

基于非合作博弈的医院EPC招投标竞争机制研究

李简妮, 倪 枫, 刘 姜*, 王 涛, 朱晨帆

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月15日

摘 要

合同能源管理是推进医院节能改造的有效途径。为分析节能公司与各方的互动关系及其报价行为对各方收益和策略的影响, 并解决医院合同能源管理项目招投标过程中存在的问题, 本文构建了节能公司与不同参与方串谋的Stackberg博弈模型和两家节能服务公司公平竞价的Bertrand博弈模型。研究发现: 在Stackberg博弈模型中, 节能公司1的怠工程度对各方收益影响显著, 地方政府和医院处于劣势, 而节能公司2收益相对稳定。具体来说, 节能公司1与地方政府合谋时, 随着节能公司1怠工程度的加大, 医院策略受限, 地方政府收益快速下降; 节能公司1与医院合谋时, 随着节能公司1怠工程度的加大, 地方政府收益下降至零, 而两家节能公司收益稳定。地方政府试图通过监管手段降低节能公司的怠工行为, 但节能公司可能通过串通规避惩罚; 节能公司1与地方政府合谋时, 医院策略受限, 地方政府收益可能快速下降; 与医院合谋时, 地方政府收益下降至零, 而两家节能公司收益稳定; 项目所需的生产要素投入量、医院的节能收益系数对各方收益的影响因合谋关系而异。在Bertrand模型中, 节能公司的竞争强度与均衡价格呈负相关, 单位工作成本与均衡价格成正比, 地方政府的补贴与均衡价格成反比。医院的单位购买成本上限与节能公司1的报价成反比, 与节能公司2的报价成正比。节能公司1因较低的单位成本和较高的竞争强度, 在市场中更具价格优势。这对医院和地方政府维护招标秩序、改善自身收益具有参考价值。

关键词

合同能源管理, 招投标, Stackberg博弈, Bertrand博弈

Non-Cooperative Game Analysis for the Bidding Competition Mechanism of EPC Led by Hospital

Jianni Li, Feng Ni, Jiang Liu*, Tao Wang, Chenfan Zhu

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

*通讯作者。

文章引用: 李简妮, 倪枫, 刘姜, 王涛, 朱晨帆. 基于非合作博弈的医院 EPC 招投标竞争机制研究[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(2): 620-639. DOI: 10.12677/orf.2025.152111

Abstract

Energy performance contracting is an effective way to promote energy-saving renovations in hospitals. To analyze the interaction between an energy-saving company and different participants and the impact of companies' bidding behavior, and solve the problems in the bidding of hospital energy performance contracting projects, this paper constructs a Stackberg game model of collusion between an energy-saving company and different participants and a Bertrand game model of fair bidding between two companies. The research finds that in the Stackberg game model, the degree of shirking of energy-saving Company 1 has a significant impact on the profits of all parties. The local government and the hospital are at a disadvantage, while the profit of energy-saving Company 2 is relatively stable. To be specific, when energy-saving Company 1 colludes with the local government, with the increase of the degree of shirking of energy-saving Company 1, the hospital's strategy is restricted, and the local government's profit may decline rapidly. When energy-saving Company 1 colludes with the hospital, with the increase of the degree of shirking of energy-saving Company 1, the local government's profit drops to zero, while the profits of two companies are stable. The local government attempts to reduce these companies' shirking behavior through regulatory means, but energy-saving companies may collude to avoid punishment. When energy-saving Company 1 colludes with the local government, the hospital's strategy is restricted, and the local government's profit may decline rapidly. When energy-saving Company 1 colludes with the hospital, the local government's profit drops to zero, while the profits of the two companies are stable. The required input of production factors for the project and the energy-saving benefit coefficient of the hospital have different impacts on the profits of all parties in different collusion relationships. In the Bertrand model, the competition intensity of energy-saving companies is negatively correlated with their equilibrium prices, the unit work cost is directly proportional to the equilibrium price, and the local government subsidy is inversely proportional to the equilibrium price. The upper limit of the hospital's unit purchase cost is inversely proportional to the price quoted by Company 1 and directly proportional to the price quoted by Company 2. Energy-saving Company 1 has a greater price advantage in the market due to its lower unit cost and higher competition intensity. These conclusions have reference value for hospitals and local governments to maintain the bidding order and improve their own profits.

Keywords

Energy Performance Contracting (EPC), Bidding and Tendering, Stackberg Game, Bertrand Game

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

医院是必须提供 24/7 全天候服务的建筑,其能源系统更为复杂,能源形式多样,设备数量众多、分布广泛[1]。能耗系统运行时间较其他公共建筑长[2]。作为能源消耗密集型机构,医院在碳排放中占有重要份额[1] [3] [4],这既影响到了医院的环境质量,又影响到了当地利益相关者的总体福祉、健康与安全[5]。因此,医院节能改造不仅是能源管理的需求,更是社会责任和可持续发展的必然选择。

受中国低碳发展、节约资源和减少污染的建筑节能政策的推动,合同能源管理(Energy Performance Contracting, EPC)在医院后勤节能管理中日益受到重视[6]。它是客户与节能服务公司(ESCO)之间的一种

合同安排,由节能服务公司提供一整套系统的服务,包括提供能源使用诊断、节能项目设计、融资、改造(施工、设备安装、调试)、运营管理,并按合同约定从客户节能改造后获得的节能效益中收回投资和利润[7]-[9]。中国建筑规模大,建筑领域节能潜力巨大。与发达国家相比,中国的建筑节能工作更加注重提高和节约建筑能效[10]。

招投标是一种公开、透明的资源配置机制,广泛应用于工程建设、采购和服务领域。其基本理论源于经济学中的竞争机制和博弈论,旨在通过竞争实现资源的最优配置[11]。作为利用非经营性国有资产依法设立的医疗卫生服务机构,公立医院的合同能源管理工作需要通过招投标的形式选取合格的承包商[12]。对公立医院和节能服务公司来说,一方面,由于医院节能潜力、资金保障度、财务信用度均较高,其合同能源管理项目会吸引大量节能服务公司参与投标[13]。另一方面,医院功能多样,能源需求复杂,且对能源供应的可靠性要求极高,任何能源中断都可能影响医疗服务的正常运行,因此改造既需兼顾各系统的协调性,又必须确保能源系统的稳定性[14][15]。而且节能改造项目通常涉及长期合作,时间跨度在5至10年。这对投标方的综合能力,包括技术实力、财务稳定性和履约能力提出了更高的要求[16]。巨大的资金投入、较长的执行周期和管理的不确定性使选择一个有能力的承包商以顺利交付项目成为了一项具有挑战性的任务[17]。

投标策略是利用所有可用的相关资源,通过考虑包括内部、外部和环境在内的各个方面,以提供全面和有竞争力的投标为目的的一种管理技巧,目的是在投标竞争中获胜,并提供最大的项目绩效[18]。为了减少或规避合理竞争所带来的不确定性和风险,很多投标方通过利益主体之间的非法合作,即串通投标,来提高中标的可能性,达到维护自身利益的目的[19]。在中国,串通投标的案件屡见不鲜,2009年至2012年间,共发生了3305起串通投标案件。安徽、江苏、陕西、福建、广东等省多次举报投标串通的存在[20]。

在投标人与招标人相互串通的案件中,往往存在贿赂、钱权交易等腐败现象[19]。Freeman (1979)认为核心度高的成员比边缘的成员有更多的联系,Brass (1981)认为处于核心位置可以带来更高的权利和丰富的社会资源。因此,处于核心结构的竞标者比其他竞标者出价次数更多,其行为表现出集群性,使得串谋嫌疑更大[20]。另外,串通投标犯罪凭借其低犯罪成本滋生和吸引了大量的黑恶势力参与其中。这些黑恶势力依靠其暴力手段操纵招投标进程,迫使其他投标者退出竞争或者使其在竞争中处于不利的位置,形成对诸多工程项目的非法控制,进而谋取非法利益[19]。这些行为不仅破坏了我国社会主义市场经济制度的公平竞争原则,也对国家、社会、集体的利益和公民的合法权益造成了实质性的损害[19]。

近年来,有关招投标中的非合作博弈的文献主要研究招投标中各方的竞价机制和竞价策略。杨锋、何慕佳以政府为节能服务需求方,通过非合作博弈研究政府和多ESCO间的逆向拍卖行为[21]。李学平、王健民等提出了一种包含能源公司、能源服务商和用户的综合能源市场定价机制,建立了基于零售价格弹性的能源服务商的非合作博弈模型,利用Nikaido-Isoda函数将能源服务商之间的非合作博弈模型转化为最优问题进行求解[22]。何建洪将供应链多属性逆向拍卖方法引入研究政府工程多属性招投标,构建了公开招标人偏好的政府工程多属性招投标非合作博弈模型,分析了招、投标双方的竞价策略[23]。吕炜、贺昌政构建了政府工程多属性招投标非合作动态博弈模型,把投标价格视为竞标质量和工期的函数,求出了投标人的最优竞标战略[24]。从总体看,有关招投标的研究主要集中在招标中主导方的策略优化、串标行为的发生机制和控制对策、串标行为的危害性和法学研究等方面,有关招投标的非合作博弈的研究较少。

招投标中的竞争机制主要分为非法竞争和合法竞争两大类。Stackelberg博弈和Bertrand博弈为招投标竞争机制的设计提供了重要的理论工具。Stackelberg博弈是一种领导者-跟随者模型,由德国经济学家Heinrich Stackelberg于1934年提出。在该模型中,领导者先行动,跟随者根据领导者的决策作出反应,领导者通过预测跟随者的反应来优化自身策略。其核心模型包括纳什均衡的扩展形式,强调决策的顺序

性和策略互动[25]。Bertrand 博弈由法国经济学家 Joseph Bertrand 于 1883 年提出，主要用于分析企业通过价格竞争的市场行为[26]。本研究利用 Stackelberg 博弈模型和 Bertrand 博弈模型构建了医院、地方政府、两家实力不一的节能公司参与的招投标竞争机制，再现节能公司与不同参与方串谋时各方收益的变化情形和两家节能公司公平竞争时其收益的变化情形。通过数值仿真分析关键参数之间的相互作用及其对各方收益的影响机制，帮助参与方在实际招投标过程中更好地应对信息不对称、利益冲突等问题，从而提高节能改造项目的成功率和社会效益。

2. Stackelberg 博弈模型

2.1. 问题描述和基本假设

在医院合同能源管理项目的招标过程中，会有多家市场竞争力不一的节能公司参与投标，通过策略性行为(如合谋或违规操作)来获取竞争优势。为简化分析，假定有两家竞争力不一的节能公司投标。招标的博弈过程有四个参与方：医院、节能公司 1、节能公司 2、地方政府。医院负责组织招投标活动；两家节能公司根据医院要求、自身情况和竞争对手情况动态权衡项目方案和报价策略；地方政府负责监管整个招投标进程，确保招标的公正性和合法性。四方均是有限理性的，追求收益最大化。医院希望以最小成本获得高质量服务，地方政府要平衡政策和财政，节能公司则要竞争中标同时最大化利润。其中，节能公司 1 具有较强的市场竞争力，为了增大中标的可能性，可能拉拢节能公司 2，共同制定投标策略，操纵投标价格，也可能贿赂医院或地方政府相关工作人员以违规中标。本文旨在用 Stackelberg 博弈模拟招投标中的多种合谋情形，揭示节能公司与不同参与方合谋时的策略选择及其对各方收益的影响，为医院和地方政府制定有效的监管策略提供理论依据。

2.2. 模型参数

本博弈模型涉及医院、地方政府、节能公司 1 和节能公司 2 四类参与者，博弈过程中各方的参数如下：

作为项目需求方的公立医院，其核心职责在于通过节能改造实现运营成本优化，博弈目标聚焦于最小化改造成本与风险的同时，确保医疗服务系统的稳定性。它既需要和节能服务公司、地方政府提前确认合同能源管理的收益和收益分配方式，即节能收益系数 γ 、医院和地方政府的收益分配比例 θ ，又需要权衡节能收益、改造投入及面临的风险，即对节能服务的最初单位报价 P_1 、项目所需的生产要素投入量 q_0 、监管要素投入量 q_1 、单位监管成本 C_{11} 和得罪串标方的损失 C_{12} 。

地方政府作为政策制定者与公共资金监管方，需平衡区域节能减排目标与财政支出效率，并设计惩罚机制引导多方主体行为。其效用函数涉及地方政府的监管要素投入量 q_2 、单位工作成本 C_{21} 、得罪串标主导方的损失 C_{22} 、节能工作出现失误的单位名誉损失 C_{23} 、纵向串标的名誉损失程度 η 等变量，其惩罚机制包括对医院受贿行为的惩罚系数 φ_1 、对医院总工损失的惩罚系数 μ_1 、对节能公司施贿受贿行为的惩罚系数 φ_2 、对节能公司总工行为的惩罚系数 μ_2 。

节能公司 1 是潜在串标主导方，其策略变量包括单位工作成本 C_{31} 、固定投标成本 C_{32} 、串标行贿金额 C_{33} 、对医院报价的提升比例 ϵ 、总工程进度 σ_1 、串标曝光后被拉入黑名单年限 τ 。节能公司 2 是跟随方，其策略变量包括节能公司 2 的固定投标成本 C_{41} 、得罪串标主导方的损失 C_{42} 、总工程进度 σ_2 。

上述参数的取值均大于 0，其中，医院和地方政府的收益分配比例 θ 、地方政府纵向串标的名誉损失程度 η 、地方政府对医院受贿行为的惩罚系数 φ_1 、对医院总工损失的惩罚系数 μ_1 、对节能公司施贿受贿行为的惩罚系数 φ_2 、对节能公司总工行为的惩罚系数 μ_2 、节能公司 1 的总工程进度 σ_1 、节能公司 2 的总工程进度 σ_2 的取值范围在 0 到 1 之间，节能公司 1 对医院报价的提升比例 ϵ 的取值范围在 -0.1 到 0.1 之间。医院的合同能源管理项目最短 3 年，长则 5 到 10 年，节能公司投标违规后的禁标时间为 3 年。因此，假

定项目总时长为 1，节能公司 1 串标曝光后被拉入黑名单年限的取值范围在 0.3 到 1 之间。

2.3. 模型构建

2.3.1. 两家节能公司合谋

在 Stackberg 博弈框架下，医院节能改造招标中，节能公司 1 作为潜在串标主导方试图引导节能公司 2 形成串谋围标联盟。双方通过采用对节能公司 1 有利的报价策略迫使医院做出让步，从而降低竞争难度，提高中标概率。博弈时序如下：医院设定招标规则并明确监管力度，若发现价格异常将启动调查；节能公司 1 主动向节能公司 2 传递串谋信号，通过私下沟通共享投标信息，承诺共同抬高投标报价，并分配中标后收益；节能公司 2 选择接受合作，参加招标的目的由中标变为获取节能公司 1 的受贿金额，并采取怠工策略；地方政府基于社会效益目标，对中标项目进行回溯审查，若发现围标证据则对双方处以罚款、市场禁入等惩罚。

在 Stackelberg 博弈中，领导者率先行动，追随者根据观察到的策略进行最优响应。采用逆向归纳法的核心原因在于博弈的动态时序性，其思路分为两步：首先，假设领导者策略固定，分析追随者的最大化收益决策，形成反应函数；随后，领导者将追随者的反应函数纳入自身收益模型，求解全局最优解[27]。这种方法通过“向后推理”消除不可置信威胁，使均衡策略具有时序理性，同时避免传统纳什均衡中可能存在的策略动态不一致问题，更贴合现实决策逻辑。

在节能公司合谋的情形中，博弈方的决策顺序为医院、节能公司 1、节能公司 2、地方政府。运用逆向归纳法依次求解一些参数的最优值和各方的最佳收益。

地方政府的收益函数为

$$\begin{aligned} \pi_2 = & \left[\theta \gamma \left[\frac{\ln(e - \sigma_1) q_0}{(1 + \epsilon)} \right]^2 - q_2 C_{21} - C_{22} - \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] \left[\frac{q_0}{(1 + \epsilon)} \right]^2 C_{23} \right. \\ & \left. + 2\phi_2 C_{33} + \mu_2 \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] \left[\frac{q_0}{(1 + \epsilon)} \right]^2 \right], \end{aligned}$$

包括医院分配的节能收益、监管成本、得罪串标主导方的损失、节能工作出现失误的名誉损失和违规罚款五大部分。 π_2 对节能公司 1 的怠工程度 σ_1 的一阶导和二阶导分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_2}{\partial \sigma_1} &= \frac{\gamma \mu_2 q_0^2}{(e - \sigma_1)(1 + \epsilon)^2} - \frac{\gamma q_0^2 C_{23}}{(e - \sigma_1)(1 + \epsilon)^2} - \frac{2\gamma q_0^2 \theta \ln(e - \sigma_1)}{(e - \sigma_1)(1 + \epsilon)^2}, \\ \frac{\partial^2 \pi_2}{\partial \sigma_1^2} &= \frac{\gamma \mu_2 q_0^2}{(e - \sigma_1)^2 (1 + \epsilon)^2} - \frac{\gamma q_0^2 C_{23}}{(e - \sigma_1)^2 (1 + \epsilon)^2} - \frac{2\gamma q_0^2 \theta \ln(e - \sigma_1)}{(e - \sigma_1)^2 (1 + \epsilon)^2} + \frac{2\gamma q_0^2 \theta}{(e - \sigma_1)^2 (1 + \epsilon)^2}, \end{aligned}$$

令 $\frac{\partial \pi_2}{\partial \sigma_1} = 0$ ，可得 $\sigma_1 = e - e^{\frac{\mu_2 - C_{23}}{2\theta}}$ 。当 $\mu_2 + 2\theta - C_{23} - 2\theta \ln(e - \sigma_1) < 0$ 时，这是 σ_1 的最大值；当 $\mu_2 + 2\theta - C_{23} - 2\theta \ln(e - \sigma_1) > 0$ 时，这是 σ_1 的最小值。节能公司 1 的怠工程度会影响地方政府的节能收益，因此，地方政府会采用监管手段，把 σ_1 的取值压到最小，以扩大自身收益。

节能公司 2 的收益函数为 $\pi_4 = C_{33} - \ln(e - \sigma_2) C_{41} - C_{33} - P_1 q_0$ ，对 σ_2 的一阶导和二阶导分别为

$$\frac{\partial \pi_4}{\partial \sigma_2} = \frac{C_{41}}{e - 2}, \quad \frac{\partial^2 \pi_4}{\partial \sigma_2^2} = \frac{C_{41}}{(e - 2)^2}。由于自然对数 $e = 2.7$ ， $C_{41} > 0$ ， $\frac{\partial^2 \pi_4}{\partial \sigma_2^2} > 0$ ， σ_2 只有极小值，单调递增。$$

当节能公司 1 串通节能公司 2 围标时，节能公司 2 参与投标的目的由中标变为赚取围标的受贿金额，因

此, 极有可能出现怠工现象。

节能公司 1 的收益函数为

$$\pi_3 = \epsilon P_1 q_0 - [1 - \ln(e - \sigma_1)] q_0 C_{31} - C_{32} - C_{33} - \varphi_2 C_{33} - \mu_2 \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] q_0^2 - \tau P_1 q_0,$$

把 σ_1 的最优值代入 π_3 得,

$$\pi_3 = \epsilon P_1 q_0 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} q_0 C_{31} - C_{32} - C_{33} - \varphi_2 C_{33} - \mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right] q_0^2 - \tau P_1 q_0,$$

其对节能公司对医院报价的提升比例 ϵ 、项目所需的生产要素投入量 q_0 、地方政府对节能公司怠工行为的惩罚系数 μ_2 的一阶导为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_3}{\partial \epsilon} &= \frac{C_{31} q_0 (\mu_2 - C_{23})}{2\theta (1 + \epsilon)^2} - \frac{2\gamma \mu_2 q_0^2 \left(\frac{\mu_2 - C_{23}}{2\theta} - 1 \right)}{(1 + \epsilon)^3}, \\ \frac{\partial \pi_3}{\partial q_0} &= \epsilon P_1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} C_{31} - 2\mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right] q_0 - \tau P_1, \\ \frac{\partial \pi_3}{\partial \mu_2} &= -\frac{q_0 C_{31}}{2\theta} - \gamma \left[1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right] q_0^2, \end{aligned}$$

二阶导为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \pi_3}{\partial q_0^2} &= -2\mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right], \\ \frac{\partial^2 \pi_3}{\partial \mu_2^2} &= -\gamma \left[1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right] q_0^2 = \frac{\mu_2}{2\theta} q_0^2, \\ \frac{\partial^2 \pi_3}{\partial \epsilon^2} &= \frac{6\gamma \mu_2 q_0^2 \left(\frac{\mu_2 - C_{23}}{2\theta} - 1 \right)}{(1 + \epsilon)^4} - \frac{2C_{31} q_0 (\mu_2 - C_{23})}{2\theta (1 + \epsilon)^3}, \end{aligned}$$

$$\text{当 } \frac{\partial^2 \pi_3}{\partial q_0^2} < 0, \text{ 即 } 1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} > 0 \text{ 时, } q_0 \text{ 可以取到极大值 } \frac{\epsilon P_1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} - \tau P_1}{2\mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right]}.$$

$$\text{当 } \frac{\partial^2 \pi_3}{\partial \epsilon^2} < 0 \text{ 时, } \epsilon \text{ 可以取到极大值 } \frac{3\gamma \mu_2 q_0 (\mu_2 - C_{23} - 2\theta)}{C_{31} (\mu_2 - C_{23})} - 1.$$

$$\text{由于 } \frac{\partial^2 \pi_3}{\partial \mu_2^2} < 0, \mu_2 \text{ 可以取到极大值 } 2\theta + \frac{C_{23}}{2} + \frac{C_{31}}{2\gamma q_0}.$$

由上述分析可知, 当节能公司 1 成为潜在的主导方时, 其会通过各种措施, 比如串通节能公司 2 对招标方案提出异议, 在限制范围内不断抬高报价, 压制医院对生产要素投入量的要求, 并采取多种措施隐瞒围标行为, 降低地方政府对自己怠工行为的惩罚力度。

$$\text{医院的收益函数为 } \pi_1 = \gamma \left[\frac{\ln(e - \sigma_1) q_0}{(1 + \epsilon)} \right]^2 - q_1 C_{11} - C_{12} - P_1 q_0, \text{ 把 } \sigma_1、\epsilon、q_0 \text{ 的最优值代入 } \pi_1 \text{ 得:}$$

$$\pi_1 = \gamma \left[\frac{C_{31}(\mu_2 - C_{23})^2}{6\gamma\theta\mu_2(\mu_2 - C_{23} - 2\theta)} \right]^2 - q_1 C_{11} - C_{12} - P_1 \frac{2\theta(\epsilon - \tau)P_1 - (\mu_2 - C_{23})}{2\mu_2\gamma[2\theta - (\mu_2 - C_{23})]},$$

医院无法控制参数的取值。

2.3.2. 节能公司 1 与地方政府合谋

在节能公司 1 与地方政府合谋的情形中, 节能公司 1、地方政府、节能公司 2 和医院依次做出决策。节能公司 1 为了在竞标中胜出, 选择向地方政府行贿以获取竞争优势。地方政府在收到贿赂后, 选择监管懈怠, 未能严格审查竞标过程, 并向节能公司 1 泄露项目信息和招标规则, 帮助其制定更符合医院偏好的投标策略。节能公司 2 作为竞争对手, 虽然提供了更具成本效益或技术优势的方案, 但由于地方政府的偏袒, 失去了公平竞争的机会, 无法获得中标机会, 从而遭受经济损失。医院作为项目的需求方, 原本期望通过节能项目获得能源成本降低等收益, 但由于地方政府监管不力, 节能公司 1 可能无法提供高质量的服务, 导致医院的节能效果不佳, 利益受损。

这一情形中, 博弈方的决策顺序为节能公司 1、地方政府、节能公司 2、医院, 运用逆向归纳法依次求解一些参数的最优值和各方的最佳收益。

医院的收益函数为 $\pi_1 = \gamma \left[\frac{\ln(e - \sigma_1)q_0}{(1 + \epsilon)} \right]^2 - q_1 C_{11} - C_{12} - P_1 q_0$, 其对项目所需的生产要素投入量的一阶导和二阶导分别为

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial q_0} = 2\gamma q_0 \ln(e - \sigma_1)^2 - P_1,$$

$$\frac{\partial^2 \pi_1}{\partial q_0^2} = 2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2,$$

由二阶导的表达式可得, $\frac{\partial^2 \pi_1}{\partial q_0^2}$ 始终大于 0, q_0 只有极小值 $\frac{P_1}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2}$ 。在节能公司 1 与地方政府合谋的情形中, 各方博弈策略不受医院控制, 医院只能提高对生产要素投入量的要求, 才能维护自身利益。

节能公司 2 的收益表达式为 $\pi_4 = \tau P_1 q_0 - C_{41} - C_{42}$, 把 q_0 的最优值代入得

$$\pi_4 = \frac{\tau P_1^2}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2} - C_{41} - C_{42},$$

其无法影响各参数的取值。

地方政府的收益表达式为 $\pi_2 = \theta\gamma \left[\frac{\ln(e - \sigma_1)q_0}{(1 + \epsilon)} \right]^2 - \gamma[1 - \ln(e - \sigma_1)]q_0^2 C_{23} + C_{33} - \eta C_{33}$, 把 q_0 的最优值代入得:

$$\pi_2 = \theta\gamma \left[\ln(e - \sigma_1) \frac{P_1}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2} \right]^2 - \gamma[1 - \ln(e - \sigma_1)] \frac{P_1}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2} C_{23} + C_{33} - \eta C_{33},$$

其对医院的收益系数 γ 的一阶导和二阶导分别为

$$\frac{\partial \pi_2}{\partial \gamma} = \frac{\theta P_1 [\ln(e - \sigma_1)]^2 - [1 - \ln(e - \sigma_1)] P_1^2}{16\gamma [\ln(e - \sigma_1)]^2},$$

$$\frac{\partial^2 \pi_2}{\partial \gamma^2} = \frac{[1 - \ln(e - \sigma_1)] P_1^2 - \theta P_1 [\ln(e - \sigma_1)]^2}{16\gamma^2 [\ln(e - \sigma_1)]^2},$$

当 $\frac{\partial^2 \pi_2}{\partial \gamma^2} < 0$, 即 $[1 - \ln(e - \sigma_1)]P_1^2 - \theta P_1 [\ln(e - \sigma_1)]^2 < 0$ 时, γ 可以取到最大值。其取值情况受到 σ_1 、 P_1 、 θ 等参数的影响。

节能公司 1 的收益函数为 $\pi_3 = P_1 q_0 - \ln(e - \sigma_1) q_0 C_{31} - C_{32} - C_{33} - \tau P_1 q_0$, 把 q_0 的最优值代入 π_3 的表达式得

$$\begin{aligned}\pi_3 &= \frac{P_1^2}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2} - \ln(e - \sigma_1) \frac{P_1}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2} C_{31} - C_{32} - C_{33} - \tau \frac{P_1^2}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)^2} \\ &= (1 - \tau) \frac{P_1^2}{4\gamma \ln(e - \sigma_1)} - \ln(e - \sigma_1) \frac{P_1}{4\gamma} C_{31} - C_{32} - C_{33},\end{aligned}$$

π_3 对 P_1 的一阶导和二阶导分别为

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi_3}{\partial P_1} &= (1 - \tau) \frac{P_1}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)} - \ln(e - \sigma_1) \frac{C_{31}}{4\gamma} - C_{32} - C_{33}, \\ \frac{\partial^2 \pi_3}{\partial P_1^2} &= \frac{(1 - \tau)}{2\gamma \ln(e - \sigma_1)}, \quad \frac{\partial \pi_3}{\partial P_1} = 0,\end{aligned}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_3}{\partial P_1^2}$ 始终大于 0, P_1 只能取到极小值, 令 $\frac{\partial \pi_3}{\partial P_1} = 0$ 得,

$$P_1 = \frac{[\ln(e - \sigma_1)]^2 \frac{C_{31}}{2} + 2\gamma \ln(e - \sigma_1)(C_{32} + C_{33})}{1 - \tau}.$$

在这一博弈过程中, 节能公司 1 通过不正当手段影响了地方政府的决策, 地方政府因监管不力而未能维护公平竞争环境, 节能公司 2 和医院则因这一系列决策而面临潜在的利益损失。这一情形揭示了在缺乏有效监管和透明度的情况下, 博弈各方的利益可能受到不公正的影响。

2.3.3. 节能公司 1 与医院合谋

在医院合同能源管理项目招投标过程中, 医院主管人员在制定评标要求和技术参数等环节具有重要影响力, 节能公司 1 为争取中标, 向医院主管人员行贿。医院主管人员受贿后根据节能公司 1 的要求, 设置具有排他性或倾向性的招标条件, 使节能公司 1 更容易中标。地方政府作为监管方, 发现后对节能公司 1 和医院分别处以行政处罚和罚款。节能公司 1 因违规被拉入黑名单, 失去投标资格。节能公司 2 虽因竞争加剧付出较大投标成本, 利益受损, 但因节能公司 1 出局, 获得了潜在的竞争机会。

在这一情形中, 博弈方的决策顺序为医院、节能公司 1、地方政府、节能公司 2, 运用逆向归纳法依次求解一些参数的最优值和各方的最佳收益。

节能公司 2 的收益函数为 $\pi_4 = \tau P_1 q_0 - C_{41} - C_{42}$ 。由 π_4 表达式可知, 节能公司 2 无法影响各参数的取值。

地方政府的收益函数为

$$\begin{aligned}\pi_2 &= \theta \gamma [\ln(e - \sigma_1) q_0]^2 - q_2 C_{21} - C_{22} - \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] q_0^2 C_{23} + \varphi_1 C_{33} \\ &\quad + \mu_1 \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] q_0^2 + \varphi_2 C_{33} + \mu_2 \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] q_0^2,\end{aligned}$$

π_2 对节能公司 1 的总工程度 σ_1 的一阶导和二阶导分别为

$$\frac{\partial \pi_2}{\partial \sigma_1} = \frac{\gamma \mu_1 q_0^2}{(e - \sigma_1)} - \frac{\gamma q_0^2 C_{23}}{(e - \sigma_1)} + \frac{\gamma \mu_2 q_0^2}{(e - \sigma_1)} - \frac{2\gamma \theta q_0^2 \ln(e - \sigma_1)}{(e - \sigma_1)},$$

$$\frac{\partial^2 \pi_2}{\partial \sigma_1^2} = -\frac{2\gamma q_0^2 \theta}{(e - \sigma_1)^2} + \frac{\gamma q_0^2 C_{23}}{(e - \sigma_1)^2} - \frac{\gamma \mu_1 q_0^2}{(e - \sigma_1)^2} - \frac{\gamma \mu_2 q_0^2}{(e - \sigma_1)^2} - \frac{2\gamma \theta q_0^2 \ln(e - \sigma_1)}{(e - \sigma_1)^2},$$

当 $C_{23} + 2\theta - 2\theta \ln(e - \sigma_1) - \mu_1 - \mu_2 < 0$, 即 $\sigma_1 < e - e^{\frac{C_{23} + 2\theta - \mu_1 - \mu_2}{2\theta}}$ 时, σ_1 可以取到极大值 $e - e^{\frac{\mu_1 + \mu_2 - C_{23}}{2\theta}}$ 。

这需要地方政府对医院和节能公司的总工损失的惩罚系数 μ_1 , μ_2 的值较大。但由于 μ_1 , μ_2 的取值范围是 $(0, 1)$, 只能取极小值。由于节能公司 1 的总工程度对地方政府的收益的影响是负面的, 地方政府会采用较严厉的惩罚措施降低节能公司 1 的总工程度。取值情况符合实际情形。

节能公司 1 的收益函数为

$$\pi_3 = P_1 q_0 - \ln(e - \sigma_1) q_0 C_{31} - C_{32} - C_{33} - \varphi_2 C_{33} - \mu_2 \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] q_0^2 - \tau P_1 q_0,$$

把 σ_1 的最优值代入 π_3 得,

$$\pi_3 = P_1 q_0 - \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} q_0 C_{31} - C_{32} - C_{33} - \varphi_2 C_{33} - \mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right] q_0^2 - \tau P_1 q_0,$$

π_3 对项目所需的生产要素投入量 q_0 的一阶导和二阶导分别为

$$\frac{\partial \pi_3}{\partial q_0} = P_1 - \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} C_{31} - 2\mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right] q_0 - \tau P_1,$$

$$\frac{\partial^2 \pi_3}{\partial q_0^2} = -2\mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right],$$

当 $\frac{\partial^2 \pi_3}{\partial q_0^2} < 0$, 即 $2\mu_2 \gamma \left[1 - \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right] > 0$ 时, 利用 $\frac{\partial \pi_3}{\partial q_0}$ 的表达式可以求出 q_0 的极大值。令 $\frac{\partial \pi_3}{\partial q_0} = 0$,

得:

$$q_0 = \frac{P_1 - C_{31} \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} - \tau P_1}{2\mu_2 \gamma \left[1 - C_{31} \frac{(\mu_1 + \mu_2 - C_{23})}{2\theta} \right]}.$$

π_3 对节能公司总工行为的惩罚系数 μ_2 的一阶导和二阶导分别为

$$\frac{\partial \pi_3}{\partial \mu_2} = -\frac{q_0 C_{31}}{2\theta} - \gamma \left[\frac{\mu_1 + 2\mu_2 - C_{23} - 1}{2\theta} \right] q_0^2,$$

$$\frac{\partial^2 \pi_3}{\partial \mu_2^2} = -2\gamma \frac{q_0^2}{2\theta},$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_3}{\partial \mu_2^2} < 0$, μ_2 可以取到极大值 $-\frac{C_{31}}{2\gamma q_0} - \frac{\mu_1 - C_{23} - 1}{2}$ 。因此, 鉴于地方政府的监管, 节能服务公司

在降低总工程度的同时, 会把地方政府对其总工行为的惩罚力度控制在一定范围内。虽然串谋现象依旧存在, 地方政府的监管发挥了一定的震慑作用。

医院的收益函数为 $\pi_1 = \gamma [\ln(e - \sigma_1) q_0]^2 + C_{33} - \varphi_1 C_{33} - \mu_1 \gamma [1 - \ln(e - \sigma_1)] q_0^2 - P_1 q_0$ 。把 σ_1 , q_0 和 μ_2 的最优值代入得,

$$\pi_1 = \gamma \left[\frac{2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23}) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1)}{4\theta \gamma q_0} \frac{4\theta \gamma q_0 (1 - \tau) P_1 - C_{31} [2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23}) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1)]}{2\mu_2 \gamma [4\theta \gamma q_0 - C_{31} (2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23})) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1)]} \right]^2 + C_{33} - \varphi_1 C_{33} - \mu_1 \gamma \left(1 - \frac{2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23}) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1)}{4\theta \gamma q_0} \right) \left\{ \frac{2\theta (1 - \tau) P_1 - C_{31} (2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23}) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1))}{2\mu_2 \gamma [2\theta - C_{31} (2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23})) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1)]} \right\}^2 - P_1 \frac{2\theta (1 - \tau) P_1 - C_{31} (2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23}) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1))}{2\mu_2 \gamma [2\theta - C_{31} (2\gamma q_0 (\mu_1 - C_{23})) - C_{31} - \gamma q_0 (\mu_1 - C_{23} - 1)]},$$

由上述表达式得，医院无法影响任何参数的取值。

通过 Stackelberg 博弈模型分析发现，节能公司 1 作为潜在的主导方，其怠工程度对各方收益产生显著影响。地方政府通过监管手段试图将节能公司 1 的怠工程度压至最低，以保障自身节能收益，但节能公司 1 可能会通过隐瞒围标行为等方式，降低自身被惩罚的力度。当两家节能公司围标时，节能公司 1 会在限制范围内不断抬高报价。当两家节能公司合谋或节能公司 1 与医院合谋时，项目所需的生产要素投入量会被动地受到限制。只有当节能公司 1 与地方政府合谋，即医院不在合谋群体中时，医院才能通过提高项目所需的生产要素投入量来维护自身利益。而作为投标公司中实力较弱的一方，节能公司 2 无法影响各关键参数的取值，只能选择与节能公司 1 合谋或被动接受其他各方博弈的结果。

根据上述结论，医院和地方政府可以多措并举，优化医院合同能源管理项目招标过程：医院应增强自身在招标过程中的主导权，明确对生产要素投入量的要求，避免因节能公司的怠工行为而影响项目成效；加强评标报告审查，及时发现节能公司的围标操作；并在合同中增加对节能公司的怠工行为和围标行为的惩罚条款，增加其违规成本。地方政府应明确各监管部门的责任边界，加强对节能公司投标流程的监督力度，确保其围标行为、怠工程度得到有效控制[28][29]。同时，医院与地方政府应积极沟通，合理调整双方的节能收益分配比例，保障各方收益。当合法权益受到侵害时，节能公司 2 应按照法定程序维护自身权益[29]。

2.4. 数值分析

2.4.1. 参数设定

Stackelberg 博弈中各参数的取值见表 1。其中，两家节能公司的单位工作成本小于固定投标成本，医院和地方政府的单位监管成本和单位工作成本小于得罪串标主导方的损失，地方政府的单位工作成本小于节能工作出现失误的单位名誉损失。 e 是自然对数，取固定值 2.7。

Table 1. The values of parameters in Stackelberg game

表 1. Stackelberg 博弈参数取值

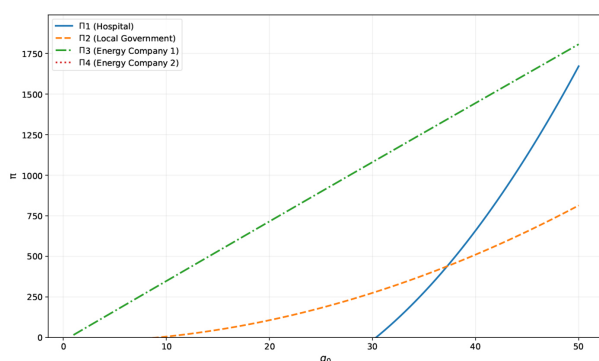
γ	ϵ	η	θ	μ_1	μ_2	φ_1	φ_2	σ_1	σ_2	τ	C_{11}	C_{12}
2.0	0.05	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	2	20
C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{41}	C_{42}	e	P_1	q_0	q_1	q_2
2	20	10	3	10	10	10	10	2.7	50	100	5	5

2.4.2. 项目所需的生产要素投入量对各方收益的影响

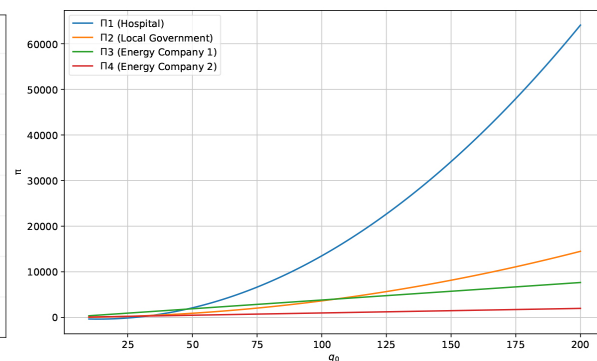
假定项目所需的生产要素投入量 q_0 的取值范围是(1, 100)，研究三种情形下对各方收益的影响。

由图 1 可知，在两家节能公司合谋的情形下， q_0 与节能公司 1、地方政府、医院的收益呈正相关。

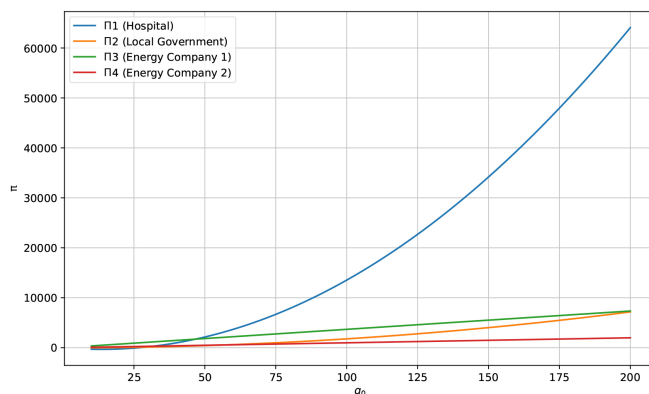
当 q_0 达到一定规模时, 三方的收益才出现增长。节能公司 1 和地方政府收益出现正增长的时间跨度短, 增长速度慢, 医院收益出现正增长的时间跨度最长, 增长速度更快。然而, 对于节能公司 2 而言, 其收益受到的影响相对较小, 基本保持稳定。在节能公司 1 与地方政府或医院单独合谋的情形中, q_0 对各方收益的影响情况相似。随着 q_0 的增大, 医院的收益从保持平稳变为快速回升, 且上升速度最快, 节能公司 2 的收益增长速度最慢。在节能公司 1 与地方政府合谋时, 与节能公司 1 相比, 地方政府的收益增长速度先慢后快; 在节能公司 1 与医院合谋时, 节能公司 1 的收益增长速度始终快于地方政府。



(a) 两家节能公司合谋时 q_0 对各方收益的影响



(b) 节能公司与地方政府合谋时 q_0 对各方收益的影响



(c) 节能公司与医院合谋时 q_0 对各方收益的影响

Figure 1. The impact of the required amount of production factor inputting the project on the income of each participant

图 1. 项目所需的生产要素投入量对各方收益的影响

由上述分析可知, 医院应提高自身的议价能力, 在合理范围内扩大节能合同中约定的项目所需的生产要素投入量, 以保证自身收益。三种情形中, 由于围标可以抬升医院出价, 两家节能公司串谋时节能公司 1 的收益较多, 地方政府凭借罚款也可以获得较多的收益。但从医院节能改造工作的目的、社会效应和生态效应的角度看, 纵容节能公司围标不利于生态工作的推进。

2.4.3. 节能公司 1 的总工程度对各方收益的影响

如图 2(a)所示, 在两家节能公司合谋的情形下, 节能公司 1 的总工程度对地方政府、医院收益的影响力度依次减小, 对两家节能公司的收益几乎没有影响。随着 σ_1 的增大, 地方政府的收益快速下降, 医院的收益较少, 下降速度更慢, 节能公司 1 的收益保持高位平稳。

图 2(b)显示, 在节能公司 1 和地方政府合谋的情形中, 节能公司 1 的总工程度对地方政府影响尤为突出。随着 σ_1 的增大, 地方政府的收益快速下降, 甚至变为负值, 这表明地方政府在这种合谋关系中对

节能公司 1 的依赖度较高, 且对怠工行为较为敏感。与此同时, 医院和节能公司 2 的收益变化相对较小。医院的收益会随着 σ_1 的增大而缓慢下降, 最终接近于 0; 节能公司 2 的收益则基本保持稳定, 与节能公司 1 的怠工程度关系不大。

图 2(c) 显示, 在节能公司 1 和医院合谋的情形中, 医院受到的影响较为严重, 随着 σ_1 的增大, 医院的收益快速下降。地方政府的收益快速下降至 0 后保持平稳, 而两家节能公司的收益几乎不受 σ_1 的影响, 一直保持平稳。这表明在这种合谋关系下, 医院和地方政府处于较为不利的地位, 医院虽然可以收取串谋行贿赂金, 但总体收益快速下降。

怠工行为虽然可以增加节能公司的短期收益, 但严重损害了医院、地方政府的收益, 不利于其与医院、地方政府建立稳固的合作关系。因此, 节能公司应从长远考虑, 通过技术升级、管理优化等方式降低成本, 在提供高质量服务的同时提高公司声誉, 扩大长期收益。

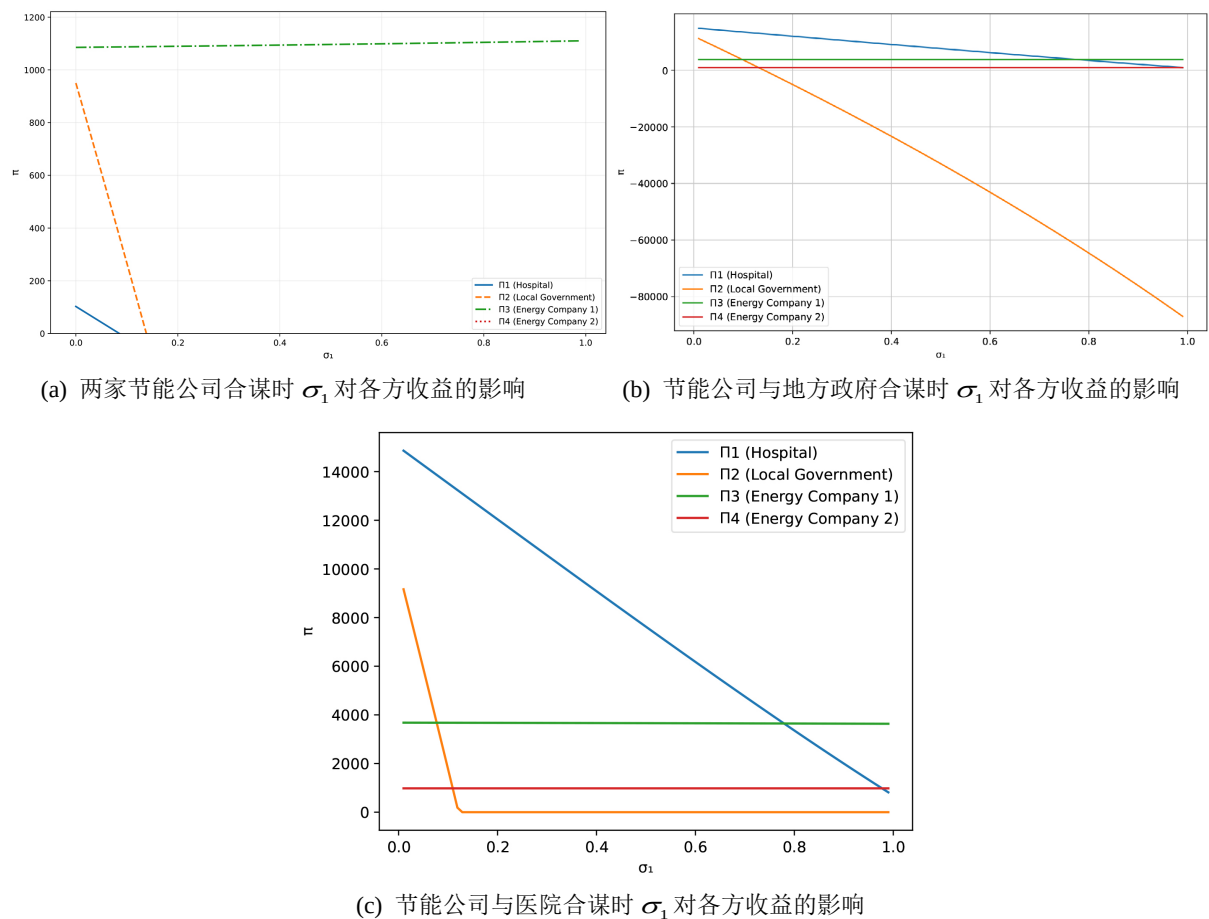


Figure 2. The impact of the sabotage degree of energy saving company 1 on the income of each participant

图 2. 节能公司 1 的怠工程度对各方收益的影响

2.4.4. 医院的节能收益系数对各方收益的影响

医院的节能收益系数对各方收益的影响见图 3。在节能公司 1 与节能公司 2 或地方政府合谋的情形中, 医院的节能收益系数 γ 与医院、地方政府和节能公司 1 的收益呈正相关, 且影响力度依次减小。但在节能公司 1 与医院合谋时, γ 的增大对地方政府的收益产生负面影响, 其收益随着 γ 的增大而逐渐减少。这是因为当节能公司 1 怠工程度不变时, 医院与其约定的节能收益系数越大, 怠工造成的节能损失越多,

间接影响了地方政府的收益。地方政府针对节能损失收取的少量罚款只能起到警示作用，并不能弥补损失。三种情形中， γ 的变化对节能公司 2 收益的影响可以忽略不计。因此，医院在制定项目生产要素投入量 q_0 时，应充分考虑节能收益系数 γ 的影响，在项目设计阶段适当提高节能目标，增加 γ 的值，以最大化自身节能收益；同时，需要与地方政府高效沟通，通过合理的政策协调和利益分配机制，缓解因 γ 增加对地方政府收益带来的负面影响，确保项目在各方利益平衡下顺利推进。

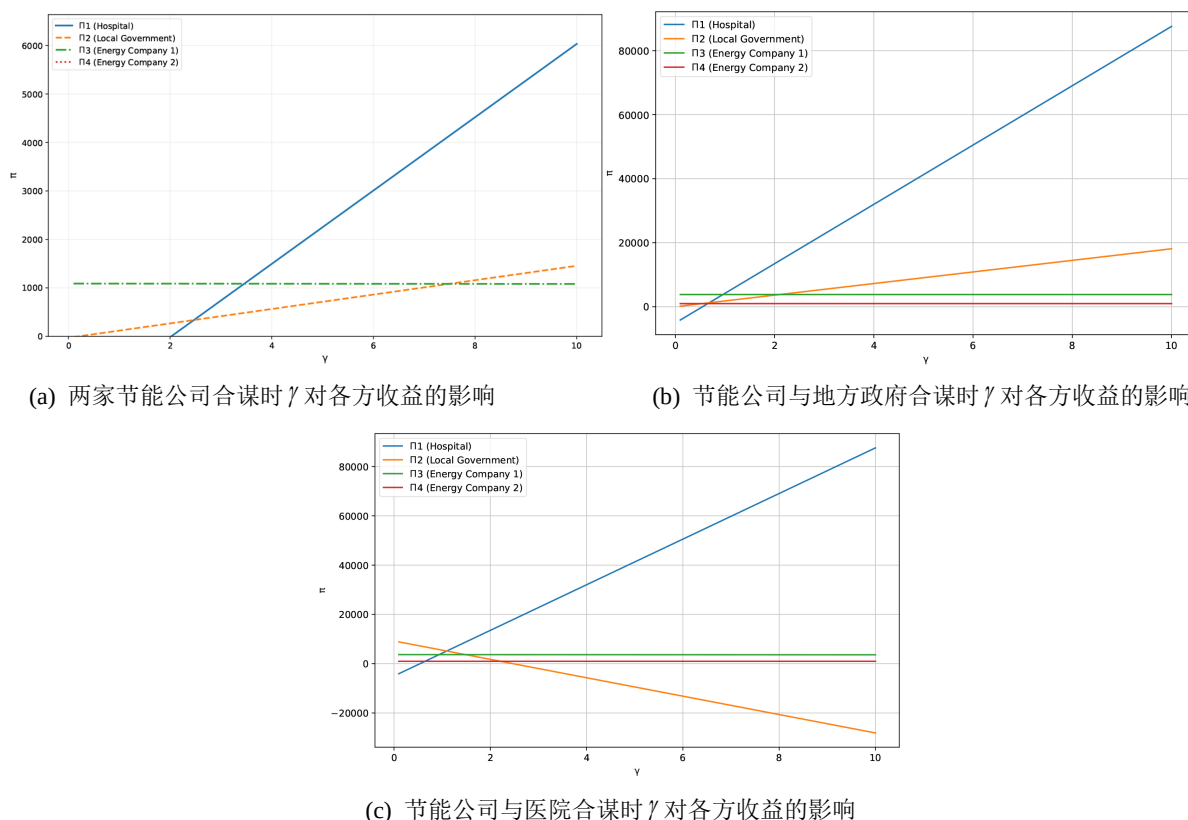


Figure 3. The impact of energy saving income coefficient of hospital on the income of each participant
图 3. 医院的节能收益系数对各方收益的影响

3. Bertrand 博弈模型

3.1. 问题描述与背景

Bertrand 博弈(伯特兰德模型)是一种经典的寡头市场竞争模型，其基本假设如下：市场上有限数量的厂商生产同类商品，其产品具有一定的替代性。每个厂商都知道其他厂商的存在和生产能力，几个厂商间通过调整价格而不是产量进行竞争。各厂商之间不存在正式或非正式的串谋行为，其可以自由进入或退出市场，没有任何进入或退出壁垒。消费者对价格敏感，会优先选择价格较低的产品。如果所有厂商的价格相同，则需求平分；如果价格不同，则价格较低的厂商将获得全部需求。

在医院合同能源管理项目招投标的情形中，如果各方依据规则参与招投标活动，则不存在相互帮助或舞弊的行为。该情形符合 Bertrand 博弈的基本假设。

3.2. 模型参数

与第 2 章中 Stackberg 博弈的情形相似，两家情况不同的承包商，节能公司 1 和节能公司 2 参与医院

合同能源管理项目投标。节能公司 1 的节能服务单价为 P_3 ，单位工作成本为 C_{31} ，固定投标成本为 C_{32} ；节能公司 2 的节能服务单价为 P_4 ，单位工作成本为 C_{41} ，固定投标成本为 C_{42} 。医院的单位购买成本上限为 $P_{\max}$ ，地方政府对节能公司的单位补贴为 S 。节能公司 1 和节能公司 2 的竞争强度分别为 ρ_1 和 ρ_2 ，且节能公司 1 的实力更强，因此。两家公司的节能服务替代系数为 ω ，表示两者服务的可替代性。这些参数的取值均大于 0。替代系数 ω 的取值范围为 $0 < \omega < 1$ ， ω 越接近 1，两家公司的节能服务替代性越强。

在博弈过程中，医院的单位购买成本上限 $P_{\max}$ 是各方决策的重要约束。两家节能公司根据自身的投标成本、工作成本和竞争强度制定投标价格，保证 $P_3 < P_{\max}$ 、 $P_4 < P_{\max}$ ，医院从中挑选性价比更高的节能服务。地方政府的补贴 S 降低了节能公司的成本负担，为其提供了额外的竞争力。

3.3. 模型构建

在合同能源管理项目中，两家节能公司的收益会受到节能服务单价和销售数量、单位工作成本和固定投标成本、地方政府补贴等多种因素的影响，其效用函数为

$$\pi_3 = P_3 q_3 - q_3 C_{31} - C_{32} + q_3 S,$$

$$\pi_4 = P_4 q_4 - q_4 C_{41} - C_{42} + q_4 S,$$

两家公司节能服务的价格函数，即逆需求函数为

$$P_3 = P_{\max} - q_3 - \rho_1 (q_3 - q_4) + \omega q_4 = P_{\max} - (1 + \rho_1) q_3 + (\omega + \rho_1) q_4,$$

$$P_4 = P_{\max} - q_4 - \rho_2 (q_4 - q_3) + \omega q_3 = P_{\max} - (1 + \rho_2) q_4 + (\omega + \rho_2) q_3,$$

联立两个逆需求函数可得，

$$q_3 = \frac{(\omega + \rho_2) P_3 - (\omega + \rho_1) P_4 + (\rho_1 - \rho_2) P_{\max}}{(1 - \omega)(\rho_1 - \rho_2)},$$

$$q_4 = \frac{(1 + \rho_2) P_3 - (1 + \rho_1) P_4 + (\rho_1 - \rho_2) P_{\max}}{(1 - \omega)(\rho_1 - \rho_2)},$$

把 q_3 ， q_4 的取值代入效用函数、得，

$$\pi_3 = \frac{(\rho_1 P_{\max} - \rho_2 P_{\max}) C_{31} + (\rho_1 - \rho_2 - \omega \rho_1 + \omega \rho_2) C_{32} + (\rho_2 P_{\max} - \rho_1 P_{\max} + \rho_2 C_{31} + \omega C_{31} - \omega S - \rho_2 S) P_3 - (\omega + \rho_2) P_3^2 + (\rho_1 S - \rho_1 C_{31} + \omega S - \omega C_{31}) P_4 + (\rho_1 + \omega) P_3 P_4 - \rho_1 S P_{\max} + \rho_2 S P_{\max}}{(\rho_1 - \rho_2)(\omega - 1)},$$

$$\pi_4 = \frac{(C_{31} - S + C_{31} \rho_2 - S \rho_2) P_3 + (\rho_1 - \rho_1 P_{\max} + \rho_2 P_{\max} + S - C_{31} + S \rho_1 - C_{31} \rho_1 + 1) P_4 - (\rho_2 + 1) P_3 P_4 + (C_{31} - S)(\rho_1 P_{\max} - \rho_2 P_{\max})}{(\rho_1 - \rho_2)(\omega - 1)} - C_{42},$$

假设两家节能公司在 t 时期的产品价格为 $P_3(t)$ ， $P_4(t)$ ，产量为 $q_3(t)$ ， $q_4(t)$ ，则两家节能公司的边际利润为

$$\frac{\partial \pi_3(t)}{\partial P_3(t)} = \frac{\rho_2 P_{\max} - \rho_1 P_{\max} + \rho_2 C_{31} + \omega C_{31} - \omega S - \rho_2 S - 2(\omega + \rho_2) P_3 + (\omega + \rho_1) P_3}{(\rho_1 - \rho_2)(\omega - 1)},$$

$$\frac{\partial \pi_4(t)}{\partial P_4(t)} = \frac{\rho_2 P_{\max} - \rho_1 P_{\max} + \rho_1 + S - \rho_1 C_{31} - C_{31} + 1 - (1 + \rho_2) P_3}{(\rho_1 - \rho_2)(\omega - 1)},$$

在招投标中，节能公司 1、2 会根据每轮报价后的评标结果提出下一轮报价。因此，每一轮报价都受到上一轮报价的影响，其迭代函数为

$$P_3(t+1) = P_3(t) + v_3 P_3(t) \frac{\partial \pi_3(t)}{\partial P_3(t)},$$

$$P_4(t+1) = P_4(t) + v_4 P_4(t) \frac{\partial \pi_4(t)}{\partial P_4(t)},$$

令 $P_3(t+1) = P_3(t)$, $P_4(t+1) = P_4(t)$, 通过计算可以得到如下四个非负均衡点:

$$E_1 = (0, 0),$$

$$E_2 = \left(\frac{C_{31}\omega - S\omega + C_{31}\rho_2 - P_{\max}\rho_1 + P_{\max}\rho_2 - S\rho_2}{2(\omega + \rho_2)}, 0 \right),$$

$$E_3 = \left(0, \frac{C_{41} - S + C_{41}\rho_1 + P_{\max}\rho_1 - P_{\max}\rho_2 - S\rho_1}{2(\rho_1 + 1)} \right),$$

$$E_4 = (A^*, B^*),$$

其中,

$$A^* = \frac{\omega C_{31} + 2\omega C_{41} + \rho_2 C_{31} + 2\rho_2 C_{41} - 3\omega S - \rho_1 P_{\max} + \rho_2 P_{\max} - 3\rho_2 S + \rho_2^2 C_{31} - \rho_2^2 P_{\max} - \rho_2^2 S}{3\omega - \rho_1 + 4\rho_2 + 4\omega\rho_1 - \omega\rho_2 + 3\rho_1\rho_2},$$

$$B^* = \frac{2\omega C_{31} + \omega C_{41} + 2\rho_2 C_{31} + \rho_1 C_{41} - 3\omega S - 2\rho_1 P_{\max} + 2\rho_2 P_{\max} - \rho_1 S - 2\rho_2 S + \rho_1^2 C_{41} - \rho_1^2 P_{\max} - \rho_1^2 S}{3\omega - \rho_1 + 4\rho_2 + 4\omega\rho_1 - \omega\rho_2 + 3\rho_1\rho_2},$$

在这里, E_1, E_2, E_3 是策略空间集边界均衡点, 只有最后一个混合策略均衡解 E_4 是真正的纳什均衡点。

3.4. 数值仿真分析

3.4.1. 参数取值

Bertrand 博弈中各参数的取值见表 2。由于两家节能公司的固定投标成本 C_{32} , C_{42} 不影响均衡解的取值, 所以不对其赋值。

Table 2. The values of parameters in Bertrand game

表 2. Bertrand 博弈参数取值

ρ_1	ρ_2	ω	C_{31}	C_{41}	$P_{\max}$	S
0.6	0.5	0.7	3	4	15	2

3.4.2. 节能公司竞争强度和产品替代程度对均衡解的影响

在 Bertrand 博弈中, 节能公司 1 和节能公司 2 分别以价格 P_3 和 P_4 出售产品。由图 4 可知, 两家节能公司的竞争强度 ρ_1, ρ_2 分别与自身的报价呈负相关, 与对方的报价呈正相关。同时, 两家公司的产品替代程度 ω 与报价成正比, 产品替代程度越高, 报价越高。

上述结论反映了竞争强度和产品替代程度对节能公司报价的两种不同的影响机制。竞争强度反映了节能公司的施工效率和服务质量, 竞争强度越高, 施工效率和工程质量越高, 在不影响收益的前提下降低报价可以增加中标的可能性; 产品替代程度越高, 相关的节能服务越不具备差异化优势, 节能公司只有降低价格, 才能在竞争者中脱颖而出。因此, 公司可以通过优化施工流程、提高管理效率、提高

服务质量、提供差异化服务等方式来提高竞争强度或降低产品替代程度，从而在价格竞争中获得优势。

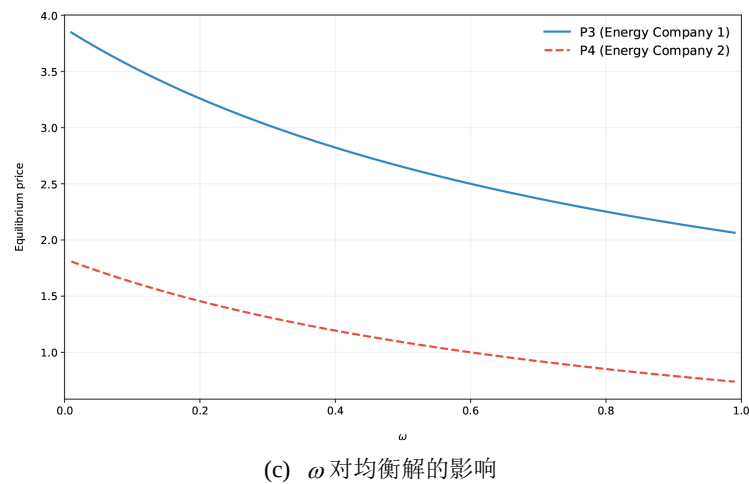
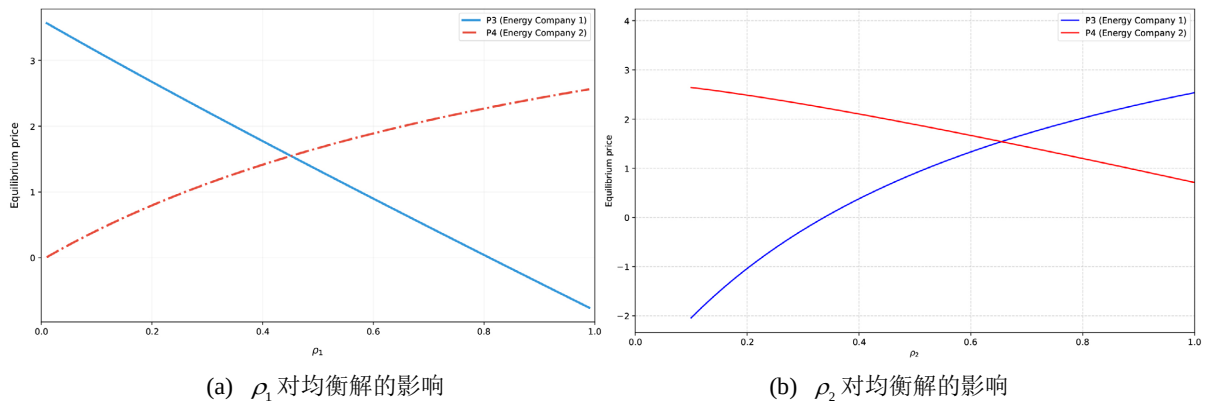
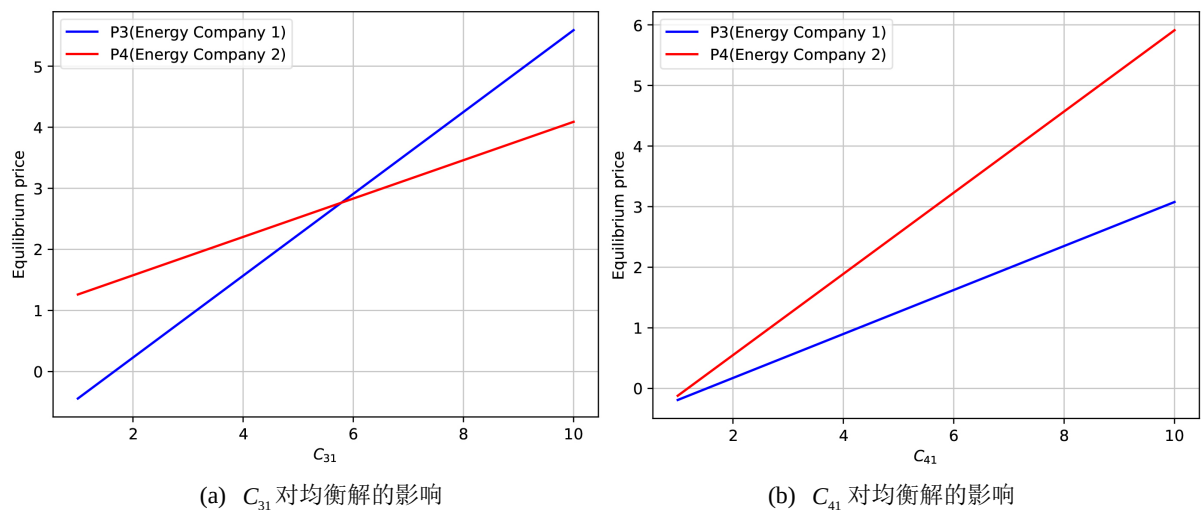


Figure 4. The impact of competition intensity and product substitution degree of energy-saving companies on equilibrium prices

图 4. 节能公司竞争强度和产品替代程度对均衡解的影响

3.4.3. 节能公司单位工作成本和医院单位购买成本上限对均衡解的影响



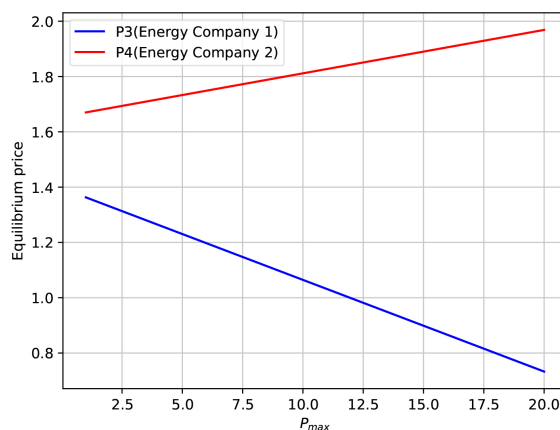
(c) $P_{\max}$ 对均衡解的影响

Figure 5. The impact of unit working cost of energy-saving companies and upper limit of unit purchasing cost of hospital on equilibrium prices

图 5. 节能公司单位工作成本和医院单位购买成本上限对均衡解的影响

由图 5 可知, 两家节能公司的单位工作成本 C_{31} , C_{41} 分别与两家公司自身的均衡价格成正比, 即单位工作成本越高, 相关节能公司的报价上升越快。而且两家节能公司的单位工作成本对各自的报价波动影响更大, 对竞争对手的报价波动影响更小。医院的单位购买成本上限与节能公司 1 的报价成反比, 与节能公司 2 的报价成正比。

在招投标活动中, 一方面, 节能公司的报价必须覆盖其节能服务成本, 包括人工费、设备费、技术费、运营维修费、利润等多种费用, 节能服务成本越高, 报价越高。另一方面, 在多轮报价和评标的过程中, 节能公司可以通过评标结果间接了解到医院的价格偏好和其他投标方的服务内容、价格安排, 在权衡多种因素后调整价格和服务内容。节能公司 1 的竞争强度比节能公司 2 高, 单位工作成本比其低, 随着 $P_{\max}$ 增大, 节能公司 1 会降低报价以增大中标可能性, 节能公司 2 会提高报价以确保收益覆盖成本。因此, 医院应综合考虑项目的投资规模和节能公司的财务状况, 在确保节能公司有资金提供高质高效的节能服务的前提下, 适度压低单位购买成本上限, 以扩大自身收益; 节能公司应通过提高管理效率等方式努力降低自身的单位工作成本, 从而增大报价的下降空间, 优化博弈结果。

3.4.4. 地方政府对节能公司的单位补贴对均衡解的影响

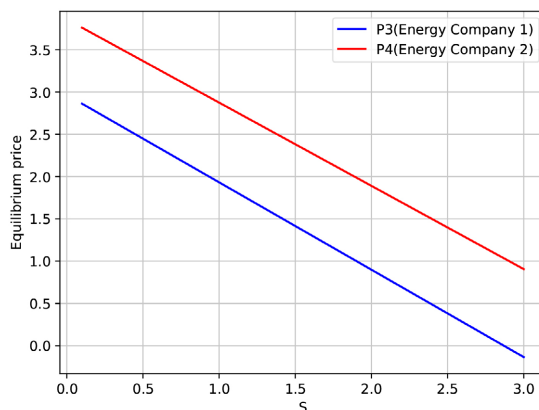


Figure 6. The impact of local government's unit subsidies to energy-saving companies on equilibrium prices

图 6. 地方政府对节能公司的单位补贴对均衡解的影响

图6反映了地方政府对节能公司的单位补贴 S 在0到3范围内变化时均衡解的变化趋势。从仿真结果可知, S 与节能公司报价的均衡解成反比。具体而言,单位补贴 S 越大,节能公司报价越低。相较于节能公司2,节能公司1的单位成本更低,竞争强度更高,其报价的均衡解更小。实际情形中,节能公司的节能服务包含多项费用,地方政府可以根据医院合同能源管理项目的投资规模和节能公司的财务情况制定灵活的补贴政策,从而降低节能公司的成本负担,激励节能公司主动降低报价,实现社会效益和企业效益的双赢。

4. 结论与启示

在医院合同能源管理项目招投标的背景下,本文根据实际情形,分别构建了投标的节能公司与医院、地方政府、同行分别串谋的Stackberg博弈模型和两家节能公司公平竞争的Bertrand博弈模型,分析各类因素对各方决策的影响机制,探究如何优化各方的竞争策略。经最优解和数值仿真分析、均衡解分析,得出如下结论和启示:

1) 医院需要提高自身的议价能力,通过专业咨询、市场调研等方式,掌握更多的市场信息和项目成本信息,研判竞争方案,确定资信条件和评标标准,以便在合同谈判中争取更有利的条件[30],如扩大大约定的项目所需的生产要素投入量。在签订合同时,明确各方的权利、义务和违规惩罚措施,以减少节能公司产生怠工等违规行为的可能性。同时加强对企业道德和社会责任的宣传,减少不正当行为的发生[31]。

2) 在招投标管理过程中,地方政府监管部门应对投标公司的历史投标文件、投标报价等信息进行分析,判断其是否参与串通投标[20]。对于发现的违规行为,应严肃处理,并将处理结果公开,以起到警示和震慑作用[31]。在成本管理方面,应对节能公司的成本进行严格审查,防止虚报成本以获取高额补贴。并根据市场变化、节能公司的成本结构和项目实施情况,动态调整补贴政策,奖优惩劣,确保政策的有效性和公平性。并与医院协商确定合理的节能收益系数,即利益分配机制,以确保在节能公司怠工时,自身的损失能够得到有效控制。

3) 医院和地方政府应加强内部管理。招投标管理工作涉及医院和地方政府内部的多个部门,招标项目归口管理不明确、部门之间的协调配合程度低、缺乏专业的管理团队、医院管理人员或地方政府官员因收受贿赂不作为,这些管理漏洞和工作细节导致招投标中的合谋行为屡禁不绝[32][33]。因此,医院和地方政府应建立透明的信息共享平台,优化部门间的协作机制和管理人员配置,提升招标质量和效率[30]。

4) 促进市场竞争与合作。在合同能源管理项目中,市场竞争是提高项目质量和效益的重要手段。因此,建议政府通过政策引导,鼓励更多的节能公司参与市场竞争,这既可以打破垄断局面,又可以促使中标意愿强的节能公司优化成本结构,降低报价,提升服务质量。

5) 在招投标过程中,医院不会把价格作为评标的唯一标准,而是综合考虑节能服务的价格和服务质量。因此,节能公司1和节能公司2都需要加强市场调研,了解客户需求、竞争对手动态和政策变化,以便及时调整策略,提升市场适应性和综合竞争力。同时,可以通过提供优质的节能解决方案、高效的项目实施和完善的售后服务,形成差异化优势,减少对价格竞争的依赖。

6) 节能公司1单位工作成本较低,竞争强度较高。而节能公司2的单位工作成本较高,且对自身报价波动影响较大。单位成本相对较高的节能公司应通过技术升级、流程优化和供应链管理等方式,降低单位工作成本,缩小与竞争对手的成本差距,从而降低报价,提升市场竞争力。

7) 节能公司1应意识到怠工行为虽然可能在短期内降低自身成本,但长期来看会显著影响地方政府和医院的收益,进而导致合作关系破裂。因此,应减少怠工行为,提高工作质量。可以与其他节能公司或第三方机构建立合作关系,通过技术合作或联合项目提升自身竞争力,减少对单一合谋关系的依赖。

8) 地方政府的补贴对报价有显著的调节作用。两家节能公司应密切关注地方政府的补贴政策变化,

争取更多的政策支持和补贴,通过补贴降低报价,提升市场竞争力。并关注地方政府的产业政策导向,积极参与政府支持的节能项目,利用政策红利扩大市场份额。

本文利用 Stackberg 博弈模型和 Bertrand 博弈模型再现了公立医院合同能源管理项目招投标的实际情形,分析了多种关键因素对各方收益和博弈策略的影响,但并未在模型中融入时间延迟和反馈控制机制或利用强化学习等方法对模型进行改进,以弥补传统 Stackberg 博弈模型和 Bertrand 博弈模型的不足之处。这是下一步需要研究和解决的问题。

基金项目

国家自然科学基金项目(12371508)。

参考文献

- [1] Eti, S., Dinçer, H., Yüksel, S., Uslu, Y.D., Gökalp, Y., Kalkavan, H., *et al.* (2023) Determination of Priority Criteria in Green Building Transformation: An Analysis on the Service Industry. *Research in Globalization*, 7, Article 100164. <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2023.100164>
- [2] Ma, D., Sun, Y., Ma, S. and Ma, H. (2024) Energy Consumption Characteristics and Evaluation of Public Buildings in Tianjin, China. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.11.006>
- [3] Lu, K., Jiang, X., Tam, V.W.Y., Li, M., Wang, H., Xia, B., *et al.* (2019) Development of a Carbon Emissions Analysis Framework Using Building Information Modeling and Life Cycle Assessment for the Construction of Hospital Projects. *Sustainability*, 11, Article 6274. <https://doi.org/10.3390/su11226274>
- [4] Rizan, C., Bhutta, M.F., Reed, M. and Lillywhite, R. (2021) The Carbon Footprint of Waste Streams in a UK Hospital. *Journal of Cleaner Production*, 286, Article 125446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125446>
- [5] Messmann, L., Köhler, S., Antimisaris, K., Fieber, R., Thorenz, A. and Tuma, A. (2024) Indicator-Based Environmental and Social Sustainability Assessment of Hospitals: A Literature Review. *Journal of Cleaner Production*, 466, Article 142721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142721>
- [6] Zhang, M., Li, R. and Xia-Bauer, C. (2024) Managing Energy Consumption by Adapted Energy Performance Contracting Modes in Rural China. *Heliyon*, 10, e30135. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30135>
- [7] Cao, X. and Zhang, S. (2010) A Research on Barriers and Strategies of Development of Chinese ESCO. *Construction Economy*, 10, 110-113.
- [8] Mills, E., Kromer, S., Weiss, G. and Mathew, P.A. (2006) From Volatility to Value: Analysing and Managing Financial and Performance Risk in Energy Savings Projects. *Energy Policy*, 34, 188-199. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.042>
- [9] Lin, Z. (2012) The Fostering Mechanism and Organizational Structure of EPC in Building Sector. *Building Science*, 28, 8-11.
- [10] Yan, D., Hong, T., Li, C., Zhang, Q., An, J. and Hu, S. (2017) A Thorough Assessment of China's Standard for Energy Consumption of Buildings. *Energy and Buildings*, 143, 114-128. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.019>
- [11] 易采购. 招投标的意义在哪里? [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1807947669819134691&wfr=spider&for=pc>, 2025-03-03.
- [12] 蒋东霞. 公立医院应姓公[J]. 中外医学研究, 2010, 8(16): 52-53.
- [13] 朱永松, 魏建军, 甘宁, 等. 合同能源管理在绿色医院节能管理中的应用[J]. 中国卫生资源, 2012, 15(3): 208-210.
- [14] 武逸, 陈戈军, 汪蕾蕾, 曹明阳, 陈欢. 医院能源“智”变: 探索“双碳”下的创新之路[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/786819846_121772255, 2025-03-03.
- [15] 医院后勤官. 医疗机构新能源发展应用与公共卫生相关问题对策研究[EB/OL]. <http://www.cn-witmed.com/list/35/10632.html>, 2025-03-03.
- [16] 郑斯怡, 邓晓岚. 合同能源管理在医院的应用研究[J]. 卫生经济研究, 2023, 40(2): 56-60.
- [17] Liu, B., Huo, T., Liao, P., Yuan, J., Sun, J. and Hu, X. (2017) A Special Partial Least Squares (PLS) Path Decision Modeling for Bid Evaluation of Large Construction Projects. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 579-592. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0702-3>
- [18] Astana, N.Y., Rusdi, H.A. and Wibowo, M.A. (2015) Factors Affecting Bidding Strategy in Construction. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9, 211-215.

- [19] 王禹. 大数据视域下串通投标犯罪案件侦查对策研究[J]. 网络安全技术与应用, 2025(1): 150-153.
- [20] Wang, B., Zhu, J., Xie, J. and Wang, B. (2023) Collusion Suspicion among Bidders of Construction Supervision Projects in China: Based on Bidding Big Data and Complex Networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27, 13-26. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-2400-7>
- [21] 杨锋, 何慕佳, 梁樑. 基于多属性逆向拍卖的节能服务公司选择研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(5): 98-106.
- [22] 李学平, 王健民, 卢志刚, 等. 基于非合作博弈与收益共享契约的能源服务商定价策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 1-8.
- [23] 何建洪, 黄莹. 公开招标人偏好的政府工程多属性招投标博弈分析[J]. 系统工程, 2016, 34(2): 95-102.
- [24] 吕炜, 贺昌政. 政府工程多属性招投标博弈分析[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2014, 20(2): 64-72.
- [25] 百度百科. 斯塔克尔伯格模型[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E6%96%AF%E5%A1%94%E5%85%8B%E5%B0%94%E6%9F%8F%E6%A0%BC%E6%A8%A1%E5%9E%8B/12765691>, 2025-03-03.
- [26] 百度百科. 伯川德竞争[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%BC%AF%E5%B7%9D%E5%BE%B7%E7%AB%9E%E4%BA%89/12715302>, 2025-03-03.
- [27] Ben Sassi, D. and Chaieb, M. (2024) A Game Theory Competitive Intelligence Solution Stimulated from a Stackelberg Game: A Three Players Scenario. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 135, Article 108825. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108825>
- [28] 寇金萌, 洪学智, 卿好婕, 等. 基于演化博弈的公立医院医疗设备招标采购监管机制研究[J]. 中国医疗设备, 2022, 37(9): 118-122.
- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会法规司. 关于严格执行招标投标法规制度进一步规范招标投标主体行为的若干意见[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202208/t20220801_1332495_ext.html, 2022-08-01.
- [30] 干汗锋, 张晓健. 招标管理的问题剖析与对策研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(S2): 28-31.
- [31] 郑利康. 工程项目招投标过程中存在的问题及策略[J]. 大众标准化, 2025(2): 120-122.
- [32] 韦丽萍. 工程招标投标管理成熟度评价研究[J]. 企业科技与发展, 2024(5): 60-64.
- [33] 陈哲, 赵双平, 刘龙飞, 等. 基于 COSO 内部控制框架的公立医院招标采购管理体系创新与实践[J]. 中国医院管理, 2023, 43(9): 44-46, 52.