

$$E(U_c^n) = Y S_c + (1-Y) S_c \quad (9)$$

$$E(U_c) = X E(U_c^e) + (1-X) E(U_c^n) \\ = X(Y P_c + Z_c - C_c) + S_c \quad (10)$$

ESCO 群体策略选择比例的复制动态方程为

$$F(X) = \frac{dx}{dt} = X[E(U_c^e) - E(U_c)] \\ = X(1-X)(Y P_c + Z_c - C_c) \quad (11)$$

对于 ESCO 来说,如果节能改造成本 C_c 小于增量收益 Z_c ,即 $Z_c - C_c > 0$, $Y P_c + Z_c - C_c$ 恒大于 0,令 $F(X) = dx/dt = 0$,则 $X(1-X) = 0$,得到 $X_1^* = 0$ 和 $X_2^* = 1$ 两个可能的稳态点.由 $F'(X) = (1-2X)(Y P_c + Z_c - C_c)$,则 $F'(0) > 0$, $F'(1) < 0$,可知 $X_2^* = 1$ 为演化博弈稳定策略,也就是在 $Z_c - C_c > 0$ 的情况下,ESCO 会跟随业主选择节能改造策略.

如果 $Y P_c + Z_c - C_c = 0$,即 $Y = (C_c - Z_c)/P_c$,则 $F(X)$ 恒等于 0,所有的 X 值都是稳态.

当 $Y P_c + Z_c - C_c \neq 0$,令 $F(X) = dx/dt = 0$,必有 $X(1-X) = 0$,则有 $X_1^* = 0$ 和 $X_2^* = 1$ 这两个可能的稳态点.此时可分为两种情况:

当 $Y P_c + Z_c - C_c > 0$,即 $Y > (C_c - Z_c)/P_c$ 时,有 $F'(0) > 0$, $F'(1) < 0$,则 $X_2^* = 1$ 为稳定策略,即政府选择激励的比例 $Y > (C_c - Z_c)/P_c$ 时,ESCO 会选择节能改造策略.

当 $Y P_c + Z_c - C_c < 0$,即 $Y < (C_c - Z_c)/P_c$ 时, $F'(0) < 0$, $F'(1) > 0$, $X_1^* = 0$ 是进化稳定策略,即政府选择激励的比例 $Y < (C_c - Z_c)/P_c$ 时,ESCO 会选择不节能改造策略.ESCO 演化博弈复制动态相位图见图 3(a)、(b)、(c)、(d).

由上述分析可知,当业主和 ESCO 选择节能改造时要求.

$$Z_o + P_o - C_o > 0 \quad (12)$$

$$Z_c + P_c - C_c > 0 \quad (13)$$

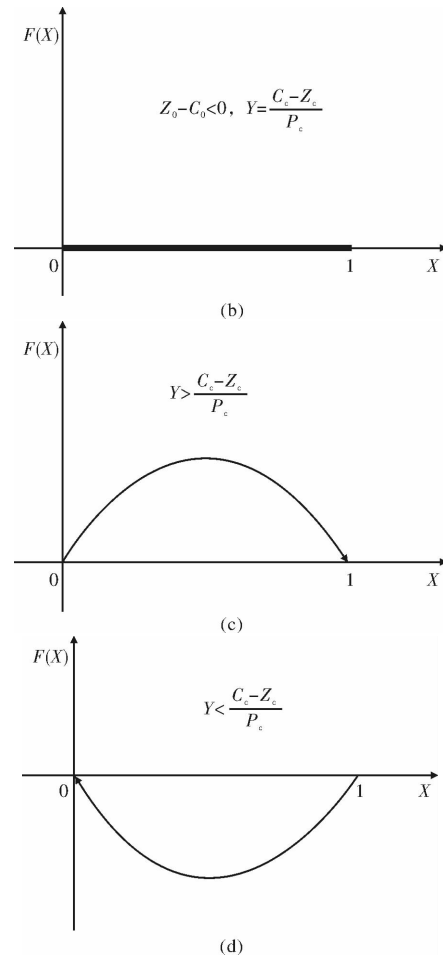
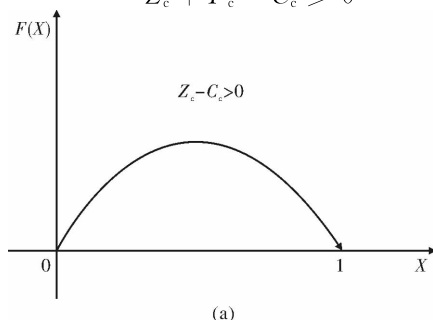


图3 ESCO 的演化博弈复制动态相位图

Fig. 3 The ESCO's evolutionary game duplication the dynamic phase diagram

将 $P_o = (1-\alpha)C_g$, $P_c = \alpha C_g$ 分别代入式(12)和(13),可以求出满足业主和 ESCO 同时选择节能改造的收益共享系数的可行阈为

(3)政府的策略选择

$$\frac{C_c - Z_c}{C_g} < \alpha < 1 - \frac{C_o - Z_o}{C_g} \quad (14)$$

各地方政府选择选择激励和不激励的比例分别为 Y 和 $1-Y$,对应的收益效用期望值则为 $E(U_g^e)$ 和 $E(U_g^n)$,地方政府群体收益效用期望平均值为 $E(U_g)$,如式(15)~(17).

$$E(U_g^e) = X(F_g + Z_g - C_t - C_g) + (1-X)(F_g - C_t) \quad (15)$$

$$E(U_g^n) = X(F_g + H_g) + (1-X)F_g \quad (16)$$

$$E(U_g) = Y E(U_g^e) + (1-Y) E(U_g^n) \\ = XY Z_g - XY H_g - XY C_g - Y C_t + X H_g + F_g \quad (17)$$

政府群体策略选择比例的复制动态方程为

$$F(Y) = \frac{dY}{dt} = Y[E(U_g^e) - E(U_g)] \\ = Y(1-Y)(X(Z_g - H_g - C_g) - C_t) \quad (18)$$

令 $F(Y)=0$, 当 $X(Z_g-H_g-C_g)-C_t=0$, 即 $X=C_t/(Z_g-H_g-C_g)$ 时, 则所有的 Y 值都是稳态点; 当 $X(Z_g-H_g-C_g)-C_t \neq 0$ 时, 分为两种情况.

当 $X(Z_g-H_g-C_g)-C_t > 0$, 即 $X > C_t/(Z_g-H_g-C_g)$ 时, $F(0) > 0$, $F(1) < 0$, 则 $Y^*=1$ 是稳态点, 即业主和 ESCO 选择节能改造的比例大于 $C_t/(Z_g-H_g-C_g)$ 时, 政府选择激励; 当 $X < C_t/(Z_g-H_g-C_g)$ 时, $F(0) < 0$, $F(1) > 0$, 则 $Y^*=0$ 是稳态点, 即业主和 ESCO 选择节能改造的比例小于 $C_t/(Z_g-H_g-C_g)$ 时, 政府选择不激励.

更进一步分析, 由于 $X \leq 1$, 当 $C_t/(Z_g-H_g-C_g) > 1$ 时, 必有 $X < C_t/(Z_g-H_g-C_g)$, 即 $F(0) < 0$ 恒成立, 说明当政府激励活动的推广、宣传、管理等成本 C_t 高于 $(Z_g-H_g-C_g)$ 时, 同样会选择选择不激励. 政府的演化博弈复制动态相位图如图 4(a)、(b), 政府、业主及 ESCO 的复制动态关系和稳定趋势见图 5.

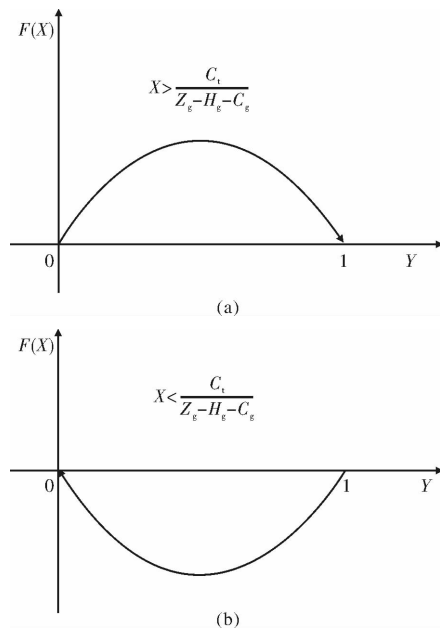


图 4 政府的演化博弈复制动态相位图

Fig. 4 The government's evolutionary game duplication of the dynamic phase diagram

2.3 EPC 主体演化博弈模型解析与调整

从图 5 可知, 稳定进化策略点为 $(0, 0)$ 和 $(1, 1)$, 但演化博弈策略究竟收敛于哪一点, 决定于博弈的初始条件. 以 $X = \frac{C_t}{Z_g - H_g - C_g}$, $Y_o = \frac{C_o - Z_o}{P_o}$ 或 $Y_c = \frac{C_c - Z_c}{P_c}$ 为基线, 将演化博弈策略选择范围划分成 4 个区域, 当 X 和 Y 值均小于基线时, 策略必然收敛并稳定于左下角区域的 $(0, 0)$ 点, 即(不节能改造, 不激励); 当 X 和 Y 值均大于基线时, 策略必然收敛并稳定于右上角区域

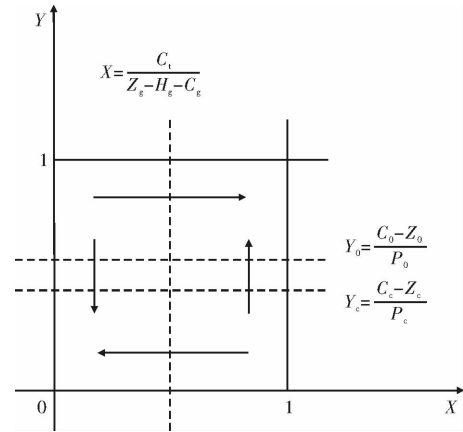


图 5 政府、业主及 ESCO 的复制动态关系和稳定趋势

Fig. 5 Dynamic relationship and stable trend of replication between government owners and ESCO

的 $(1, 1)$ 点, 其状态则为(节能改造, 激励). 如果政府对业主激励的比例与对 ESCO 激励的比例不相等, 即 $Y_o \neq Y_c$ 时, 则基线 $Y_o = \frac{C_o - Z_o}{P_o}$ 与 $Y_c = \frac{C_c - Z_c}{P_c}$ 分离, 会导致业主和 ESCO 选择节能改造或不节能改造策略不能协同一致, 不利于 EPC 模式的市场培育推广.

为了使业主和 ESCO 在选择策略时做到协同一致, 则必须满足 $Y_o = Y_c$, 使基线 $Y_o = \frac{C_o - Z_o}{P_o}$ 与 $Y_c = \frac{C_c - Z_c}{P_c}$ 重合, 即公式(19)所示的条件.

$$\frac{C_o - Z_o}{P_o} = \frac{C_c - Z_c}{P_c} \quad (19)$$

将 $P_o = (1 - \alpha)C_g$, $P_c = \alpha C_g$ 分别代入式(19), 计算出业主和 ESCO 获得政府激励的收益共享系数为

$$\alpha = \frac{C_c - Z_c}{C_c - Z_c + C_o - Z_o} \quad (20)$$

式(20)要求政府在对业主和 ESCO 进行激励时要合理分配激励额, 不仅要满足收益共享系数可行的要求, 还要满足公平性要求, 使业主和 ESCO 能够同时选择节能改造策略, 达到协同激励的目的.

3 实证分析

3.1 实证背景

苏州某酒店建于 2005 年, 2008 年开张营业. 酒店有客房 428 套, 空调面积率 76.6%. 2016 年进行节能改造, 约定合同日历工期从 2016 年 6 月 20 日到 12 月 20 日共 6 个月, 2017 年元旦开业.

3.2 演化博弈分析

按酒店的节能改造方案, 预估年节能量 3.96×10^6 kWh, 年节约标准煤 1 280 t, 合同分享

期为 2a，节能收益共享系数 $\gamma = 0.64$ 。结合上述政府的相关文件，估算政府的激励成本与年外部性收益以及业主与 ESCO 在合同分享期内的各项费用，见表 2。

将表中数据代入式 (20) 计算政府激励部分的收益共享系数。

$$\begin{aligned}\alpha &= (C_c - Z_c)/(C_c - Z_c + C_o - Z_o) \\ &= (362.3 - 266.2)/(362.3 - 266.2 \\ &\quad + 185.6 - 149.7) = 0.73.\end{aligned}$$

表 2 酒店节能改造各方预估费用(单位：万元)

Tab. 2 Estimated cost of energy saving renovation of hotel

主体名称	费用类别					备注
	收益/a		成本			
政府	F_g	Z_g	H_g	C_g	C_t	
	0	198.6	0	281.6	26.27	
业主	R_o	Z_o	P_o	C_o		
	0	149.7	76.03	185.6		$\alpha=0.73$
ESCO	S_c	Z_c	P_c	C_c		
	0	266.2	205.57	362.3		$\gamma=0.64$

合同分享期内业主的总增量收益 $Z_o = 149.7 \times 2 = 299.4$ (万元),ESCO 的总增量收益为 $Z_c = 266.2 \times 2 = 532.4$ (万元); 业主的成本 $C_o = 185.6$ (万元),ESCO 的成本 $C_c = 362.3$ (万元)。

则 EPC 主体策略选择如下:

业主: $Z_o - C_o = 299.4 - 185.6 > 0$, 选择节能改造;
ESCO: $Z_c - C_c = 532.4 - 362.3 > 0$, 选择节能改造。
政府策略为选择激励。

按照上述决策结果, 业主和 ESCO 在政府激励和监督下提高努力程度, 提前 1 个月顺利完成酒店节能改造工作。经过校核与验证, 改造后的年实际节能量为 5 558 470 kWh, 节能率为 39.45%; 年实际节约标准煤 1 561.15 t, 每年产生的环境外部性为 2 422 280 元, 均比预估值提高了 21.96%。整个节能改造过程中, 由政府激励监督, 业主和 ESCO 积极参与, 建立了良好的合作模式, 达到了多方共赢的目标。

4 结论

通过上述理论研究和实证分析, 得到如下结论:

(1) 业主和 ESCO 是有限理性的群体, 政府在对业主和 ESCO 激励时, 应当关注节能改造主体公平心理的影响; 利用收益共享系数调整对双方激励力度的大小, 激发业主实施节能改造的积极性, 提高激励效果, 达到协同共赢的目的。

(2) 对于业主和 ESCO 来说, 选择进行节能改造的比例随预期收益及政府的激励力度提高而提高, 但业主和 ESCO 应着眼于节能改造一次性投资长期受益的角度进行决策, 避免对节能改造决策造成误导。

再代入式 (14), 计算 α 的可行阈 $(C_c - Z_c)/C_g < \alpha < 1 - (C_o - Z_o)/C_g$ 为

$$(362.3 - 266.2)/281.6 < \alpha < 1 - (185.6 - 149.7)/281.6.$$

得到 $0.34 < \alpha < 0.87$, 显然 $\alpha = 0.73$ 在其可行阈范围, 取值有效。

计算业主和 ESCO 获得的政府激励的分配额。

$$P_o = (1 - 0.73) \times 281.6 = 76.03 \text{ (万元)}.$$

$$P_c = 0.73 \times 281.6 = 205.57 \text{ (万元)}.$$

(3) 对于政府来说, 不应以盈利为目的, 应立足于可持续发展及社会收益最大化的视角, 在 EPC 推广阶段加大激励力度, 将有利于建筑节能改造 EPC 模式的市场培育, 一旦形成良好的市场机制, 无论是节能技术还是管理水平都将得到提高, 业主和 ESCO 的节能成本必然降低, 可以获得更好的节能效果, 给政府带来更多的正外部性收益。

参考文献 References

[1] 卢双全. 建筑节能改造的外部性分析与激励政策[J]. 建筑经济, 2007(4):43-46.
LU Shuangquan. External analysis and incentive policy of building energy conservation renovation[J]. Construction Economy, 2007(4):43-46.

[2] 刘晓君, 赵琰, 赵翠芹. 既有商品住宅节能改造外部性及其测算研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(1):137-142.
LIU Xiaojun, ZHAO Yan, ZHAO Cuiqin. Study on externality and its calculation method of existing commercial residential buildings energy saving retrofit [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(1):137-142.

[3] 江汇, 赵景柱, 赵晓丽, 等. 中国火电行业环境外部性量化分析[J]. 中国电力, 2013, 46(7):126-132.
JIANG Hui, ZHAO Jingzhu, ZHAO Xiaoli, et al. Quantitative analysis on environmental externality of chinese thermal power industry [J]. Electric Power, 2013, 46(7):126-132.

[4] 丁淑英, 张清宇, 徐卫国, 等. 电力生产环境成本计算方法的研究[J]. 热力发电, 2007, 36(2):1-4.
DING Shuying, ZHANG Qingyu, XU Weiguo, et al.

- Study on calculation method of environmental costs for power generation [J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(2):1-4.
- [5] 王楠楠,李彦斌. 北方既有建筑节能改造外部性研究[J]. 经济视角, 2013, 71(9):164-166.
WANG Nanan, LI Yanbin. Research on externality of energy conservation renovation of existing buildings in north China [J]. Economic Vision, 2013, 71(9):164-166.
- [6] 邓建英,兰秋军. 博弈视角下政府对建筑节能服务机构的监管效能分析[J]. 系统工程, 2015, 33(12):96-100.
DENG Jianying, LAN Qiujun. Game of government-regulated building energy efficiency service from the perspective of efficiency [J]. Systems Engineering, 2015, 33(12):96-100.
- [7] MURPHY L. The policy instruments of European front-runners: effective for saving energy in existing dwellings? [J]. Energy Efficiency, 2013, 7(2):285-301.
- [8] AZIZI N S M, WILKINSON S, FASSMAN E. Management practice to achieve energy-efficient performance of green buildings in New Zealand[J]. Architectural Engineering and Design Management, 2014, 10(1):25-39.
- [9] EDOARDO B, SAHIN O, RODNEY A S, et al. Role of financial mechanisms for accelerating the rate of water and energy efficiency retrofits in Australian public buildings: Hybrid Bayesian Network and System Dynamics Modeling approach [J]. Applied Energy, 2018, 210:409-419.
- [10] 王星,郭汉丁,陶凯,等. 既有建筑节能改造市场发展协同激励路径优化研究综述[J]. 建筑经济, 2016, 37(7):100-104.
WANG Xing, GUO Handing, TAO Kai, et al. A literature review on synergy incentive path optimization of energy-saving renovation market development in existing building [J]. Construction Economy, 2016, 37(7):100-104.
- [11] 张印贤,王星,陶凯,等. 既有建筑节能改造市场发展协同激励有效性评价[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(9):69-76.
ZHANG Yinxian, WANG Xing, TAO Kai, et al. Evaluation of synergy incentive effectiveness of energy-saving renovation market development in existing building [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2017, 34(9):69-76.
- [12] 王颀. 合同能源管理中的质量保证契约研究[J]. 科技管理研究, 2016, 36(7):252-255.
WANG Xian. Research on quality assurance contract of energy performance contracting [J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(7):252-255.
- [13] 黄志烨,李桂君,汪涛. 双边道德风险下中小节能服务企业与企业关系契约模型[J]. 中国管理科学, 2016, 24(8):10-17.
HUANG Zhiye, LI Guijun, WANG Tao. Relational contract between small and medium-sized energy service companies and banks under double moral hazard [J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(8):10-17.
- [14] QIAN Dong, GUO Jue. Research on the energy-saving and revenue sharing strategy of ESCOs under the uncertainty of the value of Energy Performance Contracting Projects [J]. Energy Policy, 2014, 73(6):710-721.
- [15] 马兴能,郭汉丁,尚伶. 基于外部性的既有建筑节能改造业主进化博弈行为分析[J]. 工程管理学报, 2011, 25(6):644-648.
MA Xingneng, GUO Handing, SHANG Ling. Evolutionary game analysis of owners behavior based on externality in energy efficiency renovation of existing buildings [J]. Journal of Engineering Management, 2011, 25(6):644-648.
- [16] 曹卫星,熊焕焕,王晋宝. 基于建筑节能外部性的激励契约设计[J]. 管理观察, 2016(35):43-45.
CAO Weixing, XIONG Huanhuan, WANG Jinbao. Incentive contract design based on the externality of building energy conservation [J]. Management Observer, 2016(35):43-45.
- [17] 尹波,刘应宗. 建筑节能领域市场失灵的外部经济性分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2005, 22(4):65-68.
YIN Bo, LIU Yingzong. Economic externality analysis of market failure in the domain of energy efficiency in buildings [J]. Journal of Wuhan Urban Construction Institute (Urban Science), 2005, 22(4):65-68.
- [18] STREIMIKIENE D, KLEVAS V, BUBELIENE J. Use of EU structural funds for sustainable energy development in new EU member states [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6):1167-1187.
- [19] TECK H H, COLIN F C, CHONG J K. Self-tuning experience weighted attraction learning in games [J]. Journal of Economic Theory, 2007, 133(1):177-198.
- [20] 杨艳平,罗福周,王博俊,等. 工程分包模式下质量优化收益共享群体激励演化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(5):740-746.
YANG Yanping, LUO Fuzhou, WANG Bojun, et al. Research on the evolution of the quality optimization revenue sharing group incentive under the engineering subcontract mode [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(5):740-746.
- [21] MA Guofeng, LIN Jing, LI Nan, et al. Cross-cultural assessment of the effectiveness of eco-feedback in building energy conservation [J]. Energy and Buildings, 2017, 134(1):329-338.
- [22] 李志成. 合同能源管理中政府对用能单位的经济激励[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(5):749-753.
LI Zhicheng. Government's economic incentive to energy-using units in energy performance contracting [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2013, 35(5):749-753.

(编辑 沈波)