

基于节能服务的嵌入式低碳服务机制研究

吴界朋, 周艳菊, 周雄伟

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘 要 碳排放依赖型企业在引入嵌入式低碳服务 (embedded low-carbon service) 时往往面临着低碳节能水平信息不对称带来的项目风险. 鉴于此, 在低碳经济背景下, 本文考虑了低碳服务商 (low-carbon service provider) 的投资水平和低碳节能能力不可观测情形嵌入式低碳服务参与主体间最优激励契约的设计问题. 同时对该情形下的最优激励契约进行了分析. 应用嵌入度刻画嵌入式低碳服务参与主体间的价值共同度, 分析了嵌入度对最优激励契约的影响. 研究表明, 低水平的嵌入度将使得低碳服务商承担更大的项目风险, 同时形成需要低碳服务商每期预付节能保证金的合同模式. 高水平的嵌入度能促进嵌入式低碳服务的低碳减排效率.

关键词 低碳服务提供商; 嵌入式低碳服务; 嵌入度; 低碳减排

Research on embedded low-carbon service mechanism based on energy saving service

WU Jiepeng, ZHOU Yanju, ZHOU Xiongwei

(School of Business, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract By introducing embedded low-carbon services, carbon emission-dependent enterprises are often faced the project risk of low-carbon energy saving level information asymmetry. In view of this, this paper considers the investment level of low carbon service provider (LCSP) and the design of the optimal incentive contract between embedded low-carbon service participants with unobservable low-carbon energy saving capabilities under the background of low-carbon economy. In the meantime, by analyzing the optimal incentive contracts in this situation, we introduce “embedding degree” to describe the common value of the embedded low-carbon service participants. The influence of the embedding degree on the optimal incentive contracts is analyzed. The research shows that low level of embedding degree will lead to a larger project risk for low carbon service providers and a contract mode that requires the low carbon service providers to advance the deposit on each period. High level of embedding degree can promote low carbon emission reduction efficiency of embedded low-carbon services.

Keywords embedded low-carbon service; low-carbon-service provider; embedding degree; carbon emission reduction

1 引言

低碳经济环境的建立, 促使企业生产运营必须向着低消耗、低排放、高效率的模式发展, 以实现碳排放减少以及经济的低碳化^[1]. 在这样的背景下, 企业生产运营面临着巨大的减排压力. 众多企业基于生产与服务的专注以及低碳技术的匮乏, 产生了对低碳减排服务的需求. 由此, 具有低成本、专业性、高效性的嵌入式

收稿日期: 2017-07-19

作者简介: 吴界朋 (1989–), 男, 四川成都人, 硕士, 研究方向: 低碳供应链, 合同能源管理, E-mail: wujpmse@163.com; 周艳菊 (1972–), 女, 湖南湘潭人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 物流与供应链管理, 风险管理, 优化决策.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (71431006); 国家自然科学基金面上项目 (71171201, 71471178)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Key Program)(71431006); National Natural Science Foundation of China (General Program) (71171201, 71471178)

中文引用格式: 吴界朋, 周艳菊, 周雄伟. 基于节能服务的嵌入式低碳服务机制研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(10): 2512–2525.

英文引用格式: Wu J P, Zhou Y J, Zhou X W. Research on embedded low-carbon service mechanism based on energy saving service[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(10): 2512–2525.

低碳服务逐渐被企业界所关注, 如宝钢集团节能降耗项目、富士康集团低碳节能项目等。

所谓嵌入式低碳服务, 就是低碳服务提供商以业务嵌入与资金投入的方式融入到碳排放依赖型企业的运营环境中, 为其提供低碳减排服务的一种服务模式^[2]。在这种服务模式下, 低碳减排作为一项服务被提供, 碳排放依赖型企业引入嵌入式低碳减排活动获得了碳排放权。嵌入式低碳服务源于嵌入式服务概念的拓展, 强调低碳服务提供商(嵌入式低碳服务提供方, 简称低碳服务商)的作用, 嵌入用户的运营环境, 与用户亲密合作, 服务融合于用户自身业务运营中。

同时, 嵌入式低碳服务是对在低碳经济、政府碳限额、市场碳交易机制下的合同能源管理(EPC, energy performance contracting)的拓展: 服务方式和碳排放权问题的拓展。服务方式表现为, 嵌入式低碳服务模式下, 低碳服务提供商不仅提供节能服务来实现碳减排, 还可以为碳排放依赖型企业提供直接碳减排服务, 即技术性低碳减排服务, 如技术性降低产品碳排放强度。而碳排放权的拓展, 在于碳排放限额与交易机制下, 低碳节能服务不仅实现了能源的节约, 还实现了碳排放权的节约, 而传统合同能源管理仅仅关注于能源的节约。因此, 嵌入式低碳服务的提供, 极大拓宽了企业可实现的减排水平与收益来源(特别是供电业、水泥行业等)。统计数据显示, 2014 年我国节能服务产业总产值从 2013 年 2155.62 亿元增长到 2650.37 亿元, 增幅为 22.95%; 其中合同能源管理投资从 2013 年 742.32 亿元增长到 958.76 亿元, 增幅为 29.16%, 形成年节能能力 2996.15 万吨标准煤, 减排二氧化碳 7490.38 万吨。由此可见, 嵌入式低碳服务, 特别是基于节能服务的嵌入式低碳服务具有广阔的服务市场, 关系着节能服务产业的实现效率。

低碳服务提供商基于嵌入式低碳服务的收益主要来源于客户企业对嵌入式低碳服务项目收益的分享, 这使得需求企业的低碳项目风险向低碳服务提供商转移。其风险主要来源于低碳服务项目外部不可控的收益波动性(如能源价格、碳排放权价格)及企业自身运营的不稳定性(如客户企业生产的波动、低碳服务提供商技术水平的可靠性)。而这些风险都将使得低碳服务项目效益低于预期。不同收益分享模式意味着嵌入式低碳服务参与主体的不同风险承担, 这也促使嵌入式低碳服务参与主体缔约关系有着不同的融合程度, 对低碳减排项目有着不同的价值关注。

嵌入式低碳服务是低碳服务提供商的低碳减排活动与企业的生产运营业务相融合的价值过程, 其业务融合程度和低碳减排效益认可水平影响着嵌入式低碳服务的绩效实现。因此, 为考察嵌入式低碳服务参与主体的关系特征与低碳效益关注, 本文引入嵌入度的概念。所谓嵌入度, 是指嵌入式低碳服务参与主体关于嵌入式低碳服务项目在业务融合、项目价值关注上的一致性水平或共同程度。

为此, 关注与研究嵌入式低碳服务, 特别是基于节能服务的嵌入式低碳服务, 对企业实现低碳减排以及低碳服务产业的发展具有重要的经济价值。本文拟回答以下几方面问题: 1) 不同信息情形下最优激励契约的差异; 2) 嵌入度与最优激励契约的关系; 3) 嵌入度对嵌入式低碳服务参与主体收益结构的影响; 4) 嵌入度与嵌入式低碳服务的低碳减排效率的关系。

当前学术界对于嵌入式低碳服务的关注与研究尚处于初步阶段, 缺乏嵌入式低碳服务的理论框架。而关于嵌入式低碳服务的研究主要围绕着合同能源管理。对合同能源管理的现有研究主要应用定性分析和描述性分析^[3-5], 主要集中在 EPC 商业模式^[6,7]、EPC 应用与发展^[8-10]、EPC 运作关键因素^[11]、EPC 融资^[12]等角度的研究。其中, 关于 EPC 节能效益分配机制方面的研究, Qian 和 Guo 构建了节能服务商与用能组织之间的收益共享讨价还价模型, 分析了能源价格、风险调整贴现率和意外事故对服务提供商讨价还价战略的影响^[13]。Zhang 等设计了中国房地产行业合同能源管理的框架, 通过风险共担将绿色技术转变为经济利润^[14]。Deng 等研究了成本节约不确定下的 EPC 项目保证性设计^[15]。由于 EPC 项目自身的风险, 使得项目回收资金的不确定性, 进而削弱了 EPC 项目参与主体的缔约动力。尚天成和潘珍妮针对 EPC 节能量的不确定性与投资汇报的不确定性提出了 EPC 项目的 B-S 评价模型, 以弥补传统评价方法的不足^[16]。Lee 等对 EPC 项目的风险进行了研究, 探讨了项目内在的关键风险, 并采取实际措施来使合同能源管理更广泛的被采纳^[17]。以上研究中, 关于嵌入式低碳服务的相关研究中较少应用博弈模型进行定量研究, 关于嵌入式节能服务的契约设计的文献也是缺乏的, 特别是对信息不对称情形下嵌入式服务的契约设计。同时从现有的研究也可以发现, 关于嵌入式服务的嵌入度对企业主体决策的影响关注亦较少。

鉴于此, 本文考虑碳限额与交易体系下, 嵌入式低碳服务参与主体的最优激励契约问题, 构建节能能力不同信息情形下的嵌入式低碳服务缔约模型, 研究该模式下的最优激励合同、低碳服务提供商的最优投资水平, 以及嵌入式低碳服务参与主体间的最佳业务与价值融合关系. 本文的主要贡献有三点, 一是设计了节能能力信息不对称情形下嵌入式低碳服务最优线性激励契约. 二是引入了嵌入度的指标对嵌入式低碳服务参与主体关于业务与价值融合关系的刻画. 三是探究了嵌入度对嵌入式低碳服务低碳减排效率的影响.

本文接下来的结构安排为: 第 2 节对问题进行描述, 提出模型相关假设; 第 3 节建立各情形下嵌入式低碳服务参与主体优化问题模型, 设计最优线性激励契约; 第 4 节对最优激励契约进行因素分析; 第 5 节进行全文总结展望.

2 问题描述与模型假设

考虑低碳服务提供商以业务嵌入的方式为制造商提供节能型减排服务. 本文假设制造商是风险中性的, 低碳服务提供商是风险规避的. 低碳服务提供商与制造商的决策过程是一个 Stackberg 博弈过程:

第一阶段: 契约设计, 制造商向低碳服务提供商提供一系列包括收益共享比例和固定节能服务费的节能收益共享契约选项.

第二阶段: 契约选择, 低碳服务提供商基于其节能减排的能力选择对应契约. 若低碳服务提供商在所选契约下的效用不低于其保留效用, 则接受该契约, 否则拒绝, 博弈结束.

第三阶段: 节能服务项目投资运营, 基于所选契约低碳服务提供商为制造商提供嵌入式节能服务, 确定最优投资水平及节能效率. 同时对嵌入式节能项目进行投资、实施、运营.

第四阶段: 节能效益分享, 在合同期内, 基于每生产期的节能效益, 制造商按契约结构支付低碳服务提供商相应费用.

1) 节能效率

低碳服务提供商是一类专业从事嵌入式低碳服务的公司, 拥有或能集成先进的节能减排技术, 为制造商提供较高水平的节能效率. 低碳服务提供商对企业嵌入式节能服务项目进行投资与运营, 其节能效率 $\alpha \in [0, 1]$ 是关于节能服务项目投资水平 I 的函数. 在投资水平 I 下的节能效率, 是连续可微的, 且满足 $\alpha(0) = 0$, $\alpha'(I) > 0$, $\alpha''(I) \leq 0$. 故假定节能效率 $\alpha = \theta\sqrt{I/\rho}$, 其中 $\theta \in (0, 1)$ 是低碳服务提供商进行节能减排的能力, 表征着低碳服务提供商所拥有或集成低碳节能的技术能力, ρ 为该节能服务项目的投资规模系数. 对于节能效率水平 α , 有 $I = \rho(\alpha/\theta)^2$. 在每个生产期内, 低碳服务提供商对节能服务项目进行运营, 其运作成本为 c_p , 它主要由嵌入式低碳服务的嵌入度 λ 和节能效率 α 决定, 满足 $c_p'(\alpha) > 0$, $c_p''(\alpha) \geq 0$, $c_p'(\lambda) < 0$ 和 $c_p''(\lambda) \leq 0$. 故假设运作成本 $c_p = l(1 - \lambda)\alpha$, l 为运作成本系数.

2) 嵌入度

低碳服务提供商与制造商缔约的节能服务项目合同期为 T_c 倍生产期, 项目总运行期为 T_t . 假设合同期内, 低碳服务提供商 (制造商) 各生产周期具有相同的现金流. 合同到期后, 项目由制造商自行运营. δ 为生产期内的折现率, 记 $\tau_{tc} = \sum_{t=1}^{T_c} (\frac{1}{1+\delta})^t$, $\tau_{tt} = \sum_{t=1}^{T_m} (\frac{1}{1+\delta})^t$, 则 $\tau_{tm} = \sum_{t=T_c}^{T_m} (\frac{1}{1+\delta})^t$ 表示合同期结束后项目剩余价值的等额现值系数, 即有 $\tau_{tt} = \tau_{tc} + \tau_{tm}$. 由于低碳服务提供商与制造商的节能服务项目在在资金与业务运营上形成了相互嵌入的服务关系, 考虑其低碳服务提供商与制造商的嵌入度为 λ . 本文仅关注低碳服务提供商在嵌入式低碳服务项目合同期内的业务价值相对于低碳减排服务项目整个生命周期的价值关系. 因此, 定义嵌入度为 $\lambda = \frac{\tau_{tcontract}}{\tau_{tttotal}}$, 其刻画的是低碳服务提供商的低碳服务业务嵌入制造商低碳减排项目生命周期内的价值 (项目现值) 程度. 其中, $\tau_{tttotal}$ 表示嵌入式低碳服务项目的整个生命周期的现值系数 (等额年金率), $\tau_{tcontract}$ 则表示服务合同期内的现值系数. 对于本文有: $\tau_{tcontract} = \tau_{tc}$, $\tau_{tttotal} = \tau_{tt}$. 因此, 对于一个总运行期为 T_t 和嵌入度为 λ 的嵌入式节能服务项目, 有 $\tau_{tc} = \lambda\tau_{tt}$, $\tau_{tm} = (1 - \lambda)\tau_{tt}$.

3) 节能效益

假设制造商基期总能耗 (以标煤记) 是其生产规模的函数: $V = vq + f$, 其中, q 为单位生产期内的产量, f 是与生产不相关的固定能耗. 对于节能效率 α , 一生产期内节能量为 $\Delta V = \alpha(vq + f)$, 可实现碳排放节约 $\Delta e = k\Delta V = k\alpha(vq + f)$, k 为能耗转换为碳排放的折算系数. 假设单位能耗价格为 p_f , 单位碳排放权价格

为 p_e , 则单位生产期内节能效益为: $r_{es} = \alpha(p_f + kp_e)(vq + f) + \mu$, 其中 $\mu \sim N(0, \sigma^2)$, 代表外生的不确定性因素. 令 $Q = (p_f + kp_e)(vq + f)$, 则 $r_{es} = \alpha Q + \mu$.

4) 效用函数

合同期内每个生产期, 低碳服务提供商获得来自制造商的节能收益分享: $s(r_{es}) = \varphi r_{es} + A$, 其中 φ 是低碳服务提供商分享的节能收益比例, A 是与节能效益无关的固定服务费. 故低碳服务提供商的实际收入为: $\pi = \lambda \tau_{tt}[s(r_{es}) - c_p] - I$. 假设低碳服务提供商的效用函数为 $u_{lcsp} = -e^{-\zeta \pi}$, 其中 π 为低碳服务提供商的实际货币收入, ζ 为其绝对风险规避系数, 则低碳服务提供商的风险成本为 $C_r = \frac{1}{2}\zeta(\tau_{tc}\varphi)^2\sigma^2$. 最大化低碳服务提供商的期望效用函数 $E u_{lcsp}$ 等价于最大化低碳服务提供商的确定性等价收入:

$$E_A \pi_{lcsp} = \lambda \tau_{tt} \varphi \alpha Q + \lambda \tau_{tt} A - \lambda \tau_{tt} l(1 - \lambda) \alpha - I - C_r.$$

由于制造商是风险中性的, 因此制造商的期望节能收益等于期望效用:

$$E_v \pi_m = \lambda \tau_{tt} (1 - \varphi) \alpha Q - \lambda \tau_{tt} A + (1 - \lambda) \tau_{tt} [\alpha Q - l(1 - \lambda) \alpha].$$

3 问题描述与模型假设

3.1 完全信息情形嵌入式低碳服务契约设计

本文应用委托代理理论模型分析非对称信息情形下的低碳服务提供商与制造商嵌入式低碳服务的最优化合同. 作为分析的基准, 本小节首先讨论对称信息情形下的制造商提供的最优合同.

在完全信息情形, 低碳服务提供商与制造商之间信息是公有知识. 低碳服务提供商的节能效率水平、节能能力、投资水平是可观测的. 制造商基于低碳服务提供商可实现的节能效益与其投入水平进行收益分享. 因此, 制造商的激励合同问题是选择合同 (φ_0, A_0) 解下列最优化问题 (P1):

$$\max_{\varphi_0, A_0} \lambda \tau_{tt} (1 - \varphi_0) \alpha_0 Q - \lambda \tau_{tt} A_0 + (1 - \lambda) \tau_{tt} \alpha_0 (Q - l(1 - \lambda)) \quad (1)$$

$$\text{s.t. (IR)} \lambda \tau_{tt} \varphi_0 \alpha_0 Q + \lambda \tau_{tt} A_0 - \lambda \tau_{tt} l(1 - \lambda) \alpha_0 - I_0 - C_r \geq \underline{U}. \quad (2)$$

其中, $\alpha_0 = \theta \sqrt{I_0 / \rho}$.

在完全信息情形, 制造商没有动力分享更多的收益使得低碳服务提供商的效用高于其保留效用. 因此, 低碳服务提供商的参与约束 (2) 可表述为:

$$\lambda \tau_{tt} \varphi_0 \alpha_0 Q + \lambda \tau_{tt} A_0 - \lambda \tau_{tt} l(1 - \lambda) \alpha_0 - I_0 - C_r = \underline{U}. \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (1), 制造商的最优化问题 (P1) 可重新表述为:

$$\max_{\varphi_0, I_0} \theta \tau_{tt} (Q - l(1 - \lambda)) \sqrt{I_0 / \rho} - \frac{1}{2} \zeta \tau_{tc}^2 \varphi_0^2 \sigma^2 - I_0 - \underline{U}. \quad (4)$$

对式 (4) 求 I_0 、 φ_0 的一阶条件, 可得低碳服务提供商的最优投资水平 (节能效率) 和收益共享比例:

$$I_0^* = \frac{\theta^2 \tau_{tt}^2 (Q - l(1 - \lambda))^2}{4\rho}, \quad (5)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\theta^2 \tau_{tt} (Q - l(1 - \lambda))}{2\rho}, \quad (6)$$

$$\varphi_0^* = 0. \quad (7)$$

将式 (5) 代入式 (3) 可得低碳服务提供商获得的最优固定转移支付:

$$A_0^* = (1 - \lambda) l \alpha_0^* + \frac{(I_0^* + \underline{U})}{\lambda \tau_{tt}}. \quad (8)$$

因此, 完全信息情形下制造商所提供的契约为 $(0, l(1 - \lambda) \alpha_0^* + \frac{(I_0^* + \underline{U})}{\lambda \tau_{tt}})$, 即低碳服务提供商获得来自制造商的收益为: $s_0^*(r_{es}) = l(1 - \lambda) \alpha_0^* + \frac{(I_0^* + \underline{U})}{\lambda \tau_{tt}}$.

3.2 道德风险下嵌入式低碳服务的契约设计

在信息不对称情形, 制造商对低碳服务提供商的投资水平是不能观测的, 完全信息情形下的最优合同将不能实现. 给定收益共享比例 $\varphi = 0$, 低碳服务提供商选择自己的投资水平最大化其确定性等值, 使得低碳服务提供商将不提供嵌入式低碳服务项目. 首先考虑低碳服务提供商的投资水平不可观察时的最优激励契约

(φ_1, A_1) . 此时, 低碳服务提供商的激励相容约束是制造商给定的任何激励合同, 低碳服务提供商总是选择其最优投资水平 (节能效率水平) 参与嵌入式低碳项目来最大化其期望效用函数. 即有,

$$\max_I \lambda \tau_{tt} \varphi \alpha Q + \lambda \tau_{tt} A - \lambda \tau_{tt} l(1 - \lambda) \alpha - I - C_r. \quad (9)$$

使用一阶条件替代式 (9), 制造商的激励合同问题可以表述为: (P2)

$$\max_{\varphi_1, A_1} \lambda \tau_{tt} (1 - \varphi_1) \alpha_1 Q - \lambda \tau_{tt} A_1 + (1 - \lambda) \tau_{tt} \alpha_1 (Q - l(1 - \lambda)). \quad (10)$$

$$\text{s.t. (IR)} \lambda \tau_{tt} \varphi_1 \alpha_1 Q + \lambda \tau_{tt} A_1 - \lambda \tau_{tt} l(1 - \lambda) \alpha_1 - I_1 - C_r \geq \underline{U}, \quad (11)$$

$$(IC) \frac{1}{2} \lambda \tau_{tt} \theta [\varphi_1 Q - l(1 - \lambda)] - \sqrt{I_1 \rho} = 0. \quad (12)$$

优化问题 (P2) 中的激励相容约束式 (12) 是低碳服务提供商面对制造商给定的激励合同, 提供嵌入式低碳服务的最优反应策略:

$$I_1^* = \frac{\theta^2 \lambda^2 \tau_{tt}^2 (\varphi_1 Q - l(1 - \lambda))^2}{4\rho}. \quad (13)$$

可实现的节能效率为: $\alpha_0^* = \frac{\theta^2 \lambda \tau_{tt} (\varphi_1 Q - l(1 - \lambda))}{2\rho}$. 参与约束式 (11) 是一个紧约束, 即有:

$$\lambda \tau_{tt} \varphi_1 \alpha_1 Q + \lambda \tau_{tt} A_1 - \lambda \tau_{tt} l(1 - \lambda) \alpha_1 - I_1 - C_r = \underline{U}. \quad (14)$$

因此, 将式 (14) 和式 (13) 代入式 (10), 优化问题 (P2) 归结为:

$$\max_{\varphi_0, I_0} \theta \tau_{tt} (Q - (1 - \lambda)) \sqrt{I_1^* / \rho} - \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \varphi_1^2 \sigma^2 - I_1^* - \underline{U}. \quad (15)$$

对式 (15) 一阶条件有:

$$\frac{\lambda \tau_{tt}}{2\rho} [(1 - \lambda) \tau_{tt} l(1 - \lambda) \theta^2 Q + (\lambda \tau_{tt} \varphi_1 - \tau_{tt}) \theta^2 Q^2 + 2 \lambda \tau_{tt} \varphi_1 \varsigma \rho \sigma^2] = 0. \quad (16)$$

即:

$$\varphi_1^* = \frac{\theta^2 [Q^2 - (1 - \lambda) l Q]}{\lambda (\theta^2 Q^2 + 2 \rho \varsigma \sigma^2)}. \quad (17)$$

由式 (16) 易知 $\varphi_1^* > 0$, 这意味着, 低碳服务提供商必须承担一定节能收益不稳定的风险. 特别地, 收益分享比例 φ 与风险规避系数 ς 、投资规模系数 ρ 、收益方差 σ^2 负相关, 与节能能力系数 θ 正相关. 即低碳服务提供商的风险规避特性越强, 节能效益的波动性越大, 嵌入式服务项目投资规模越大, 其所应承担的风险就越小. 当低碳服务提供商具有较高节能能力时, 制造商会让其承担更大的风险. 式 (17) 代入式 (13) 可得:

$$I_1^* = \frac{\tau_{tt}^2 \theta^2 [\theta^2 Q^3 - (\theta^2 Q^2 + 2 \lambda \rho \varsigma \sigma^2) l(1 - \lambda)]^2}{4(\theta^2 Q^2 + 2 \rho \varsigma \sigma^2)^2 \rho}, \quad (18)$$

$$\alpha_1^* = \frac{\tau_{tt} \theta^2 [\theta^2 Q^3 - (\theta^2 Q^2 + 2 \lambda \rho \varsigma \sigma^2) l(1 - \lambda)]}{2(\theta^2 Q^2 + 2 \rho \varsigma \sigma^2) \rho}. \quad (19)$$

将式 (17)、(18) 和 (19) 代入式 (14) 可得该情形下低碳服务提供商获得的最优固定转移费用:

$$A_1^* = \frac{\underline{U}}{\lambda \tau_{tt}} + \frac{1}{2} \varsigma \lambda \tau_{tt} \varphi_1^{*2} \sigma^2 - \frac{\theta^2 \lambda \tau_{tt} (\varphi_1^* Q - l(1 - \lambda))^2}{4\rho}. \quad (20)$$

因此, 存在道德风险下制造商所提供的契约为 (φ_1^*, A_1^*) . 此时, 低碳服务提供商获得来自制造商的收益为 $s(\varphi_1^*, A_1^*)$, 其中: $s(\varphi_1^*, A_1^*) = \underline{U} + \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \varphi_1^{*2} \sigma^2 - \frac{\theta^2 \lambda^2 \tau_{tt}^2 (\varphi_1^* Q - l q^*)^2}{4\rho} + \varphi_1^* \frac{\theta^2 \lambda^2 \tau_{tt}^2 (\varphi_1^* Q - l q^*)}{2\rho} Q$.

3.3 具有逆向选择风险和道德风险的嵌入式低碳服务契约设计

考虑低碳服务提供商的节能能力 θ 为私有信息. 制造商只知道 $\theta \in [\theta_L, \theta_H]$ ($0 \leq \theta_L < \theta_H \leq 1$) 的概率密度函数为 $f(\theta)$, 累积分布函数为 $F(\theta)$. 因此, $F(\theta_L) = 0$, $F(\theta_H) = 1$. 制造商不能观测到低碳服务提供商的节能能力, 制造商为低碳服务提供商提供基于其节能能力的合同菜单. 此时, 低碳服务提供商与制造商之间为三阶段博弈关系, 应用逆向归纳法求解. 低碳服务提供商基于自己的节能能力类型 θ 选择制造商提供的合同菜单 $(\varphi(\hat{\theta}), A(\hat{\theta}))$. 给定低碳服务提供商选择的合同 $(\varphi(\hat{\theta}), A(\hat{\theta}))$, 确定最优投资水平以最大化其期望效用.

$$\max_{I(\hat{\theta})} \lambda \tau_{tt} \varphi(\hat{\theta}) \alpha(\hat{\theta}) Q + \lambda \tau_{tt} A(\hat{\theta}) - \lambda \tau_{tt} l(1 - \lambda) \alpha(\hat{\theta}) - I(\hat{\theta}) - C_r(\hat{\theta}). \quad (21)$$

其中, $\alpha(\theta) = \theta\sqrt{I/\rho}$, $C_r(\hat{\theta}) = \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\hat{\theta})\sigma^2$. 由式 (21) 一阶条件可得低碳服务提供商最优投资水平:

$$I^*(\theta) = \frac{\theta^2\lambda^2\tau_{tt}^2(\varphi(\hat{\theta})Q - l(1-\lambda))^2}{4\rho}. \quad (22)$$

同样可得节能效率水平:

$$\alpha^*(\theta) = \frac{\theta^2\lambda\tau_{tt}(\varphi(\hat{\theta})Q - l(1-\lambda))}{2\rho}. \quad (23)$$

将式 (22)、(23) 代入式 (21) 可得低碳服务提供商的确定性等价收入:

$$E_A\pi_{\text{lcsp}} = \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(Q\varphi(\hat{\theta}) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda\tau_{tt}A(\hat{\theta}) - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi(\hat{\theta})^2\sigma^2. \quad (24)$$

在博弈的第二阶段, 低碳服务提供商选择合同 $(\varphi(\hat{\theta}), A(\hat{\theta}))$, 最大化其期望效用. 即:

$$\max_{\hat{\theta}} \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(Q\varphi(\hat{\theta}) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda\tau_{tt}A(\hat{\theta}) - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi(\hat{\theta})^2\sigma^2. \quad (25)$$

博弈的第一阶段, 制造商设计合同菜单, 以最大化其期望效用.

$$E_v\pi_m = \lambda\tau_{tt}(1-\varphi(\theta))\alpha Q - \lambda\tau_{tt}A(\theta) + (1-\lambda)\tau_{tt}(\alpha Q - l(1-\lambda)\alpha). \quad (26)$$

因此, 制造商的问题可以表述为如下优化模型 (P3):

$$\max_{\varphi(\theta), A(\theta)} \int_{\theta_L}^{\theta_H} [\lambda\tau_{tt}(1-\varphi(\theta))\alpha Q - \lambda\tau_{tt}A(\theta) + (1-\lambda)\tau_{tt}(\alpha Q - l(1-\lambda)\alpha)] f(\theta) d\theta \quad (27)$$

$$\text{s.t.} \quad (\text{IR}) \quad \lambda\tau_{tt}\varphi(\theta)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - I - C_r \geq \underline{U}, \quad (28)$$

$$(\text{IC}) \quad I \in \arg \max_{I(\theta)} \{ \lambda\tau_{tt}\varphi(\hat{\theta})\alpha(\theta)Q + \lambda\tau_{tt}A(\hat{\theta}) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha(\theta) - I(\theta) - C_r(\hat{\theta}) \}, \quad (29)$$

$$(\text{IC}) \quad \lambda\tau_{tt}\varphi(\theta)\alpha(\theta)Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha(\theta) - I(\theta) - C_r(\theta) \geq \lambda\tau_{tt}\varphi(\hat{\theta})\alpha(\theta)Q + \lambda\tau_{tt}A(\hat{\theta}) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha(\theta) - I(\theta) - C_r(\hat{\theta}). \quad (30)$$

其中, $\alpha(\theta) = \theta\sqrt{I(\theta)/\rho}$, $C_r(\hat{\theta}) = \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\hat{\theta})\sigma^2$.

式 (27) 为制造商提供合同菜单 $(\varphi(\theta), A(\theta))$ 实现自身期望效用最大化的目标函数, 其中 $\varphi(\theta)$ 、 $A(\theta)$ 是制造商基于低碳服务提供商节能能力系数最大化自身期望效用而决策的每生产期的节能服务收益共享比例和固定转移费用. 式 (28) 是低碳服务提供商的参与约束, 实施嵌入式节能服务能力系数为的低碳服务提供商选择合同 $(\varphi(\theta), A(\theta))$ 所得的期望效用不低于不参与嵌入式节能项目活动所得的最大效用 (保留效用). 式 (29) 为低碳服务提供商节能项目投资 (节能效率水平) 决策的激励相容约束, 旨在使得嵌入式节能项目的投资水平只是通过最大化低碳服务提供商的期望效用来实现的. 式 (30) 为低碳服务提供商嵌入式节能服务能力类型的显示性激励相容约束, 表示嵌入式节能服务能力为的低碳服务提供商接受制造商为其设计的合同 $(\varphi(\theta), A(\theta))$ 获得的期望效用要大于其选择制造商为其他嵌入式节能服务能力类型 $\hat{\theta}$ ($\hat{\theta} \neq \theta$) 的低碳服务提供商设计的合约 $(\varphi(\hat{\theta}), A(\hat{\theta}))$, 从而使得低碳服务提供商选择与自己能力类型相符的合同, 以达到显示低碳服务提供商嵌入式节能服务能力类型的目的.

求解最优化问题 (P3), 则面对低碳服务提供商节能服务能力不能观测情形, 制造商为低碳服务提供商提供的最优合同菜单为:

$$\varphi^*(\theta) = \frac{\tau_{tt}\theta^2Q^2 - (1-\lambda)^2\theta^2Ql + 2(1-\lambda)\lambda\theta Ql \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}{\lambda\theta^2Q^2 + 2\varsigma\lambda\sigma^2\rho + 2\lambda\theta Q^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}, \quad (31)$$

$$A^*(\theta) = \frac{1}{\lambda\tau_{tt}}\underline{U} + \frac{1}{2}\varsigma\lambda\tau_{tt}\sigma^2\varphi^*(\theta)^2 - \frac{\lambda\tau_{tt}\theta^2(Q\varphi^*(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \frac{\lambda\tau_{tt}\theta(Q\varphi^*(\theta) - (1-\lambda)l)^2(1-F(\theta))}{2\rho f(\theta)}. \quad (32)$$

在合约菜单下, 低碳服务提供商的投资水平为:

$$I^*(\theta) = \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - l(1-\lambda))^2}{4\rho}. \quad (33)$$

嵌入式节能服务所实现的节能效率水平为:

$$\alpha^* = \frac{\lambda\tau_{tt}\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - l(1-\lambda))}{2\rho}. \quad (34)$$

命题 1 低碳服务提供商节能服务能力不能观测情形, 给定嵌入式低碳服务的最优合同菜单 $(\varphi^*(\theta), A^*(\theta))$, 低碳服务提供商的最优投资水平为 $I^*(\theta)$, 实现节能效率为 $\alpha^*(\theta)$.

4 模型分析

4.1 嵌入度与最优激励契约的关系

命题 2 信息不对称情形下, 制造商的最优激励契约的收益分享比例大于零, 且有:

- 1) $\varphi_1^* \geq \frac{\theta^2 Q^2}{\theta^2 Q^2 + 2\rho\sigma^2\varsigma}$, 特别地, $\lambda \in (0, \frac{2Ql\theta^2 - (Q^2\theta^2 + 2\rho\sigma^2\varsigma - \sqrt{(Q^2\theta^2 + 2\rho\sigma^2\varsigma)^2 - 8Ql\rho\sigma^2\theta^2\varsigma})}{2Ql\theta^2})$ 时, $\varphi_1^* > 1$;
- 2) $\varphi^*(\theta) = \frac{\theta^2 Q^2 - (1-\lambda)^2 \theta^2 Ql + 2\lambda\theta Ql(1-\lambda) \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}{\lambda\theta^2 Q^2 + 2\varsigma\lambda\sigma^2\rho + 2\lambda\theta Q^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}$, 特别地, 当 $\lambda \in (0, \lambda^{\varphi(\theta)=1})$ 时, $\varphi^*(\theta) > 1$.

推论 1 最优收益分享比例随着低碳服务提供商与制造商嵌入式低碳服务的嵌入度的增大而降低.

由命题 1 可知, 在面临信息不对称情形 (投资水平不可观测情形和节能水平不可观测情形), 制造商的最优激励契约要求低碳服务提供商必须承担一定节能效益不稳定的风险 ($\varphi_1^* > 0, \varphi^*(\theta) > 0$). 当低碳服务提供商与制造商的嵌入度低于一定水平时, 基于节能效益的分享比例将大于 1. 这意味着, 每个生产期内制造商不仅要将其节能收益完全转移给低碳服务提供商, 而且还要基于每期的节能收益多支付一定比例的收益给低碳服务提供商. 这个结论似乎有违直觉, 但在实际一些企业间的支付确实如此的. 那是因为, 当低碳服务提供商与制造商嵌入度较低时, 其价值共同度较低. 对一个有 τ_{tt} 倍价值收益的项目, 由于低碳服务提供商嵌入制造商时期内共同获得 $\lambda\tau_{tt}$ 倍价值收益, 为激励低碳服务提供商关注到合同期后的项目收益而进行有效投资, 使其保证后期项目的价值收益, 制造商必须让低碳服务提供商获得分享大于 1 的收益比例. 这样有效增加了低碳服务提供商仅关注合同期节能效益的机会成本, 促使其进行有效投资. 但是, 注意每期的节能收益分享比例大于 1 也并不意味着低碳服务提供商承担了节能项目的全部风险. 这是因为分享比例大于 1 只是说明节能项目合同期内的节能收益风险被完全承担, 对于合同期结束后项目剩余运行周期内的收益风险并不一定被完全承担. 需要注意的是, 低碳服务提供商获得节能收益分享比例越大时, 往往对应着需要支付给制造商更高水平的低碳减排保证金 ($A^*(\theta) < 0$). 特别的, 对风险中性 ($\varsigma = 0$) 的低碳服务提供商, 当其与制造商的嵌入式服务项目的嵌入度 $\lambda = 1$ (低碳服务提供商业务价值与项目生命周期价值完全共同), 投资水平不可观测或者节能水平不可观测时 (低碳服务提供商的节能水平最高为 θ_H 时), 最优激励契约要求低碳服务提供商承担嵌入式节能项目生命周期的全部风险. 此时, 对于嵌入度 $\lambda < 1$, 有 $\varphi > 1$. 因低碳服务提供商与项目价值不共同, 为激励其关注项目后期价值, 除去低碳服务提供商获得的每期收益外, 制造商需按每期低碳收益 $(\varphi - 1)$ 的比例补贴低碳服务提供商.

命题 3 信息不对称情形下, 低碳服务提供商承担节能收益的风险随着其嵌入式服务项目对制造商的嵌入度的增加而降低.

由于信息不对称, 制造商要求低碳服务提供商承担节能项目收益波动的必要风险, 以此来激励低碳服务提供商进行更有效的节能项目投资. 然而命题 3 表明, 低碳服务提供商可以通过提升与制造商的嵌入度来降低对节能项目风险的承担. 产生这种意识背反现象在于, 嵌入度的提升, 意味着低碳服务提供商与制造商面对节能项目的价值取向更一致, 低碳服务提供商对嵌入式服务项目的收益关注更长远, 低碳服务提供商已有足够的动力进行更好的投资, 制造商也就愿意降低对低碳服务提供商对节能风险分担的要求.

命题 3 也表明较高的嵌入度能降低低碳服务提供商对节能项目风险的承担. 因此, 低碳服务提供商有动力与制造商建立高嵌入度的嵌入式服务关系. 同时, 命题 2 表明, 较低水平的嵌入度, 会促使制造商以较高的节能效益分享比例来要求低碳服务提供商分担合同后期的项目收益风险. 这意味着, 制造商通过每生产期高的分享比例把节能项目后期的收益提前分享给低碳服务提供商, 使其投资决策中关注到项目后期的收益. 这使得制造商在合同期内分享出高于本期节能效益的费用, 同时在合同结束后独立承担项目后期收益风险. 然而, 制造商往往不愿意让每期的支付高于每期的实际收益, 而去关注未来有较高风险的项目后期收益. 因此, 制造商往往更愿意提供分担比例小于 1 的最优激励契约. 对于 $\varphi_1^* \leq 1$, 有

$$\lambda \geq \frac{2Ql\theta^2 - (Q^2\theta^2 + 2\rho\sigma^2\varsigma - \sqrt{(Q^2\theta^2 + 2\rho\sigma^2\varsigma)^2 - 8Ql\rho\sigma^2\theta^2\varsigma})}{2Ql\theta^2}.$$

这就意味着制造商愿意与低碳服务提供商形成较高嵌入度来参与嵌入式低碳项目. 综上可得推论 2:

推论 2 信息不对称情形下, 高水平的嵌入度更能促进低碳服务提供商与制造商基于嵌入式低碳服务模式的服务关系.

对于固定服务费往往存在两种情形: $A > 0$, 表示制造商向低碳服务支付的每期固定转移费用, 以保障低碳服务提供商的收益在合理范围内; $A < 0$, 则表示低碳服务提供商向制造商支付的每期固定费用, 往往是低碳服务提供商获取了更大的节能收益比例, 制造商要求低碳服务提供商支付一定的节能保证金. $A < 0$ 情形能很好解释命题 2 中收益分享比例很大的情形. 对 A 分析有如下命题:

命题 4 最优契约菜单中, 当低碳服务提供商项目风险成本很低或者为零时 (项目节能效益不确定性 σ^2 很小, 低碳服务提供商风险中性或规避系数很小), 低碳服务提供商分享节能效益的比例越高 (低), 其获得固定转移费用额越低, 或者其向制造商支付的节能保证金也越高 (低).

4.2 最优分享契约的影响因素分析

命题 5 信息不对称情形, 最优合同契约低碳服务提供商获得的节能收益分享比例与其所面对的节能项目投资规模、节能效益不确定性负相关, 同时与其自身风险规避系数负相关, 而与其节能能力正相关.

命题 5 表明, 无论是仅存道德风险还是逆向选择风险与道德风险并存情形, 制造商的所提供的效益最优分享契约的比例必须关注到低碳服务提供商的特征属性 (如节能能力、风险规避) 以及节能项目的本身规模以及节能效益的波动性. 当低碳服务提供商风险规避特性越大, 节能项目投资规模系数越大以及节能效益波动性越大, 对于给定的节能效益分享比例, 低碳服务提供商面临的风险成本就越高. 这使得低碳服务提供商越不愿为实现更高的节能效率对项目进行更好的投资, 这也一定程度上解释了实际调研发现众多合同能源管理项目投资不足, 节能效益不明显的现象. 因此在这种情形下, 制造商应该低碳服务承担较小风险, 即低碳服务提供商的最优风险承担使得 φ 越小, 此刻低碳服务提供商对嵌入式节能项目进行有效的投资运作, 其收益更多的以每期固定转移支付的形式获得. 但当低碳服务提供商具有较高的节能服务能力时, 其愿意承担更多的风险, 这是因为其较高的节能能力, 能以较低的投资水平实现更高的节能效率和节能效益.

4.3 最优契约下嵌入式低碳服务参与主体收益结构变化

命题 6 投资水平不可观测时, 低碳服务提供商获得的期望报酬随着最优分享比例的增大而增大, 且其趋势随着节能项目节能效益风险及风险规避系数的增大而增大.

命题 7 节能能力不可观测情形下, 低碳服务提供商获取的信息租金为:

$$\Delta IF = \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta (Q \varphi^*(\theta) - (1 - \lambda) l)^2 (1 - F(\theta))}{2 \rho f(\theta)}.$$

投资水平不可观测情形下, 制造商面临两类代理成本, 一类是由于低碳服务提供商承担节能效益风险而产生的风险成本, 另一类是由于节能服务投资不足的导致的激励成本. 低碳服务提供商参与节能效益分享比例为 φ_1^* , 此时其风险成本为 $\Delta C_r = \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \varphi_1^{*2} \sigma^2$. 制造商的激励成本为 (以完全信息情形为基准): $\Delta R_{es} - \Delta I - \Delta C_p = \tau_{tt} (Q - (1 - \lambda) l) (\alpha_0^* - \alpha_1^*) - (I_0^* - I_1^*)$; 制造商付出的总代理成本为: $AC = \Delta C_r + (\Delta R_{es} - \Delta I - \Delta C_p) = \frac{\varsigma \theta^2 \sigma^2 [\tau_{tt} Q^2 - (1 - \lambda^2) (1 - \lambda)^2 \tau_{tt}^2 l^2]}{2 Q^2 \theta^2 + 4 \rho \varsigma \sigma^2}$. 由此可以注意到, 当低碳服务提供商为风险中性时, 其代理成本为零. 这是因为当低碳服务提供商风险中性时, 其能够承担节能项目生命周期的所有风险 ($\varphi_1^*|_{\varsigma=0} = \frac{\theta^2 [Q^2 - (1 - \lambda)^2 l^2]}{\lambda \theta^2 Q^2}$), 实现最优激励达到完全信息水平下的最优投资 (节能效率) ($I_1^*|_{\varsigma=0} = I_0^*$). 因此有如下命题:

命题 8 投资水平不可观测情形, 制造商付出的代理成本随着低碳服务提供商的风险规避系数 ς 、节能能力 θ 以及节能效益不确定性 σ^2 上升而上升.

4.4 嵌入式低碳服务低碳减排效率分析

命题 9 信息不对称情形下, 低碳服务提供商对嵌入式低碳服务项目的投资水平 (节能效率) 小于对称信息下的投资水平 (节能效率). 特别地: 1) 投资水平不可观测下, 当 $\varsigma = 0$ 或 $\sigma^2 = 0$ 时, $I_1^* = I_0^*$, $\alpha_1^* = \alpha_0^*$; 2) 节能能力不可观测下, 当 $\varsigma = 0$, 且 $\theta = \theta_H$ 时, $I^*(\theta) = I_0^*$, $\alpha^*(\theta) = \alpha_0^*$.

命题 9 说明, 由于嵌入式低碳服务参与主体风险偏好及项目风险的存在, 使得嵌入式低碳服务投资水平 (低碳效率) 低于完全信息下的投资水平 (低碳效率). 考虑嵌入度与嵌入式低碳服务低碳减排效率的关系: 1) 完全信息情形下: 低碳减排效率关于嵌入度偏导有: $\frac{\partial \alpha_0^*}{\partial \lambda} = \frac{\theta^2 \tau_l}{2 \rho} > 0$, 应用复合函数特征可知, $\frac{\partial}{\partial \lambda} I_1^* > 0$, 即此时

嵌入式低碳服务的低碳减排效率随着参与主体间嵌入度的提高而提高. 2) 对投资水平不可观测下的低碳减排效率求导有, $\frac{\partial}{\partial \lambda} \alpha_1^* = \frac{\theta^2 \tau (2\sigma^2 \rho (2\lambda - 1) + \theta^2 Q^2) l}{2(\theta^2 Q^2 + 2\rho \sigma^2 \zeta) \rho}$, 令 $\frac{\partial}{\partial \lambda} \alpha_1^* > 0$ 有 $\lambda > \frac{1}{2} - \frac{\theta^2 Q^2}{4\rho \sigma^2 \zeta}$. 故当 $\lambda \in (\frac{1}{2} - \frac{\theta^2 Q^2}{4\rho \sigma^2 \zeta}, 1)$ 时, $\frac{\partial}{\partial \lambda} \alpha_1^* > 0$. 又 $0 < \lambda \leq 1$, 所以当低碳减排效率高于成本风险率, 即 $\theta^2 Q^2 > 2\rho \sigma^2 \zeta$ 时, 嵌入度有效值范围内 ($0 < \lambda \leq 1$), $\frac{\partial}{\partial \lambda} \alpha_1^* > 0$. 故 $\max_{\lambda \in (0,1)} \alpha_1^* = \alpha_1^*|_{\lambda=1} = \frac{\tau_{tt} \theta^4 Q^3}{2(\theta^2 Q^2 + 2\rho \sigma^2 \zeta) \rho}$. 应用复合函数特征可知: $\frac{\partial}{\partial \lambda} I_1^* > 0$. 3) 同理有, 节能能力不可观测下, $\frac{\partial}{\partial \lambda} \alpha^*(\theta) = \frac{\theta^2 \tau (2\sigma^2 \rho (2\lambda - 1) + \theta^2 Q^2) l}{2(\theta^2 Q^2 + 2\rho \sigma^2 \zeta + 2Q^2 \theta \frac{1-F(\theta)}{f(\theta)}) \rho}$, 令 $\frac{\partial}{\partial \lambda} \alpha^*(\theta) > 0$ 有 $\lambda > \frac{1}{2} - \frac{\theta^2 Q^2}{4\rho \sigma^2 \zeta}$. 所以当低碳减排效率高于成本风险率, 即 $\theta^2 Q^2 > 2\rho \sigma^2 \zeta$ 时, 嵌入度有效值范围内 ($0 < \lambda \leq 1$), $\frac{\partial}{\partial \lambda} \alpha^*(\theta) > 0$. 同理对于嵌入度 $\lambda = 1$ 时低碳减排效率 (投资水平) 最大, 且 $\frac{\partial}{\partial \lambda} I^*(\theta) > 0$.

由此可知, 完全信息情形下, 低碳减排效率随着嵌入式低碳服务参与主体的嵌入度的提高而提高. 信息不对称情形下, 由于风险偏好的存在, 使得嵌入式低碳服务的低碳减排效率受限于嵌入度. 当参与主体间嵌入度处于低水平时低碳减排效率随着嵌入的提高而降低, 而当嵌入度达到一定水平后, 随着低碳减排效率嵌入的提高而提高. 但无论是信息完全还是信息不对称情形, 高水平的嵌入度都能促使嵌入式低碳服务的低碳减排效率提高.

5 结论

低碳经济背景下, 碳排放依赖型企业往往面临着对嵌入式低碳服务的需求. 希望通过嵌入式低碳服务的引入克服自主低碳减排的困境, 实现企业生产/服务的综合效益最大化. 然而由于关低碳服务提供商多方面的信息不对称, 使得企业在缔约嵌入式低碳服务项目时面临诸多不利情景. 由此, 本文讨论了基于嵌入式低碳服务的一个风险规避的低碳服务提供商与一个碳排放依赖型制造商在碳排放限额与市场交易机制下的嵌入式节能服务委托代理问题. 考虑完全信息情形下嵌入式节能服务的激励机制为参考, 研究了低碳服务提供商投资水平不可观测情形、节能能力不可观测情形下嵌入式低碳服务的最优线性契约设计问题. 得到以下结论: 1) 低碳服务提供商与制造商的嵌入显著影响嵌入式低碳服务的最优线性激励契约的结构: 较低水平的嵌入度可能导致过高的收益分享比例 ($\varphi > 1$), 同时形成需要低碳服务提供商每期预付节能保证金的合同模式. 2) 低碳服务提供商的收益随着其风险规避程度的提高而提高, 随着嵌入度的而增大而增加. 3) 制造商关于嵌入式低碳服务委托代理的信息成本与嵌入式呈反向变化. 4) 无论是信息完全还是信息不对称情形, 高水平的嵌入度都能促使嵌入式低碳服务的低碳减排效率提高.

本文的研究视角除了弥补委托代理理论在嵌入式低碳服务机制下的契约应用外, 还引入了低碳服务提供商与制造商的嵌入度, 以刻画低碳服务提供商在嵌入式低碳服务项目合同期内的业务价值相对于该项目整个生命周期的价值关系. 进一步的研究可关注嵌入式低碳服务下嵌入度对企业生产决策的影响.

参考文献

- [1] 魏守道, 周建波. 碳税政策下供应链低碳技术研发策略选择 [J]. 管理学报, 2016, 13(12): 1834–1841.
Wei S D, Zhou J B. A choice of environmental R&D in supply chain under carbon tax policy[J]. Chinese Journal of Management, 2016, 13(12): 1834–1841.
- [2] 周艳菊, 吴界朋, 陈晓红, 等. 低碳经济下嵌入式低碳服务机制设计研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(5): 1193–1204.
Zhou Y J, Wu J P, Chen X H, et al. Embedded low-carbon service mechanism design with low-carbon economy[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(5): 1193–1204.
- [3] Okay N, Akman U. Analysis of ESCO activities using country indicators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2760–2771.
- [4] Limaye D R, Limaye E S. Scaling up energy efficiency: The case for a Super ESCO[J]. Energy Efficiency, 2011, 4(2): 133–144.
- [5] 惠宁, 周晓唯, 王林平. 油气田开发企业合同能源管理应用研究 [J]. 科技进步与对策, 2017, 34(9): 132–135.
- [6] Sorrell S. The economics of energy service contracts[J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 507–521.
- [7] Qin Q, Liang F, Li L, et al. Selection of energy performance contracting business models: A behavioral decision-making approach[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 422–433.
- [8] Yuan X, Ma R, Zuo J, et al. Towards a sustainable society: The status and future of energy performance contracting in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1608–1618.

- [9] Labanca N, Suerkemper F, Bertoldi P, et al. Energy efficiency services for residential buildings: Market situation and existing potentials in the European Union[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 109: 284–295.
- [10] Wang T, Foliente G, Song X, et al. Implications and future direction of greenhouse gas emission mitigation policies in the building sector of China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 31(2): 520–530.
- [11] Xu P, Chan E H W, Visscher H J, et al. Sustainable building energy efficiency retrofit for hotel buildings using EPC mechanism in China: Analytic network process (ANP) approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107: 378–388.
- [12] Mills E, Kromer S, Weiss G, et al. From volatility to value: Analysing and managing financial and performance risk in energy savings projects[J]. Energy Policy, 2006, 34(2): 188–199.
- [13] Qian D, Guo J. 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(5): 710–721.
- [14] Zhang X, Wu Z, Feng Y, et al. “Turning green into gold”: A framework for energy performance contracting (EPC) in China’s real estate industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 109: 166–173.
- [15] Deng Q, Jiang X, Cui Q, et al. Strategic design of cost savings guarantee in energy performance contracting under uncertainty[J]. Applied Energy, 2015, 139: 68–80.
- [16] 尚天成, 潘珍妮. 合同能源管理项目评价方法 [J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 135–138.
Shang T C, Pan Z N. Evaluation of energy performance management project[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(3): 135–138.
- [17] Lee P, Lam P T I, Lee W L. Risks in energy performance contracting (EPC) projects[J]. Energy and Buildings, 2015, 92: 116–127.

附录 优化问题 (P3) 求解

对于低碳服务提供商而言, 任意 $\theta \in [\theta_L, \theta_H]$ 有: $\lambda\tau_{tt}\varphi(\theta_L)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho(\alpha/\theta)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2 > \lambda\tau_{tt}\varphi(\theta_L)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho(\alpha/\theta_L)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2$ 成立. 由激励相容约束式 (30) 可得: $\lambda\tau_{tt}\varphi(\theta)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho(\alpha/\theta)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta)\sigma^2 \geq \lambda\tau_{tt}\varphi(\theta_L)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho(\alpha/\theta)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2$. 故对任意 $\theta \in [\theta_L, \theta_H]$ 有: $\lambda\tau_{tt}\varphi(\theta)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho(\alpha/\theta)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta)\sigma^2 \geq \lambda\tau_{tt}\varphi(\theta_L)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho(\alpha/\theta_L)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2$. 因此, 只要 $\lambda\tau_{tt}\varphi(\theta_L)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho(\alpha/\theta_L)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2 \geq \underline{U}$, 即节能服务能力为 θ_L 的低碳服务提供商满足参与约束, 其他任意节能能力类型的低碳服务提供商就能参与节能服务. 这说明在节能能力信息不对称时, 制造商的合同菜单只需保证最低节能服务能力类型的低碳服务提供商的参与, 就能保证其他节能服务能力类型的低碳服务提供商参与. 因此, 最优化问题 (P3) 的参与约束可等价于节能服务能力为 θ_L 的低碳服务提供商的参与约束, 同时在最优合同情况下, 此参与约束等式成立. 由此, 参与约束式 (28) 可变换为:

$$\lambda\tau_{tt}\varphi(\theta_L)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho\left(\frac{\alpha}{\theta_L}\right)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2 = \underline{U}. \quad (35)$$

同时, 激励相容约束式 (29) 是低碳服务提供商面对制造商给定激励合同的最优反应策略. 故式 (29) 可用一阶条件替换为: $\alpha(\theta) = \frac{\lambda\tau_{tt}\theta^2(\varphi(\hat{\theta})Q - l(1-\lambda))}{2\rho}$, 此时低碳服务提供商的投资水平为 $I(\theta) = \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi(\hat{\theta})Q - l(1-\lambda))^2}{4\rho}$. 因此, 最优化模型 (P3) 可等价于最优化问题 (P4):

$$\max_{\varphi(\theta), A(\theta)} \int_{\theta_L}^{\theta_H} [\lambda\tau_{tt}(1-\varphi(\theta))\alpha Q - \lambda\tau_{tt}A(\theta) + (1-\lambda)\tau_{tt}\alpha(Q - l(1-\lambda))]f(\theta)d\theta \quad (36)$$

$$\text{s.t.} \quad (\text{IR}) \quad \lambda\tau_{tt}\varphi(\theta_L)\alpha Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha - \rho\left(\frac{\alpha}{\theta_L}\right)^2 - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2 = \underline{U}, \quad (37)$$

$$(\text{IC}) \quad \alpha = \frac{\lambda\tau_{tt}\theta^2(\varphi(\hat{\theta})Q - l(1-\lambda))}{2\rho}, \quad (38)$$

$$\begin{aligned} (\text{IC}) \quad & \lambda\tau_{tt}\varphi(\theta)\alpha(\theta)Q + \lambda\tau_{tt}A(\theta) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha(\theta) - I(\theta) - C_r(\theta) \geq \\ & \lambda\tau_{tt}\varphi(\hat{\theta})\alpha(\theta)Q + \lambda\tau_{tt}A(\hat{\theta}) - \lambda\tau_{tt}l(1-\lambda)\alpha(\hat{\theta}) - I(\hat{\theta}) - C_r(\hat{\theta}). \end{aligned} \quad (39)$$

将式 (38) 代入式 (37) 和式 (39) 可得

$$\frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta_L^2(Q\varphi(\theta_L) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda\tau_{tt}A(\theta_L) - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^2(\theta_L)\sigma^2 = \underline{U}, \quad (40)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda \tau_{tt} A(\theta) - \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \varphi(\theta)^2 \sigma^2 \geq \\ & \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\hat{\theta}) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda^2 \tau_{tt}^2 A(\hat{\theta}) - \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \varphi(\hat{\theta})^2 \sigma^2. \end{aligned} \quad (41)$$

等价变换式 (41) 可得:

$$\begin{aligned} E_A(\theta) &= \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda^2 \tau_{tt}^2 A(\theta) - \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \varphi(\theta)^2 \sigma^2 \\ &= \max_{\hat{\theta}} \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\hat{\theta}) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda \tau_{tt} A(\hat{\theta}) - \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \varphi(\hat{\theta})^2 \sigma^2. \end{aligned} \quad (42)$$

对式 (32) 求导有

$$\frac{dE_A(\theta)}{d\theta} = \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l) Q\varphi'(\theta)}{2\rho} + \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} + \lambda \tau_{tt} A'(\theta) - \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \sigma^2 \varphi(\theta) \varphi'(\theta), \quad (43)$$

$$\frac{dE_A(\theta)}{d\hat{\theta}} \Big|_{\hat{\theta}=\theta} = \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l) Q\varphi'(\theta)}{2\rho} + \lambda \tau_{tt} A'(\theta) - \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \sigma^2 \varphi(\theta) \varphi'(\theta) = 0. \quad (44)$$

由式 (33) 和式 (44) 可得:

$$\frac{dE_A(\theta)}{d\theta} = \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho}. \quad (45)$$

由式 (45) 可知低碳服务提供商的确定性等价收入随着其节能能力的增加而增加. 同时由式 (42) 可知:

$$E_A(\theta) = E_A(\theta_L) + \int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta. \quad (46)$$

结合式 (40) 和式 (42) 可知: $E_A(\theta_L) = \underline{U}$, 故由式 (40) 和式 (46) 有: $\frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \lambda \tau_{tt} A(\theta) - \frac{1}{2} \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \sigma^2 \varphi(\theta)^2 = \underline{U} + \int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta$. 由此可知每期固定转移费用 $A(\theta)$ 与每期收益分享比例 $\varphi(\theta)$ 的关系为:

$$A(\theta) = \frac{1}{\lambda \tau_{tt}} \underline{U} + \frac{1}{2} \varsigma \lambda \tau_{tt} \sigma^2 \varphi(\theta)^2 - \frac{\lambda \tau_{tt} \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda \tau_{tt} \theta (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta. \quad (47)$$

由式 (41) 的激励相容约束的二阶条件有:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 E_A(\theta)}{d\hat{\theta}^2} \Big|_{\hat{\theta}=\theta} &= \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 Q^2(\varphi'(\theta))^2}{2\rho} + \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l) Q\varphi''(\theta)}{2\rho} + \lambda \tau_{tt} A''(\theta) \\ &\quad - \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \sigma^2 (\varphi'(\theta))^2 - \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \sigma^2 \varphi(\theta) \varphi''(\theta) \leq 0. \end{aligned} \quad (48)$$

对式 (44) 关于 θ 求导有:

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l) Q\varphi'(\theta)}{\rho} + \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l) Q\varphi''(\theta)}{2\rho} \\ & + \frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta^2 Q^2(\varphi'(\theta))^2}{2\rho} + \lambda \tau_{tt} A''(\theta) - \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \sigma^2 (\varphi'(\theta))^2 - \varsigma \lambda^2 \tau_{tt}^2 \sigma^2 \varphi(\theta) \varphi''(\theta) = 0. \end{aligned} \quad (49)$$

结合式 (48) 和式 (49) 可得: $\frac{d^2 E_A(\theta)}{d\hat{\theta}^2} \Big|_{\hat{\theta}=\theta} = -\frac{\lambda^2 \tau_{tt}^2 \theta (Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l) Q\varphi'(\theta)}{\rho} \leq 0$. 由于 $Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l > 0$, 故为使式 (49) 成立, 即满足激励相容约束的二阶条件有: $\frac{d\varphi(\theta)}{d\theta} \geq 0$. 因此最优化问题 P4 的激励相容约束的二阶条件可以表示为:

$$\frac{d\varphi(\theta)}{d\theta} \geq 0. \quad (50)$$

由此可知, 当制造商不能观测到低碳服务提供商的节能服务能力时, 最优激励合同菜单中的节能效益分享比例 $\varphi(\theta)$ 应当是节能服务能力 θ 的增函数, 即在给定节能效益共享比例 $\varphi(\theta)$ 情形下, 若契约菜单中分享比例 $\varphi(\theta)$ 随着节能服务能力 θ 递增, 则存在最优固定转移费用 $A(\theta)$ 满足式 (47). 从风险分担角度来看, 嵌入式节能服务能力的高低决定了其承担节能收益风险的大小, 低碳服务提供商的嵌入式节能服务能力越小, 其承担的风险也就越低. 这是因为 θ 越小时, 制造商希望低碳服务提供商提供同等节能服务效率 α 所需的节能效益分享比例 $\varphi(\theta)$ 越大, 低碳服务提供商有足够的动力选择一个低的投资水平来降低风险成本.

对于制造商的最优化问题 (P4) 的参与约束式 (37) 和激励相容约束式 (39) 已等效转换为式 (47) 和式 (50). 式 (47) 和式 (49) 保证了低碳服务提供商只有通过选择与自己节能服务能力相符的合同契约来实现在自身期望效用最大化. 因此, 激励相容约束式 (38) 可等价:

$$\alpha = \frac{\lambda\tau_{tt}\theta^2(\varphi(\theta)Q - l(1-\lambda))}{2\rho}. \quad (51)$$

因此, 将式 (51) 和式 (47) 代入式 (36) 得:

$$\begin{aligned} \max_{\varphi(\theta), A(\theta)} \int_{\theta_L}^{\theta_H} & \left[(1-\varphi(\theta)) \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi(\theta)Q - l(1-\lambda))}{2\rho} Q + \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} - \underline{U} \right] f(\theta)d\theta + \\ & \int_{\theta_L}^{\theta_H} \left[(1-\lambda)\tau_{tt} \frac{\lambda\tau_{tt}\theta^2(\varphi(\theta)Q - l(1-\lambda))}{2\rho} (Q - lq^\kappa) - \int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\sigma^2\varphi(\theta)^2 \right] f(\theta)d\theta. \end{aligned} \quad (52)$$

又,

$$\begin{aligned} & \int_{\theta_L}^{\theta_H} \left(\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta \right) f(\theta)d\theta = \int_{\theta_L}^{\theta_H} \left(\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta \right) dF(\theta) \\ & = \left\{ F(\theta) \left[\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta \right] \right\} \Big|_{\theta_L}^{\theta_H} - \int_{\theta_L}^{\theta_H} F(\theta) d \left(\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta \right) \\ & = \int_{\theta_L}^{\theta_H} (1-F(\theta)) \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta. \end{aligned}$$

可得:

$$\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{2\rho} d\theta = \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2(1-F(\theta))}{2\rho f(\theta)}. \quad (53)$$

式 (53) 代表低碳服务提供商节能服务能力信息所产生的信息租金. 式 (53) 代入式 (52), 同时将可最优化问题 (P4) 转换为 (P5):

$$\begin{aligned} \max_{\varphi(\theta), A(\theta)} \int_{\theta_L}^{\theta_H} & \left[(1-\varphi(\theta)) \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi(\theta)Q - l(1-\lambda))}{2\rho} Q + \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} \right. \\ & \left. - \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\sigma^2\varphi(\theta)^2 + (1-\lambda)\tau_{tt}(Q - l(1-\lambda)) \frac{\lambda\tau_{tt}\theta^2(\varphi(\theta)Q - l(1-\lambda))}{2\rho} \right. \\ & \left. - \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi(\theta) - (1-\lambda)l)^2(1-F(\theta))}{2\rho f(\theta)} - \underline{U} \right] f(\theta)d\theta \end{aligned} \quad (54)$$

$$\text{s.t. } \frac{d\varphi(\theta)}{d\theta} \geq 0. \quad (55)$$

首先假定式 (54) 成立, 则最优化问题 (P5) 转化为无约束的优化问题. 因此, 对式 (52) 关于 $\varphi(\theta)$ 一阶条件有:

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2Q^2}{2\rho} + \frac{(\lambda-\lambda^2)\tau_{tt}^2\theta^2(Q - l(1-\lambda))Q}{2\rho} + \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta Q l(1-\lambda)(1-F(\theta))}{\rho f(\theta)} \\ & - \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2Q^2\varphi(\theta)}{2\rho} - \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta Q^2\varphi(\theta)(1-F(\theta))}{\rho f(\theta)} - \varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\sigma^2\varphi(\theta) = 0. \end{aligned} \quad (56)$$

解式 (56) 有:

$$\varphi(\theta) = \frac{\theta^2Q^2 - (1-\lambda)^2\theta^2Ql + 2(1-\lambda)\lambda\theta Ql \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}{\lambda\theta^2Q^2 + 2\varsigma\lambda\sigma^2\rho + 2\lambda\theta Q^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}. \quad (57)$$

由于 $\varphi'(\theta) \geq 0$, 故对式 (57) 求关于 θ 导数可得:

$$\begin{aligned} & \tau_{tt}Q\theta \left(Q^2\theta \frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} + 2\varsigma\rho\sigma^2 \right) - \frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} l(1-\lambda)(\tau_{tt}\theta^2Q^2 - 2\rho\varsigma\sigma^2) \\ & - \theta \{ \tau_{tt}\theta^2Q^3 - (\tau_{tt}\theta^2Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2)l(1-\lambda) \} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} \right) \geq 0. \end{aligned}$$

解不等式有:

$$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} \right) \leq \frac{\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} [\tau_{tt} Q^3 \theta^2 - l(1-\lambda)(\tau_{tt} \theta^2 Q^2 - 2\rho\varsigma\sigma^2)] + 2\tau_{tt} Q \theta \varsigma \rho \sigma^2}{\theta [\tau_{tt} \theta^2 Q^3 - (\tau_{tt} \theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2) l(1-\lambda)]}. \quad (58)$$

故当 $\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} \right) \leq 0$ 时, 式 (57) 满足制造商的优化问题 (P5) 的约束条件: $\varphi'(\theta) \geq 0$ (此时满足 $\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} \right) \leq \frac{\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} [\tau_{tt} Q^3 \theta^2 - l(1-\lambda)(\tau_{tt} \theta^2 Q^2 - 2\rho\varsigma\sigma^2)] + 2\tau_{tt} Q \theta \varsigma \rho \sigma^2}{\theta [\tau_{tt} \theta^2 Q^3 - (\tau_{tt} \theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2) l(1-\lambda)]}$). 因此, 当 $\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)} \right) \leq 0$ 时, 制造商最优优化问题 P5 的最优解为:

$$\varphi(\theta) = \frac{\theta^2 Q^2 - (1-\lambda)^2 \theta^2 Q l q^\kappa + 2(1-\lambda) \lambda \theta Q l \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}{\lambda \theta^2 Q^2 + 2\varsigma \lambda \sigma^2 \rho + 2\lambda \theta Q^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}.$$

命题 2 证明 1) 仅存道德风险 (投资水平不可观测) 情形: 由式 (17) 可知, 制造商向低碳服务提供商提供的节能效益分享比例为: $\varphi_1^* = \frac{\theta^2 [Q^2 - (1-\lambda)^2 l Q]}{\lambda (\theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2)}$. 由 $Q > l$ 易知, $\varphi_1^* > 0$. 对 φ_1^* 求导有:

$$\frac{\partial \varphi_1^*}{\partial \lambda} = -\frac{\theta^2 Q (l\lambda^2 + Q - l)}{\lambda^2 (Q^2 \theta^2 + 2\rho\sigma^2 \varsigma)} < 0,$$

故 $\lambda = 1$ 时, $\varphi_1^*|_{\min} = \frac{\theta^2 Q^2}{\theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2}$, 即 $\varphi_1^* \geq \frac{\theta^2 Q^2}{\theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2}$. 令 $\frac{\theta^2 [Q^2 - (1-\lambda)^2 l Q]}{\lambda (\theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2)} \geq 1$, 有

$$0 < \lambda \leq \frac{2Ql\theta^2 - (Q^2 \theta^2 + 2\rho\sigma^2 \varsigma - \sqrt{(Q^2 \theta^2 + 2\rho\sigma^2 \varsigma)^2 - 8Ql\rho\sigma^2 \theta^2 \varsigma})}{2Ql\theta^2},$$

则当 $\lambda \in (0, \frac{2Ql\theta^2 - (Q^2 \theta^2 + 2\rho\sigma^2 \varsigma - \sqrt{(Q^2 \theta^2 + 2\rho\sigma^2 \varsigma)^2 - 8Ql\rho\sigma^2 \theta^2 \varsigma})}{2Ql\theta^2})$ 时, $\varphi_1^* > 1$. 特别的, 对于 $\varsigma = 0$ 情形, $\varsigma = 0$ 时, 有 $\varphi_1^* = 1$. 2) 同时具有逆向选择风险和道德风险 (节能能力不可观测) 情形: 由式 (55) 可知, 该情形下制造商向低碳服务提供商提供的节能效益分享比例为:

$$\varphi^*(\theta) = \frac{\theta^2 Q^2 - (1-\lambda)^2 \theta^2 Q l + 2\lambda \theta Q l (1-\lambda) \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}{\lambda \theta^2 Q^2 + 2\varsigma \lambda \sigma^2 \rho + 2\lambda \theta Q^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}.$$

由 $Q > l$ 易知, $\varphi_1^* > 0$. 对 $\varphi^*(\theta)$ 求导有:

$$\frac{\partial \varphi^*(\theta)}{\partial \lambda} = -\frac{\theta Q (\theta (l\lambda^2 + Q - l) + 2l\lambda^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)})}{(Q^2 \theta^2 + 2\rho\sigma^2 \varsigma + 2Q^2 \theta \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}) \lambda^2} < 0,$$

故 $\lambda = 1$ 时, $\varphi^*(\theta) \geq \varphi^*(\theta)|_{\min} = \varphi^*(\theta)|_{\lambda=1} = \frac{\theta^2 Q^2}{\theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2 + 2\theta Q^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}$; 存在 $\lambda^{\varphi(\theta)=1} \in (0, 1]$, 使得

$$\frac{\theta^2 Q^2 - (1-\lambda)^2 \theta^2 Q l + 2(1-\lambda) \lambda \theta Q l \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}{\lambda \theta^2 Q^2 + 2\varsigma \lambda \sigma^2 \rho + 2\lambda \theta Q^2 \frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}} = 1.$$

即当 $\lambda \in (0, \lambda^{\varphi(\theta)=1})$ 时, 有 $\varphi^*(\theta) > 1$. 特别地, 对于节能水平 θ_H , 且 $\varsigma = 0$ 情形, $\lambda = 1$ 时, 有 $\varphi^*(\theta) = 1$. 证毕.

命题 3 证明 首先考虑仅存道德风险情形, 最优风险分担契约下低碳服务提供商面临的风险成本为:

$$C_{r\varphi_1^*} = \frac{1}{2} \lambda \varphi_1^{*2} \varsigma \tau_{tt} \sigma^2 = \frac{1}{2} \lambda \left(\frac{\theta^2 (Q^2 - (1-\lambda)^2 l Q)}{\lambda (\theta^2 Q^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2)} \right)^2 \varsigma \tau_{tt} \sigma^2.$$

对 $C_{r\varphi_1^*}$ 求导有:

$$\frac{\partial C_{r\varphi_1^*}}{\partial \lambda} = -\frac{\tau_{tt} \varsigma \theta^4 Q^2 \sigma^2 ((3\lambda^2 - 2\lambda - 1) l + Q) (-(\lambda - 1)^2 l + Q)}{2\lambda^2 (Q^2 \theta^2 + 2\rho\sigma^2 \varsigma)^2}.$$

故 $\frac{\partial C_{r\varphi_1^*}}{\partial \lambda} < 0$. 同理可证, 在逆向选择风险与道德风险并存情形, $\frac{\partial C_{r\varphi^*(\theta)}}{\partial \lambda} < 0$. 证毕.

命题 4 证明 考虑投资水平不可观测情形, 制造商所提的最优固定转移费用为: $A_1^* = \frac{1}{2} \lambda \tau_{tt} \varsigma \varphi_1^{*2} \sigma^2 + \frac{1}{\lambda \tau_{tt}} U - \frac{\lambda \tau_{tt} \theta^2 (\varphi_1^* Q - l(1-\lambda))}{4\rho}$, 对 A_1^* 关于 φ_1^* 求导有: $\frac{\partial A_1^*}{\partial \varphi_1^*} = -\frac{\lambda \tau_{tt} \theta^2 Q (\varphi_1^* Q - l(1-\lambda))}{2\rho} + \lambda \tau_{tt} \varsigma \varphi_1 \sigma^2$. 当项目节能效益风险不确定性 σ^2 很大, 或者低碳服务提供商的风险规避系数很大时, 有 $A_1^* > 0$, 即低碳服务提供商获得的固定转移费用随着其最优分享比例的增大而增加. 反之, 有 $\frac{\partial A_1^*}{\partial \varphi_1^*} < 0$, 即当 $A_1^* > 0$ 时, 低碳服务提供商获得的固定转移费用随着其最优分享比例的增大而减少; 当 $A_1^* < 0$ 时, 低碳服务提供商向制造商支付的节能保证金随着最优分享比例的增大而增加. 证毕.

命题 5 证明 1) 仅存道德风险 (投资水平不可观测) 情形: 由式 (17) 可知, 制造商向低碳服务提供商提供的节能效益分享比例为: $\varphi_1^* = \frac{\theta^2[Q^2-(1-\lambda)^2lQ]}{\lambda(\theta^2Q^2+2\rho\varsigma\sigma^2)}$. φ_1^* 关于 ρ 、 σ^2 及 ς 的偏导数为: $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\rho} = -\frac{2\theta^2[(Q^2-(1-\lambda)^2lQ)\varsigma\sigma^2]}{\lambda(\theta^2Q^2+2\rho\varsigma\sigma^2)^2}$; $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\sigma^2} = -\frac{2\theta^2[Q^2-(1-\lambda)^2lQ]\rho\varsigma}{\lambda(\theta^2Q^2+2\rho\varsigma\sigma^2)^2}$; $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\varsigma} = -\frac{2\theta^2[Q^2-(1-\lambda)^2lQ]\rho\sigma^2}{\lambda(\theta^2Q^2+2\rho\varsigma\sigma^2)^2}$; $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\theta} = \frac{2\rho\varsigma\sigma^2[Q^2-(1-\lambda)^2lQ]}{\lambda(\theta^2Q^2+2\rho\varsigma\sigma^2)^2}$. 显然有: $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\rho} < 0$, $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\sigma^2} < 0$, $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\varsigma} < 0$, $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\theta} > 0$. 因为 $\frac{\partial\theta^2}{\partial\theta} > 0$, 故有 $\frac{\partial\varphi_1^*}{\partial\theta} > 0$.

2) 同时具有逆向选择风险和道德风险 (节能能力不可观测) 情形: 由式 (55) 可知, 该情形下制造商向低碳服务提供商提供的节能效益分享比例为: $\varphi^*(\theta) = \frac{\theta^2Q^2-(1-\lambda)^2\theta^2Ql+2\lambda(1-\lambda)\theta Ql\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}{\lambda\theta^2Q^2+2\varsigma\lambda\sigma^2\rho+2\lambda\theta Q^2\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)}}$. $\varphi^*(\theta)$ 关于 ρ 、 σ^2 及 ς 的偏导数为:

$$\begin{aligned}\frac{\partial\varphi^*(\theta)}{\partial\rho} &= -\frac{2\lambda\varsigma\sigma^2(\theta^2Q^2-(1-\lambda)^2\theta^2Ql+2\lambda(1-\lambda)\theta Ql\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)})}{(\lambda\theta^2Q^2+2\varsigma\lambda\sigma^2\rho+2\lambda\theta Q^2\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)})^2}; \\ \frac{\partial\varphi^*(\theta)}{\partial\sigma^2} &= -\frac{2\varsigma\rho(\theta^2Q^2-(1-\lambda)^2\theta^2Ql+2\lambda(1-\lambda)\theta Ql\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)})}{(\lambda\theta^2Q^2+2\varsigma\lambda\sigma^2\rho+2\lambda\theta Q^2\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)})^2}; \\ \frac{\partial\varphi^*(\theta)}{\partial\varsigma} &= -\frac{2\rho\sigma^2(\theta^2Q^2-(1-\lambda)^2\theta^2Ql+2\lambda(1-\lambda)\theta Ql\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)})}{(\lambda\theta^2Q^2+2\varsigma\lambda\sigma^2\rho+2\lambda\theta Q^2\frac{(1-F(\theta))}{f(\theta)})^2}.\end{aligned}$$

同样, 显然有: $\frac{\partial\varphi^*(\theta)}{\partial\rho} < 0$, $\frac{\partial\varphi^*(\theta)}{\partial\sigma^2} < 0$, $\frac{\partial\varphi^*(\theta)}{\partial\varsigma} < 0$. 由式 (51) 可知, $\frac{\partial\varphi^*(\theta)}{\partial\theta} > 0$. 结合情形 1) 和 2) 命题可得证. 证毕.

命题 6 证明 考虑投资水平不可观测时, 制造商向低碳服务提供商支付的期望报酬为:

$$E(S(\varphi_1^*, A_1^*)) = \underline{U} + \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi_1^{*2}\sigma^2 - \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi_1^*Q - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \varphi_1^*\frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi_1^*Q - (1-\lambda)l)}{2\rho}Q,$$

对其求导有:

$$\frac{\partial E(S(\varphi_1^*, A_1^*))}{\partial\varphi_1^*} = \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi_1^*(Q^2\theta^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2)}{2\rho}.$$

节能能力不可观测情形, 低碳服务的期望报酬为:

$$\begin{aligned}E(S(\varphi^*(\theta))) &= \underline{U} + \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^{*2}(\theta)\sigma^2 - \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \\ &\quad \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - (1-\lambda)l)^2(1-F(\theta))}{2\rho f(\theta)} + \varphi^*(\theta)\frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - (1-\lambda)l)}{2\rho}Q.\end{aligned}$$

对其求导有:

$$\frac{\partial E(S(\varphi^*(\theta)))}{\partial\varphi^*(\theta)} = \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2(\varphi^*(\theta)(Q^2\theta^2 + 2\rho\varsigma\sigma^2 + \theta Q^2\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)}) - (1-\lambda)l\theta Q\frac{1-F(\theta)}{f(\theta)})}{2\rho}.$$

证毕.

命题 7 证明 考虑低碳服务提供商节能水平信息不对称情形下, 制造商向低碳服务提供商支付的期望报酬为: $E(S(\varphi^*(\theta))) = \underline{U} + \frac{1}{2}\varsigma\lambda^2\tau_{tt}^2\varphi^{*2}(\theta)\sigma^2 - \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - (1-\lambda)l)^2}{4\rho} + \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - (1-\lambda)l)^2(1-F(\theta))}{2\rho f(\theta)} + \varphi^*(\theta)\frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta^2(\varphi^*(\theta)Q - (1-\lambda)l)}{2\rho}Q$ 相较于投资水平不可观测情形下同等收益分享比例 (保证了与节能水平信息不对称情形有相同的投资水平、节能效益和风险成本), 制造商向低碳服务提供商支付的额外报酬即为低碳服务提供商在节能信息不对称上获取的信息租金:

$$\Delta IF = E(S(\varphi^*(\theta))) - E(S(\varphi_1^*, A_1^*)|_{\varphi_1^*=\varphi^*(\theta)}) = \frac{\lambda^2\tau_{tt}^2\theta(Q\varphi^*(\theta) - (1-\lambda)l)^2(1-F(\theta))}{2\rho f(\theta)}.$$

证毕.

命题 8 证明 $AC = \frac{\varsigma\theta^2\sigma^2[\tau_{tt}Q^2-(1-\lambda^2)(1-\lambda)^2\tau_{tt}^2l^2]}{2Q^2\theta^2+4\rho\varsigma\sigma^2}$, $\frac{\partial AC}{\partial\varsigma} = \frac{Q^2\varsigma\theta^2\sigma^2(\tau_{tt}Q^2-(1-\lambda^2)(1-\lambda)^2\tau_{tt}^2l^2)}{2(Q^2\theta^2+2\rho\varsigma\sigma^2)^2} > 0$; 同理可证 $\frac{\partial AC}{\partial\theta} > 0$, $\frac{\partial AC}{\partial\sigma^2} > 0$. 证毕.

命题 9 证明 投资水平不可观测情形: $\alpha_0^* - \alpha_1^* = \frac{\theta^2\tau_{tt}(Q-(1-\lambda)l)}{2\rho} - \frac{\tau_{tt}\theta^2(\theta^2Q^3-(1-\lambda)(\theta^2Q^2+2\lambda\rho\varsigma\sigma^2)l)}{2(\theta^2Q^2+2\rho\varsigma\sigma^2)\rho} = \frac{\theta^2\tau_{tt}(Q-(1-\lambda)^2l)\varsigma\sigma^2}{\theta^2Q^2+2\rho\varsigma\sigma^2} \geq 0$. 即 $\alpha_0^* \geq \alpha_1^*$, 继而有, $I_o^* \geq I_1^*$. 当 $\varsigma = 0$ 或 $\sigma^2 = 0$ 时, $I_1^* = I_o^*$, $\alpha_1^* = \alpha_0^*$; 同理可证, 节能能力信息不完全情形: $\alpha_0^* \geq \alpha^*(\theta)$, $I_o^* \geq I^*(\theta)$. 当 $\varsigma = 0$ 或 $\sigma^2 = 0$ 时, 对于 $\theta = \theta_H$ 有, $\alpha_0^* = \alpha^*(\theta)$, $I_o^* = I^*(\theta)$. 证毕.