DOI: 10.19666/j.rlfd.202511007

退役火电机组改造卡诺电池技术、政策可行性及市场研究

王天堃[1]，刘垚辰[2]，邢 刚[1]，王 昊[3]，王志得[3]，乔永辉[2]
（1. 国电电力发展股份有限公司，北京 100101；
2. 西北工业大学动力与能源学院，陕西 西安 710129；
3. 北京低碳清洁能源研究院，北京 102211）

［摘 要］【目的】“双碳”背景下，新能源高比例并网，火电厂大规模退役，为保障电力系统稳定运行，退役火电机组改造卡诺电池技术路径正逐步受到关注，有必要对其开展技术可行性、国家及地方政策体系与潜在市场机制的研究。【进展】总结我国新型储能发展现状和卡诺电池基本原理；对比分析主流储能技术特性和卡诺电池竞争环境；综述国内外退役火电机组卡诺电池化改造的相关研究；调研国家与地方火电改造和新型储能领域政策；基于电力市场现状与现存独立储能盈利模式分析改造后机组的市场机制。【结论】研究发现：用熔盐热泵替代原火电机组锅炉的卡诺电池化改造技术具备落地潜力；陆续出台的退役火电改造储能、支持长时储能发展政策有利于技术应用；改造后热储能系统可通过参与电能量、辅助服务、容量市场获利。当前存在高温热泵能效低、频繁启停伤寿命、政策标准不完善、市场机制不匹配等问题。随着技术进步和市场创新，退役火电机组改造卡诺电池技术有望成为电力系统灵活性提升和能源转型的重要支撑。

［关 键 词］退役火电机组；卡诺电池；政策支持；市场机制

［引用本文格式］王天堃，刘垚辰，邢刚，等. 退役火电机组改造卡诺电池技术、政策可行性及市场研究[J]. 热力发电，2026，55(8)：163. Wang T K, Liu Y C, Xing G, et al. Technology, policy feasibility and market research on retrofitting decommissioned thermal power units with Carnot batteries[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(8): 163.

Technology policy feasibility and market research on retrofitting decommissioned thermal power units with Carnot batteries

Wang Tiankun[1], Liu Yaochen[2], Xing Gang[1], Wang Hao[3], Wang Zhide[3], Qiao Yonghui[2]
(1. GD Power Development Co., Ltd., Beijing 100101, China;
2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
3. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: [Objective] Driven by the dual carbon goals, the high-penetration integration of renewable energy and the large-scale retirement of coal-fired power plants present significant challenges to grid stability. In this context, retrofitting decommissioned thermal power units into Carnot battery energy storage systems has emerged as a promising solution. This technology offers a pathway to repurpose existing infrastructure assets, provide essential large-scale, long-duration energy storage, and support the transition to a cleaner power system. Therefore, a comprehensive investigation into its technical feasibility, the supporting national and local policy frameworks, and the potential electricity market mechanisms is both timely and necessary for its future deployment. [Progress] This work begins by summarizing the current developmental status of new energy storage technologies in China and elucidating the fundamental operational principles of Carnot Batteries. A comparative analysis is then performed to

收 稿 日 期：2025-11-04 修 回 日 期：2026-01-21 接 受 日 期：2026-01-26
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52406195）
Supported by: National Natural Science Foundation of China (52406195)
第一作者简介：王天堃（1982），男，博士，教授级高级工程师，主要研究方向为低碳节能灵活智能燃煤发电，tiankun.wang@chnenergy.com.cn。
通信作者简介：乔永辉（1992），男，博士，教授，主要研究方向为能源利用领域的多相流动数值模拟，yhqiao@nwpu.edu.cn。

assess the technical characteristics of mainstream energy storage technologies and to position the competitive environment for Carnot Batteries. Subsequently, a review of relevant domestic and international research concerning the Carnot Battery retrofit of decommissioned thermal power units is presented. The investigation extends to an examination of policies at both the national and local levels pertaining to thermal power plant retrofitting and the broader field of new energy storage. Furthermore, based on the current state of the electricity market and existing profit models for standalone energy storage systems, an analysis of potential market mechanisms for the retrofitted units is conducted. [Conclusion] The research findings indicate that the retrofit technology, which involves replacing the original boiler with a molten salt heat pump system, possesses tangible potential for practical implementation. The sequentially introduced policies that support the conversion of retired thermal power plants into energy storage facilities and foster long-duration energy storage development has created favorable conditions for this technological application. The retrofitted thermal energy storage system can generate revenue through participation in multiple market segments, including the energy market, compensated ancillary services, capacity compensation schemes, and capacity leasing arrangements. However, several significant obstacles currently hinder progress. These include the relatively low energy efficiency of high-temperature heat pumps, the detrimental impact of frequent start-stop cycles on system longevity, incomplete policy frameworks and technical standards, and market mechanisms that are not yet fully aligned with the technology's value proposition. With anticipated advancements in technology and continued innovation in electricity market design, the Carnot Battery retrofit of decommissioned thermal power units holds considerable promise. It is positioned to become a crucial supporting element for enhancing power system flexibility and facilitating the ongoing energy transition.

Key words: decommissioned thermal power units; Carnot batteries; policy support; market mechanisms

全球能源结构加速转型，“双碳”驱动下，电力行业正经历深刻变革。截至 2025 年 4 月，我国可再生能源发电装机已突破 20 亿千瓦，同比增长 58%[1]。风、光等新能源并网挤占火电出力，以煤电为主的基荷电源逐渐向调节性电源过渡。据悉，在实现碳中和目标前，我国发电机组将出现较集中的退役潮[2]，提前布局势在必行。

新能源大规模并网不利于电网安全运行，较长时间内火电机组仍需发挥“压舱石”托底作用。国家鼓励退役火电厂关停但不拆除，后续可转为备用电源、调相机或储能设施。其中储能设施可降低调度成本[3]，助力电网调峰调频，平抑可再生能源波动性、间歇性[4]，是构建绿色低碳能源消费体系的关键环节[5]。随着新型储能快速发展，长时储能需求凸显[6]，卡诺电池有望成为大规模、长周期电力存储技术选项[7]，并可用于退役火电机组的改造与重构。

1 卡诺电池化改造背景

1.1 新型储能助力退役火电机组改造

新型储能指除抽水蓄能外进行能量存储、转换并释放电力，对外提供服务的储能技术，包括电化学储能、机械储能、电磁储能、氢储能、热储能等[8]，具有建设周期短、布局灵活、响应速度快等优势，可发挥调峰、调频、调压、备用、黑启动、惯量响应多种功能[9]。新型储能分调度调用型和电站自用型[10]，主要包含电源侧新能源配置储能、电网侧独立储能和用户侧工商业储能。

我国储能技术已在多个领域得到广泛应用，按产业化规模分为 4 个梯队[8]（图 1）。其中飞轮储能等短时高频储能可用于惯量响应与调频，钠离子电池等中短时储能适于电网调频与日内调峰，抽水蓄能、压缩空气储能等长时储能可用于调峰备用，确保供电充裕度 [11]。我国新型储能技术以低成本、大容量、长寿命、高安全为目标[12]，氢储能、卡诺电池等长时储能在不同时间尺度调节场景中的应用愈发重要[13]。“十四五”以来，台山电厂、华电朔州电厂等耦合新型储能的火电改造项目相继落地，新型储能已成为火电机组转型的重要助力。国家鼓励退役火电机组改造为储能设施，具备热电耦合特性的卡诺电池在此领域具有广阔的应用前景。

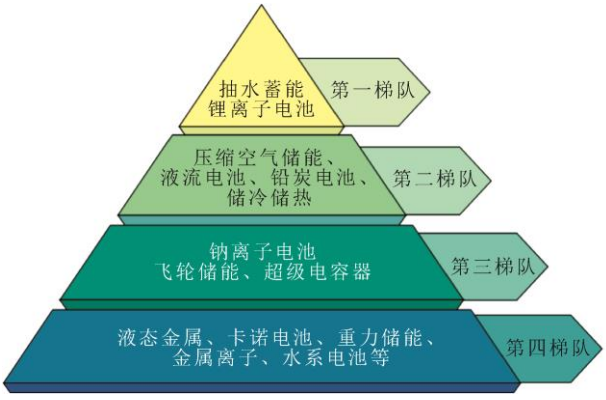


图 1 中国储能集成示范和产业化梯队
Fig.1 Echelon of energy storage technology integration demonstration and industrialization in China

1.2 卡诺电池基本原理与竞争环境

卡诺电池是一种通过电能和热能相互转换实现能量存储的大规模储能系统[14]，广义上包括热泵储电、液态压缩空气储能、拉姆-霍尼格曼储能[15]和具有斯特林发电机的发电技术[16]。其工作原理分充电、储能、放电 3 个阶段（图 2）。充电阶段通过电加热器或基于布雷顿循环、朗肯循环的热泵将电能转换为热能；储能阶段利用介质显热、潜热、热化学存储或结合多种储热技术稳定保存热能；放电阶段通过朗肯循环、布雷顿循环等多种热力过程单独或联合作用，靠热机实现热转电[17]。

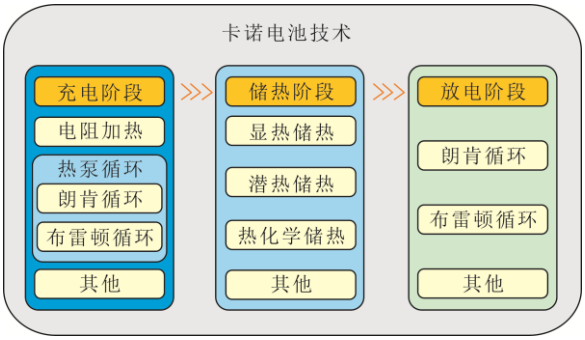


图 2 卡诺电池系统组成

Fig.2 Composition of the Carnot battery system

卡诺电池具有能量密度高[18]、成本低、寿命长、安全[16]、环境友好、可拓展、不受地理限制[19]等优点。电加热型卡诺电池循环效率约为 25%~55%，热泵型约为 42%~85%，该效率区间在主流储能技术中最为宽泛（图 3[20-26]）。卡诺电池度电成本与锂离子电池、压缩空气储能大致相同（图 4[20-28]），在新能源装机规模较大、低谷电价较低且弃电现象较为突出的市场环境中，卡诺电池凭借其较低的初期投资成本，有望进一步扩大应用规模。

对比其他储能技术（表 1），抽水蓄能技术成熟，具有容量大、寿命长、度电成本最低等优势，但受限于地理环境和建设周期长，其灵活性不如卡诺电池；压缩空气储能应用范围广，成本持续下降，但受盐洞等地质条件限制；飞轮储能效率高、响应快，适于短时高频调节情景，但其高成本和自放电特性不适用于长时储能；重力储能技术尚不成熟，且无法用于火电机组改造；锂电、钠电等常见电化学储能产业规模庞大，但更适合中短时尺度、中小规模应用；全钒液流电池可用于大规模储电，但其环保性不及卡诺电池。在火电机组大量退役的背景下，依据国家规定，淘汰关停的煤电机组可用于容量替代。对退役机组进行卡诺电池改造能够有效利用退役火电资产，降低改造成本，减少系统对化石能源的依赖，在提升电力系统灵活性的同时确保电网安全[17]，符合电力企业的需求。

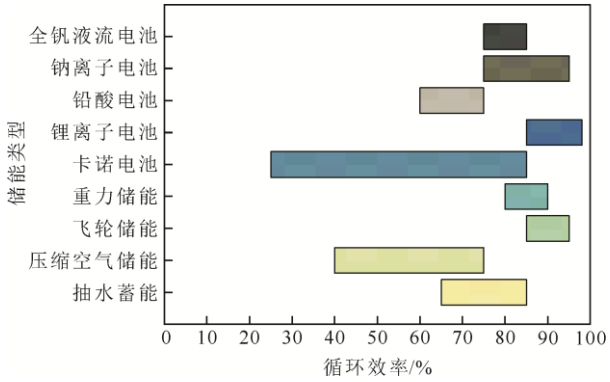


图 3 部分储能技术循环效率

Fig.3 Round-trip efficiencies of selected energy storage technologies

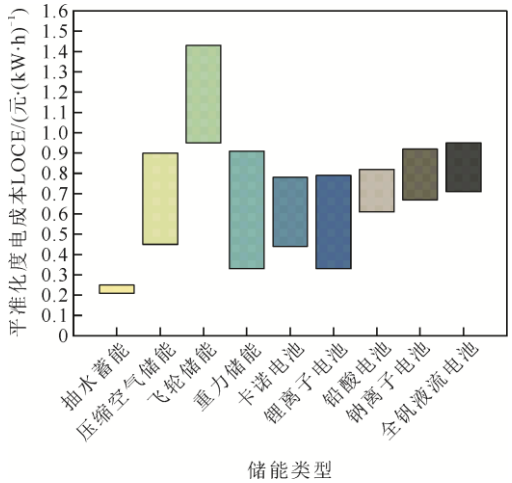


图 4 部分储能技术平准化度电成本

Fig.4 Levelized cost of electricity (LCOE) of selected energy storage technologies

表 1 不同储能技术特性对比

Tab.1 Comparison of characteristics of different energy storage technologies

储能类型	发展阶段	响应速度	持续放电时长	循环效率	LCOE/(元·(kW·h)$^{-1}$)	典型功率/MW	寿命	应用场景	优势	劣势
抽水蓄能	商业化	分钟级[20]	6~12+h[20]	65%~85%[21,23]	0.21~0.25+[23]	100~2 000[20]	50~60 年[23]	削峰填谷、调频、黑启动、备用、缓解输配电阻塞	技术成熟、容量大、寿命长、运维成本低、安全	受地理限制、能量密度低、建设周期长、初期投资高、启动慢

续表

储能类型	发展阶段	响应速度	持续放电时长	循环效率	LCOE/(元·(kW h)$^{-1}$)	典型功率/MW	寿命	应用场景	优势	劣势
压缩空气储能	逐步商业化	分钟级[20]	4~24 h[20]	40%~75%[22]	0.45~0.90[20,23]	50~300+[20]	30~50 年[23]	调峰、二次调频、备用	能量密度较高、储能周期长	效率低、选址受限、响应慢、补燃式有污染
飞轮储能	推广应用	毫秒级[20]	30 s~15 min[20]	85%~95%[20,23]	0.95~1.43[20]	0.005~5.000[20]	20 年[23]	惯性响应、不间断供电、平滑新能源出力波动、备用	响应快、高频调节、比功率高、高效环保	容量小成本高、放电时间短、自放电高、空载损耗大
重力储能	技术研发	秒级[20]	2~12 h[20]	80%~90%[20,24]	0.33~0.91[20,24]	<100[20]	30~40 年[23]	调峰、一次调频、需求响应	效率高、寿命长、适应性强、选址较灵活、环保	体积大、投资高、重物切换可能冲击电网
卡诺电池	技术研发	分钟级[25]	2~12+ h[25]	25%~85%[16]	0.44~0.78[25]	0.01~100+[25]	20~30 年[25]	长时储热、工业余热回收、调峰、备用、火电改造、配储	安全环保、储能密度高、不受地理限制	无法应对短时波动、对抗腐蚀材料要求高、技术不成熟
锂离子电池	商业化	百毫秒级[23]	0.3~6.0 h[26]	85%~98%[23,26]	0.33~0.79[26-27]	灵活	2 000~15 000 次[26]	配储调频、水火风太阳能电站、电动车、航空航天	效率高、寿命长、比功率高、高温性能好、环保	自放电高、一致性差、存在安全隐患
铅酸电池	商业化	百秒级[26]	15 min~4 h[26]	60%~75%[26]	0.61~0.82[23]	≤100[26]	500~3 000 次[26]	调峰、电动交通工具、备用电源	安全性、可靠性高、成本低、技术成熟	能量密度低、充电速度慢、循环寿命短、需回收
钠离子电池	工程示范	毫秒级[26]	1~8 h[26]	75%~95%[26]	0.67~0.92[23,28]	灵活	4 000~6 000 次[23]	储能电池、电动车	寿命较长、比功率高、充电快、自放电率低	能量密度较低、当前价格偏高
全钒液流电池	初步商业化	百毫秒级[26]	4~10 h[26]	75%~85%[23,26]	0.71~0.95[23]	≤100[26]	10 000~25 000 次[26]	大规模蓄电储能、新能源消纳、调峰调频	循环寿命高、充放电速度快、自放电低、功率与容量独立、安全性高	能量密度低、运维成本高、对环境温度要求高、产酸雾污染环境

2 卡诺电池化改造可行性

2.1 改造技术可行性

除 Melta 公司的退役火电机组改造采用电加热熔盐卡诺电池外，其他退役火电机组的改造多采用效率更高的热泵型或混合型卡诺电池。以朗肯型卡诺电池改造为例，该技术采用熔盐热泵替代退役火电机组的锅炉[29]，保留退役机组的汽轮机、发电机等设施（图 5）。

充电时，低谷电或新能源弃电驱动压缩机工作，被压缩的高温高压工质在换热器 1 中与熔盐换热降温，中温工质通过回热器变为低温高压工质，经膨胀机做功减压后在换热器 2 与冷源换热，在回热器处继续升温，最后中温低压工质返回压缩机，完成循环，由此电能转化为熔盐热能储存；放电时，部分高温熔盐进入过热器与蒸发器产生的蒸汽换热，高温高压蒸汽在高压缸中做功将热能转换为机械能。其余高温熔盐进入再热器与高压缸部分抽汽换热，部分再热后高温抽汽进入中压缸和低压缸做功，由发电机将机械能转化为电能。换热降温后，两部分中温熔盐均进入蒸发器和预热器与低温蒸汽换热，流出的低温熔盐回到低温熔盐罐中完成循环，实现热能转换为电能。

自德国宇航中心提出卡诺电池化改造概念以来，国内外研究聚焦系统构型与性能分析，取得了丰富的研究成果。文献[30]提出了通过替代锅炉设备对燃煤电站进行卡诺电池化改造。文献[31]分析了退役火电改造为电加热熔盐系统时，不同充放电

时间和储热容量的成本与效率。文献[32]基于火电转型储能场景搭建热泵和熔盐系统，分析了压力区间与热源温度对制热系数的影响。文献[33]对比了抽汽辅助、依托低阶煤电站提质储热这 2 种朗肯型卡诺电池耦合煤电方式。文献[34]针对耦合火电灵活性改造的卡诺电池，分析了火储、火储−热泵联合及热泵 3 种储热形式的性能。文献[35]提出了燃煤电站抽汽驱动的热泵-Kalina 循环的卡诺电池储能系统。文献[36]将退役火电改造卡诺电池技术用于新能源基地混合储能。文献[37]构建了热泵与电加热耦合卡诺电池模型。众多研究为火电改造提供了理论依据。

卡诺电池化改造现存如下难点：高温热泵技术可行但效率偏低；原蒸汽管道结构复杂、造价高，不可能完全替换主蒸汽管道和锅炉，掺杂锅炉蒸汽的混合蒸汽在高压下并气困难；系统改造后因利用废电或余热频繁启停会损伤寿命；系统长期处于低负荷热备用状态，其无法产生效率优势。目前还需加强高温电制热装备、高温换热器技术研发，优化系统构造与动态调控方法，研究电网支撑与退役机组再涉网技术。未来随着卡诺电池技术不断进步，改造项目的优势将逐步凸显，适宜推广应用。

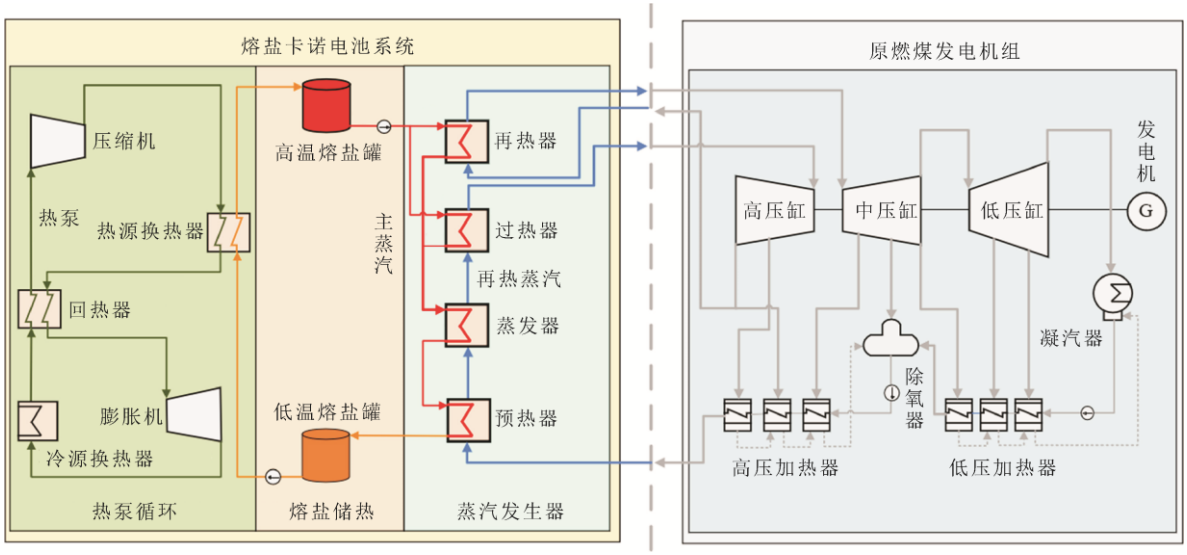


图 5 退役火电机组熔盐卡诺电池改造示意

Fig.5 Schematic diagram of molten salt Carnot battery retrofit for decommissioned thermal power units

2.2 国家层面政策可行性

作为能源转型的关键，世界各国积极出台政策推动新型储能发展。美国发布《通胀消减法案》《储能战略和路线图（草案）》等文件发展长时储能，提供税收抵免补贴；欧盟发布《电池 2030+路线图》《电力市场改革法案》等政策攻关电池技术，建立储能容量市场机制；英国发布《长时储能技术细节与运行方案》等文件推动储能参与中长期双边交易、日前集中交易和辅助服务市场[6]。我国也出台系列文件发展新型储能、推进煤电转型，为退役火电改造卡诺电池提供了政策依据。

自“双碳”目标提出以来，我国新能源规模迅速扩大，亟需同步推进火电厂改造升级，优化电力系统调节能力。《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》《能源重点领域大规模设备更新实施方案》等文件皆要求落实煤电机组节能降碳、供热、灵活性改造“三改联动”。《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030 年前碳达峰行动方案》等文件明确推进绿色转型，发展低碳节能技术。《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》指出对于存量煤电项目，优先通过灵活性改造提升调节能力。《关于加快推动新型储能发展的指导意见》《新型储能规模化建设专项行动方案（2025—2027 年）》等文件提出，探索利用退役火电机组的既有厂址和输变电设施建设储能。卡诺电池系统可耦合煤电灵活性改造，其长时储能、零碳环保特性与上述政策要求一致。

国家鼓励扩大新型储能应用领域，“火电+新型储能”已形成火电配储、火电改造新型储能等技术路线。《十四五新型储能发展实施方案》《新型储能制造业高质量发展行动方案》等文件明确提出，

确立独立储能市场主体定位，完善价格机制，并发展储热等新型储能技术。2024 年发展新型储能首度写入政府工作报告，《中华人民共和国能源法》更是从法律层面要求推动新型储能发展、发挥储能调节作用，《关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》再次强调绿色转型，大力发展新型储能。对退役火电机组进行卡诺电池化改造拓宽了新型储能应用场景，符合国家宏观政策导向，具有较强的创新性。

国家层面政策体系如表 2 所示。近年国家能源政策聚焦“双碳”、新型电力系统、新能源、新型储能、绿色低碳转型、火电改造。从煤电机组“三改联动”到退役机组改建储能，从储能电站建设管理到独立储能并网入市，从新能源强制配储到科学合理配置储能，大量政策为退役火电机组改造为储能提供了有力支持。同时，政策鼓励发展长时储能，完善电力市场机制，明确财政支持，并鼓励投资。尽管在技术标准细化与针对性价格机制方面仍需完善，但从能源转型战略层面考虑，退役火电改造卡诺电池构想已具备较充分的政策基础。

表 2 国家层面政策体系
Tab.2 National-level policy architecture

成文/发布时间	政策文件	内容简述
2021 年 2 月 25 日	《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》	源网荷储一体化；煤电灵活性改造；鼓励社会投资储能
2021 年 7 月 19 日	《关于加快推动新型储能发展的指导意见》	新型储能市场主体；退役火电改造储能；发展储热；设立基金
2021 年 9 月 22 日	《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》	加快煤电节能和灵活性改造；推进新型储能规模化
2021 年 10 月 24 日	《关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》	推进熔盐储能供热和发电应用；健全标准与市场
2021 年 10 月 29 日	《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》	“三改联动”；合规退役机组关而不拆，转为应急备用和调峰电源
2022 年 1 月 29 日	《“十四五”新型储能发展实施方案》	新型储能市场主体；应用依托火电的新型储能；突破长时储能技术；退役火电改造储能
2022 年 1 月 30 日	《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》	完善储能电价；退役火电改造新型储能或调相机；绿色转型金融保障
2022 年 5 月 24 日	《关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知》	独立储能入市；独储容量电价；电网关键节点建设储能
2024 年 1 月 27 日	《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》	鼓励新能源企业通过自建、共建或租赁灵活合理配置新型储能
2024 年 3 月 5 日	《2024 年政府工作报告》	绿色低碳；发展新型储能
2024 年 5 月 23 日	《2024—2025 年节能降碳行动方案》	煤电三改；发展新型储能；旧设备回收利用
2024 年 7 月 25 日	《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027 年）》	提升新型储能涉网性能；建设共享储能；探索应用新储能技术
2024 年 7 月 31 日	《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》	煤电三改；绿色转型；健全新型储能价格机制
2024 年 8 月 3 日	《能源重点领域大规模设备更新实施方案》	煤电三改；健全新型储能标准；加大财税支持
2024 年 11 月 8 日	《中华人民共和国能源法》	推进新型储能高质量发展；支持能源科技创新
2024 年 12 月 20 日	《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027 年）》	鼓励煤电企业按需配置储能；完善峰谷电价、辅助服务、容量补偿机制
2025 年 1 月 27 日	《关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知》	不得将配置储能作为新建新能源项目核准、并网、上网等的前置条件
2025 年 2 月 10 日	《新型储能制造业高质量发展行动方案》	支持储热等新型储能技术发展；鼓励探索火电合理配储；金融、保险
2025 年 3 月 26 日	《新一代煤电升级专项行动实施方案（2025—2027 年）》	煤电机组低碳化改造
2025 年 4 月 29 日	《关于促进能源领域民营经济发展若干举措的通知》	支持民营企业投资新型储能；用超长期特别国债资金支持改造
2025 年 8 月 27 日	《新型储能规模化建设专项行动方案（2025—2027 年）》	新能源合理配储；火热储联合；退役电厂建储能；独立储能、配网储能；完善标准与市场；鼓励投资、贷款、利率支持
2025 年 9 月 15 日	《关于推进能源装备高质量发展的指导意见》	煤电改造；突破物理储能技术；研发压缩机、膨胀和储热关键技术装备
2025 年 10 月 28 日	《关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》	推进煤电改造升级，大力发展新型储能

2.3 地方层面政策可行性

为响应国家政策，地方政府因地制宜出台文件，形成与区域能源结构相适应的制度框架。2021—2024年地方储能领域主要政策数量如图6所示，数据来源于 EESA 数据库。广东、江苏、浙江等新型储能装机多、经济与产业发达的沿海省份出台政策多；内蒙古、宁夏、陕西等能源大省新型储能政策体系较完善，侧重调峰能力提升；黑龙江、辽宁、山西等电力富集区或传统煤电基地发布政策数较少；西藏虽可再生能源丰富，但电网规模小、基础薄弱，更关注通电和主网稳定，政策偏向构网型储能技术。

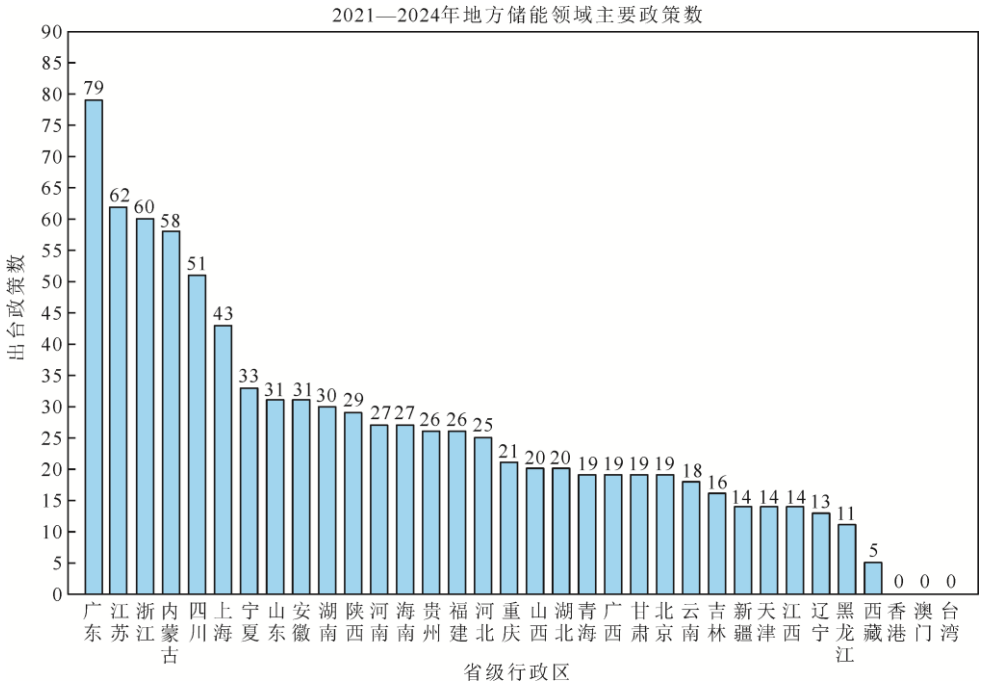


图 6 2021—2024 年地方储能领域主要政策数量

Fig.6 Number of major local energy storage policies (2021—2024)

表 3 为部分地方政策。各省份中，广东省以新型储能推动经济发展，构建省级指导、地市实施的多维政策体系；江苏省重视独立储能，建立电能量市场电价差、顶峰补贴费用和参与辅助服务市场的盈利模式；浙江省优化独立储能调用机制，新型储能在迎峰度夏、度冬期间增强电力供应；内蒙古采用市场化收益+放电量补偿模式，对纳入规划的项目向电网的放电量给予补偿，蒙西储能电站参与电力现货和辅助服务市场，通过峰谷价差获利，蒙东执行峰谷分时电价政策；山东省出台系列政策，规范项目管理和容量补偿机制，支持长时储能发展；河北省扩大峰谷电价浮动比例提升独立储能收益；山西省明确新型储能参与一次调频市场机制，探索虚拟电厂建设；新疆储能市场政策较完备，推动新能源与新型储能协同发展等。十四五以来，各地积极响应国家号召，推动绿色低碳转型，落实火电机组升级改造，重视新型储能技术攻关，明确新型储能市场主体地位，完善市场机制和储能电价，从政策构建、金融支持、人才培育等方面大力支持新型储能产业发展。

表 3 部分地方政策

Tab.3 Policies in selected localities

地方	发布时间	文件名称	内容简述
广东	2021 年 1 月 7 日	《广东省培育新能源战略性新兴产业集群行动计划（2021—2025 年）》	发展电网侧储能；推进火储联合
	2023 年 3 月 15 日	《广东省推动新型储能产业高质量发展的指导意见》	攻关长时储能、储热；加大招商引资；煤电合理配储；退役火电改造储能
	2023 年 5 月 30 日	《广东省促进新型储能电站发展若干措施》	火电配储；新型储能纳入绿色金融；财政支持
	2024 年 11 月 9 日	《广东省 2024—2025 年节能降碳行动方案》	煤电三改；括大新型储能规模
	2025 年 9 月 19 日	《关于深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展的实施方案》	鼓励新能源配建或租赁储能

续表

地方	发布时间	文件名称	内容简述
山西	2021 年 4 月 9 日	《关于印发山西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要的通知》	新能源消纳和储能协调发展，煤电与储能一体化布局
	2022 年 9 月 5 日	《“十四五”新型储能发展实施方案》	新型储能市场主体；结合煤电灵活性改造，发展电网侧储能；加快热储能等技术示范
	2022 年 9 月 23 日	《山西省可再生能源发展“十四五”规划》	退役火电建设储能；煤电灵活性改造；开展 REITs 试点。
	2023 年 1 月 16 日	《关于完整准确全面贯彻新发展理念切实做好碳达峰碳中和工作的实施意见》	煤电三改，储能入市
	2025 年 1 月 10 日	《关于印发山西省加快经济社会发展全面绿色转型行动方案的通知》	煤电三改；健全新型储能价格机制
	2025 年 7 月 24 日	《促进全省能源领域民营经济发展若干举措》	支持民企投资储能

3 卡诺电池系统的市场机制

3.1 我国电力市场现状

我国电力市场分批发市场和零售市场，零售侧售电公司向终端电力用户售电，批发侧主要指发电企业向售电公司或大用户直接售电，目前多数用户选择通过售电公司代理参与批发市场。电力批发市场分为电能量、辅助服务、容量、输电权市场等。电能量市场涵盖中长期和现货市场，辅助服务市场交易种类主要为调峰、调频、备用、爬坡等。

2016 年以来我国各类经营主体稳步增长，市场化交易电量节节攀升。随着跨省跨区交易规模扩大，省间电力中长期和现货市场都较活跃。省内市场以江苏、广东、蒙西为首，中长期交易规模总体扩大。截至 2026 年 2 月，山西、广东、山东、甘肃、蒙西、湖北和浙江 7 个省级现货市场正式运行，陕西、辽宁、河北南网、四川、上海、蒙东、江西、新疆等 18 个省级现货市场和南方区域电力市场已转入连续结算试运行，我国电力现货市场基本实现全覆盖，但当前现货价格普遍低于中长期交易电价。

目前我国以《电力市场运行基本规则》为纲领性文件，以《电力中长期交易基本规则》《电力现货市场基本规则》《电力辅助服务市场基本规则》为主干文件，以《电力市场注册基本规则》《电力市场计量结算基本规则》《电力市场信息披露基本规则》为配套文件，构建了全国统一电力市场“1+N”基本规则体系（表 4）。国家将持续推进能源转型，发展绿电和零碳市场[38]。

表 4 国家电力市场政策体系

Tab.4 National electricity market policy system

发布时间	文件名称	内容简述
2023 年 9 月 7 日	《电力现货市场基本规则（试行）》	日前、日内、实时市场；电网阻塞严重、输电能力受限区域用含电能量分量和阻塞分量节点边际电价，有明显阻塞断面地区用分区边际电价，统一出清用系统边际电价；主体可报价和参与定价；市场限价
2024 年 1 月 31 日	《电力市场信息披露基本规则》	明确发电企业、电力用户、独立储能等需披露的公众信息
2024 年 2 月 7 日	《关于建立健全电力辅助服务市场价格机制的通知》	调峰价格上限原则上不高于当地平价新能源项目上网电价；调频出清上限不超过 0.015 元/kW；备用价格上限不超过当地电能量市场价格上限
2024 年 4 月 25 日	《电力市场运行基本规则》	储能企业为经营主体，入市需注册；储能需安装电能计量装置，明确计量点
2024 年 9 月 13 日	《电力市场注册基本规则》	在电力交易机构办理市场注册，信息共享；明确注册基本条件
2025 年 4 月 3 日	《电力辅助服务市场基本规则》	明确辅助服务价格机制；独立储能上、下网费用按发、用两侧结算，日清月结
2025 年 7 月 18 日	《电力市场计量结算基本规则》	计量结算以月为周期，现货连续运行地区日清月结
2025 年 9 月 2 日	《电力中长期市场基本规则（征求意见稿）》	跨省跨区与省内交易结合；签订中长期合同；定期或连续开市；集中交易和双边协商，带曲线签约，分时结算

3.1 独立储能电站参与电力市场

《关于加快推动新型储能发展的指导意见》《关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知》等文件规定符合相关标准的新型储能可转为独立储能，作为独立主体参与电力市场。独立储能多为电化学储能，由退役火电改造的卡诺电池系统理论上可作为电网侧独立储能入市，但目前尚无专门针对热储能电站的市场规则。其盈利空间可参照配备熔盐储热的火电联合调峰的独立储能商业模式，共享储能容量租赁和抽水蓄能两部制电价进行分析。国家发布的《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027 年）》《关于支持电力领域新型经营主体创新发展的指导意见》等文件规范了独立储能主要盈利模式：参与中长期市场和现货市场的

电能量交易，提供调频备用等有偿辅助服务，依据当地政策获取容量补偿，与新能源企业签署合同提供容量租赁。退役火电改造的卡诺电池系统在电能量市场、调峰备用市场、容量市场中发挥重要作用，未来还有望进一步拓展至虚拟电厂、碳市场等领域。

电能量市场方面，改造后系统可通过“低充高放”方式获取电价差收益[39]。我国在中长期市场引入分时段标准化交易产品，加快实现分时段交易结算，引导独立储能根据自身电力电量平衡需求灵活参与各时间尺度电力中长期交易。当前国内河南、河北、新疆等地中长期市场较为成熟，山东、山西、甘肃、青海、广东、贵州等省明确独立储能参与现货市场机制[40]。国家鼓励独立储能以报量报价或报量不报价等方式参与现货市场，将出清节点向更低等级电压延伸。山西、广东等电力现货运行地区科学设置市场价格上下限，通过市场竞争形成合理峰谷价差；但尚未完全实现现货运行地区需完善峰谷分时电价政策，提升价差激励。目前国内现货市场整体价格区间较低，上限多为 1.5 元/(kW·h)[41]，需要科学确定并适时优化市场限价[42]。根据相关政策，独立储能向电网送电，其相应充电电量不承担输配电价和政府性基金及附加。改造后的卡诺电池系统可与电网签订顶峰时段和低谷时段市场合约，发挥移峰填谷和顶峰发电作用。

辅助服务市场方面，各省市建立“按效果付费”的补偿机制，建立健全调峰、调频、备用市场体系，鼓励设置爬坡、转动惯量等辅助服务。独立储能提供有功无功平衡、事故应急与恢复等服务，电网事故时快速有功响应，在现货运行区域费用由发电侧并网主体、电力用户合理分摊。通常，储能以调频收益为主，调度机构按需调用独立储能容量后，剩余容量可继续以独立储能身份参与一次调频市场[43]。卡诺电池系统主要提供调峰、二次调频、备用服务，因部分省份未对储能开放有偿调频服务，实际运行中只有甘肃、福建、山西等地明确储能可获得二次调频收益。

容量市场方面，国家鼓励在电网关键节点建设储能，可参照煤电和抽水蓄能建立卡诺电池系统的容量电价机制，进行容量激励，以市场为导向确定容量需求和容量价值，对有效容量合理补偿[44]，部分地方新型储能市场机制见表 5。蒙西、山东等地补偿机制较为完善，对电网替代型储能设施成本收益纳入输配电价回收的研究颇有进展。目前我国储能电站收入高度依赖容量租赁[45]，但其存在周期短、价格波动大等问题。《关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知》（发改价格〔2025〕136 号）叫停新能源强制配储后，容量租赁收益锐减，独立储能步入市场化深水区[46]。国家鼓励新能源按需合理配置新型储能，参照共享储能[47]，改造后储能系统可综合考虑地方参考价和市场运营，与新能源企业商定租借费用，在电力交易平台统一登记开放，提供容量租赁服务。

表 5 部分地方新型储能市场机制

Tab.5 Market mechanisms for new energy storage in selected localities

地方	发布时间	政策文件名称	内容简述
广东	2023 年 3 月 30 日	《广东省新型储能参与电力市场交易实施方案》	独立储能中长期市场双边协商、挂牌和集中交易，设交易电量约束；全电量现货出清，分时电价；报量报价参与调频和备用报量
	2025 年 4 月 2 日	《广东电力市场现货电能量交易实施细则》	报价或报量不报价参与现货交易
	2025 年 4 月 2 日	《广东电力市场中长期电能量交易实施细则》	中长期市场采用绝对价格；独立储能可在年、多月、月度双边协商、集中竞争中同时作为买方、卖方交易
	2025 年 4 月 2 日	《广东电力现货市场结算实施细则》	批发市场“日清月结”，三部制结算；暂不计算独立储能系统运行补偿
	2025 年 9 月 19 日	《关于深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展的实施方案》	现货市场出清上限 1.8 元/(kW·h)，申报、出清下限–0.05 元/(kW·h)
山西	2022 年 10 月 26 日	《关于印发山西省电力市场运营管理办法的通知》	现货市场集中竞价、统一出清；集中竞价单独开展调频；推进备用、爬坡、有偿无功调节、自动电压控制、黑启动等辅助服务市场化；现货市场“双结算”和“日清月结”
	2024 年 12 月 25 日	《电力市场规则体系（V15.0）》	独储参与二次调频、应急备用，二次调频申报分时段 5~15 元/MW 或 10~15 元/MW，充放电费用差调频补偿；灵活性改造新增调节容量补偿不超过 36 万元/MW；省间购电细则
	2025 年 4 月 22 日	《山西电力二次调频辅助服务市场交易实施细则》	独储参与二次调频以整体为主体申报，火电、储能协同分配 AGC 指令，储能总指令占比不超 65%，日清月结
	2025 年 8 月 20 日	《山西省深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展实施方案（征求意见稿）》	电能量电价含实时市场全电量电费、日前市场差价电费、中长期差价合约电费；现货市场结算限价不高于燃煤发电度电燃料成本 2 倍，迎峰度夏（冬）期可适当提高；储能容量补偿费用由有效容量、供需系数等共同决定，“电能量+容量”两部制电价

4 结 语

本文对退役火电机组改造卡诺电池系统的背景、技术发展现状、国家及地方政策、参与电力市场机制展开综述，得出以下结论。

1）“双碳”背景下，“双高”短板叠加火电厂退役潮，新型电力系统亟需低成本长时储能技术和退役机组处理方案。我国政策鼓励利用退役火电建设储能，将退役火电机组改造为长时储热、安全环保的卡诺电池，既有效利用退役电厂土地、设施节约成本，又可提供灵活性调节资源。改造后系统可作为独立储能参与电力市场，从电能量市场、有偿辅助服务、容量补偿与租赁市场多方盈利，发展潜力巨大。

2）国内外积极推进退役机组改造卡诺电池构想落地。改造技术保留退役火电厂的发电机、汽轮机等基础设施与主要动力设备，用熔盐储热系统、电加热器或热泵系统替代锅炉燃烧系统，耦合火电灵活性改造实现零碳电热转换。该构想虽存在高温热泵循环效率偏低、混合蒸汽高压并气困难、频繁启停减损系统寿命、低负荷热备用能效低等技术难点，但已具备一定的可行性。

3）卡诺电池化改造存在盈利风险。现暂无明确针对卡诺电池的市场政策，其理论上可作为独立储能参与市场，但地方电力交易种类不全、价格机制不完善导致电能量和辅助服务市场获利空间有限；国家取消新能源强制配储后容量租赁市场缩减；容量补偿高度依赖政策导向，周期波动大。未来随着市场机制健全，新型储能相关标准完善和卡诺电池技术迭代，退役火电机组改造卡诺电池技术有望为新型电力系统建设提供有力支撑。

[参 考 文 献]

[1] 张佳星. 政策、技术双管齐下 西部绿电利用率迎来“拐点”？[N]. 科技日报, 2025-07-03(5).
Zhang J X. A two-pronged approach of policy and technology: has western China’s green electricity utilization reached a tipping point?[N]. Science and Technology Daily, 2025-07-03(5).

[2] 苏南. 电力系统如何应对机组集中退役潮[N]. 中国能源报, 2023-10-16(20).
Su N. How power systems cope with the wave of concentrated unit retirements[N]. China Energy News, 2023-10-16(20).

[3] 欧阳蔚琦, 陈经纬, 肖雅, 等. 新能源电力的现货交易面临的挑战与对策分析[J]. 电子技术, 2024, 53(7): 192.
Ouyang W Q, Chen J Wi, Xiao Y, et al. Analysis of challenges and countermeasures faced by spot trading of new energy electricity[J]. Electronic Technology, 2024, 53(7): 192.

[4] 朱光明, 陈珣, 何洪浩, 等. “双碳”背景下热储能技术的发展及应用(上)[J]. 大众用电, 2025, 40(3): 73.
Zhu G Mg, Chen X, He H H, et al. Development and application of thermal energy storage technology under the dual carbon goals (part 1)[J]. Popular Utilization of Electricity, 2025, 40(3): 73.

[5] 沈昊天, 张华良, 徐玉杰, 等. 考虑不同场景与利益主体的储能技术选型综合评价[J]. 能源研究与管理, 2025, 17(2): 156.
Shen H T, Zhang H L, Xu Y J, et al. Comprehensive evaluation of energy storage technology selection considering various scenarios and stakeholders[J]. Energy Research and Management, 2025, 17(2): 156.

[6] 黄康桥. 新型储能产业发展问题分析及政策建议研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(7): 2617.
Huang K Q. China’s new energy storage industry: challenges and policy recommendations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(7): 2617.

[7] 邵明轩, 孙杨, 张祥, 等. 依托低阶煤电站的提质储热卡诺电池及其性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5525.
Shao M X, Sun Y, Zhang X, et al. Carnot battery integrated with low-rank coal power plant for the stored heat upgrading and its performance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5525.

[8] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149.
Chen H S, Li H, Xu Y J, et al. Research progress on China’s energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149.

[9] 郑步高, 崔宇, 陈前, 等. 新型电力系统下中国新型储能行业高质量发展的思考[J]. 国际石油经济, 2025, 33(5): 38.
Zheng B G, Cui Y, Chen Q, et al. Reflections on the high-quality development of China’s new energy storage industry under the new power system[J]. International Petroleum Economics, 2025, 33(5): 38.

[10] 国家能源局. 关于促进新型储能并网和调度运用的通知[EB/OL]. (2024-04-02) [2025-08-13]. https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/hbjgfl/gfxwj/202405/t20240508_261856.html.
National Energy Administration. Notice on promoting the grid integration and dispatch utilization of new-type energy storage[EB/OL]. (2024-04-02) [2025-08-13]. https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/hbjgfl/gfxwj/202405/t20240508_261856.html.

[11] 洪民健. 储能技术在大规模新能源并网中的应用分析[J]. 科技资讯, 2025, 23(14): 53.
Hong M J. Analysis of the application of energy storage technology in large-scale new energy grid connection[J]. Science & Technology Information, 2025, 23(14): 53.

[12] 郭鸿. 新型储能技术的现状与趋势展望[J]. 集成电路应用, 2023, 40(3): 254.
Guo H. Current situation and prospect of new energy storage technologies[J]. Application of IC, 2023, 40(3): 254.

[13] 张彦莉, 刘伏萍. 我国新型储能产业发展现状及趋势展望[J]. 汽车与新动力, 2025, 8(4): 1.
Zhang Y L, Liu F P. Development status and future trends of china’s new energy storage industry[J]. Automobile and New Powertrain, 2025, 8(4): 1.

[14] Scharrer D, Bazan P, Pruckner M, et al. Simulation and analysis of a Carnot battery consisting of a reversible heat

pump/organic Rankine cycle for a domestic application in a community with varying number of houses[J]. Energy, 2022, 261: 125166.
[15] 邢刚, 杨涵, 乔永辉, 等. 卡诺电池分类与关键要素研究进展[J]. 材料导报, 2026, 40(17): 25080084.
Xing G, Yang H, Qiao Y H, et al. Research progress on the classification and key factors of Carnot[J]. Materials Review, 2026, 40(17): 25080084.
[16] 封官斌, 李跃林, 程孝峰, 等. 高温卡诺电池关键技术及应用现状[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 1.
Feng G B, Li Y L, Cheng X F, et al. Key technologies and current applications of high-temperature Carnot batteries[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 1.
[17] 朱光明, 陈珣, 何洪浩, 等. “双碳”背景下热储能技术的发展及应用(下)[J]. 大众用电, 2025, 40(4): 73.
Zhu G M, Chen X, He H H, et al. Development and application of thermal energy storage technology under the dual Carbon Goals (part 2)[J]. Popular Utilization of Electricity, 2025, 40(4): 73.
[18] Frate G F, Ferrari L, Desideri U, et al. Multi-criteria investigation of a pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration and sensible heat storage[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 208: 112530.
[19] White A, Parks G, Markides C N. Thermodynamic analysis of pumped thermal electricity storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(2): 291.
[20] 王青山, 李妍, 张群, 等. 不同规模化机械储能技术在高比例可再生能源电力系统中应用的比较分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(2): 854.
Wang Q S, Li Y, Zhang Q, et al. A comparative analysis for various scaled mechanical energy storage technologies applied to power systems with a high share of renewable energy sources[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(2): 854.
[21] Bazdar E, Sameti M, Nasiri F, et al. Compressed air energy storage in integrated energy systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112701.
[22] 吴金龙, 李峻, 邢泰高, 等. 绝热压缩空气储能系统的热力性能与经济性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 27.
Wu J L, Li J, Xing T G, et al. Thermodynamics and economic analysis of adiabatic compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 27.
[23] 新型电力产融服务. 各类储能技术路线对比及应用研究[EB/OL]. (2024-02-19) [2025-11-20]. https://zhuanlan.zhihu.com/p/682792541.
New Power Industry-Finance Services. Comparative analysis and application study of various energy storage technology routes[EB/OL]. (2024-02-19) [2025-11-20]. https://zhuanlan.zhihu.com/p/682792541.
[24] 徐志强, 李峻, 张春琳, 等. 框架式重力储能度电化净现值分析[J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 48.
Xu Z Q, Li J, Zhang C L, et al. Levelized net present value of electricity analysis of frame gravity energy storage system[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(5): 48.
[25] Vecchi A, Konbloch K, Liang T, et al. Carnot battery development: a review on system performance, applications and commercial state-of-the-art[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105782.
[26] 吴界辰, 王智冬, 韩晓男, 等. 电化学储能度电成本及在电力系统中的盈利模式分析[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 177.
Wu J C, Wang Z D, Han X N, et al. Analysis on LCOE and profit model for electro chemical energy storage in power systems[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 177.
[27] 傅旭, 李富春, 杨欣, 等. 基于全寿命周期成本的储能成本分析[J]. 分布式能源, 2020, 5(3): 34.
Fu X, Li F C, Yang X, et al. Cost analysis of energy storage based on life cycle cost[J]. Distributed Energy, 2020, 5(3): 34.
[28] 梁毅, 田思源, 张颖. 用户侧储能经济性研究[J]. 中外能源, 2024, 29(10): 18.
Liang Y, Tian S Y, Zhang Y. Research on economy of user-side energy storage[J]. Sino-Global Energy, 2024, 29(10): 18.
[29] Li B H, Qian W, Du X Z. Study on the retrofit of coupled Carnot battery in retired coal-fired power units for grid energy storage transformation[J]. Applied Energy, 2025, 401: 126796.
[30] Novotny V, Basta V, Smola P, et al. Review of Carnot battery technology commercial development[J]. Energies, 2022, 15: 647.
[31] Geyer M, Giuliano S. Conversion of existing coal plants into thermal storage plants[M]//Encyclopedia of Energy Storage. Amsterdam: Elsevier, 2022: 122.
[32] 赫广迅, 宋业琛. 基于火电站转型储能电站的超高温热泵及熔盐储换热系统工程应用设计[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(2): 93.
He G X, Song Y C. Engineering application design of ultra-high temperature heat pump and molten salt heat storage and exchange system based on thermal power station transformation to energy storage power station[J]. Turbine Technology, 2023, 65(2): 93.
[33] 张祥. 朗肯型卡诺电池与燃煤电站的耦合互补及其性能分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2024: 57.
Zhang X. Coupling and complementarity of Rankine-based Carnot batteries with coal-fired power plants and their performance analysis[D]. Qingdao: Qingdao University, 2024: 57.
[34] 于博旭, 韩瑞, 刘倩, 等. 耦合火电厂灵活改造的卡诺电池储能系统热力学性能研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1461.
Yu B X, Han R, LIU Q, et al. Thermodynamic performance of a flexible retrofit Carnot battery energy storage system in a coupled thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1461.
[35] 杨勇, 徐书德, 张祥, 等. 燃煤电站抽汽驱动的热泵-Kalina 循环卡诺电池及其性能评估[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 46.
Yang Y, Xu S D, Zhang X, et al. Heat pump-Kalina cycle Carnot battery driven by extracted steam in coal-fired power station and its performance evaluation[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 46.
[36] 刘天阳, 舒印彪, 毕天姝, 等. 考虑退役火电改造卡诺电池的沙戈荒新能源基地电热混合储能优化配置方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025-11-21. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250615.
Liu T Y, Shu Y B, Bi T S, et al. Optimization configuration method of electric-thermal hybrid energy storage for desert-gobi-wasteland new energy base considering the transformation of decommissioned thermal power unit into Carnot battery[J/OL]. 2025-11-21. Proceedings of the CSEE. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250615.

[37] 王天堃, 殷文兴, 邢刚, 等. 热泵与电加热耦合的卡诺电池电转热过程建模与性能研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 806.
Wang T K, Yin W X, Xing G, et al. Modeling and performance study of the electricity-to-heat process in a Carnot battery coupled with heat pump and electric heating[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 806.
[38] 电力规划设计总院. 2024 年度中国电力市场发展报告[EB/OL]. (2025-07-17) [2025-08-14]. https://henb.nea.gov.cn/hdhy/zlxz/202508/t20250805_285315.html.
Electric Power Planning & Engineering Institute. China Electricity Market Development Report 2024[EB/OL]. (2025-07-17) [2025-08-14]. https://henb.nea.gov.cn/hdhy/zlxz/202508/t20250805_285315.html.
[39] 赵元芳, 刘小林. 电力市场下新型储能应用场景及经济评价[J]. 电气技术与经济, 2025(6): 319.
Zhao Y F, Liu X L. Application scenarios and economic evaluation of new energy storage under the electricity market[J]. Electrical Equipment and Economy, 2025(6): 319.
[40] 王一竹. 储能电站参与电力现货市场的发展与建议[J]. 上海节能, 2025(5): 705.
Wang Y Z. Development and suggestions for energy storage power stations participating in the power spot markets[J]. Shanghai Energy Conservation, 2025(5): 705.
[41] 靳慧龙, 刘宏扬, 康赫然, 等. 国内外独立储能参与电力市场交易机制研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(7): 2602.
Jin H L, Liu H Y, Kang H R, et al. Research on the mechanism of independent energy storage participating in electricity market trading in China and abroad[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(7): 2602.
[42] 张家杭, 熊力, 王杰, 等. 电力现货市场下新型独立储能经济性分析[J]. 水力发电, 2025, 51(11): 89.
Zhang J H, Xiong L, Wang J, et al. Tech-economic analysis on independent energy storage in the context of power spot market[J]. Water Power, 2025, 51(11): 89.
[43] 肖虹宇. H 电池储能电站投资效益分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022: 24.
Xiao H Y. H battery energy storage power plant investment benefit analysis[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022: 24.
[44] 国家发展改革委. 关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知[EB/OL]. (2022-05-24) [2025-08-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/07/content_5694423.htm.
National Development and Reform Commission. Notice on Further Promoting the Participation of New-Type Energy Storage in Electricity Markets and Dispatch Utilization[EB/OL]. (2022-05-24) [2025-08-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/07/content_5694423.htm.
[45] 马晨晨. “强制配储”时代结束: 储能收益重构, 厂商期待突围[N]. 第一财经日报, 2025-04-21(A06).
Ma C C. The end of the “Mandatory Storage Allocation” era: storage revenue models overhauled as manufacturers seek a breakthrough[N]. China Business Network Daily, 2025-04-21(A06).
[46] 苏南. 独立储能步入市场化深水区[N]. 中国能源报, 2025-03-24(3).
Su N. Independent energy storage enters the deep waters of marketization[N]. China Energy News, 2025-03-24(3).
[47] 张开亮, 李昂. 共享储能参与电力市场交易机制研究[J]. 东北电力技术, 2025, 46(3): 42.
Zhang K L, Li A. Research on shared energy storage participating in power market trading mechanism[J]. Northeast Electric Power Technology, 2025, 46(3): 42.

（责任编辑　邓玲惠）