

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-757-06

地源热泵 BOT 项目特许经营期决策模型

刘进军¹ 高林朝² 邢俊敏¹ 马少魁¹ 杜晓康¹

(1. 河南农业大学 郑州 450046;

2. 河南省科学院能源研究所有限公司 郑州 450008)

【摘要】 针对地源热泵 BOT 项目特许经营期的决策问题, 以某高校地源热泵 BOT 项目为例, 先用净现值法构建数学模型, 计算项目特许经营期可行域, 再利用博弈论中的 Nash 讨价还价理论, 引入风险分配因子, 构建特许经营期计算模型, 最后求得特许经营期 Nash 均衡解。提出的决策模型均衡了项目风险与收益, 提高了决策的准确性和合理性, 研究结论为地源热泵行业 BOT 项目特许经营期的决策提供参考。

【关键词】 地源热泵; BOT 模式; 特许经营期; 博弈论; Nash 讨价还价理论
中图分类号 TB65 文献标识码 A

Decision Model of Ground Source Heat Pump BOT Project during Franchise Period

Liu Jinjun¹ Gao Linchao² Xing Junmin¹ Ma shaokui¹ Du Xiaokang¹

(1.Henan Agricultural University, Zhengzhou, 450046;

2.Energy Research Institute of Henan Academy of Sciences, Zhengzhou, 450008)

【Abstract】 Aiming at the decision-making problem of the ground source heat pump BOT project during the franchise period, taking the ground source heat pump BOT project of a university as an example, the mathematical model was firstly constructed by using the net present value method to calculate the franchise period feasible area. By using Nash bargaining theory in game theory, the risk distribution factor is introduced, the franchise period calculation model is constructed, and the Nash equilibrium solution of franchise period is obtained. The decision model balances project risks and benefits, and improves the accuracy and rationality of decision making. The research conclusion provides reference for decision making of BOT projects in the concession period of the ground source heat pump industry.

【Keywords】 Ground source heat pump; The BOT mode; Franchise period; Game theory; Nash bargaining theory

0 引言

保持经济与环境和谐发展是目前国家所关注的焦点所在, 地源热泵作为一项可再生能源技术, 它的开发利用成为我国建筑节能的一个重要途径。近年来地源热泵特许经营服务在建筑物供暖/制冷市场得到了广泛的推广^[1-4], 这种模式简称 BOT (Build-Operate-Transfer) ^[5,6]。地源热泵 BOT 项

目具有初投资高、经营风险大, 收益不确定性的特点, 特许经营期是 BOT 项目特许经营协议中的核心要素, 它是划分协议双方各自权利、义务的时间分界线, 是确定项目经营权以及所有权归属的时间节点^[7]。不合理的特许经营期决策将导致投资公司获得超额利润或者其无法在特许经营期内实现预期收益, 进而导致项目失败。因此, 确定合理的特

基金项目: 河南省重点科技攻关项目 (182102210075, 132102310057)

作者简介: 刘进军 (1972-), 男, 硕士, 工程师, E-mail: 13803892153@139.com

通讯作者: 高林朝 (1964-), 男, 博士, 研究员, E-mail: glc9845@163.com

收稿日期: 2022-06-13

许经营期,是地源热泵 BOT 项目成功实施的关键所在,是各行业 BOT 项目特许经营期决策理论研究中的重要内容^[8]。

现有文献中对 BOT 项目特许经营期决策的研究方法主要有实物期权法、博弈论法和净现值法(NPV)等,许多学者从不同视角对决策模型进行构建和优化。陈通、吴正泓从项目不确定性特征和隐性违约风险对特许经营期决策的影响角度,运用实物期权理论构建决策模型^[9]。吕俊娜考虑到轨道交通 SBOT 项的不确定性特征,利用不可逆投资模型,构建了不确定条件下 SBOT 项目特许经营期决策模型^[10]。Sheng 和 Wu 综合考虑各类关键风险因素的影响,在公共部门/投资部门决策 BOT 项目特许经营期基准条件基础上,借助蒙特卡洛模拟(Monte Carlo)技术,构建了特许经营期决策模型^[11],Ng 等针对不精确的数据还引入了模糊的多元目标决策模型进行决策^[12]。综合以上,BOT 项目特许经营期决策理论在众多学者的研究下不断得到完善。但是 BOT 项目种类繁多,各行业的不确定性特征千差万别,现有文献决策模型并不完全适用于所有行业。因此针对特定行业的 BOT 项目特许经营期进行决策研究,具有重要的现实意义。

不同以往的文献,本文针对地源热泵行业,以郑州某高校地源热泵 BOT 项目为例,充分考虑行业的不确定性特征,先介绍该项目建设方案和经济参数,而后分二个步骤来确定项目特许经营期,第一个步骤先构建投资方能接受的最小特许经营期数学模型,再构建校方能接受的最大特许经营期数学模型,最后根据项目经济参数进行分析计算,得出特许经营期的可行域。第二个步骤先根据学校与投资方对项目风险的偏好程度,将各类不确定风险因素对特许经营期的影响以参数赋值,归并为地源热泵 BOT 项目的风险分配因子,然后构建特许经营期 Nash 讨价还价博弈模型,确定 Nash 均衡解^[13],最后求得项目特许经营期的具体值。希望研究结论对地源热泵行业 BOT 项目进行准确合理的特许经营期决策提供参考。

1 项目概况

1.1 项目建设方案

项目位于河南省郑州市某高校,地理位置北纬 34.44°、东经 113.42°,年平均气温 13.8~15.5℃,

全年无霜期为 198~220d。学校新建建筑面积 49258m²综合实验楼,地上五层,地下一层,建筑高度 22.5 米。夏季办公室、学生实验室设计温度 26℃,冬季办公室设计温度 20℃,学生实验室设计温度 18℃。因投资新建地源热泵空调系统一次性投资费用较大,为此学校决定引入社会资本采用 BOT 模式建造浅层地热能埋管地源热泵空调系统,满足综合实验楼供暖/制冷一体化需求。

项目采用 4 台高效螺杆土壤源热泵机组,主机空调侧及土壤换热器侧采用变流量系统,循环系统选用四台性能曲线一致的循环水泵,系统补水定压采用真空脱水定压补水装置。土壤换热器使用有效深度 120 米的双 U 高密度聚乙烯土壤换热管 858 个,换热管孔间距 5 米,布置在场地 2.4 米以下,室外设地理一级集水器。夏季增加冷水机组和冷却塔承担剩余冷负荷,配套冷却塔主机制冷量为 1237kW,冷却塔冷却水量 300t/h。设置两组 DTS-1 地温场测试仪,自动计量检测土壤温度变化,根据负荷合理计划运行冷却塔及其热泵机组,达到土壤热平衡。实施结果如图 1 所示。



图1 地源热泵系统热泵机房

Fig.1 Heat pump room of ground source heat pump system

1.2 项目成本(C)

地源热泵项目成本分为初投资成本(C_i)和运行成本,运行成本包括能耗成本(C_e)和运维成本(C_o),即 $C=C_i+C_e+C_o$ 。

1.2.1 初投资(C_i)

地源热泵项目初投资主要包括热泵机组、设备埋管换热系统、附属设备及运输安装等其他费用如表 1 所示。

表 1 地源热泵项目初投资

Table 1 Initial investment of ground source heat pump project

序号	项目	建筑工程 (万元)	设备购置费 (万元)	安装工程费 (万元)	其他费用 (万 元)	合计 (万元)
1	热泵机组设备	2	299	143	—	444
2	地埋管换热系统	10	190	111	—	311
3	附属设备	6	36	38	—	80
4	其他费用	—	—	—	52	52
5	总计	18	525	292	52	887

1.2.2 年能耗成本 (C_e)

为计算项目实际能耗成本, 对项目热泵机组、泵阀、风机盘管等所有用电设备, 使用 UT204 数字电能计量表和 UT243 钳形谐波功率计等电量功率监测工具, 采集耗电量数据, 进行周期为一年的耗电量监测测试, 其中每天供暖/制冷时间为 8:00-18:00 计 10 小时, 供暖/制冷期各 100 天。测试结果如图 2 所示。

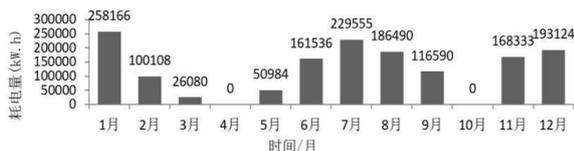


图 2 地源热泵项目月耗电量

Fig.2 Monthly power consumption of the ground source heat pump project

依据图 2 中月耗电量测试结果, 可得出项目日均耗电 7083kWh, 全年消耗电能共计 1699966kWh, 年运行耗电成本按照当地城区电价标准 0.56 元/kWh 计算, 项目运行年能耗成本如表 2 所示。

表 2 地源热泵项目年能耗成本

Table 2 Annual energy consumption cost of ground source heat pump project

项目	制冷期	供暖期	合计
年运行电费 (万元)	41.72	53.46	95.18

1.2.3 年运维成本 (C_o)

项目每年的运维成本 (C_o) 主要是设备运维人工成本和设备维修保养成本, 为方便研究, 取初投资成本 (C_i) 的 2%。

1.3 年现金流量 (Q) 函数

项目年现金流量来自于投资方收取校方的供暖/制冷费用, 见式 (1)。

$$Q = S \times \left(P_h + \frac{Q_R}{1000} \times \frac{1}{EER} \times P \times h \right) - C_o - C_e \quad (1)$$

式中, S 为建筑面积; P_h 为供热价; Q_R 为建筑物冷负荷指标; EER 为能效等级; P 为电价; h 为年制冷时间。

1.4 净现值 (NPV_i)

项目净现值与年现金流量、折现率以及初投资相关, 见式 (2)。

$$NPV_i = \sum_{t=1}^{T_i} \frac{Q}{(1+r)^t} - C_i \quad (2)$$

式中, NPV_i 为投资方特许经营期净现值; Q 为年现金流量, t=1, 2, ..., T_i; T_i 为特许经营年限; r 为折现率, C_i 为初投资。

2 特许经营期可行域决策模型构建与计算

2.1 最小特许经营期 T_{i min} 模型构建与计算

投资方能接受的最小特许期 (T_{i min}) 必满足式 (3)。

$$NPV_{i min} = \sum_{t=1}^{T_{i min}} NPV_T \geq C_i R \quad (3)$$

式中, NPV_{i min} 为投资方最小特许期净现值; R 为投资方预期的最低投资回报率。

由式 (3) 可知 NPV_{i min} = ∑_{t=1}^{T_{i min}} NPV_t = C_iR 时, T_{i min} 为最小特许期, 因项目净现值曲线为线性, 如图 3 所示, 设 T_{i min} 在 T₁、T₂ 之间, T₁、T₂ 对应的净现值为 NPV₁ 和 NPV₂, 用试算法^[14]可得到 T_{i min}, 见式 (4)。

$$\begin{cases} \frac{NPV_2 - NPV_1}{T_2 - T_1} = \frac{NPV_{i min} - NPV_1}{T_{i min} - T_1} = \frac{NPV_2 - NPV_{i min}}{T_2 - T_{i min}} \\ NPV_{i min} = C_i R \end{cases}$$

$$T_{i min} = T_1 + \frac{C_i R - NPV_1}{NPV_2 - NPV_1} (T_2 - T_1) \quad (4)$$

将式 (2) 代入式 (4), 可得到投资方能接受的最小特许经营期 $T_{i\min}$ 。

其中冷负荷指标参数和能效等级参数取值对最小特许经营期 $T_{i\min}$ 的影响如图 3 所示。

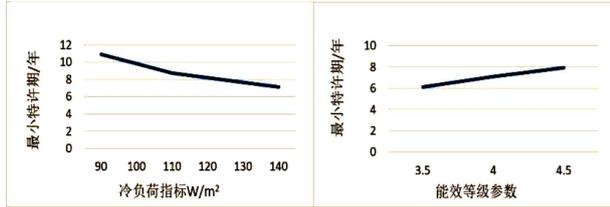


图 3 冷负荷指标参数和能效等级参数对最小特许经营期的影响

Fig.3 Effect of cooling load index parameter and energy efficiency grade parameter on minimum franchise period

其中, 建筑物冷负荷指标 Q_R 按行业规范取值范围 (90-140) W/m^2 , 能效等级 EER 按 GB 21455-2019 取值范围 (3.5-4.5), S 取 $49258m^2$, P_h 取 $33.6 \text{ 元}/m^2 \cdot a$ (按照当地发改价管[2019]文件规定非居民集中供热收费标准), P 取 $0.56 \text{ 元} / kWh$, h 取 $100 \text{ 天} \times 10 \text{ 小时}$, C_i 取 887 万元 (见表 1), R 取 10% , C_e 取 95.18 万元 (见表 2), C_o 取 C_i 的 2% , r 取人民币五年以上贷款利率 4.9% 。

2.2 最大特许经营期 $T_{i\max}$ 模型构建与计算

校方能接受的最大特许经营期 $T_{i\max}$ 必满足式 (5)。

$$NPV_{i\max} = \sum_{t=T_{i\max}}^T NPV_t$$

$$= \sum_{t=T_{i\max}}^T \frac{S \times \left(P_h + \frac{Q_R}{1000} \times \frac{1}{EER} \times P \times h \right) - C_o - C_e}{(1+r)^t} \geq 0 \quad (5)$$

式中, $NPV_{i\max}$ 为校方能接受的最大特许经营期净现值, T 为项目生命周期。

由式 (5) 可知, $\sum_{t=T_{i\max}}^T \frac{S \times \left(P_h + \frac{Q_R}{1000} \times \frac{1}{EER} \times P \times h \right) - C_o - C_e}{(1+r)^t} = 0$ 时, $T_{i\max}$ 为校方能接受的最大特许期, 因 $S \times \left(P_h + \frac{Q_R}{1000} \times \frac{1}{EER} \times P \times h \right) - C_o - C_e$ 为项目的年收入流量函数恒大于 0, 所以最大特许经营期 $T_{i\max}$ 等于项目生命周期 T 。地源热泵系统各部分寿

命期不尽相同, 地埋管一般按照 50 年寿命计算, 热泵主机一般为 15 年, 一个完整的项目生命周期 T 需要每隔 15 年对热泵机组重复投资。经计算, 该地源热泵 BOT 项目特许经营期 T_i 可行域为 $8.1 \leq T_i \leq 50$, 如图 4 所示。

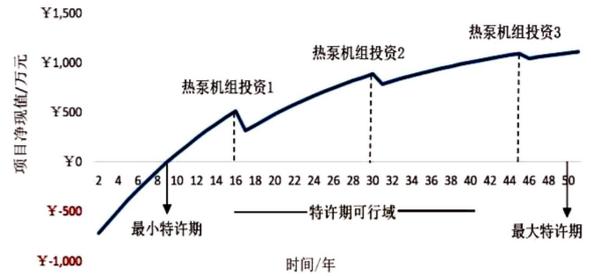


图 4 特许经营期可行域

Fig.4 Franchise period feasible area

其中, Q_R 按照设计院计算建筑物的冷负荷指标取 $103W/m^2$, EER 取 3.5 (GB 21455-2019 中的最低限值)。

3 特许经营期决策模型构建与计算

校方和投资方在可行域范围内计算项目特许经营期的确定值时, 都会从自身的角度出发, 希望实现自身利益最大化。因此我们把特许经营期的决策问题定义为一个讨价还价问题^[15], 博弈双方在可行域内针对项目特许经营期进行讨价还价, 最终获得确定值。

3.1 博弈模型参数设置

项目在整个生命周期内会面临各种各样的风险, 为实现博弈双方收益与风险的均衡, 本文采用德尔菲法, 选择地源热泵行业从事 BOT 项目的投资公司、地源热泵 BOT 项目使用单位、BOT 项目专家, 发放调查问卷 18 份, 根据各个风险指标的影响因素, 确定政治、法律、金融、建设、自然五项一级风险指标和十项二级风险指标。采用层次分析法对一级和二级风险指标进行排序、赋值和评价, 确定各级风险指标权重和主要影响因素隶属度。运用模糊综合评价法, 依据确定的风险指标因素集、指标权重和隶属度, 对风险指标进行定性与定量评估, 把各项风险指标对特许经营期的影响分别以参数赋值, 归并为风险因子 (λ), 如表 3 所示。

表 3 地源热泵 BOT 项目风险因子

Table 3 Risk allocation factors of ground source heat pump BOT project

风险指标因素	校方风险因子 (λ_u)	投资方风险因子 (λ_i)
政治法律风险		
政府审批延误	0.0978	0
税收调整	0	0.0987
金融风险		
贷款利率调整	0	0.0996
项目建设风险		
建设工期	0	0.0985
技术复杂	0	0.0979
市场需求	0.0993	0
市场风险		
材料成本	0	0.0993
能源价格	0.0497	0.0501
劳动力价格	0	0.0986
自然风险		
不可抗力	0.0989	0
合计	0.3457	0.6427

3.2 博弈模型构建

我们把特许经营期讨价还价问题定义为一个对偶 (F, V) , 其中 $F(T_u, T_i)$ 为特许经营期讨价还价问题的可行配置集, $V(V_u, V_i)$ 为无法达成协议点, T 为项目生命周期, (F, V) 可行集:

$$F = \{T \in \mathbf{R}^2 | T_u + T_i \leq T, T_u \geq 0, T_i \geq 0\} \quad (6)$$

$$S = F \cap \{T \in \mathbf{R}^2 | T_u + T_i \leq T, T_u \geq V_u, T_i \geq V_i\} \quad (7)$$

根据博弈论 Nash 讨价还价公理^[6], (F, V) 的解是在可行集 F 上使 Nash 积最大化的点, 即:

$$\text{Max } (\lambda_u T_u - V_u)(\lambda_i T_i - V_i) \quad (8)$$

$$\text{S t. } T_u + T_i \leq T \quad (9)$$

式中, T_u 为校方经营期, T_i 为特许(投资方)经营期, λ_u 为校方风险因子, λ_i 为投资方风险因子, Nash 均衡解如图 4 所示。

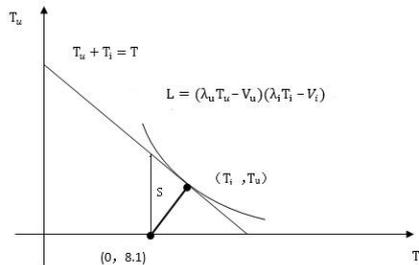


图 5 地源热泵 BOT 项目特许经营期 Nash 均衡解

Fig.5 Nash equilibrium solution of Franchise period

由于集 S 的最大值必定在 S 的边界 $T_u + T_i = T$ 上, 将约束条件 (9) 改为 $T_u = T - T_i$, 代入式 (8) 得 Nash 积 L , 见式 (10)。

$$L = [\lambda_u (T - T_i) - V_u](\lambda_i T_i - V_i) \quad (10)$$

$L = T\lambda_u\lambda_i T_i - \lambda_u\lambda_i T_i^2 - V_u\lambda_i T_i - T\lambda_u V_i + \lambda_u V_i T_i + V_u V_i$, 求得 Nash 均衡解 T_i , 见式 (11)。

$$\frac{dL}{dT_i} = T\lambda_u\lambda_i - 2\lambda_u\lambda_i T_i - V_u\lambda_i + \lambda_u V_i = 0$$

$$T_i = \frac{1}{2} \left(T - \frac{V_u}{\lambda_u} + \frac{V_i}{\lambda_i} \right) \quad (11)$$

从该讨价还价问题的 Nash 均衡解的形式上可以看出, 博弈模型中特许经营期 T_i 的值与无法达成协议点 V 的值密切相关。在博弈双方无法达成协议点 V 的值和风险因子 λ 都相同的条件下, 讨价还价解将均分项目生命周期的值。其他条件下, 博弈方风险因子 λ 的值越高, 获得的特许经营期越长。

3.3 特许经营期的确定

由图 4 可知: 校方无法达成协议点 $V_u=0$ 年, 投资方无法达成协议点 $V_i=8.1$ 年, 项目生命周期 T 为 50 年, 但因地源热泵项目生命周期内需要每隔 15 年对热泵机组重复投资, 存在较大的通货膨胀、政策改变等不确定风险因素, 该项目投资方不愿意进行重复投资, 因此项目生命周期 T 取 15 年, 将表 3 中 λ_u, λ_i 代入式 (11), 可得特许经营期 $T_i=13.8$ 年。从 Nash 均衡解的分配结果来看, 投资方承担了较多的风险, 在项目收回投资后, 获得收益分配比例较大。从均衡收益与风险的角度, 该项目特许经营期的确定是合理的, 具有较高的可操作性。

4 结论

本文以郑州某高校地源热泵 BOT 项目为例, 通过净现值法构建数学模型, 计算出特许经营期的可行域。将校方与投资方的风险因素归并风险因子, 作为参数分别赋值, 再利用 Nash 讨价还价理论, 构建博弈模型, 求得特许经营期 Nash 均衡解 13.8 年, 通过计算分析, 得出以下结论:

(1) 充分考虑地源热泵行业 BOT 项目协议双方的风险偏好对特许期的影响, 有利于实现风险与收益的均衡。既可以保证投资方能够获得合理的收益, 又能够避免其获取超额利润, 能够更好的保障 BOT 项目协议双方的项目利益。

(2) 该决策模型客观地反映了协议双方的目标和要求,提高了特许经营期的决策准确性和合理性,具有良好的扩展性,对地源热泵行业 BOT 项目特许经营期的决策和谈判有实际应用价值。

(3) 该决策方法没有考虑风险偏好之外的因素对特许期的影响,比如协议双方的理性程度、地区差异、行业收益标准等各种不确定性因素的影响,未来的研究需要充足的实践案例作为支撑以探寻各种不确定性因素对地源热泵 BOT 项目特许经营期决策的综合影响。

参考文献:

- [1] 徐玉党,雷飞,王凡.地源热泵空调系统的技术经济分析[J].应用科学学报,2003,21(4):377-380.
- [2] 地源热泵采暖空调系统技术经济分析[Z].中国建筑科学研究院,2007.
- [3] 范凤敏.推动地源热泵行业持续发展[J].制冷与空调,2013,13(8):46-47.
- [4] 田清剑,张胜利.中原地区地下水源热泵与地板供暖系统的技术经济分析[J].中原工学院学报,2003,14(2):66-68.
- [5] 汪建顺.BOT建设模式在我国的应用研究[J].工程与建设,2015,29(6):869-871.
- [6] 张志顺,吴语欣,刘琪.地源热泵节能工程实施 BOT 模式的经济分析[J].建筑节能,2015,36(5):111-114.
- [7] 杨宏伟,周晶,何建敏.基于博弈论的交通 BOT 项目特许权期的决策模型[J].管理工程学报,2003,17(3):93-95.
- [8] 王守清.特许经营项目融资(BOT PFI PPP)[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [9] 陈通,吴正泓.考虑隐性违约风险的 BOT 项目特许期决策模型研究[J].预测,2016,35(6):69-74.
- [10] 吕俊娜,刘伟,邹庆,等.轨道交通 SBOT 项目特许期的合作博弈模型研究[J].管理工程学报,2016,30(3):209-215.
- [11] Sheng LY, Wu YZ. Risk concession model for build operate transfer contract projects[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2005,13(2):211-220.
- [12] N g ST, XIE J, Skit more M, et al. A fuzzy simulation model for evaluating the concession items of public-private partnership schemes [J]. Automation in Construction, 2007,17(1):22-29.
- [13] 谢识予.经济博弈论[M].上海:复旦大学出版社,2002.
- [14] 李启明,申立银.基础设施 BOT 项目特许权期的决策模型[J].管理工程学报,2000,14(1):43-46.
- [15] 鲍海君.基础设施 BOT 项目特许权期决策的动态博弈模型[J].管理工程报,2009,23(4):139-147.
- [16] 赵东生.博弈论入门[M].郑州:河南科学技术出版社,2014.