

考虑政府干预的可再生能源与储能企业合作模式演化博弈研究

邹小燕, 张瑞宏

(重庆师范大学 经济与管理学院, 重庆 401331)

摘 要: 在“新能源配储”政策的推动下, 可再生能源发电企业配备储能设施以提升能源供应的稳定性, 然而储能电站的实际利用效率往往未能达到预期。通过引入地方政府这一主体, 构建地方政府-可再生能源发电企业-储能公司三方演化博弈模型, 研究地方政府干预对促成可再生能源发电企业与储能公司合作的影响, 分析三方策略的动态演化过程及其博弈均衡策略, 并进行仿真分析。结果表明: 地方政府的适当干预有助于推动可再生能源发电企业和储能公司达成“众筹共建”和“容量租赁”的合作模式; 地方政府可以根据双方合作意愿的变化灵活调整补贴力度, 确保政策效果的最大化; 地方政府在发电企业与储能公司合作的初始阶段进行干预能够有效促进双方建立合作关系, 随着合作关系的深入发展, 地方政府应适时减少直接干预, 让市场机制发挥更大作用。研究成果对于优化新能源配储政策、推动可再生能源产业的健康发展具有理论和实践意义。

关键词: 可再生能源发电企业; 新能源配储; 演化博弈; 储能公司; 政府干预

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202404001

0 引言

在“双碳”等政策推动下, 电力行业正向更清洁、高效的未来转型^[1]。然而, 可再生能源的增加也带来了预测性、波动性等挑战, 影响能源利用、电网稳定和发电效率^[2]。储能技术因其灵活性和对电网稳定性的贡献, 对新型电力系统构建至关重要^[3-4]。尽管如此, 高成本和收益不确定性使得可再生能源发电企业在储能投资上持谨慎态度^[5]。2021 年, 国家能源局和国家发展改革委发布通知, 鼓励可再生能源发电企业自建或购买储能以提升调峰能力, 增加并网规模, 地方政府在推动企业承担消纳责任中扮演关键角色。

在可再生能源发电领域, 储能设备的配置问题一直是研究的热点。文献[6]分析了风能和太阳能电力系统, 发现集成输送转化设备能显著减少储能设备的投资需求, 最高可节省 50%, 提升经济效益。文献[7]发现随着可再生能源比例的

增加, 储能设备投资也随之上升, 两者投资比例约为 1.3 : 1。文献[8]介绍了海上风电场群联合储能优化调度方法, 考虑了场间功率时移, 其能显著减少储能成本并提升经济性。文献[9]结合碳效益和运行策略, 提出了风电场储能优化配置的新方法。文献[10]提出了储能参与电力辅助服务的成本核算方法。这些研究为储能设备的经济效益分析和配置提供了理论依据和实践指导。

另一些研究从储能设备的投资和配置方法出发, 综合考量了可再生能源的渗透程度、储能单位成本以及消费者对电力品质的偏好等因素, 以最大化经济效益。文献[11]通过供应链模型分析发现, 发电企业租赁储能设备能提升电力质量和电价合理性。文献[12]探讨了在阶梯成本下, 混合模式配储方法能降低投资成本、提高资源利用率, 并减少用户用电成本。文献[13]提出了众筹建设储能电站的模式包括成本传导机制, 并分析了补偿价格和敏感性因素。文献[14]研究显示, 可再生能源发电企业自投资储能设备能降低消费者电价。这些研究为储能设备投资和配置提供了科学依据, 促进了储能技术的商业化。

目前文献中较少涉及政府干预如何影响发电

收稿日期: 2024-04-01; 修回日期: 2024-12-10。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71201180); 重庆师范大学研究生科研创新项目(YKC23026)。

企业储能决策。本研究创新性地将地方政府纳入分析框架，构建了一个涉及可再生能源发电企业、储能公司和地方政府的三方演化博弈模型。通过演化博弈理论，深入分析了各方互动和策略选择，旨在探讨地方政府在促进可再生能源发电企业与储能公司合作中的作用，评估政府补贴对和合作模式的影响，并揭示不同政策下各方的稳定策略及其条件。研究结果为制定更优的可再生能源储能决策提供了理论依据。

1 博弈问题描述

在“新能源配储”政策下，各省份实施方式多样，主要分为强制配储、建议配储和补贴配储项目3种类型。可再生能源发电企业面临自主建设储能设施的高成本和盈利难题，投资者参与可分担成本并共享经济收益。储能公司通过租赁和市场交易盈利，同时承担建设和运维成本^[15]。政府对储能产业给予重视和支持，地方政府在执行和监督配储任务中，可以选择介入合作，通过财政支持促进可再生能源发电企业与储能公司的合作，推动电力和储能产业的协同发展^[16]。合作达成后，电力系统稳定性和能源结构得到优化，地方政府也面临上级考核。这种策略有助于构建良性循环体系，为区域经济发展注入活力，促进经济高质量发展。

本文构建了一个涉及可再生能源发电企业、储能公司和地方政府的三方演化博弈模型，考虑了投资商参与储能电站建设的情况，以分析三者之间的交互关系，如图1所示。

2 博弈模型构建

2.1 研究假设与参数设定

本文基于可再生能源发电企业、储能公司和地方政府的互动关系，提出以下假设，汇总模型参数及含义见表1。

1) 地方政府、可再生能源发电企业、储能公司三者均为有限理性且具有学习能力的博弈方。地方政府的策略是{干预，不干预}，发电企业和储能公司则选择{众筹共建，容量租赁}，博弈三方选择第一种策略的概率分别为 x 、 y 、 z 。

2) 地方政府干预市场总成本 $F = (1 - t)F_1 + F_2$ 。

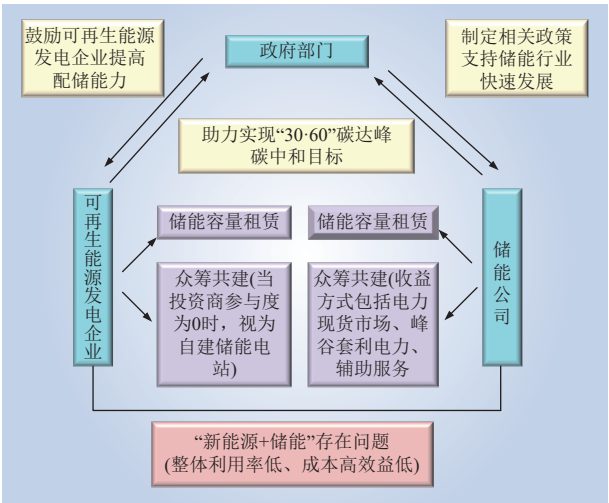


图 1 地方政府干预视角下可再生能源发电企业和储能公司合作模式示意

Fig. 1 Schematic diagram of cooperation mode between renewable energy generation enterprises and energy storage companies from the perspective of local government intervention

表 1 模型参数及含义

Table 1 Model parameters and meanings

博弈主体	参数	定义
政府部门	F	地方政府干预策略的总成本
	F_1	地方政府干预策略的可变成本
	F_2	地方政府干预策略的固定成本
	s	地方政府干预效率
	R_1	合作后地方政府获得的社会总效益
	T_1	给予发电企业的合作补贴
	T_2	给予储能公司的合作补贴
可再生能源发电企业	W	上级政府对不作为地方政府的惩罚
	C_1	发电企业众筹共建储能电站投资额
	S_1	发电企业配储电量收益
	N	众筹共建下储能电站外包风险
	B	众筹共建下储能电站外包费用
储能公司	t	投资商参与度
	M_2	众筹共建下储能电站运维成本
	S_2	众筹共建下储能电站现货市场收益
	C_2	容量租赁收益
	C_4	容量租赁下储能电站建设成本
	M_1	容量租赁下储能电站运维成本

未达成合作时，政府提供补贴以促成合作，效率为一定比例 s ， $s、t \in (0, 1)$ ^[17]。合作成功后，能提升电力稳定性和优化能源结构，带来环境效益 R_1 。若政府绩效不达标，将受行政处罚 W 。

3) 在“众筹共建”策略中, 可再生能源发电企业须承担建设成本 C_1 和外包成本 $(1-t)B$, 同时面临外包风险 $(1-t)N$ 。完成配储后, 可通过储能系统提高能源利用率, 获得收益 S_1 ; 若选择“容量租赁”策略, 则需支付储能公司租赁费 C_2 。

4) 储能公司在“众筹共建”策略下能获得外包收益 B , 并在满足可再生能源发电企业的储能需求后, 通过市场交易剩余电量获得额外收益 S_2 , 但需要承担维护成本 M_2 ; 在“容量租赁”策略下, 公司获得租赁收益 C_2 , 但须自行负责储能电站的建设成本 C_4 和运维成本 M_1 。

2.2 三方主体演化博弈模型

根据设定的参数和实际损失, 得到地方政府、可再生能源发电企业和储能公司在各种策略组合下的收益, 详见表 2。

表 2 三方博弈下的收益
Table 2 The income of tripartite game

策略组合 (地方政府, 发电企业, 储能公司)	收益
(干预, 众筹共建, 众筹共建)	$(s+t)R_1 - [(1-t)F_1 + F_2];$ $-C_1 + S_1 - (1-t)B - (1-t)N;$ $B - M_2 + S_2$
(干预, 众筹共建, 容量租赁)	$(s+t)R_1 - [(1-t)F_1 + F_2] - T_1 - T_2;$ $-C_1 + S_1 - (1-t)B - (1-t)N + T_1;$ $C_2 - C_4 - M_1 + T_2$
(干预, 容量租赁, 众筹共建)	$sR_1 - F_1 - F_2 - T_1 - T_2;$ $-C_2 + S_1 + T_1;$ $B - M_2 + S_2 + T_2$
(干预, 容量租赁, 容量租赁)	$sR_1 - F_1 - F_2;$ $-C_2 + S_1;$ $C_2 - C_4 - M_1$
(不干预, 众筹共建, 众筹共建)	$(s+t)R_1 - W;$ $-C_1 + S_1 - (1-t)B - (1-t)N;$ $B - M_2 + S_2$
(不干预, 众筹共建, 容量租赁)	$(s+t)R_1 - W;$ $-C_1 + S_1 - (1-t)B - (1-t)N;$ $C_2 - C_4 - M_1$
(不干预, 容量租赁, 众筹共建)	$sR_1 - W;$ $-C_2 + S_1;$ $B - M_2 + S_2$
(不干预, 容量租赁, 容量租赁)	$sR_1 - W;$ $S_1 - C_2;$ $C_2 - C_4 - M_1$

3 模型求解及均衡分析

3.1 各主体动态方程的建立

根据演化博弈理论, 计算了地方政府、可再

生能源发电企业和储能公司在不同策略组合下的期望收益和平均收益。基于这些数据, 构建了一个三维动力系统 M , 描述三方的策略选择动态, 具体为

$$F(x) = x(x-1)(F_1 + F_2 - W + yT_1 + yT_2 + zT_1 + zT_2 - tyF_1 - 2yzT_1 - 2yzT_2) \quad (1)$$

$$F(y) = y(y-1)(B + C_1 - C + N - tB - tN - xT_1 + 2xzT_1) \quad (2)$$

$$F(z) = -z(z-1)(B - C_2 + C_4 + M_1 - M_2 + S_2 + xT_2 - 2xyT_2) \quad (3)$$

3.2 各主体策略演化路径分析

利用三维动力系统 M , 分析三方主体的策略选择动态。

3.2.1 地方政府

1) 当 $y = \frac{W - F_1 - F_2 - zT_1 - zT_2}{T_1 + T_2 - tF_1 - 2zT_1 - 2zT_2}$ 时, 任意 x 均为演化稳定状态。2) 当 $(1-ty)F_1 + F_2 - W + (T_1 + T_2)(y + z - 2yz) < 0$ 时, 地方政府的演化稳定策略为 $x = 1$, 即选择干预策略。3) 当 $(1-ty)F_1 + F_2 - W + (T_1 + T_2)(y + z - 2yz) > 0$ 时, 地方政府的演化稳定策略为 $x = 0$, 即选择不干预策略。

政府部门的演化动态趋势如图 2 所示。

在本模型中, 随着投资商参与度提高和上级政府处罚力度增加, 地方政府更可能选择干预策略以保持稳定。上级政府的处罚力度对地方政府的稳定策略选择有决定性影响。因此, 上级政府应加强监管, 确保地方政府有效执行可再生能源电力配储工作, 并设计一个公正高效的奖惩机制, 处罚力度需适中, 既能有效约束地方政府, 又避免过度财政负担, 以实现可持续发展。

3.2.2 可再生能源发电企业

1) 当 $z = \frac{xT_1 - C_1 + C_2 - (1-t)(B+N)}{2xT_1}$ 时, 任意 y 均为演化稳定状态。2) 当 $(1-t)(B+N) + C_1 - C_2 + xT_1(2z-1) < 0$ 时, 发电企业的演化稳定策略为 $y = 1$, 即选择“众筹共建”策略。3) 当 $(1-t)(B+N) + C_1 - C_2 + xT_1(2z-1) > 0$ 时, 发电企业的演化稳定策略为 $y = 0$, 即选择“容量租赁”策略。

可再生能源发电企业的演化动态趋势如图 3 所示。

在地方政府和储能公司初始选择概率不变的情况下, 随着投资商参与度的提升, 发电企业更倾向于选择“众筹共建”策略。发电企业在决策

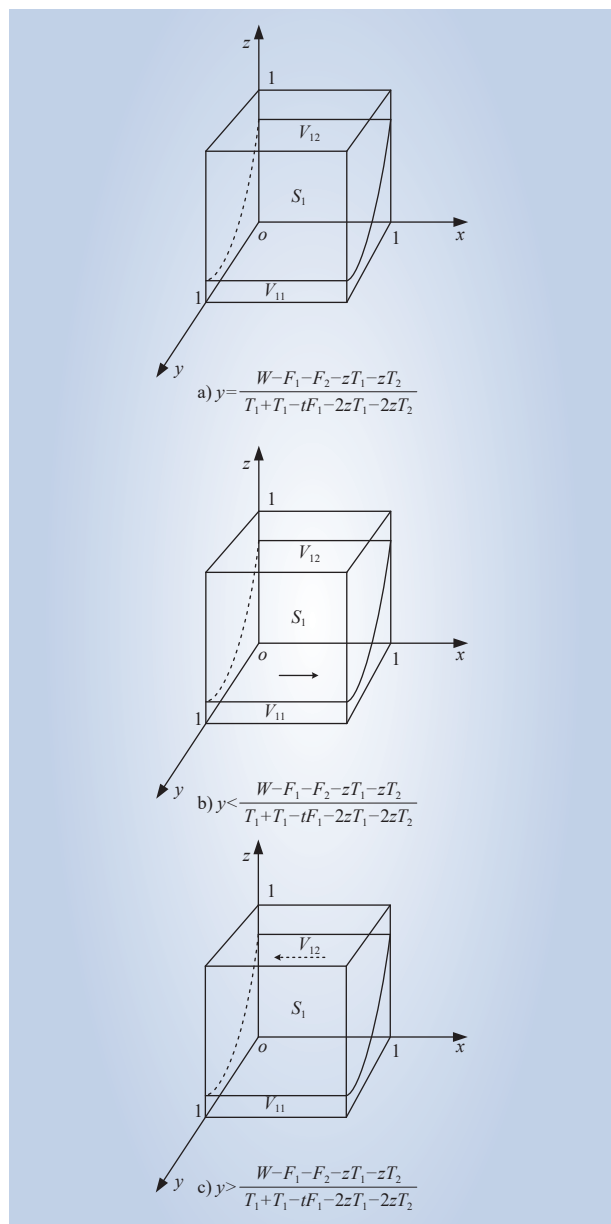


图 2 地方政府动态演化趋势
Fig. 2 Dynamic evolution trend chart of local government

时会权衡租赁成本和外包费用，其中租赁成本受政府指导价影响，外包费用降低会增加选择“众筹共建”的可能性。这一结论突出了地方政府在促进发电企业与储能公司合作中的重要性，并指导储能公司在政策引导下合理设定费用，优化运营策略。

3.2.3 储能公司

1) 当 $x = \frac{C_2 + M_2 - C_4 - M_1 - S_2 - B}{T_2 - 2yT_2}$ 时，任意 z 均为演化稳定状态。2) 当 $B - C_2 + C_4 + M_1 - M_2 +$

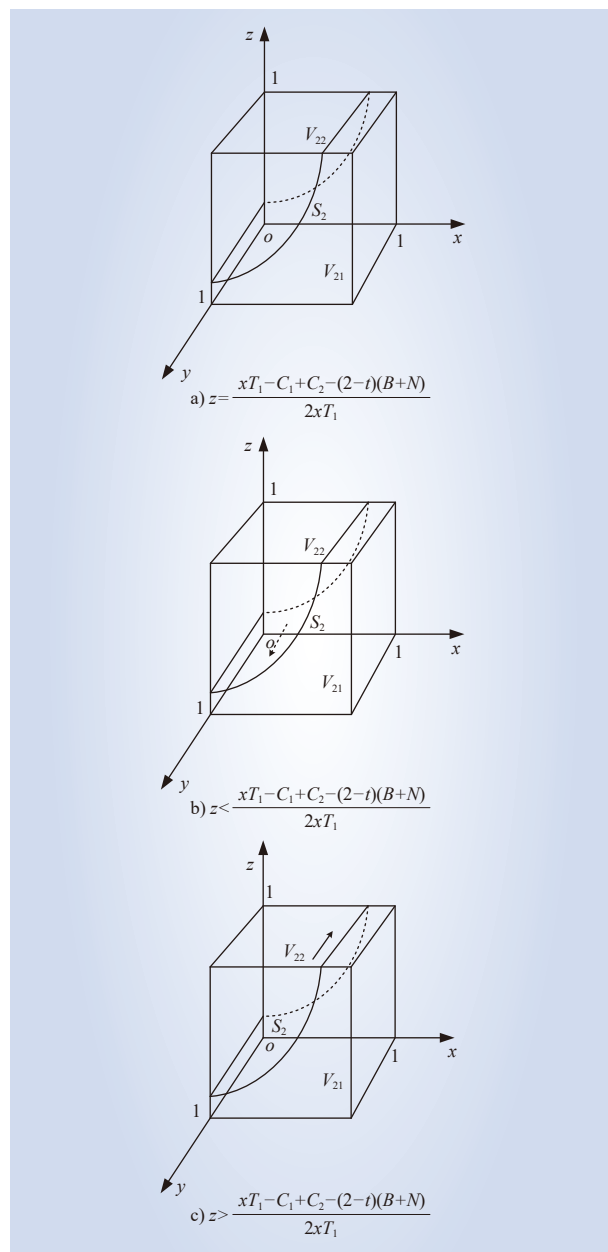


图 3 可再生能源发电企业动态演化趋势
Fig. 3 Dynamic evolution trend chart of renewable energy generation enterprises

$S_2 + xT_2(1 - 2y) < 0$ 时，储能公司的演化稳定策略为 $z = 0$ ，即选择“容量租赁”策略。3) 当 $B - C_2 + C_4 + M_1 - M_2 + S_2 + xT_2(1 - 2y) > 0$ 时，储能公司的演化稳定策略为 $z = 1$ ，即选择“众筹共建”策略。

储能公司的演化动态趋势如图 4 所示。

储能公司策略选择的稳定性受外包和租赁费用等参数影响较大，同时受地方政府干预和发电企业初始策略的影响。当发电企业对“众筹共建”的初始倾向较低，地方政府提供的合作补贴

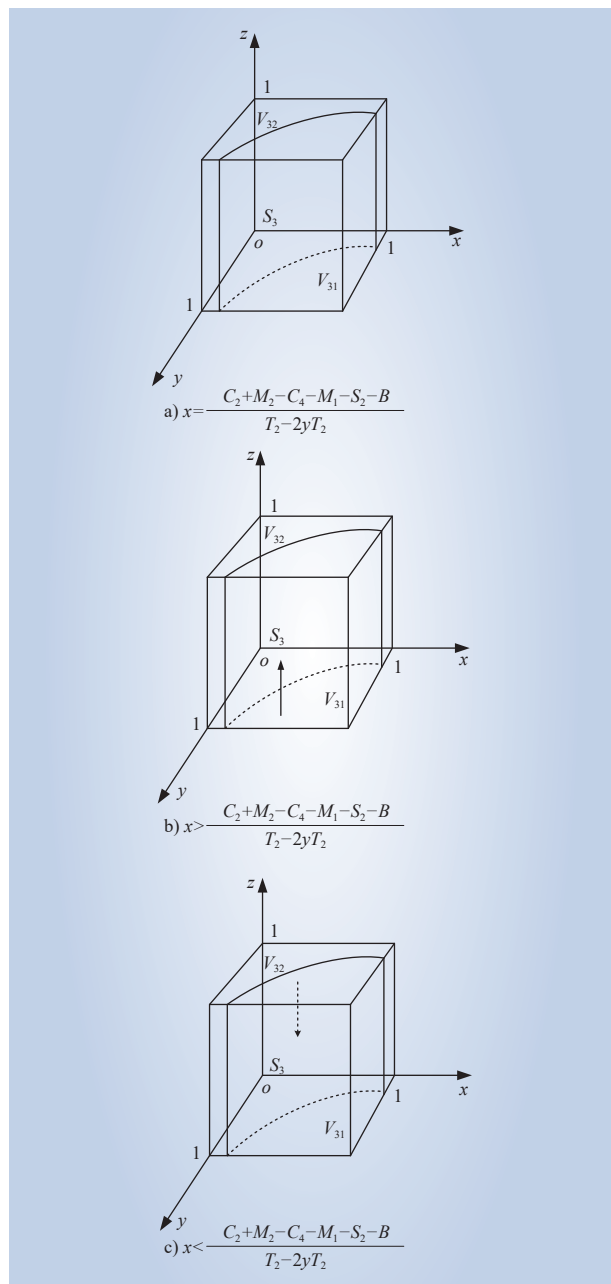


图 4 储能公司动态演化趋势
Fig. 4 Dynamic evolution trend of energy storage companies

能显著增加储能公司选择该策略的可能性。

3.3 系统均衡点及稳定性分析

根据李雅普诺夫判别法判别规则，稳定性由特征值的实部决定，所有负实部表示进化稳定点（evolutionarily stable strategy, ESS），至少一个正实部或实部不确定表示不稳定点，零实部伴随负实部表示鞍点^[18-19]。

将 5 个均衡点代入雅可比矩阵，得到特征值，并依据李雅普诺夫法^[20]分析如下 4 种情况。

1) 当 $F_1 + F_2 < W$ 且 $B + C_4 + M_1 + S_2 - M_2 + T_2 < C_2 < C_1 + (1-t)B + (1-t)N - T_1$ 时，平衡点 $(1,0,0)$ 达到稳定，该情形下的稳定策略为 {干预，容量租赁，容量租赁}。

2) 当 $F_1 + F_2 + T_1 + T_2 < W$ 且 $C_2 < \min\{B + C_4 + M_1 - M_2 + S_2 + T_2, C_1 + (1-t)B + (1-t)N + T_1\}$ 时，平衡点 $(1,0,1)$ 达到稳定，平衡点 $(1,1,0)$ 可能达到稳定，该种情形下存在 2 种可能的稳定策略组合，分别是 {干预，容量租赁，众筹共建} 和 {干预，众筹共建，容量租赁}。

3) 当 $(1-t)F_1 + F_2 + T_1 + T_2 < W$ 且 $C_2 > \max\{B + C_4 + M_1 + S_2 - M_2 - T_2, (1-t)B + (1-t)N + C_1 - T_1\}$ 时，平衡点 $(1,1,0)$ 为稳定点，平衡点 $(1,0,1)$ 和 $(0,0,1)$ 的稳定情况无法具体判断，可能为不稳定点、鞍点，也可能为稳定点。该种情形下出现的稳定策略情况较为复杂，有 3 种可能的组合，分别是 {干预，众筹共建，容量租赁}、{干预，容量租赁，众筹共建} 和 {不干预，容量租赁，众筹共建}。

4) 当 $(1-t)F_1 + F_2 < W$ 且 $(1-t)B + (1-t)N + C_1 + T_1 < C_2 < B + C_4 + M_1 - M_2 + S_2 - T_2$ 时，平衡点 $(1,1,1)$ 为稳定点，该情形下的稳定策略为 {干预，众筹共建，众筹共建}。

在情况 1) 和 4) 中，地方政府的干预显著影响可再生能源发电企业与储能公司的决策。

情况 1) 中，政府推动“干预-容量租赁”策略，在此模式下，储能公司通过出租设施给发电企业获得更多利润，合作补贴基于 2 种合作方式的成本差额和收益差额设定。

情况 4) 中，双方选择“干预-众筹共建”策略，合作激励上限基于 2 种策略的收益和成本差异设定。本文将进一步分析这些参数如何影响各方策略演化。

4 数值仿真分析

本文采用 Matlab 2018a 进行数值仿真，以光伏发电企业为例，装机容量 1 MW，须配备 20%、2 h 的储能系统，每天充放电一次，循环 5 000 次^[21]。在不考虑净现值的情况下，光伏建设投资取 4 元/W^[16]，众筹共建策略下配储的光伏电站总建设成本为 400 万元，投资商参与度影响发电企业成本承担。租赁费用为 243.5 元/((kW·h)·年)^[22]，

设定 C_2 为 48.7 万元/年。基于现实情况, 对情况 1) (干预-容量租赁策略) 和情况 4) (干预-众筹共建策略) 下各参数进行初始值设定, 并进行仿真分析。

4.1 干预-容量租赁策略下的数值仿真分析

对各个参数赋值如下。 $t = 0.2, F_1 = 20, F_2 = 20, W = 50, B = 30, N = 180, C_1 = 320, T_1 = 0, C_2 = 487, C_4 = 330, M_1 = 30, M_2 = 10, S_2 = 90, T_2 = 0$ 。

系统演化如图 5 所示。仿真结果表明, 在干预-容量租赁策略下, 三方博弈主体最终稳定于 {干预, 容量租赁, 容量租赁} 状态。为深入分析初始选择概率对策略演化的影响, 设定了 3 组不同的初始意愿值进行研究。分别为 $x = y = z = 0.1$, $x = y = z = 0.5$, $x = y = z = 0.9$, 演化结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 系统随时间演化最终会稳定在 2 个状态, 且无论初始选择如何, 地方政府最终

总是选择“干预”, 储能公司稳定在“容量租赁”。可再生能源发电企业初期倾向于“容量租赁”, 随后可能转向“众筹共建”, 这种转变发生在“众筹共建”的外部风险超过建设成本时。但实际上, 由于市场监管, 外包风险通常不会远高于建设成本。

4.2 干预-众筹共建策略下的数值仿真分析

对各个参数赋值如下。 $t = 0.5, F_1 = 20, F_2 = 20, W = 50, B = 30, N = 10, C_1 = 200, T_1 = 20, C_2 = 487, C_4 = 350, M_1 = 50, M_2 = 10, S_2 = 90, T_2 = 20$ 。

系统演化如图 7 所示。数值仿真显示, 在“干预-众筹共建”策略下, 博弈主体最终稳定于策略组合 {干预, 众筹共建, 众筹共建}。在此基础上, 进一步探究初始选择概率、政府给予发电企业和储能公司的合作补贴、以及上级部门惩罚力度 3 个参数对博弈主体演化策略的影响。

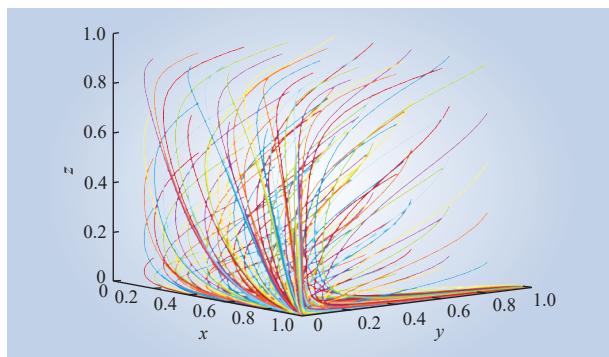


图 5 干预-容量租赁策略下的系统演化

Fig. 5 System evolution chart under the intervention-capacity leasing strategy

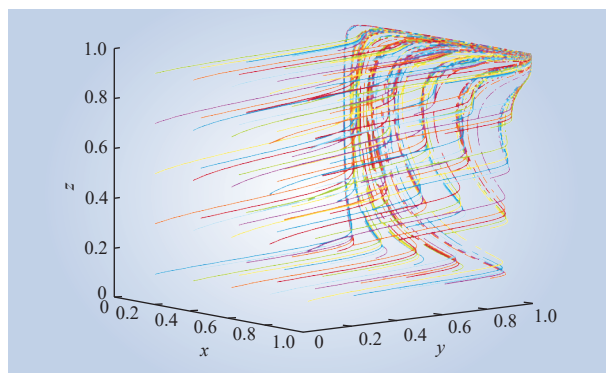


图 7 干预-众筹共建策略下的系统演化

Fig. 7 System evolution chart under the intervention-crowdfunding co-construction strategy

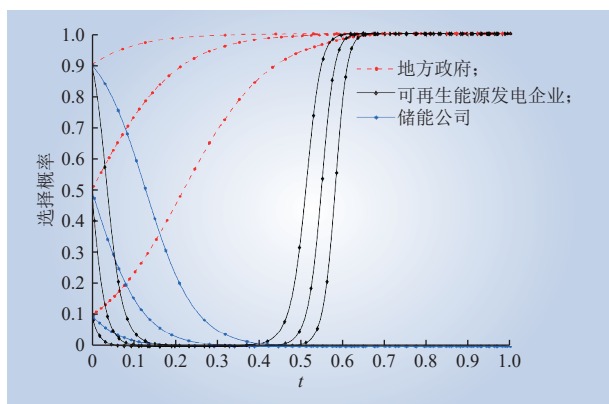


图 6 干预-容量租赁策略下初始选择概率对博弈主体演化策略的影响

Fig. 6 The influence of initial choice probability on the evolution strategy of game players under the intervention-capacity leasing strategy

4.2.1 初始选择概率 x 、 y 、 z 对博弈主体演化策略的影响

图 8 展示了在参数固定时, 三方主体 (可再生能源发电企业、储能公司、地方政府) 初始意愿的同步变化如何影响演化结果的稳定性。

由图 8 可知: 1) 可再生能源发电企业和地方政府的“众筹共建”和“干预”意愿越强, 其合作速度越快; 储能公司则相反, 意愿越强, 合作速度越慢; 2) 意愿低时, 可再生能源发电企业先快速合作, 储能公司随后, 地方政府从无干预转向干预; 3) 意愿高时, 可再生能源发电企业最快合作, 储能公司随地方政府逐渐合作。

综上, 地方政府在促进可再生能源发电企业与储能公司合作中起关键作用。如果储能公司偏

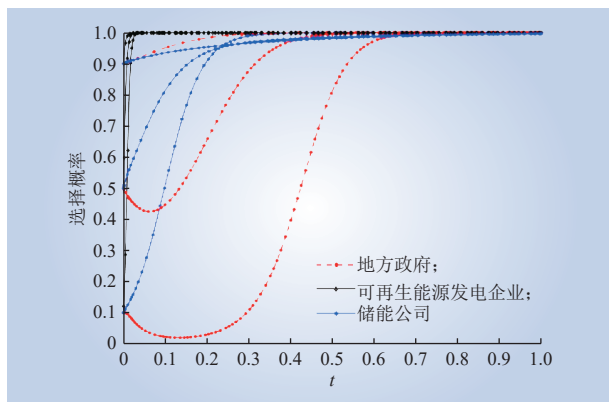


图8 干预-众筹共建策略下初始选择概率对博弈主体演化策略的影响

Fig. 8 The influence of initial selection probability on the evolution strategy of game players under the co-construction strategy of intervention and crowdfunding

好“众筹共建”，地方政府的补贴可能不会增加其合作积极性，甚至可能产生消极影响。因此，地方政府应实施差异化补贴策略，并根据合作双方的意愿灵活调整补贴，以优化政策效果。

4.2.2 政府给予发电企业补贴额度 T_1 对博弈主体演化策略的影响

图9仿真模拟了地方政府给予发电企业的补贴额度在3种不同意愿下对博弈主体演化策略的影响。可以看出，地方政府对发电企业的补贴额度影响博弈主体策略演化，这取决于三方主体的初始意愿（低意愿： $x=y=z=0.1$ ，中意愿： $x=y=z=0.5$ ，高意愿： $x=y=z=0.9$ ）。

在低意愿条件下，增加对发电企业的补贴 T_1 能推动可再生能源发电企业与储能公司的合作，但超过一定阈值后，补贴增加对合作的促进作用有限；在高意愿条件下，增加补贴能加快双方合作速率，地方政府的干预逐渐减少。

综上，地方政府在进行市场干预之前，需先调研合作双方意愿。若发现合作双方合作意愿薄弱，应提供高补贴激励机制并逐步退出，让市场决定合作；相反，若双方合作意愿强烈，则给予较低补贴机制，适时调整，减少干预，促进双方合作的健康发展。

4.2.3 政府给予储能公司补贴额度 T_2 对博弈主体演化策略的影响

图10显示了地方政府给予储能公司的补贴额度在3种不同意愿下对博弈主体演化策略的影响。可以看出，地方政府给予储能公司补贴额度影响

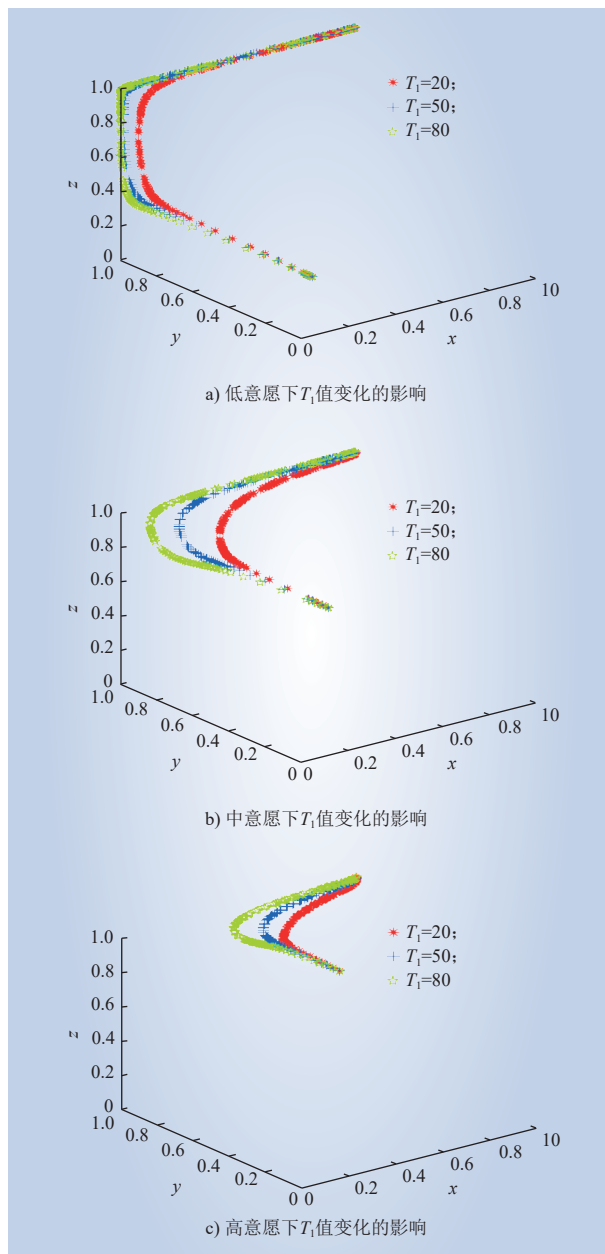


图9 干预-众筹共建策略下地方政府给予发电企业补贴额度对博弈主体演化轨迹的影响

Fig. 9 The influence of local government subsidies to generation enterprises on the evolution trajectory of game players under the intervention-crowdfunding co-construction strategy

博弈策略，同样受三方主体初始意愿的影响。

在低意愿条件下，提高政府补贴能加速发电企业与储能公司的合作。然而，当初始策略概率较高时，过度增加补贴可能对双方合作产生负面影响。

综合该结论并与4.2.2对比分析可知，地方政府在制定补贴政策时，应采取非对称策略，重点

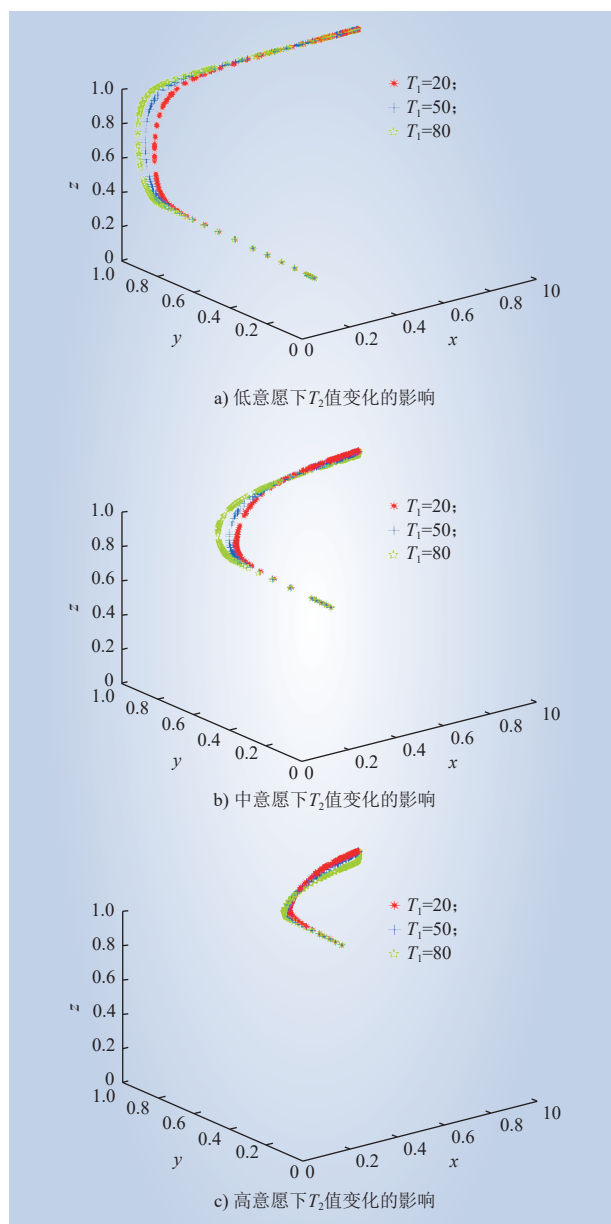


图 10 干预-众筹共建策略下地方政府给予储能公司补贴额度对博弈主体演化轨迹的影响

Fig. 10 Influence of local government subsidies to energy storage companies on the evolution trajectory of game players under the intervention-crowdfunding co-construction strategy

关注可再生能源发电企业，合理设定储能公司补贴上限，并根据合作进展和意愿变化动态调整补贴金额。必要时适时退出补贴，让市场力量决定合作方向，以确保政策效果和市场活力，促进可再生能源与储能领域的协同发展。

4.2.4 上级政府对地方政府的处罚额 W 对博弈主体演化策略的影响

图 11 仿真模拟了针对地方政府不作为，上级

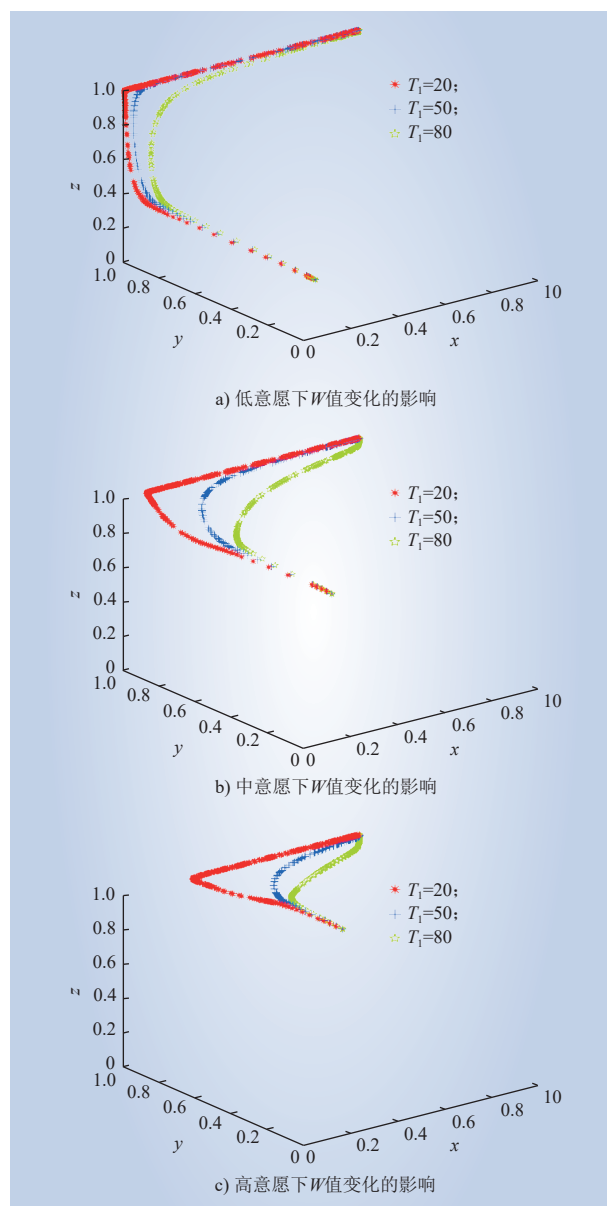


图 11 干预-众筹共建策略下上级政府对地方政府的处罚额对博弈主体演化策略的影响

Fig. 11 The influence of higher level government's penalty to local government on the evolution strategy of game players under the intervention-crowdfunding co-construction strategy

政府对其处罚力度在 3 种不同意愿下对博弈主体演化策略的影响。可以看出，提高处罚额度会减缓可再生能源发电企业和储能公司达成合作的速度，并增加地方政府干预的概率，这一趋势不受初始意愿的影响。

从 2 个维度分析处罚额度对博弈主体演化策略的影响，1) 增加上级政府处罚力度将促使地方干预可再生能源企业与储能公司的合作。2) 上

级政府处罚过重会导致地方政府过度干预，促使可再生能源发电企业和储能公司转向“容量租赁”合作。

综上，上级政府可以规划可再生能源发电企业与储能公司的合作框架，并确定相应的发展指导方针。在此基础上，明确对地方政府不当干预的处罚，激励其积极促进可再生能源发电企业与储能公司的合作。

5 研究结论与政策建议

5.1 研究结论

本文基于已有研究，将地方政府这一主体引入到了可再生能源发电企业与储能公司的合作中，构建了包含地方政府、可再生能源发电企业和储能公司的三方演化博弈模型，分析了不同合作模式的条件，并用 Matlab 仿真分析了特定情形下初始选择概率、地方政府给予可再生能源发电企业和储能公司的补贴额度、上级政府对地方政府的处罚额等参数对合作动态的影响。

研究结果表明：1）地方政府的合理介入能够有效推动可再生能源发电企业与储能公司的合作。在合作模式中，“众筹共建”和“容量租赁”是主要形式。若双方倾向于“容量租赁”，地方政府无需额外补贴，因为这种模式可能已商业可行。若双方偏好“众筹共建”，地方政府应提供激励补贴以降低投资风险，促进项目启动和实施。2）地方政府在促进可再生能源发电企业与储能公司合作中起主导作用，应适时引导合作。初期积极介入，成熟期减少干预，让市场主导。对于“众筹共建”模式，政府补贴应差异化，以激励合作而不扭曲市场。3）上级政府的监管对于激励地方政府和保障合作至关重要，但应适度处罚，以免过度处罚对可再生能源发电企业和储能公司造成负面影响，从而影响合作的长期稳定发展。

5.2 政策建议

1）地方政府应因地制宜，灵活执行储能配置任务，避免一刀切。鉴于各省运营和地理差异导致的储能成本不同，地方政府须为可再生能源发电企业和储能公司提供差异化补贴，并防止可再生能源发电企业出现“配而不用”的现象。

2）地方政府须合理调控储能电站租赁费用，适度干预可再生能源与储能公司的合作，既不能过度干预也不能完全放任。应重视电力和储能产业，定期调研市场，适时干预，并在合作成熟后逐步让市场接管监管。

3）鼓励投资商参与储能电站的建设，并与可再生能源发电企业和储能公司共享配储收益，以降低配储成本、提升配储率，并促进社会经济效益提升，减少监管成本，推动绿色经济社会发展。

参考文献：

- [1] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, *et al.* Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [2] 但扬清, 王蕾, 郑伟民, 等. 高比例可再生能源接入背景下电网承载能力鲁棒提升策略[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 104-111.
DAN Yangqing, WANG Lei, ZHENG Weimin, *et al.* Robust improvement strategy for power grid hosting capacity with integration of high proportion of renewable energy[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 104-111.
- [3] 郝婷, 樊小朝, 王维庆, 等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 101-112.
HAO Ting, FAN Xiaochao, WANG Weiqing, *et al.* Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 101-112.
- [4] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 17-25.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, *et al.* Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 17-25.
- [5] 王骞, 易传卓, 张学广, 等. 兼顾捕碳强度与可再生能源消纳的储能容量配置优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8295-8309.
WANG Qian, YI Chuanzhuo, ZHANG Xueguang, *et al.* Optimization of energy storage capacity sizing considering carbon capture intensity and renewable energy consumption[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2023, 43(21): 8295–8309.
- [6] PEKER M, KOCAMAN A S, KARA B Y. Benefits of transmission switching and energy storage in power systems with high renewable energy penetration[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1182–1197.
- [7] CONLON T, WAITE M, MODI V. Assessing new transmission and energy storage in achieving increasing renewable generation targets in a regional grid[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 1085–1098.
- [8] 朱昌辉, 边晓燕, 臧延雪, 等. 考虑场间功率时移的海上风电场群联合储能优化调度方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2394–2403.
- ZHU Changhui, BIAN Xiaoyan, ZANG Yanxue, *et al.* Optimal scheduling method of offshore wind farm groups with energy storage considering power time shift between adjacent offshore wind farms[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(6): 2394–2403.
- [9] 刘道兵, 李珏岑, 齐越, 等. 考虑碳效益和运行策略的风电场储能优化配置[J/OL]. *太阳能学报*, 1–9[2024-12-04]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1565>.
- LIU Daobing, LI Juecen, QI Yue, *et al.* Wind farm energy storage optimization considering carbon benefit and operation strategy[J/OL]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 1–9[2024-12-04]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1565>.
- [10] 王庆, 赵宏, 陈静漪. 考量储能参与电力辅助服务的成本核算方法研究—基于功率型储能、能量型储能的比较分析[J]. *价格理论与实践*, 2024(1): 129–134.
- WANG Qing, ZHAO Hong, CHEN Jingyi. Research on the cost accounting method of considering the participation of energy storage in power ancillary services—based on the comparative analysis of power-based energy storage and energy-based energy storage[J]. *Price: Theory & Practice*, 2024(1): 129–134.
- [11] 陈威, 田永乐, 马永开, 等. 可再生能源储能租赁模式对电力质量和电价决策的影响[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(1): 309–318.
- CHEN Wei, TIAN Yongle, MA Yongkai, *et al.* Impact of leasing mode with renewable energy storage equipment on electricity quality and price[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(1): 309–318.
- [12] 栗然, 吕慧敏, 彭湘泽, 等. 阶梯成本下考虑混合租建模式的云储能优化配置[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(2): 263–273.
- LI Ran, LYU Huimin, PENG Xiangze, *et al.* Optimal configuration of cloud energy storage considering hybrid self-built and lease mode under tiered cost[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2024, 45(2): 263–273.
- [13] 田冰颖, 何永秀, 恩格贝, 等. 众筹储能模式分析及成本传导机制[J]. *现代电力*, 2024, 41(3): 557–564.
- TIAN Bingying, HE Yongxiu, EN Beige, *et al.* Analysis of crowd funding energy storage mode and cost transmission mechanism[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(3): 557–564.
- [14] 陈威, 马永开, 白春光. 基于新型电力系统的储能设备投资决策[J]. *系统管理学报*, 2024, 33(5): 1194–1203.
- CHEN Wei, MA Yongkai, BAI Chunguang. Investment of renewable energy storage device in new electricity systems[J]. *Journal of Systems & Management*, 2024, 33(5): 1194–1203.
- [15] 郑云平, 李明, 张艳丽, 等. 新型储能政策分析与建议[J/OL]. *储能科学与技术*, 1–10[2024-12-04]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0140>.
- ZHENG Yunping, LI Ming, ZHANG Yanli, *et al.* Analysis and suggestions on new energy storage policy[J/OL]. *Energy Storage Science and Technology*, 1–10[2024-12-04]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0140>.
- [16] 程承, 安润飞, 董康银, 等. 碳交易机制引导下可再生能源发电企业创新策略研究: 基于演化博弈视角[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(3): 82–94.
- CHENG Cheng, AN Runfei, DONG Kangyin, *et al.* Research on innovation strategy for renewable power generation enterprises under the background of carbon trading mechanism—from the perspective of evolutionary game[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(3): 82–94.
- [17] 刘兰剑, 张萌, 黄天航. 政府补贴、税收优惠对专利质量的影响及其门槛效应: 基于新能源汽车产业上市公司的实证分析[J]. *科研管理*, 2021, 42(6): 9–16.
- LIU Lanjian, ZHANG Meng, HUANG Tianhang. The impact of government subsidies and tax preferences on patent quality and its threshold effect —An empirical analysis based on the listed companies in the new energy automobile industry[J]. *Science Research Management*, 2021, 42(6): 9–16.
- [18] SHAN S N, ZHANG Z C, JI W Y, *et al.* Analysis of collaborative urban public crisis governance in complex system: a multi-agent stochastic evolutionary game approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 91: 104418.
- [19] TAN J S, ZHAO X Y. Research on technological strategy of main body of innovation ecosystem—Evolutionary game and simulation based on leading and following firms[J]. *Journal of management science*, 2022, 25(5): 13–28.
- [20] JIANG Y, QIAN C Y, YU J, *et al.* Evolutionary game analysis of power generation groups considering energy price fluctuation[J].

Algorithms, 2022, 15(12): 456.

- [21] 朱振涛, 吴丘驰, 张焱, 等. 考虑容量优化的光伏制氢盐穴储氢系统经济性分析 [J]. *电力建设*, 2024, 45(4): 26–36.

ZHU Zhen tao, WU Qiuchi, ZHAN Yan, *et al.* Economic analysis of photovoltaic hydrogen-generation system using salt cavern for hydrogen storage considering capacity optimization[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(4): 26–36.

- [22] 张博, 唐钰政, 代双寅, 等. 供用电双方满意的电压暂降治理增值服务策略 [J]. *中国电力*, 2020, 53(11): 50–59.

ZHANG Bo, TANG Yuzheng, DAI Shuangyin, *et al.* Value-added service strategy of voltage sag governance for mutual satisfaction of

power supply companies and power users[J]. *Electric Power*, 2020, 53(11): 50–59.

作者简介:

邹小燕 (1979—), 女, 博士后, 教授, 从事博弈论、机制设计等理论在能源、环境政策中的应用研究, E-mail: 375918519@qq.com;

张瑞宏 (2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 从事博弈论在电力市场、储能领域的应用研究, E-mail: 1605797643@qq.com。

(责任编辑 许晓艳)

Evolutionary Game Study of the Cooperation Mode Between Renewable Energy Generation Enterprises and Energy Storage Companies Considering Government Intervention

ZOU Xiaoyan, ZHANG Ruihong

(School of Economics and Management, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Driven by the policy of new energy distribution and storage, renewable energy generation enterprises are equipped with energy storage facilities to improve the stability of energy supply, but the actual utilization efficiency of energy storage power stations often fails to meet expectations. By introducing the local government as the main body, this paper constructs a tripartite evolutionary game model of local government, renewable energy generation enterprises and energy storage companies, studies the influence of local government intervention on promoting the cooperation between renewable energy generation enterprises and energy storage companies, analyzes the dynamic evolution process of the tripartite strategy and its game equilibrium strategy, and conducts simulation analysis. The results show that: firstly, the appropriate intervention of local government is helpful to promote the cooperation mode of "crowdfunding co-construction" and "capacity leasing" between renewable energy generation enterprises and energy storage companies; secondly, local government can flexibly adjust the subsidy intensity according to the changes in the cooperation willingness of both parties; thirdly, local government's intervention can effectively promote the establishment of cooperation between the two sides. With the in-depth development of cooperation, local government should reduce direct intervention in due course and let market mechanisms play a greater role. This research result has theoretical and practical significance for optimizing new energy distribution and storage policies and promoting the healthy development of renewable energy industry.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.71201180), Chongqing Normal University Graduate Research Innovation Project (No.YKC23026).

Keywords: renewable energy generation enterprises; new energy distribution and storage; evolutionary game; energy storage companies; government intervention