

复杂适应系统理论视角下既有建筑节能改造市场运行机制研究

马彩薇* 胡恒祺 范冬娇 徐理 刘玉洁 曾雯琳

新余学院建筑与设计学院 江西新余 338000

摘要:既有建筑节能改造市场是一个涉及多元运行主体、不断交互演化的复杂适应系统。既有建筑节能改造工作的高效开展离不开市场的健康发展,其关键在于市场中各运行主体间的行为选择与协同作用。本文基于CAS理论,对既有建筑节能改造市场进行适切性分析,构建基于既有建筑节能改造市场的复杂适应系统,明确市场各运行主体及其行为特征,分阶段对市场运行机制进行系统研究,从而提出与我国国情相适应的既有建筑节能改造实施路径与举措,为推动市场高质量发展提供理论参考。

关键词:既有建筑节能改造;复杂适应系统;运行机制

引言

随着社会经济的高速发展,建筑领域能源消耗和碳排放也随之大幅增长。《2023 中国建筑节能年度发展研究报告》中指出,2021 年我国建筑面积总量达 678 亿 m^2 ,商品能耗总量达 11.1 亿 tce,占总能耗比例约 21%;排碳总量达 22 亿 tCO_2 ,占总排放比例约 22%^[1]。既有建筑节能改造为我国建筑产业高质量发展提供了新的契机,相较于对既有建筑进行重新建造,节能改造更能减少对环境造成的二次破坏及污染,加快推进我国实现“碳达峰、碳中和”目标^[2]。住建部于 2022 年发布的《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》指出,“十三五”期间我国累计建设完成既有居住建筑节能改造面积 5.14 亿 m^2 、公共建筑节能改造面积 1.85 亿 m^2 ,并提出到 2025 年完成既有建筑节能改造面积 3.5 亿 m^2 以上的具体目标。我国既有建筑节能改造工作迫在眉睫。

多年来,我国既有建筑节能改造工作多以中央及地方住房和城乡建设主管部门为主导,以单体项目为对象,虽在功能提升、节能降耗、环境改善、社会效益等方面取得了阶段性成效,但改造规模不显著、节能效益不佳、创新驱动动力不足、市场运行不畅、重复改造导致资源浪费等问题依然凸显^[3]。归根结底,既有建筑节能改造工作的高效开展离不开市场的健康发展。经过 50 多年的探索和实践,国内外有关既有建筑节能改造市场运行理论研究主要围绕风险分析^[4-5]、利益分配^[6-7]、激励策略^[8-10]、行为选择^[11] 四个方面展开。

既有建筑节能改造市场是一个涉及多元运行主体、不断交互演化的复杂适应系统,国内外学者虽已从多个角度对

市场运行现状及影响因素进行研究,但多针对某些特定因素分析其对市场发展的影响,较少系统地研究分析整个市场的运行机制,及其各运行主体在市场运行过程中的行为特征和交互关系。鉴于此,本文基于复杂适应系统(Complex Adaptive Systems,简称CAS)理论,利用“聚集、非线性、流、多样性”4个特性和“标识、内部模型、积木块”3个机制,对既有建筑节能改造市场进行适切性分析,并构建基于既有建筑节能改造市场的复杂适应系统,明确市场各运行主体及其行为特征,分阶段对市场运行机制进行系统研究,从而提出与我国国情相适应的既有建筑节能改造实施路径与举措,以期为推动市场高质量发展提供理论参考。

1 CAS 理论与既有建筑节能改造市场的适切性分析

由美国学者 Holland 提出的 CAS 理论将传统的系统思想进行了延伸,其核心理念是“适应性造就复杂性”,通过分析各运行主体间的交互行为,实现复杂系统的进化,是系统科学发展的新阶段^[12-13]。CAS 理论强调系统中运行主体的自主性,即具有“活力”、相对独立,且能适应和协调自身系统及外界环境^[14]。因此,CAS 的复杂性是由运行主体适应性引发的,表现为“聚集、非线性、流、多样性”4个特性和“标识、内部模型、积木块”3个机制^[15]。

通过引入 CAS 理论,以新视野、新方法重新审视我国既有建筑节能改造市场发展现状,发现其具有典型的 CAS 理论应用场域特征,其适切性分析如表 1 所示。首先,我国既有建筑节能改造市场在运行过程中逐渐形成了一个基于多元运行主体不断聚集、交互演化、非线性、多样性的系统,

不同运行主体各司其职、协同交互愈加频繁,并借助信息流、物质流、能量流等实现运行主体间的要素转化;其次,我国既有建筑节能改造市场是一个复杂多变的社会系统,其高质量发展需要摆脱传统线性、机械、封闭的运行思维,构建动态演化、主体适应的运行机制。

表 1 CAS 理论与既有建筑节能改造市场的适切性分析

基本要素	要素解释	适切性阐释
聚集	目标相似的运行个体通过聚集形成更高层次的“聚集体”,是复杂适应系统形成的基础。	既有建筑节能改造市场的形成与发展离不开运行个体间的聚集。在市场发展初期,基于市场前景不明确和认知能力参差不齐,不同运行个体间会相互了解其行为选择,感知其行为效用,在学习和合作中逐渐形成“聚集体”。
非线性	系统环境是不断变化的,运行主体是有限理性的,这都会导致其行为选择的非线性发展。	既有建筑节能改造市场在发展演化的过程中存在诸多因素影响,相对独立的运行主体为适应环境所发起的行为选择是非线性的。运行主体可能会作出顺应市场发展的行为选择,也可能为追求短期利益发生机会主义行为,这就属于非线性发展。
流	系统中运行主体间、运行主体与环境间通过信息流、物质流、能量流等进行交互,促使系统内部保持动态稳定。	既有建筑节能改造市场是“运行主体—市场环境—资源、技术”耦合的多层次网络结构,存在诸多信息、资源、技术等要素的传递与转化。运行主体通过对市场环境的观察,为其行为选择提供信息、资源、技术等基础,再与其他运行主体进行交互,以保持市场稳定运行。
多样性	运行主体和环境变化的多样性决定了系统的多样性。	受市场的非线性发展影响,既有建筑节能改造市场中会出现运行主体的多样性、行为选择的多样性、组织结构的多样性等。运行主体间的合作与竞争关系会根据自身发展规模、认知程度及市场发展趋势呈现多样性,从而影响市场的发展走向。
标识	运行主体通过“标识”在系统中进行识别筛选,从而指引其发生聚集并建立协同关系。	既有建筑节能改造市场的发展需要考虑地域、经济、技术水平等因素,这些标识会成为运行主体间行为选择的基础。运行主体中的生产与供给行为依赖于政策制度、市场信息等标识;消费行为依赖于产品及服务质量、价格等标识。
内部模型	系统中运行主体间都存在交互演化机制,这些机制构成了内部模型。	既有建筑节能改造市场运行过程中,运行主体会根据市场环境的信息反馈作出预测与反应,并且不断进行调整和改变,从而选择当下最有利的市场运行机制与管理模式,作出符合市场当前发展,促进未来发展的行为选择。
积木块	积木块是内部模型的生成机制和基本构件,内部模型的多样性来自于“积木块”组合形式的多样性。	既有建筑节能改造市场的发展,实质就是运行主体对市场环境变化作出适应性反应,从而保证其市场发展的延续性和稳定性。运行主体的行为选择是市场运行机制的基本要素,而运行机制的多样性取决于运行主体及其行为选择的多样性。

2 基于既有建筑节能改造市场的复杂适应系统构建

既有建筑节能改造市场符合自由市场的一般规律,且存在正外部性、信息不对称性、显性需求不足和高资本壁垒等问题^[16]。根据CAS理论与既有建筑节能改造市场的适切性分析,构建基于既有建筑节能改造市场的复杂适应系统,如图1所示。其中,既有建筑节能改造市场运行主体可划分为调控主体、供给主体和需求主体,各运行主体间通过信息流、物质流、能量流等进行交互所产生的非线性作用会影响甚至决定市场的发展方向。

需求主体自身及相互间的行为选择进行全过程的正确引导,避免市场失灵现象发生。调控主体一般通过立法规范、规划引领、政策激励等方法,提高既有建筑节能改造在建设项目中的占比,促进既有建筑节能改造市场高质量发展,从而实现社会环境效益最大化。在立法规范方面,《节约能源法》《建筑法》等宏观统筹了我国既有建筑节能改造工作,由此奠定了市场的运行基础。在规划引领方面,国家发改委与住建部于2024年联合发布的《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》提出,要推进城镇既有建筑改造升级,以城市为单位制定既有建筑年度改造计划,合理确定改造时序,结合房屋安全情况,明确重点用能设备和内容。在政策激励方面,财政部于2010年发布的《国家税务总局关于促进节能服务产业发展的增值税、营业税和企业所得税政策问题的通知》指出,对符合条件的节能改造项目给予所得税的三年免征和随后三年减半征收的税收激励措施,撬动更多社会资金参与到节能改造中来。

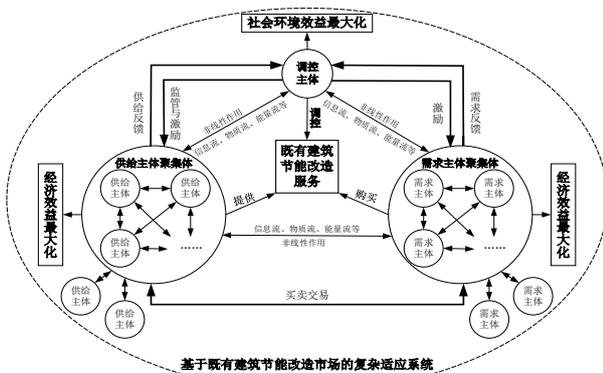


图 1 基于既有建筑节能改造市场的复杂适应系统

在既有建筑节能改造市场运行过程中,调控主体主要指中央及地方住房和城乡建设主管部门,需要对供给主体和

在既有建筑节能改造市场运行过程中,供给主体主要指以节能服务企业(Energy Service Company,简称ESCO)为核心的各类企业单位,包括提供建筑节能材料、设备、技术等服务的供应商、设计单位、施工单位、运营单位等^[17]。我国既有建筑节能改造市场尚处于起步阶段,项目前期投入

过大, 收益回收期长, 且受自身技术水平及服务质量限制, 造成 ESCO 所需承担的风险过高^[18]。ESCO 以追求经济效益最大化为目标, 其行为选择决定既有建筑节能改造的性能与质量, 包括材料的选择、施工的质量、新技术的研发运用等, 进而极大影响市场的发展方向。作为成功入选住建部《城市更新典型案例(第一批)的通知》中的既有建筑更新改造案例, 海南省琼海市博鳌零碳示范区项目集成运用先进技术对区域存量建筑实施节能降耗和减碳降碳改造的同时, 积极探索市场参与机制, 打通零碳示范区建设的技术环节和运营环节, 通过公开招选方式积极引入社会资本, 社会投资占比达 76%, 探索出市场投资与经营回报相联动的实施模式, 为既有建筑节能改造市场技术进步和规模化发展提供具备复制推广价值的节能改造经验。

在既有建筑节能改造市场运行过程中, 需求主体主要指节能改造服务的需求者及消费者, 其中既包括接受节能改造的既有建筑业主, 也包括其租户或用户。需求主体的数量十分庞大, 且需求也不尽相同, 既有投资性的获利需求, 也有自用性的刚性需求。一方面, 我国南北地区节能改造需求存在差异, 北方采暖地区节能改造工作重点在于供热系统, 夏热冬冷地区关键在于围护结构, 夏热冬暖地区落脚于暖通空调和照明设计^[19]; 另一方面, 我国区域经济发展不均衡, 经济水平的差异导致各地既有建筑节能改造工作开展存在异步性, 改造实施效果也不尽相同。对于需求主体而言, 其行为选择是以付出最小的报酬获得最优的节能改造服务, 从而实现自身经济效益、生活水平最大化。需求主体在追求效用最大化的同时又受外部性影响较大, 会根据自身的经济情况、节能环保意识、既有建筑属性、对既有建筑节能改造及社会责任的认知等情况来决定是否对既有建筑进行节能改造及其改造程度。以上种种原因迫使需求主体接受既有建筑节能改造的可能性趋于多元, 难以协调统一, 致使需求主体的集成目标更难实现。以需求主体的实际需求角度出发, 综合考虑平面布局、露明管线、立面色彩及造型等品质因素的改善, 特别是通过标准化、工业化等手段实现室内空间的精细化更新, 以确保居民居住满意度得到持续提升^[20]。

3 CAS 理论下的既有建筑节能改造市场运行机制研究

针对我国既有建筑节能改造市场运行现状, 以 CAS 理论作指引, 主动引导市场各运行主体建立既有建筑节能改造市场运行机制, 并分阶段进行系统研究, 从而解决当前市场

共性问题, 推动我国既有建筑节能改造市场高质量发展。

3.1 基础阶段: 凝聚协同发展共识

CAS 理论强调复杂适应系统的演化进程离不开各运行主体的主动适应^[21]。既有建筑节能改造市场运行过程中, 涉及到的运行主体较为复杂, 且各运行主体的需求目标与行为选择各不相同。面对如此复杂多样的主体范围, 调控主体应积极发挥调控引导作用, 通过“双碳”战略目标、“四节一环保”理念、监管与激励政策措施等, 展开协同发展共识凝聚工作, 促进增信释疑, 激发市场各运行主体的既有建筑节能改造动力, 推动其正向选择, 提高节能改造效果与效益, 从而进一步加强多方合作, 实现共赢, 如图 2 所示。

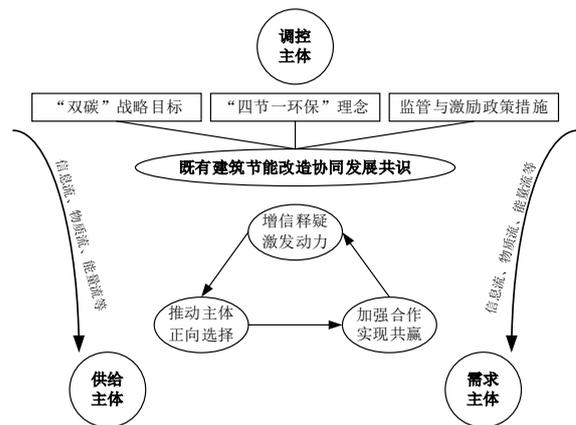


图 2 基础阶段: 凝聚既有建筑节能改造市场协同发展共识

凝聚既有建筑节能改造协同发展共识, 需要调控主体结合市场实际与当地经济发展水平对市场各运行主体行为进行正向引导。一方面, 对既有建筑节能改造工作进行多方面宣传引导, 包括“双碳”战略目标、“四节一环保”理念等, 提升需求主体对节能改造及社会责任的认知, 并对项目实施采取补贴措施, 鼓励需求主体接受节能改造服务, 引导居民节能生产生活行为; 另一方面, 通过财政预算支出大力支持既有建筑节能改造技术创新及产品研发, 并通过制定相关标准及规范对既有建筑节能改造项目实施进行监督管理, 对节能改造效果显著并具有正面导向的投资项目给予经济补贴、税收减免、贷款优惠等政策支持, 调动供给主体积极性。

3.2 关键阶段: 构建多元运行机制

CAS 理论主张各运行主体能够通过一定的规则改善自身的行为模式, 使其在复杂适应系统中发挥适应、协调和交互作用^[22]。既有建筑节能改造市场应遵从“信息共享、风险共担、利益共享”的协同发展模式, 构建多元运行机制,

如图 3 所示。首先, 调控主体依托市场各运行主体的利益需求目标, 发挥组织管理作用, 进行有序分工; 其次, 依据各运行主体间的契约和合作目标, 建立“信息共享、风险共担、利益共享”的合作契约联盟; 再者, 在 BIM 等现代信息技术的支撑下, 构建现代化既有建筑节能改造信息管理平台, 加快各运行主体间的信息沟通, 形成高效的信息交流机制; 最后, 在市场运行过程中引进成本管控、风险防范、质量追溯、技术创新、品牌宣传等多元运行机制。

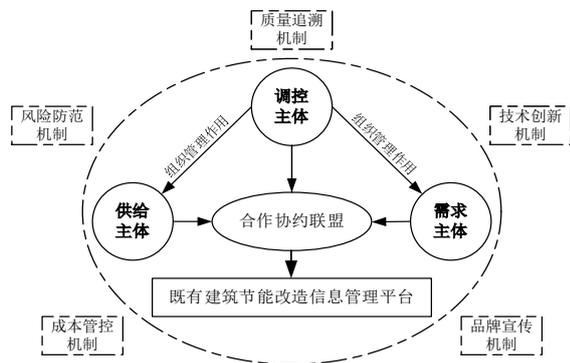


图 3 关键阶段：构建既有建筑节能改造市场多元运行机制

其中, 成本管控机制的引入可以在项目实施中对设计、生产、运输、施工、运维等各阶段成本费用进行全过程动态监控调整, 从而解决节能改造成本高的问题; 风险防范机制的引入使市场各运行主体对市场动态及项目情况进行及时进行交流, 实现供需信息均衡, 从而有效防范市场及项目实施风险; 质量追溯机制的引入可以对项目实施过程进行实时追溯, 及时进行安全及质量控制, 从而解决重复改造导致资源浪费、市场运行不畅等问题; 技术创新机制的引入可以及时针对节能改造问题进行技术改进和产品创新, 并通过信息管理平台及时更新完善, 推进建造进度, 从而解决节能改造效益不佳、创新驱动不足等问题; 品牌宣传机制的引入可以在有关企业或单位、公众中加大既有建筑节能改造的认识和宣传, 提高供给主体积极性, 增强需求主体及公众认可度, 从而进一步扩大节能改造规模。

3.3 扩张阶段：推进市场高质量发展

依据 CAS 理论可知既有建筑节能改造市场是一个“活”的系统, 强调运行主体的多样性和多变性, 既受制于系统内部各运行主体间的交互行为, 又随着系统外部变化发生相应改变。既有建筑节能改造市场不应仅依靠中央及各地方政府采取排他性的运行举措, 而是要以市场“信息共享、风险共担、利益共享”的协同发展模式为“标识”, 吸引调动多方

社会力量参与, 形成更大、更复杂的既有建筑节能改造市场复杂适应系统。

具体来看, 一方面中央要积极推动各地方政府及其住房和城乡建设主管部门积极性, 将更多的调控权力下放, 依据当地的经济发展及科技水平, 制定既有建筑节能改造相关的技术标准、评价体系及验收规范; 另一方面要放宽市场准入, 拓宽民营经济发展空间, 吸引更多的社会力量参与既有建筑节能改造, 明确各社会力量参与市场的范围及方式, 建立完备市场。此外, 为推进既有建筑节能改造市场高质量发展, 须引入第三方机制对市场运行进行监督审查, 对系统各运行主体行为选择进行全过程监督, 并及时反馈问题及解决手段。

参考文献：

- [1] 江亿. 2023 中国建筑节能年度发展研究报告 [R]. 北京: 清华大学建筑节能研究中心, 2023.
- [2] 王俐. 中国提出双碳目标的历史背景、重大意义和实现路径 [J]. 哈尔滨师范大学社会科学学报, 2023, 14(03): 41-45.
- [3] 杨帆, 郭汉丁. 既有住区绿色改造项目政府与业主决策协同机制理论研究综述 [J]. 项目管理技术, 2024, 22(11): 54-60.
- [4] 张娜. EPC 模式下既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素研究 [D]. 青岛理工大学, 2022.
- [5] 郭汉丁, 张印贤, 陶凯. POPP 模式下既有建筑节能改造项目风险共担契约集成与制度建设 [J]. 项目管理技术, 2020, 18(10): 1-6.
- [6] Abdallah M, El-Rayes K. Multiobjective Optimization Model for Maximizing Sustainability of Existing Buildings [J]. Journal of Management in Engineering, 2016, 32(4): 04016003.
- [7] Jeong K, Hong T, Kim J, et al. Development of a multi-objective optimization model for determining the optimal CO2 emissions reduction strategies for a multi-family housing complex [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 110: 118-131.
- [8] Li Y, Liang M. The economic development incentive mechanism for the existing energy-saving building structure in the perspective of game analysis [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2018, 13(3): 250-254.

- [9] 李柏桐, 郭汉丁, 伍红民. 基于演化博弈的既有建筑节能服务产业发展支持路径研究[J]. 生态经济, 2020, 36(01): 74-78+91.
- [10] 陈立文, 张孟佳, 李素红, 等. 基于 DEMATEL-ISM 的既有建筑节能改造推广影响因素研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(01): 84-92.
- [11] Prabatha T, Hewage K, Karunathilake H, et al. To retrofit or not? Making energy retrofit decisions through life cycle thinking for Canadian residences[J]. Energy & Buildings, 2020, 226: 110393.
- [12] Holland J H. Adaption in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence[M]. Cambridge Massachusetts: The MIT Press, 1992.
- [13] Holland J H. Complex Adaptive System[M]. Boston: Winter, 1992.
- [14] 王江, 王健. 复杂适应系统理论视角下智慧社区向“人本主义”转型发展的逻辑重构[J]. 城市发展研究, 2023, 30(10): 75-84.
- [15] 霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性[M]. 周晓牧, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2011.
- [16] 郭汉丁, 张印贤, 刘继仁. 既有建筑节能改造市场健康发展的实施策略[J]. 建筑经济, 2023, 44(11): 32-35.
- [17] 徐水太, 马彩薇, 袁北飞. 建筑节能服务市场三方演化博弈及仿真研究[J]. 沿海企业与科技, 2021, (06): 10-18.
- [18] 秦广蕾, 郭汉丁, 乔婉贞, 等. 既有住区绿色改造核心主体行为博弈研究——基于市场运行视角[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(04): 377-382.
- [19] 乔婉贞, 郭汉丁. 既有建筑绿色改造多主体多目标集成优化机理研究综述——基于市场运行视角[J]. 生态经济, 2019, 35(09): 88-93.
- [20] 索健, 王继辉, 陈宇. 既有住区建筑多品质提升指标因素住户满意度分析——以大连市为例[J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37(03): 105-111.
- [21] 马文婷. CAS 复杂适应性理论视域下南海生态安全治理问题研究[J]. 系统科学学报, 2024, 32(01): 78-82.
- [22] Koza J R. Hidden order: how adaptation builds complexity[J]. Artificial Life, 2014, 3(2): 333-335.
- 作者简介:** 马彩薇, 女, 1997年7月, 汉, 硕士, 研究方向为既有建筑节能改造。
- 基金项目:** 江西省教育厅科学技术研究项目“基于CAS的既有建筑节能改造市场运行机制研究”(GJJ2202229); 2023年江西省住建领域科技项目“既有建筑节能改造市场运行机制与发展路径研究”; 2024年江西省住建领域科技项目“高品质住宅评价体系构建与实施策略研究”(20241RKFD306)。