

压缩空气储能与综合能源系统耦合的研究进展与展望

王润泽, 张思齐, 张彦, 张硕, 沈昊天, 王家辉, 杨旭龙, 徐玉杰, 陈海生, 张新敬

Research Progress and Prospects on the Coupling of Compressed Air Energy Storage and Integrated Energy Systems

WANG Runze, ZHANG Siqi, ZHANG Yan, ZHANG Shuo, SHEN Haotian, WANG Jiahui, YANG Xulong, XU Yujie, CHEN Haisheng, and ZHANG Xinjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16516/j.ceec.2026-037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分布式压缩空气储能电站能源综合利用

Comprehensive Utilization of Energy in Distributed Compressed Air Energy Storage Power Station

南方能源建设. 2025, 12(S1): 41-49

压缩空气储能地下人工洞室研究现状与展望

Research Status and Prospect of Underground Artificial Rock Caverns for Compressed Air Energy Storage

南方能源建设. 2024, 11(4): 54-64

大容量压缩空气储能关键技术

Key Technologies of Large-Scale Compressed Air Energy Storage

南方能源建设. 2023, 10(6): 26-33

主机设备故障诊断技术在压缩空气储能领域的研究进展与发展趋势

Research Progress and Development Trends in Fault Diagnosis Technology for Main Equipment in the Field of Compressed Air Energy Storage

南方能源建设. 2025, 12(6): 1-8

300 MW级压缩空气储能电站DCS一体化技术

DCS Integration Technology for 300 MW Compressed Air Energy Storage Power Station

南方能源建设. 2025, 12(6): 33-42

压缩空气储能技术研究现状及发展趋势

Research Status and Development Trend of Compressed Air Energy Storage Technology

南方能源建设. 2024, 11(2): 146-153



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 王润泽, 张思齐, 张彦, 等. 压缩空气储能与综合能源系统耦合的研究进展与展望 [J]. 南方能源建设, 2026: 1-17. WANG Runze, ZHANG Siqi, ZHANG Yan, et al. Research progress and prospects on the coupling of compressed air energy storage and integrated energy systems [J]. Southern energy construction, 2026: 1-17. DOI: [10.16516/j.ceeec.2026-037](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2026-037).

压缩空气储能与综合能源系统耦合的研究进展与展望

王润泽^{1,2,5}, 张思齐^{2,4,5}, 张彦³, 张硕^{2,5}, 沈昊天⁴, 王家辉^{1,2,5},
杨旭龙^{1,2,5}, 徐玉杰^{2,4,5}, 陈海生^{2,4,5}, 张新敬^{2,4,5,✉}

- (1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;
2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;
3. 中电建新能源集团股份有限公司, 北京 100029;
4. 中科南京未来能源系统研究院, 江苏 南京 211135;
5. 长时规模储能重点实验室 (中国科学院), 北京 100190)

摘要: [目的]综合能源系统因其在多能互补及碳减排方面的显著优势, 成为支撑“双碳”目标的重要技术路径。然而, 可再生能源的间歇性波动对系统的稳定运行构成了严峻挑战。压缩空气储能作为一种大规模长时物理储能技术, 凭借其独特的冷热电联供特性, 成为解决综合能源系统供需失衡的关键手段。本文旨在系统阐述压缩空气储能与综合能源系统耦合的研究现状与未来发展。[方法]评估了压缩空气储能相较于抽水蓄能的差异化优势。系统梳理并剖析压缩空气储能与冷热电联供系统、太阳能集热系统、海水淡化系统以及氢能/燃料电池等新兴系统的耦合机理。调研并归纳典型园区级与电网级示范工程的建设现状, 总结了在不同应用场景下的系统配置与运行策略。[结果]分析表明, 压缩空气储能凭借其独特的压缩热与膨胀冷能回收特性, 在实现热力学解耦与长时能量时移方面具有显著优势。多能耦合系统的综合效率提升核心在于“热能的高效梯级利用”, 通过系统集成可有效解决单一储能形式效率受限的问题。园区级应用侧重于分布式多能互补与冷热联供, 而电网级应用则聚焦于大规模新能源消纳与电网调峰。[结论]压缩空气储能与综合能源系统的深度耦合是构建新型电力系统的重要技术方向, 但当前仍面临多物理场动态耦合机理不清、关键透平机械在变工况下效率衰减严重等技术瓶颈。未来的发展应聚焦于构建“功率型+能量型”的混合储能架构以弥补动态响应短板, 引入人工智能算法实现源网荷储的智慧协同调控, 从而推动压缩空气储能技术从单一电力存储向多能流综合管理方向演进。

关键词: 可再生能源消纳; 压缩空气储能; 综合能源系统; 冷热电联供; 多能互补; 梯级利用; 示范工程

DOI: [10.16516/j.ceeec.2026-037](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2026-037)

文章编号: 2095-8676(2026)

CSTR: [32391.14.j.ceeec.2026-037](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2026-037)

中图分类号: TK01; TM73



论文二维码

Research Progress and Prospects on the Coupling of Compressed Air Energy Storage and Integrated Energy Systems

WANG Runze^{1,2,5}, ZHANG Siqi^{2,4,5}, ZHANG Yan³, ZHANG Shuo^{2,5}, SHEN Haotian⁴, WANG Jiahui^{1,2,5},
YANG Xulong^{1,2,5}, XU Yujie^{2,4,5}, CHEN Haisheng^{2,4,5}, ZHANG Xinjing^{2,4,5,✉}

- (1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

收稿日期: 2026-02-14 修回日期: 2026-03-26

基金项目: 国家自然科学基金“等温压缩空气储能系统热力循环特性与内流机理研究”(52376040); 国家自然科学基金项目“压缩空气储能关键科学问题青年科学基金项目(A类)”(52525601); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目资助“双碳目标下储能应用技术与产业发展研究”(117GJHZ2023009MI); 北京市科技新星“北京市科技新星计划交叉课题”(20230484479)。

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. China Electric Power New Energy Group Co., Ltd., Beijing 100029, China;
4. Nanjing Institute of Future Energy System, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, Jiangsu, China; 5. Key Laboratory of Long-Duration and Large-Scale Energy Storage (Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China)

Abstract: [Objective] Integrated energy systems (IES) serve as a vital technological pathway supporting the "Carbon Peaking and Carbon Neutrality" goals due to their significant advantages in multi-energy complementarity and carbon emission reduction. However, the intermittent fluctuations of renewable energy pose severe challenges to stable system operation. As a large-scale, long-duration physical energy storage technology, compressed air energy storage (CAES) becomes a key solution for addressing supply-demand imbalances in IES, leveraging its unique combined cooling, heating, and power characteristics. This paper aims to systematically review the research status and future development of the coupling between CAES and IES. [Method] The differentiated advantages of CAES compared to pumped hydro storage were evaluated. The coupling mechanisms of CAES with CCHP systems, solar thermal collection systems, seawater desalination systems, and emerging hydrogen energy/fuel cell systems were systematically reviewed and analyzed. Furthermore, the construction status of typical industrial park-level and grid-level demonstration projects was investigated and summarized, outlining system configurations and operational strategies under different application scenarios. [Result] The analysis indicates that CAES possesses significant advantages in achieving thermal decoupling and long-duration energy time-shifting due to its unique recovery characteristics of compression heat and expansion cooling energy. The core of improving the comprehensive efficiency of multi-energy coupled systems lies in the "efficient cascading utilization of thermal energy," where system integration effectively resolves the efficiency limitations of single energy storage forms. Park-level applications focus on distributed multi-energy complementarity and CCHP, while grid-level applications focus on large-scale renewable energy consumption and grid peak shaving. [Conclusion] The deep coupling of CAES and IES represents an important technological direction for building a new power system; however, it currently faces technical bottlenecks such as poorly understood multi-physics dynamic coupling mechanisms and severe efficiency attenuation of key turbomachinery under off-design conditions. Future development should focus on constructing a "power-type + energy-type" hybrid energy storage architecture to compensate for dynamic response shortcomings and introducing artificial intelligence algorithms to achieve smart collaborative control of "source-grid-load-storage," thereby promoting the evolution of CAES technology from single electricity storage to comprehensive multi-energy flow management.

Key words: renewable energy accommodation; compressed air energy storage; integrated energy system; combined cooling, heating and power; multi-energy complementarity; cascading utilization; demonstration project

2095-8676 © 2026 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在“双碳”目标的背景下，中国可再生能源实现了跨越式发展，2015—2024年全国电力装机结构与装机增速如图1所示^[1-2]。然而，风能、太阳能等可再生能源具有天然的间歇性与波动性，大规模接入给电力系统的功率平衡与频率稳定带来了严峻挑战^[3-5]。综合能源系统（Integrated Energy System, IES）作为一种包含电、热、冷、气等多种能源形式的耦合系统，通过多能互补与梯级利用，成为解决可再生能源消纳难题的重要物理载体。在IES中，储能技术是平抑源荷波动、实现能量时空平移的关键支撑^[6-7]。进入“十五五”时期后，储能在国家能

源体系中的定位从新能源并网条件下的辅助调节逐步转变为支撑新型能源体系和新型电力系统建设的重要基础单元。《关于加快推动新型储能发展的指导意见》指出2025年实现新型储能技术规模化发展，2030年市场化发展；《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》进一步明确指出要大力发展新型储能，加快智能电网和微电网建设^[8-10]。按照载体的不同，储能大致可以分为机械储能、电化学储能、电磁储能和储氢等^[11]，如图2所示。

在所有储能中，较为成熟的大规模长时储能主要有抽水蓄能（Pumped Energy Storage, PES）和

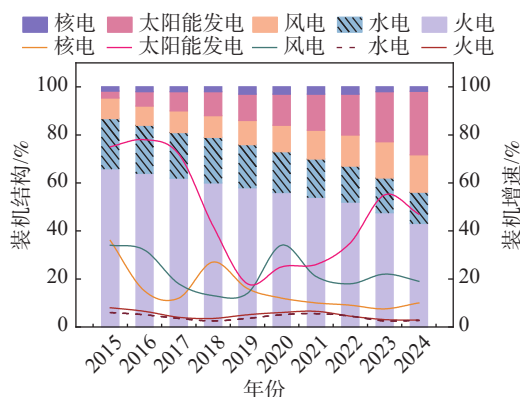


图1 2015至2024年全国电力装机结构与装机增速
Fig. 1 National installed capacity structure and growth rate from 2015 to 2024

压缩空气储能 (Compressed Air Energy Storage, CAES) [19-20]。其中, PES 是目前应用最广泛的大规模长时储能技术, 国际水电协会发布的《2025 World Hydropower Outlook》指出, 截至 2024 年, PES 装机容量占全球储能总量的 90% 左右[21]。但是, PES 具有选址条件严格, 建设周期长等问题[19]。而 CAES 具有储能规模大、能量成本相对较低以及选址灵活等优势[22-25], 这些特点使其在 IES 中, 尤其是在需要长时储能的应用场景中, 得到了广泛的关注[26-27]。

CAES 是基于燃气轮机的一项技术[28-29], 其工

作原理为: 储能时, 电动机驱动压缩机压缩空气, 并存储在储气室内; 释能时, 高压气体从储气室释放, 在燃烧室内与燃料混合后燃烧, 生成高温烟气推动叶片旋转做功, 驱动发电机发电[30-32]。后来, 有学者提出了带储热系统的先进绝热压缩空气储能 (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES), 不需要燃料补燃, 而是将压缩过程中产生的压缩热储存在储热系统中, 在膨胀过程中重新利用[33-35]。储热系统的存在也使其能够直接与冷热电联供系统 (Combined Cooling Heating and Power System, CCHP) 耦合, 实现多能源的耦合转化[36], 也正因如此, AA-CAES 是学者研究 CAES-IES 时最常用的 CAES 类型。

近几年有许多学者对于 IES 的研究进行了综述, Zhu 等[37] 对于 IES 中的负荷预测问题进行了综述, 并传统电力系统进行了对比。袁越等[38] 总结了低碳 IES 的发展路径, 对低碳特性和减排能力进行了归纳, 并对优化调度问题进行了综述。张苏涵等[39] 围绕 IES 的仿真展开综述, 分别总结了电网、气网和热网的建模方法。Wu 等[40] 对于 IES 建模过程中常用的建模工具与平台进行了概述, 并对国内几个典型 IES 示范项目进行了综述。Kang 等[41] 同样聚焦于国内 IES 示范项目, 并从利用率、环保性和经济性 3 个方面对 IES 进行了评价。Bazdar 等[42] 讨论

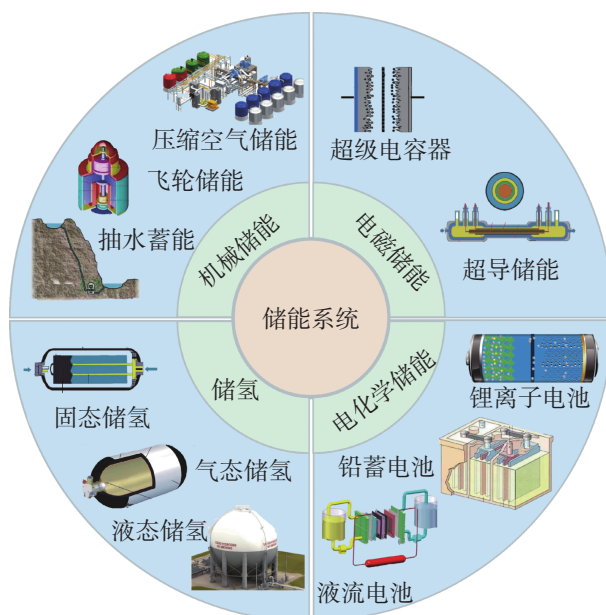


图2 储能的分类[12-18]
Fig. 2 Classification of energy storage[12-18]

了 CAES 应用于微电网的优化调度问题,但是缺少对 IES 相关内容的综述。Mullanu 等^[43]聚焦于耦合人工智能的氢能 IES 展开了综述。EL-Emam 等^[44]讨论了耦合可再生能源的核能综合能源系统 (N-R-IES), 并分析了其商业化部署存在的挑战。本综述与上述综述的对比如表 1 所示。

表 1 有关 IES 的综述对比
Tab. 1 Comparison of reviews on IES

文献	年份	不同储能 方式对比	可再生 能源	冷热电 联供	耦合 原理	研究 进展	CAES-IES	示范 项目
本文	2026	√	√	√	√	√	√	√
文献[37]	2022	×	×	×	×	×	×	×
文献[38]	2024	×	×	×	×	×	×	√
文献[39]	2024	×	×	×	×	×	×	×
文献[40]	2023	×	√	×	×	×	×	√
文献[41]	2022	×	×	√	×	×	×	√
文献[42]	2022	√	√	√	×	×	√	√
文献[43]	2024	×	√	√	×	×	×	×
文献[44]	2024	×	×	×	×	×	×	×

尽管 CAES 在 IES 中应用前景广阔,但目前的综述类文献多集中于单一 CAES 技术的效率优化或 IES 的通用规划算法,缺乏针对“CAES 与不同类型 IES 耦合机理”的系统性总结,尤其是对热能梯级利用机制及多物理场耦合特性的分析不够深入。鉴于此,本文旨在系统回顾 CAES 与 IES 耦合的研究进展与未来展望。文章结构安排如下:第 1 章深入剖析 CAES 与冷热电联供系统、聚光太阳能系统、海水淡化及氢能/燃料电池系统的耦合原理与研究现状;第 2 章梳理国内典型的集成 CAES 的 IES 示范工程,分析其系统配置与运行策略;第 3 章针对当前面临的多物理场耦合控制难、关键设备变工况效率低等挑战进行深入分析,并从混合储能架构及智慧调控等方面展望其未来发展方向。本文可为构建高效、灵活的新型电力系统提供理论参考与技术支持。

1 压缩空气储能与不同综合能源系统的耦合原理与研究进展

1.1 压缩空气储能与冷热电联供系统耦合

1.1.1 耦合原理

CCHP 通常指的是通过发电设备发电,利用储热罐和储冷罐回收热量和冷量,并提供热、电、冷

负荷的系统。为提高 AA-CAES 的能量利用效率并同时满足用户侧电力、制冷与供热的多重需求,越来越多的学者提出将 AA-CAES 与 CCHP 相耦合的系统,其原理图如图 3 所示^[45-46]。AA-CAES-CCHP 耦合系统在释能过程中,储热罐中储存的热量一部分用于将高压空气再加热以提高膨胀端温度并提升发电效率,另一部分直接为用户侧提供热负荷^[47-48],末级膨胀机排出的低温空气则可作为冷源满足制冷需求^[49-50]。

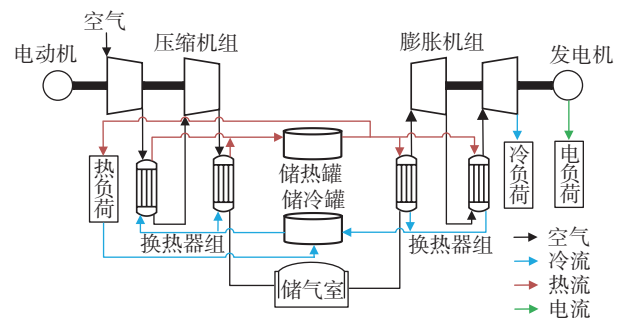


图 3 AA-CAES-CCHP 系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of AA-CAES-CCHP system

1.1.2 研究现状

目前,研究人员主要针对 AA-CAES-CCHP 耦合系统的热力学特性进行研究,并通常以系统的经济性和环保性为优化目标进行优化设计。Chen 等^[51]提出了如图 4 所示的新型 CCHP-IES,主要由风机、AA-CAES、吸收式制冷机 (Absorption Refrigerator, AR) 和内燃机 (Internal Combustion Engine, ICE) 组成,风机通过风能产生电力,ICE 通过消耗天然气进行发电。电力充足时,消耗电力驱动压缩机压缩空气,并储存在储气室中,余热储存在储热罐中;电力短缺时,高压空气从储气室释放,进行发电。为实现能源的综合梯级利用, Li 等^[52]提出系统的主要结构与 Chen 等^[51]提出的系统相似,都可以输出电能、热能和冷能,如图 5 所示。Li 等^[52]提出了一种上层以经济性为目标,下层以节能率为目标的双层优化方法,并通过北京某酒店进行了方法有效性验证,结果表明,这种优化方法具有显著的经济优势。

燃气-蒸汽联合循环 (Gas-Steam Combined Cycle, GTCC) 是一种成熟的发电技术,并伴有余热产生,在发电厂和工业过程中应用广泛。He 等^[53]提出了一种 CAES 与 GTCC 耦合的 IES 系统,如图 6

所示, CAES 中的压缩热可以通过甲醇的裂解反应吸收, 并将裂解气体供应给 GTCC, 在释能时, 从 GTCC 分流的部分气体加热即将进入膨胀机的空气, 以增加系统的总输出功率, 该系统很好地实现了冷热电气的耦合转化。

1.2 压缩空气储能与集中式太阳能系统耦合

1.2.1 耦合原理

为改善 CAES 在释能阶段因膨胀侧补热不足而导致的进气温度偏低、可用能利用不充分等问

题, 近年来研究人员广泛探索将聚光太阳能热发电 (Concentrated Solar Power, CSP) 与 CAES 耦合的技术路径, 该耦合系统利用太阳能集热器吸收的热量对导热油进行预热, 从而在释能过程中明显提高送入膨胀机的空气温度, 其原理图如图 7 所示^[54-57]。释能时, 储气室释放的高压空气先与 CSP 系统中的换热器组进行换热, 再与 AA-CAES 系统中的换热器组进一步换热后进入膨胀机。在该过程中, 太阳能热源在释能阶段分担了部分补热负荷, 提高了进

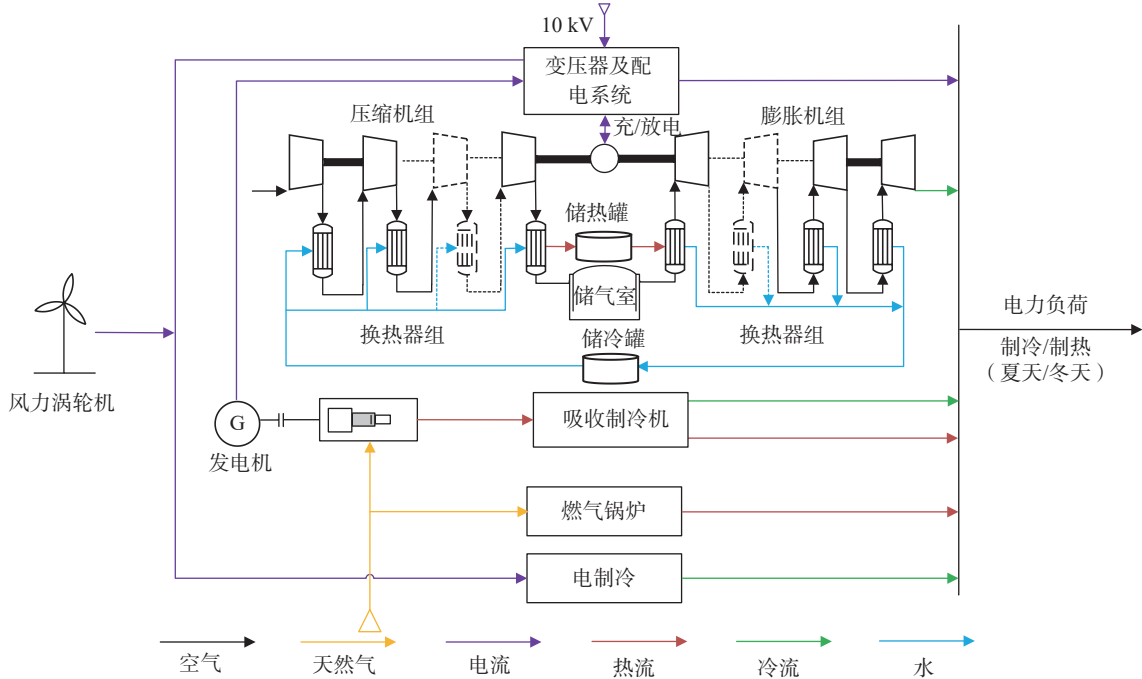


图 4 AA-CAES-CCHP-IES 系统示意图^[51]
Fig. 4 Schematic diagram of AA-CAES-CCHP-IES system^[51]

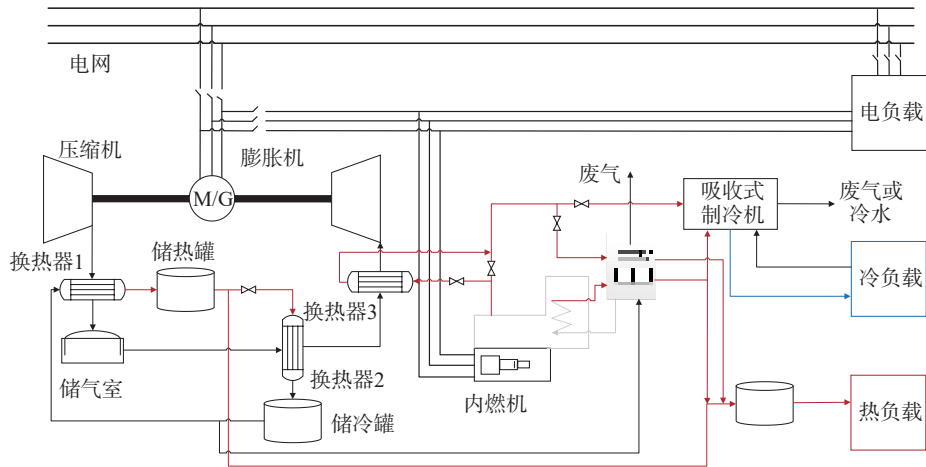


图 5 ICE-CAES-CCHP-IES 系统结构示意图^[52]
Fig. 5 Schematic diagram of ICE-CAES-CCHP-IES system^[52]

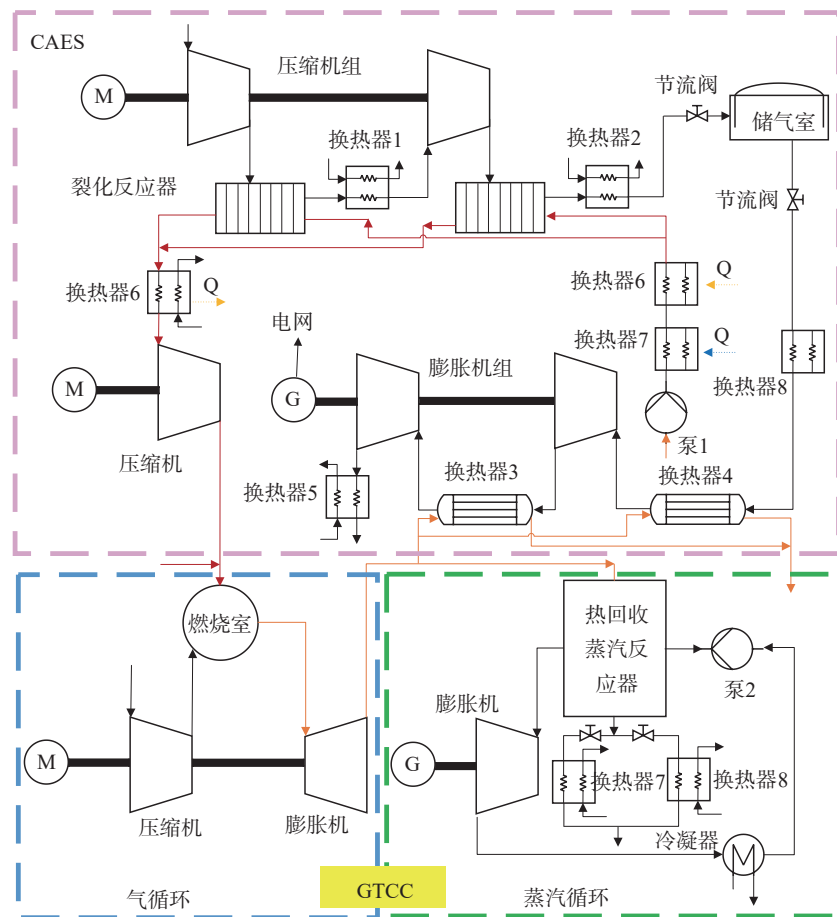
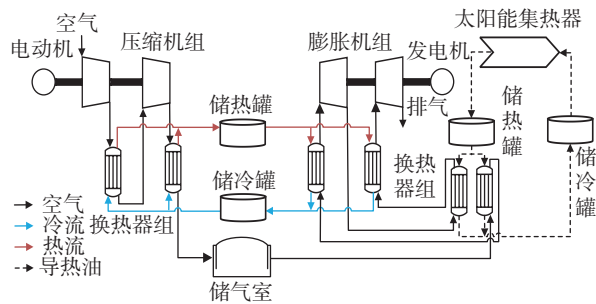
图6 GTCC-CAES-IES系统示意图^[53]Fig. 6 Schematic diagram of GTCC-CAES-IES system^[53]

图7 AA-CAES-CSP系统原理图

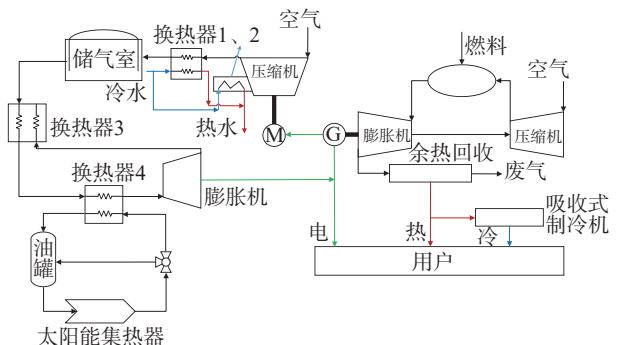
Fig. 7 Schematic diagram of AA-CAES-CSP system

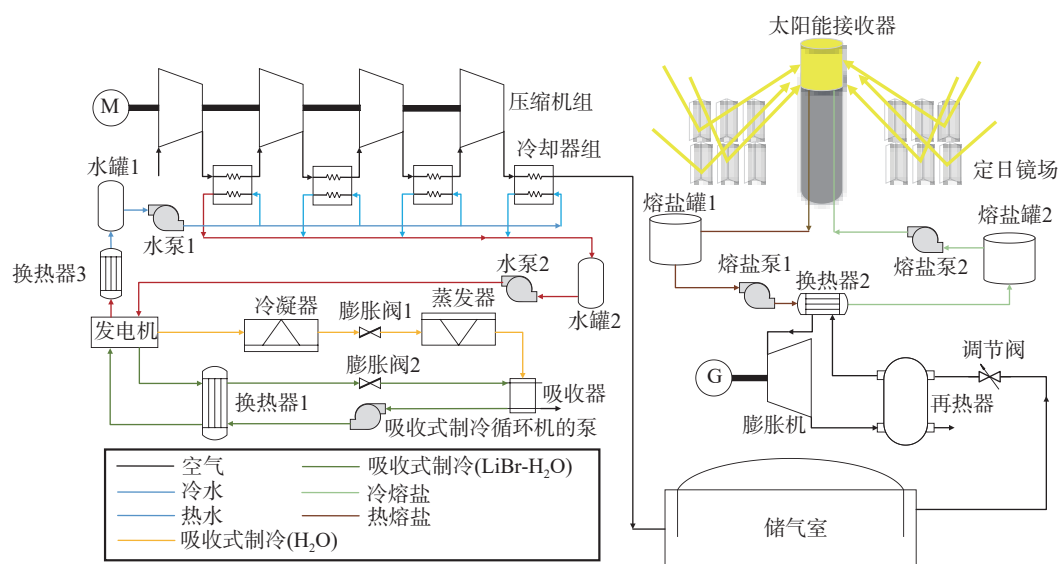
入后续换热环节前的空气焓值,从而改善了系统整体的热力学性能^[58-60]。

1.2.2 研究现状

目前,对于CAES-CSP耦合系统的研究主要聚焦于其热力学性能分析,并通过系统参数优化与结构设计改进提升经济性、环境性及综合效率等参数。小规模CAES因储气方式灵活,更适用于

分布式IES场景。Wang等^[61]提出了一种包含小规模CAES和太阳能集热系统的S-CAES-IES,如图8所示,太阳能集热系统收集的光热和CAES的余热为用户供热的同时,可以用于AR间接为用户供冷。Kandezi等^[62]提出了一种基于CAES、CSP和AR的新型IES系统,如图9所示。该系统采用熔盐作为光热储热介质,相较于Wang等^[61]所采用的导

图8 S-CAES-IES系统示意图^[61]Fig. 8 Schematic diagram of S-CAES-IES system^[61]

图9 CAES-CSP-AR-IES系统结构示意图^[62]Fig. 9 Schematic diagram of CAES-CSP-AR-IES system^[62]

热油储热方案, 具有更高的储热温度与更广的工作温区。

1.3 压缩空气储能与海水淡化系统耦合

1.3.1 耦合原理

海水淡化的方式主要可以分为热法与膜法, 热法主要包括多级闪蒸 (Multistage Flash, MSF) 和多效蒸馏 (Multi Effect Distillation, MED), 膜法主要指的是反渗透法, 其中, 反渗透法虽然能耗低, 但是维护成本高, 且会产生溴化物和氯化物等有毒物质, MED 与 MSF 相比具有较低的成本, 且不需要很高的运行温度, 是目前大规模海水淡化的最优选择, AA-CAES 与 MED 耦合的系统原理图如图 10 所示^[63-66]。AA-CAES-MED 耦合系统可以在充放电的同时生成淡水, AA-CAES 压缩时产生的热量可

以被回收储存在储热罐中, 这部分热量用于驱动膨胀机后, 剩余的中低温热源可以用于 MED 系统的蒸发器, 加热管外海水使其蒸发, 蒸汽冷凝成高纯度的淡水, 剩余的海水进入下一循环^[67-70]。

1.3.2 研究现状

目前, 对于 CAES 与海水淡化系统耦合的研究主要聚焦于其热力学性能和经济性, 通过集成可再生能源以及创新系统设计等方式, 优化系统效率、淡水产出和环境友好性。Tayefeh^[71] 提出了将 CAES 与 MED 相结合的新型 IES, CAES 的余热可作为蒸馏系统的驱动力, 他研究了带换热器与不带换热器的两种系统, 分别如图 11 (a) 和图 11 (b) 所示。与带换热器的系统相比, 不带换热器的系统产生的产水放率和往返效率分别提高了 255% 和 3%, 且投资与维护成本也显著降低。Javidmehr 等^[72] 研究了将 CAES、MED 和有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle, ORC) 集成的 IES, 如图 12 所示, 该系统采用 MED 替代 ORC 冷凝器, 并利用 ORC 膨胀后有机工质蒸汽的冷凝余热进行海水蒸馏, 可同时实现发电、供热与淡水制取。

1.4 压缩空气储能与其他新兴系统耦合

除了上述典型的 CCHP 系统、CSP 系统及海水淡化系统外, 为了突破地理限制并进一步提升能源利用深度, CAES 正逐步向“多形态混合储能”与“氢电耦合”等新兴方向拓展。

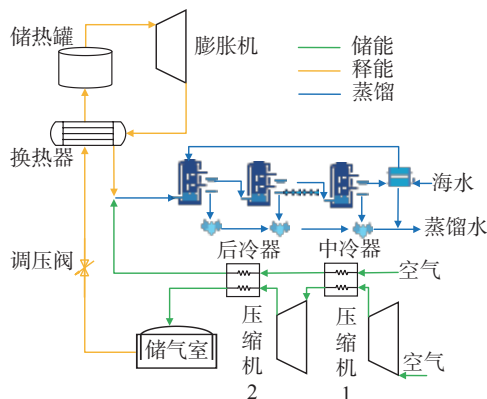
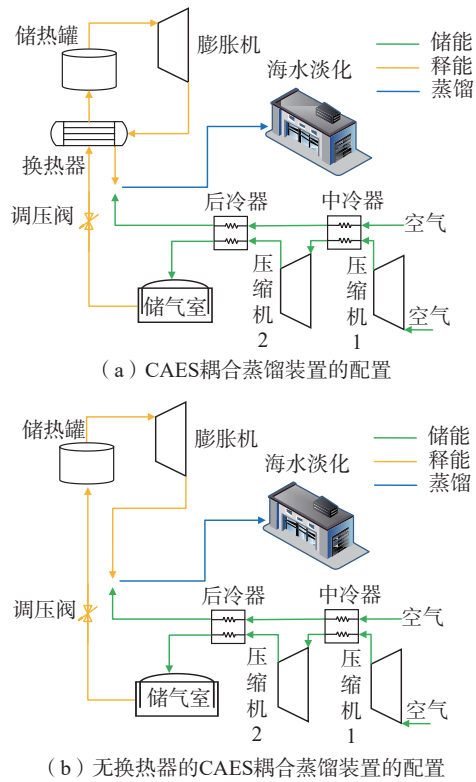


图10 AA-CAES-MED系统原理图

Fig. 10 Schematic diagram of AA-CAES-MED system

图 11 CAES-MED 耦合系统^[71]Fig. 11 Integrated CAES-MED system^[71]

1.4.1 集中-分布式混合储能

随着城镇化发展和乡村振兴政策的实施，乡镇

居民的生活质量持续改善，用电需求也随之增加，尹斌鑫等^[73]基于集中式 AA-CAES 电站增加了分布式液态空气储能（Liquid Air Energy Storage, LAES）电站，建立了集中-分布式混合 CAES 电站，如图 13 所示。系统运行时，集中式电站利用谷段电力驱动压缩机压缩空气，并将一部分压缩空气经换热后以高压气态形式储存在集中储气装置中，将压缩过程产生的热量储存在储热罐中；另一部分空气则经蓄冷回热后液化并储存在液态空气储罐中，连同蓄冷单元运输至负荷中心。到达用能侧后，液态空气在环境热源和回热单元作用下气化膨胀发电，从而形成“集中储能、分布释能”的运行模式。

1.4.2 与氢能及燃料电池耦合

随着氢能技术的发展，构建“电-热-氢”耦合系统成为 IES 的重要演进方向。固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）作为高效的发电装置，其运行温度高达 600~1000 ℃，产生的高温排气是 CAES 的理想补热来源。

Yun 等^[74]研究了一种基于 CAES 与 SOFC 的耦合系统，如图 14 所示。在该系统中，SOFC 产生的电力可直接驱动 CAES 压缩机进行储能，其高温尾气则通过换热器为 CAES 膨胀侧提供补热，从而减少外部化石燃料消耗并提升系统综合能源利用水平。

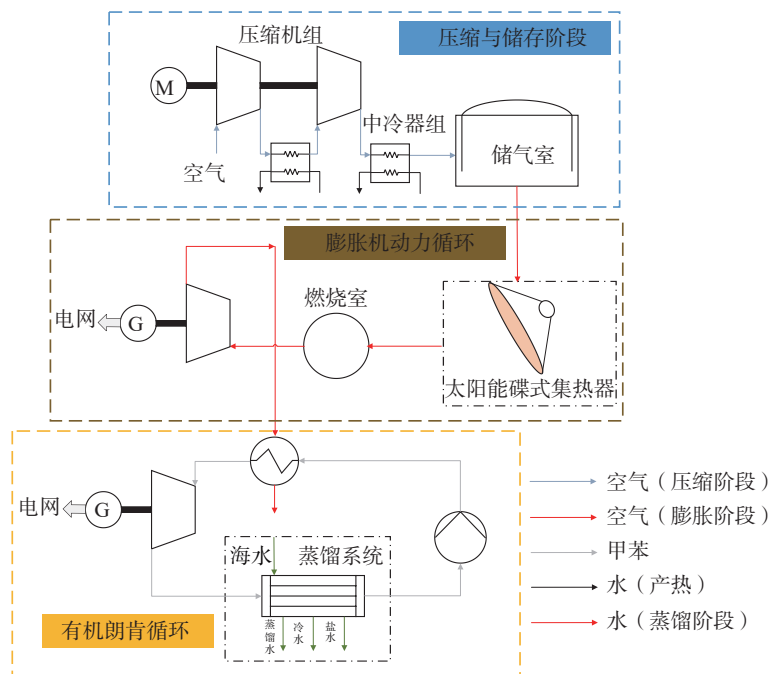
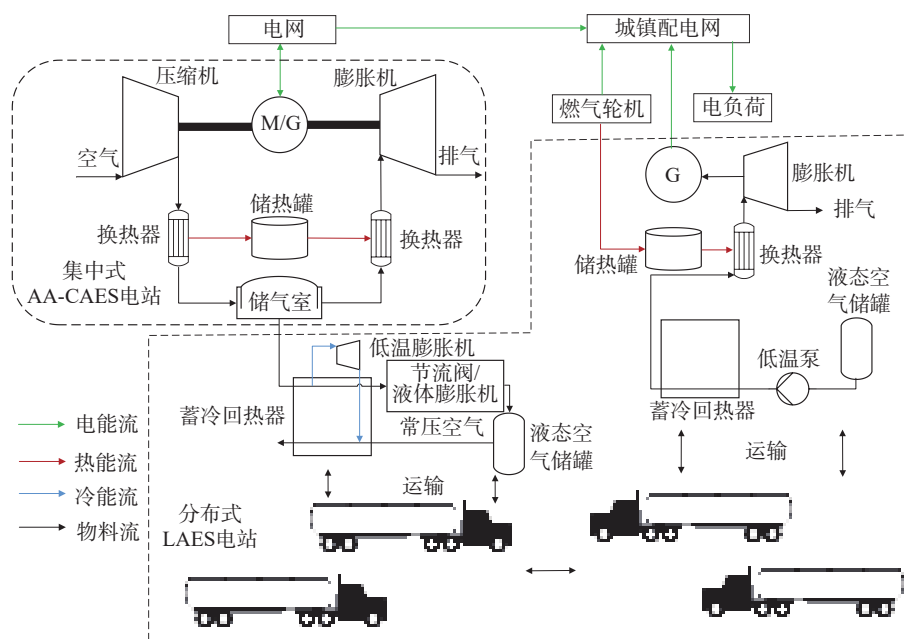


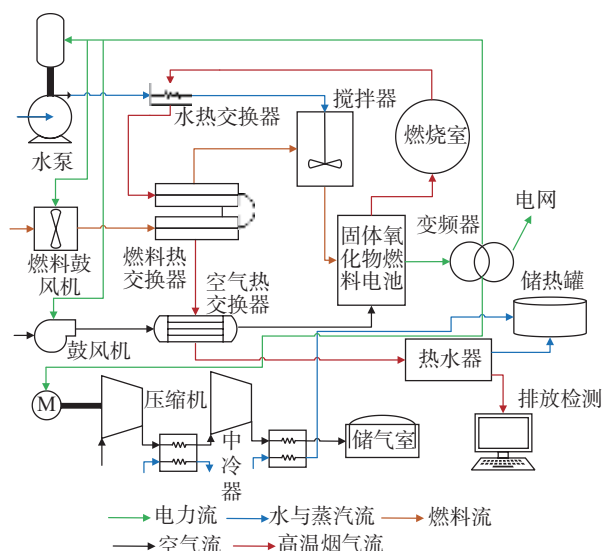
图 12 CAES-MED-ORC-IES 系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of CAES-MED-ORC-IES system

图 13 集中-分布式混合 CAES 电站示意图^[73]Fig. 13 Schematic diagram of hybrid centralized-distributed CAES station^[73]

此外, 该研究引入了人工智能作为关键控制手段, 通过机器学习算法对系统负荷进行预测, 并实时优化 SOFC 的产热与 CAES 的充放电策略。这种“物理设备互补+智能算法赋能”的模式, 为园区级 IES 的热回收利用与智能调度提供了范例。

2 集成压缩空气储能的综合能源系统示范项目

图 14 采用智能方法的 CAES-SOFC 系统示意图^[74]Fig. 14 Schematic diagram of CAES-SOFC system based on intelligent methods^[74]

国内外先后建成了多套 CAES 示范电站, 1978 年德国的 Brown Boveri 公司设计建造了世界上第一座正式投入使用的 CAES 电站——Huntorf 电站^[28, 75], 1991 年, 美国在 Alabama 建造的世界第二座 CAES 电站 McIntosh 电站正式投运^[76]。2014 年 3 月, 中国科学院工程热物理研究所在河北廊坊建成了 1.5 MW 级超临界压缩空气储能 (Supercritical Compressed Air Energy Storage, SC-CAES) 系统示范工程, 系统效率达到 52.1%^[77-78]。同年 11 月, 清华大学等在安徽芜湖建成 500 kW 级 AA-CAES 示范项目, 效率约 40%^[79-80]。2016 年 12 月, 中国科学院工程热物理研究所在贵州毕节开展了 10 MW 级 AA-CAES 系统联合调试, 并于 2021 年 10 月并网发电^[81]。2024 年 4 月, 由中储国能技术有限公司投建、位于山东肥城的 300 MW 先进 CAES 电站首次并网成功, 是当时国际上规模最大、效率最高、性能最优的新型 CAES 电站^[82]。

随着“双碳”目标的提出及 IES 理念的普及, CAES 正逐渐从单一的电力存储向“电-热-冷”多能联供及多系统耦合方向演进。近年来, 中国在这一领域取得了显著进展, 先后建成了一批具有代表性的示范工程。本节主要对一些典型示范项目进行介绍, 并将这些示范项目从系统配置、储能方式、装

机容量、减碳量、投资方、建成时间与地点等方面进行了整理与比较,最后汇总于表2。

表2 CAES-IES 示范项目汇总
Tab. 2 Summary of CAES-IES demonstration projects

项目名称	建成年份	地点	投资方	系统配置	储能方式	装机容量	减碳量	参考文献
青海大学校园智能微能源网系统	2017	青海省西宁市	青海大学	光伏系统+光热回收系统+热气流发电系统+储能系统	CAES+储热	100 kW	每年可减少CO ₂ 排放1 163.75 t	[83]
同里区域能源互联网示范区	2018	江苏省苏州市吴江区	国家电网有限公司	光伏电站+生物质电站+风电站+储能系统+数据中心	液态空气储能+电化学储能	900 kW	—	[84-85]
新华乌什构网型储能项目	2023	新疆维吾尔自治区	水电四局	太阳能集热系统+储能系统	磷酸铁锂电池+全钒液流电池+压缩二氧化碳储能	500 MW	每年可减少CO ₂ 排放39万t	[86-88]
华夏智慧遂宁船山综合能源利用项目	在建	四川省遂宁市船山区	华夏智慧能源有限公司	220 kV变电站+储能系统	CAES	200 MW	—	[89]
天津中新生态城国家绿色发展示范区(计划)	2035	天津市滨海新区	中新天津生态城管委会	光伏电站+风电站+生物质电站+绿色交通+物流+储能+数据中心	电化学储能+CAES+氢储能	—	每万元产值排放CO ₂ 少于0.20 t	[90]

2.1 园区级微网示范

2.1.1 青海大学智慧微能源网系统

青海地区的太阳能资源十分丰富,年总太阳辐射量可达5 560~7 400 MJ/m²,基于优越的自然环境条件,青海大学建设了国内首个基于太阳能的校园智能微能源网系统,该系统包含光热复合CAES系统、图书馆光伏微电网系统、太阳能人居环境系统以及高原热气流发电系统等多个子系统,如图15所示,能够实现冷-热-电三联供^[83]。

2.1.2 同里能源互联网示范区

2018年10月,由国家电网牵头的江苏省苏州市同里能源互联网示范区正式投运,该示范区航拍图如图16(a)所示,该示范区由太阳能、风能、

生物质能综合供能,在用电低谷期,电能可通过储热系统以热能的形式储存起来,实现热电联供。此外,该示范区基于一个500 kW的液态空气储能示范项目,可以有效地削峰填谷,抑制可再生能源的波动性和间歇性,如图16(b)所示^[84-85]。

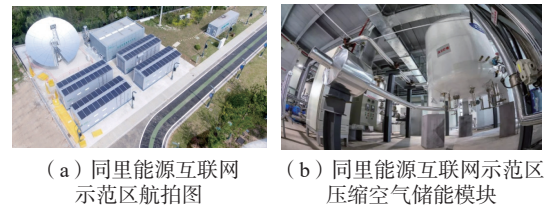


图16 同里能源互联网示范区航拍图及其压缩空气储能系统模块

Fig. 16 Aerial view of the Tongli energy internet demonstration zone and its CAES system module



图15 青海大学智慧微能源网

Fig. 15 Qinghai University smart micro-energy network

2.2 电网侧商业化示范

2.2.1 新华乌什构网型储能项目

乌什县年总日照时数超过2 800 h,拥有丰富的光热资源,2023年10月,位于乌什县阿合雅光伏产业园区的新华乌什500 MW/2 GW构网型储能项目正式启动。在该项目前期公布的方案中,储能系统包括磷酸铁锂电池、全钒液流电池以及压缩二氧化碳储能(CO₂ Energy Storage, CES)。CES是基于CAES的重要衍生与升级技术,利用CO₂易液化和超临界转换的物理特性,有效提升了系统的能量密度,代表了广义压缩空气储能技术的前沿发展方

向。该项目作为广义压缩空气储能技术与电化学储能技术耦合的典型示范, 为构建新型电力系统提供了重要的工程参考^[86-88]。

2.2.2 华夏智慧遂宁船山综合能源利用项目

2023 年 11 月, 由华夏智慧能源有限公司与船山区牵头的华夏智慧遂宁船山 200 MW 级 CAES 及综合能源利用项目在遂宁顺利通过评审, 于 2024 年正式启动建设, 对推动当地绿色低碳产业发展具有重要意义^[89]。

2.2.3 天津中新生态城国家绿色发展示范区

2024 年 8 月, 中新天津生态城建设国家绿色发展示范区方案正式获批, 该项目积极开发分布式能源调控系统, 实现电热冷气多能源协同互补, 拟选用锂电池、CAES 和氢储能的混合储能系统, 安全性高, 循环寿命长^[90]。

可以看出, 我国集成 CAES 的 IES 示范项目呈现出“因地制宜”的分布特点。西部地区(如青海、新疆)依托丰富的光热资源和地下空间, 侧重于大规模可再生能源消纳和长时储能。东部地区(如江苏、天津)侧重于负荷中心的冷热电联供及高能量密度的液态空气储能应用, 以解决土地资源受限和多能需求复杂的问题。政府的政策支持与电价机制的完善, 也是推动这些示范项目从单一技术验证向商业化运营转变的关键因素。

3 挑战与展望

尽管 CAES 在 IES 中的耦合应用展现出了巨大的潜力, 但在实际推广与大规模商业化进程中, 仍面临着诸多技术瓶颈与挑战。同时, 随着能源结构的转型, 其未来的发展方向也呈现出多维度的趋势。

3.1 面临的挑战

1) 多物理场深度耦合机理与动态响应匹配问题

目前的 CAES-IES 研究多基于稳态模型进行能量平衡计算, 忽略了系统在实际运行中的动态特性。IES 涉及电、热、冷、气等多种能流, 各子系统的响应时间尺度差异巨大。在源荷双侧随机波动下, CAES 的充放电过程不再是简单的启停, 而是频繁的变负荷调节。如何揭示多物理场下的动态耦合机理, 解决不同能流在时间尺度上的匹配问题, 是实现系统稳定运行的关键挑战。

2) 复杂系统的多目标优化与容量配置问题

CAES-IES 耦合系统包含光热、海水淡化、供冷供热等多个模块, 各模块之间存在强耦合与强非线性。传统的单目标优化往往难以兼顾经济性与环境性。如何在满足多元负荷需求的前提下, 综合考虑设备寿命、碳排放、投资回报周期等因素, 进行系统容量的精细化配置与协同优化, 是一个极具挑战性的技术与经济问题。

3) 关键透平机械的宽工况高效运行问题

在 IES 中, 为了平抑可再生能源波动, 压缩机与膨胀机需长期运行在非设计工况下。现有的工业级透平机械多针对额定工况设计, 在大幅度偏离设计点运行时, 其等熵效率会显著下降, 甚至面临喘振或阻塞等安全风险。研发具有宽负荷调节能力、在变工况下仍能保持高效率的新型压缩膨胀设备, 是提升 CAES-IES 系统全生命周期能效的硬件基础。

3.2 技术展望

1) 向高密度与混合储能方向发展

针对传统 CAES 能量密度较低的问题, 未来将向 SC-CAES 等方向演进。此外, 单一储能技术难以同时满足高功率突变和长时能量平移的需求。构建由“CAES+飞轮/超级电容/锂电池”组成的混合储能系统, 利用功率型储能承担高频波动调节, 利用 CAES 承担长时削峰填谷任务, 将是提升 IES 整体经济性和可靠性的主流技术路线。

2) 基于数字孪生与人工智能的智慧调控

随着人工智能技术的成熟, CAES-IES 的控制将从传统的 PID 控制向智能预测控制转变。利用数字孪生技术建立系统的高保真虚拟模型, 结合深度学习算法对风光资源和用户负荷进行超短期精准预测, 可实现“源-网-荷-储”的实时互动与全局最优调度, 最大化系统的经济效益。

3) 商业模式创新与多市场参与

目前 CAES-IES 项目多为示范工程, 缺乏成熟的商业盈利模式。未来应探索 CAES 参与电力辅助服务市场、容量市场以及碳交易市场的多渠道盈利机制。特别是在碳中和背景下, 量化 CAES 在冷热电联供中的碳减排效益, 并将其转化为经济价值, 将是推动其商业化发展的关键动力。

4 结论

本文在“双碳”目标背景下, 系统阐述了包含

储能的 IES 发展的必要性,重点剖析了 CAES 作为一种长时物理储能技术,凭借其独特的冷热电联供特性,在 IES 中具有不可替代的优势。通过对现有研究成果的梳理与分析,得出以下主要结论:

1) 技术优势显著: CAES 不仅能提供大规模电力存储,其压缩热与膨胀冷能的梯级利用特性契合 IES 的多能需求。相比于其他储能方式,CAES 在寿命、规模及多能耦合潜力上均具有显著优势。

2) 耦合模式多样: 现有的耦合研究已覆盖了冷热电联供、太阳能集热补热、海水淡化以及氢能互补等多个领域。研究表明,通过热整合技术解决 CAES 的热能管理问题,不仅提升了储能效率,更大幅提高了 IES 的一次能源利用率。

3) 示范应用加速: 国内外已建成多个集成 CAES 的综合能源示范项目,验证了其在削峰填谷、消纳新能源及多能供应方面的工程可行性。从园区级微网到电网侧大型电站,CAES 的应用场景正在不断拓宽。

4) 关键问题仍待突破: 当前 CAES-IES 研究仍以稳态分析和局部优化为主,在多能流动态耦合机理、关键透平机械宽工况高效运行以及面向实际场景的智能调控等方面仍存在明显不足。未来应进一步聚焦于多能流动态耦合机理研究、关键设备的宽工况适应性以及基于人工智能的智慧调控策略,以推动该技术从理论研究走向大规模商业化应用,为实现能源绿色低碳转型提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 林子涵. 中国加快能源绿色低碳转型 [N]. 人民日报海外版, 2024-07-23(010). DOI: 10.28656/n.cnki.nrmrh.2024.002375.
LIN Z H. China accelerates the green and low-carbon energy transition [N]. People's Daily Oversea, 2024-07-23(010). DOI: 10.28656/n.cnki.nrmrh.2024.002375.
- [2] ZHAO X, MA X, CHEN B, et al. Challenges toward carbon neutrality in China: strategies and countermeasures [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2022, 176: 105959. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105959.
- [3] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(8): 189-207. DOI: 10.7500/AEPS20210703002.
ZHANG S X, WANG D Y, CHENG H Z, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(8): 189-207. DOI: 10.7500/AEPS20210703002.
- [4] SHEN H T, ZHANG H L, XU Y J, et al. Multi-objective capacity configuration optimization of an integrated energy system considering economy and environment with harvest heat [J]. *Energy conversion and management*, 2022, 269: 116116. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116116.
- [5] WANG Y Z, HAN Y B, SHEN J, et al. Data center integrated energy system for sustainability: generalization, approaches, methods, techniques, and future perspectives [J]. *The innovation energy*, 2024, 1(1): 100014. DOI: 10.59717/j.xinn-energy.2024.100014.
- [6] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的能源转型 [EB/OL]. (2024-08-29) [2024-11-01]. <http://www.scio.gov.cn/gxzt/dtzt/2024zt/zgnyzxbps/index.html>.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's Energy Transition [EB/OL]. (2024-08-29) [2024-11-01]. <http://www.scio.gov.cn/gxzt/dtzt/2024zt/zgnyzxbps/index.html>.
- [7] YAN R J, WANG J J, HUO S J, et al. Flexibility improvement and stochastic multi-scenario hybrid optimization for an integrated energy system with high-proportion renewable energy [J]. *Energy*, 2023, 263: 125779. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125779.
- [8] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要 [EB/OL]. (2026-03-13) [2026-03-25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202603/content_7062633.htm.
Xinhua News Agency. The 15th five-year plan for national economic and social development of the People's Republic of China [EB/OL]. (2026-03-13) [2026-03-25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202603/content_7062633.htm.
- [9] WANG Y J, WANG R, TANAKA K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China [J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 761-767. DOI: 10.1038/S41586-023-06180-8.
- [10] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2806-2819. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2806-2819. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
- [11] 梅生伟, 李建林, 朱建全. 储能技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
MEI S W, LI J L, ZHU J Q. Energy storage [M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [12] MISTRY A. Ion dynamics in battery materials imaged rapidly [J]. *Nature*, 2021, 594(7864): 503-504. DOI: 10.1038/D41586-021-01600-Z.
- [13] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 47-53. DOI: 10.7500/AEPS2012

- 10003.
- JIANG K, LI H M, LI W, et al. On several battery technologies for power grids [J]. *Automation of electric power systems*, 2013, 37(1): 47-53. DOI: [10.7500/AEPS201210003](https://doi.org/10.7500/AEPS201210003).
- [14] 罗星, 王吉红, 马钊. 储能技术综述及其在智能电网中的应用展望 [J]. *智能电网*, 2014, 2(1): 7-12. DOI: [10.3969/j.issn.2095-5944.2014.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5944.2014.01.002).
- LUO X, WANG J H, MA Z. Overview of energy storage technologies and their application prospects in smart grid [J]. *Smart grid*, 2014, 2(1): 7-12. DOI: [10.3969/j.issn.2095-5944.2014.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5944.2014.01.002).
- [15] 贾志军, 宋士强, 王保国. 液流电池储能技术研究现状与展望 [J]. *储能科学与技术*, 2012, 1(1): 50-57.
- JIA Z J, SONG S Q, WANG B G. A critical review on redox flow batteries for electrical energy storage applications [J]. *Energy storage science and technology*, 2012, 1(1): 50-57.
- [16] 伍岳, 肖立业. 超导体在电力输送与储能领域的应用 [J]. *现代物理知识*, 2025, 37(1): 3-10. DOI: [10.13405/j.cnki.xdwz.2025.01.002](https://doi.org/10.13405/j.cnki.xdwz.2025.01.002).
- WU Y, XIAO L Y. The application of superconductors in the fields of power transmission and energy storage [J]. *Modern physics*, 2025, 37(1): 3-10. DOI: [10.13405/j.cnki.xdwz.2025.01.002](https://doi.org/10.13405/j.cnki.xdwz.2025.01.002).
- [17] 张晓飞, 蒋利军, 叶建华, 等. 固态储氢技术的研究进展 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 345-354. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0536](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0536).
- ZHANG X F, JIANG L J, YE J H, et al. Research progress of solid-state hydrogen storage technology [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(6): 345-354. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0536](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0536).
- [18] 唐西胜, 姜彦涛, 戴兴建, 等. 飞轮储能技术及其构网应用展望 [J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(11): 1-13. DOI: [10.7500/AEPS20240424010](https://doi.org/10.7500/AEPS20240424010).
- TANG X S, LOU Y T, DAI X J, et al. Flywheel energy storage technology and prospect of its grid-forming application [J]. *Automation of electric power systems*, 2025, 49(11): 1-13. DOI: [10.7500/AEPS20240424010](https://doi.org/10.7500/AEPS20240424010).
- [19] PANDA A, MISHRA U, AVISO K B. Optimizing hybrid power systems with compressed air energy storage [J]. *Energy*, 2020, 205: 117962. DOI: [10.1016/j.energy.2020.117962](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117962).
- [20] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments [J]. *Journal of energy storage*, 2020, 27: 101047. DOI: [10.1016/j.est.2019.101047](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047).
- [21] ASSOCIATION I H. 2025 World hydropower outlook [EB/OL]. (2025-06-25) [2025-07-28]. <https://www.hydropower.org/publications/2025-world-hydropower-outlook>.
- [22] 李子钰, 吕宏, 李祖辉, 等. 空气压缩储能的发展现状及其应用前景 [J]. *资源节约与环保*, 2023(8): 5-8. DOI: [10.16317/j.cnki.12-1377/x.2023.08.032](https://doi.org/10.16317/j.cnki.12-1377/x.2023.08.032).
- LI Z Y, LYU H, LI Z H, et al. The current status and application prospects of air compression energy storage [J]. *Resources economization & environmental protection*, 2023(8): 5-8. DOI: [10.16317/j.cnki.12-1377/x.2023.08.032](https://doi.org/10.16317/j.cnki.12-1377/x.2023.08.032).
- [23] LI Y H, XU W B, ZHANG M, et al. Performance analysis of a novel medium temperature compressed air energy storage system based on inverter-driven compressor pressure regulation [J]. *Frontiers in energy*, 2025, 19(2): 144-156. DOI: [10.1007/s11708-024-0921-0](https://doi.org/10.1007/s11708-024-0921-0).
- [24] ZHANG X F, ZENG R, DENG Q L, et al. Energy, exergy and economic analysis of biomass and geothermal energy based CCHP system integrated with compressed air energy storage (CAES) [J]. *Energy conversion and management*, 2019, 199: 111953. DOI: [10.1016/j.enconman.2019.111953](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111953).
- [25] YAO E R, ZHONG L K, LI R X, et al. 4E analysis and optimization of a novel combined cooling, heating and power system integrating compressed air and chemical energy storage with internal combustion engine [J]. *Journal of energy storage*, 2023, 62: 106777. DOI: [10.1016/j.est.2023.106777](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106777).
- [26] GUNAY M S, TEPE Y. Classification and assessment of energy storage systems [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 75: 1187-1197. DOI: [10.1016/j.rser.2016.11.102](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102).
- [27] WANG J D, MA L, LU K P, et al. Current research and development trend of compressed air energy storage [J]. *Systems science & control engineering*, 2017, 5(1): 434-448. DOI: [10.1080/21642583.2017.1377645](https://doi.org/10.1080/21642583.2017.1377645).
- [28] ZHANG X J, GAO Z Y, ZHOU B Q, et al. Advanced compressed air energy storage systems: fundamentals and applications [J]. *Engineering*, 2024, 34: 246-269. DOI: [10.1016/j.eng.2023.12.008](https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.12.008).
- [29] TIANO F A, RIZZO G. Use of an under-water compressed air energy storage (UWCAES) to fully power the sicily region (italy) with renewable energy: a case study [J]. *Frontiers in mechanical engineering*, 2021, 7: 641995. DOI: [10.3389/fmech.2021.641995](https://doi.org/10.3389/fmech.2021.641995).
- [30] LI Y W, MIAO S H, LUO X, et al. Dynamic modelling and techno-economic analysis of adiabatic compressed air energy storage for emergency back-up power in supporting microgrid [J]. *Applied energy*, 2020, 261: 114448. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.114448](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114448).
- [31] ZHANG X J, XU Y J, XU J, et al. Study on the performance and optimization of a scroll expander driven by compressed air [J]. *Applied energy*, 2017, 186(Pt 3): 347-358. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.004).
- [32] 黄志高, 林应斌, 李传常. 储能原理与技术 (2 版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- HUANG Z G, LIN Y B, LI C C. Principles and technology for energy storage (2nd ed.) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [33] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent

- developments [J]. *Applied energy*, 2016, 170: 250-268. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.02.108](#).
- [34] ZHOU Q, DU D M, LU C, et al. A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system [J]. *Energy*, 2019, 188: 115993. DOI: [10.1016/j.energy.2019.115993](#).
- [35] TONG Z M, CHENG Z W, TONG S G. A review on the development of compressed air energy storage in China: technical and economic challenges to commercialization [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2021, 135: 110178. DOI: [10.1016/j.rser.2020.110178](#).
- [36] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 2893-2907. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138](#).
MEI S W, LI R, CHEN L J, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2893-2907. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138](#).
- [37] ZHU J Z, DONG H J, ZHENG W Y, et al. Review and prospect of data-driven techniques for load forecasting in integrated energy systems [J]. *Applied energy*, 2022, 321: 119269. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.119269](#).
- [38] 袁越, 苗安康, 吴涵, 等. 低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(9): 4019-4036. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20232247](#).
YUAN Y, MIAO A K, WU H, et al. Review of the research framework and key issues for low-carbon integrated energy system [J]. *High voltage engineering*, 2024, 50(9): 4019-4036. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20232247](#).
- [39] 张苏涵, 顾伟, 俞睿智, 等. 综合能源系统建模与仿真: 综述、思考与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(17): 1-21. DOI: [10.7500/AEPS20231129001](#).
ZHANG S H, GU W, YU R Z, et al. Modeling and simulation of integrated energy system: review, reflection and prospects [J]. *Automation of electric power systems*, 2024, 48(17): 1-21. DOI: [10.7500/AEPS20231129001](#).
- [40] WU N Y, ZHANG F Z, WANG J J, et al. A review on modelling methods, tools and service of integrated energy systems in China [J]. *Progress in energy*, 2023, 5(3): 032003. DOI: [10.1088/2516-1083/acef9e](#).
- [41] KANG L G, WU X J, YUAN X X, et al. Performance indices review of the current integrated energy system: from history and projects in China [J]. *Sustainable energy technologies and assessments*, 2022, 53: 102785. DOI: [10.1016/j.seta.2022.102785](#).
- [42] 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. DOI: [10.1016/j.rser.2022.112701](#).
- [43] MULLANU S, CHUA C, MOLNAR A, et al. Artificial intelligence for hydrogen-enabled integrated energy systems: a systematic review [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2025, 141: 283-303. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.08.013](#).
- [44] EL-EMAM R S, CONSTANTIN A, BHATTACHARYYA R, et al. Nuclear and renewables in multipurpose integrated energy systems: a critical review [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2024, 192: 114157. DOI: [10.1016/j.rser.2023.114157](#).
- [45] SI S Q, DOU Z H, WANG Z C, et al. The analysis of time-sharing economic exergy efficiency of the CCHP system using planetary search algorithms [J]. *Journal of computational methods in sciences and engineering*, 2023, 23(4): 2205-2224. DOI: [10.3233/JCM-226745](#).
- [46] 韩中合, 胡庆亚, 李鹏. 基于压缩空气储能的 CCHP 系统特性研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 409-415. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0406](#).
HAN Z H, HU Q Y, LI P. Research on characteristics of CCHP system based on compressed air energy storage [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(10): 409-415. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0406](#).
- [47] HAN Z H, SUN Y, LI P. Thermo-economic analysis and optimization of a combined cooling, heating and power system based on advanced adiabatic compressed air energy storage [J]. *Energy conversion and management*, 2020, 212: 112811. DOI: [10.1016/j.enconman.2020.112811](#).
- [48] JIANG R H, CAI Z D, PENG K W, et al. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of polygeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Energy conversion and management*, 2021, 229: 113724. DOI: [10.1016/j.enconman.2020.113724](#).
- [49] LI Y W, YAO F X, ZHANG S X, et al. An optimal dispatch model of adiabatic compressed air energy storage system considering its temperature dynamic behavior for combined cooling, heating and power microgrid dispatch [J]. *Journal of energy storage*, 2022, 51: 104366. DOI: [10.1016/j.est.2022.104366](#).
- [50] HE X, WANG H R, LI R X, et al. Thermo-conversion of a physical energy storage system with high-energy density: combination of thermal energy storage and gas-steam combined cycle [J]. *Energy*, 2022, 239: 122325. DOI: [10.1016/j.energy.2021.122325](#).
- [51] CHEN S, ZHU T, GAN Z X, et al. Optimization of operation strategies for a combined cooling, heating and power system based on adiabatic compressed air energy storage [J]. *Journal of thermal science*, 2020, 29(5): 1135-1148. DOI: [10.1007/s11630-020-1170-0](#).
- [52] LI K, WEI X G, YAN Y, et al. Bi-level optimization design strategy for compressed air energy storage of a combined cooling, heating, and power system [J]. *Journal of energy storage*, 2020, 31: 101642. DOI: [10.1016/j.est.2020.101642](#).
- [53] HE X, LI C C, WANG H R. Thermodynamics analysis of a combined cooling, heating and power system integrating compressed air energy storage and gas-steam combined cycle

- [J]. *Energy*, 2022, 260: 125105. DOI: [10.1016/j.energy.2022.125105](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125105).
- [54] FU H L, HUA Q S, SHI J, et al. Photothermal-assisted scheme design and thermodynamic analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Renewable energy*, 2023, 215: 118927. DOI: [10.1016/j.renene.2023.118927](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118927).
- [55] HAMAD J, AHMAD M, ZEESHAN M. Solar energy resource mapping, site suitability and techno-economic feasibility analysis for utility scale photovoltaic power plants in Afghanistan [J]. *Energy conversion and management*, 2024, 303: 118188. DOI: [10.1016/j.enconman.2024.118188](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118188).
- [56] CHEN J, LIU W, JIANG D Y, et al. Preliminary investigation on the feasibility of a clean CAES system coupled with wind and solar energy in China [J]. *Energy*, 2017, 127: 462-478. DOI: [10.1016/j.energy.2017.03.088](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.088).
- [57] BEN HAMIDA M B, BASEM A, RAJAB H, et al. Dynamic optimization of a solar-sCO₂-CAES hybrid energy system: integration of green hydrogen production and al-based energy management [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2025, 146: 149888. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2025.06.078](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.06.078).
- [58] MOUSAVI S B, AHMADI P, POURAHMADIYAN A, et al. A comprehensive techno-economic assessment of a novel compressed air energy storage (CAES) integrated with geothermal and solar energy [J]. *Sustainable energy technologies and assessments*, 2021, 47: 101418. DOI: [10.1016/j.seta.2021.101418](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101418).
- [59] CARVALHO J E S P, PRADELLE F, RULLIÈRE R, et al. Seasonal assessment of a hybrid CCHP-photovoltaic system coupled with CAES for a residential building in Rio de Janeiro: Energetic, exergetic, exergoeconomic and environmental analysis [J]. *Energy conversion and management*, 2025, 329: 119637. DOI: [10.1016/j.enconman.2025.119637](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119637).
- [60] BU S J, YANG X L, SUN Y, et al. Thermodynamic performances analyses and process optimization of a novel AA-CAES system coupled with solar auxiliary heat and organic rankine cycle [J]. *Energy reports*, 2022, 8: 12799-12808. DOI: [10.1016/j.egy.2022.09.133](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.133).
- [61] WANG X S, YANG C, HUANG M M, et al. Multi-objective optimization of a gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system [J]. *Energy conversion and management*, 2018, 164: 93-101. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.02.081](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.081).
- [62] SALEH KANDEZI M, MOUSAVI NAEENIAN S M. Thermodynamic and economic analysis of a novel combination of the heliostat solar field with compressed air energy storage (CAES); a case study at San Francisco, USA [J]. *Journal of energy storage*, 2022, 49: 104111. DOI: [10.1016/j.est.2022.104111](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104111).
- [63] MOGHIMI M, EMADI M, AKBARPOOR A M, et al. Energy and exergy investigation of a combined cooling, heating, power generation, and seawater desalination system [J]. *Applied thermal engineering*, 2018, 140: 814-827. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2018.05.092](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.092).
- [64] BEHZADI A, HABIBOLLAHZADE A, ZARE V, et al. Multi-objective optimization of a hybrid biomass-based SOFC/GT/double effect absorption chiller/RO desalination system with CO₂ recycle [J]. *Energy conversion and management*, 2019, 181: 302-318. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.11.053](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.053).
- [65] SADRI S, KHOSHKHOO R H, AMERI M. Optimum exergoeconomic modeling of novel hybrid desalination system (MEDAD+RO) [J]. *Energy*, 2018, 149: 74-83. DOI: [10.1016/j.energy.2018.02.006](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.006).
- [66] KHALILZADEH S, NEZHAD A H. Utilization of waste heat of a high-capacity wind turbine in multi effect distillation desalination: energy, exergy and thermoeconomic analysis [J]. *Desalination*, 2018, 439: 119-137. DOI: [10.1016/j.desal.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.04.010).
- [67] RAZMI A, SOLTANI M, TAYEFEH M, et al. Thermodynamic analysis of compressed air energy storage (CAES) hybridized with a multi-effect desalination (MED) system [J]. *Energy conversion and management*, 2019, 199: 112047. DOI: [10.1016/j.enconman.2019.112047](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112047).
- [68] TAYEFEH M. An innovative rearrangement and comprehensive comparison of the combination of compressed air energy storage (CAES) with multi stage flash (MSF) desalination and multi effect distillation (MED) systems [J]. *Journal of energy storage*, 2022, 52: 105025. DOI: [10.1016/j.est.2022.105025](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105025).
- [69] KHALEGHI S, ASIAEI S, SIAVASHI M. A smart grid poly-generation design for hot arid regions composed of multi-effect distillation (MED), compressed air energy storage (CAES), and parabolic trough solar collector field (PTSC) [J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 372: 133693. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.133693](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133693).
- [70] CHITGAR N, SADRZADEH M. Optimizing sustainable energy systems: a comparative study of geothermal-powered desalination for green hydrogen production [J]. *Desalination*, 2025, 593: 118219. DOI: [10.1016/j.desal.2024.118219](https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118219).
- [71] TAYEFEH M. Exergy and economic analysis of a novel integration of compressed air energy storage with multi-effect distillation and multi-stage flash systems [J]. *Journal of energy storage*, 2022, 55: 105534. DOI: [10.1016/j.est.2022.105534](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105534).
- [72] JAVIDMEHR M, JODA F, MOHAMMADI A. Thermodynamic and economic analyses and optimization of a multi-generation system composed by a compressed air storage, solar dish collector, micro gas turbine, organic Rankine cycle, and desalination system [J]. *Energy conversion and management*, 2018, 168: 467-481. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.05.019](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.019).
- [73] 尹斌鑫, 苗世洪, 李姚旺, 等. 集中-分布式混合压缩空气储能电站优化规划策略 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(5): 53-64. DOI: [10.7500/AEPS20220330006](https://doi.org/10.7500/AEPS20220330006).

- YIN B X, MIAO S H, LI Y W, et al. Modeling and planning strategy for centralized-distributed hybrid compressed air energy storage station [J]. *Automation of electric power systems*, 2023, 47(5): 53-64. DOI: 10.7500/AEPS20220330006.
- [74] YUN P Y, WU H P, ALSENANI T R, et al. On the utilization of artificial intelligence for studying and multi-objective optimizing a compressed air energy storage integrated energy system [J]. *Journal of energy storage*, 2024, 84: 110839. DOI: 10.1016/j.est.2024.110839.
- [75] JAFARIZADEH H, SOLTANI M, NATHWANI J. Assessment of the Huntorf compressed air energy storage plant performance under enhanced modifications [J]. *Energy conversion and management*, 2020, 209: 112662. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112662.
- [76] SOLTANI M, MORADI KASHKOOL F, JAFARIZADEH H, et al. Diabatic compressed air energy storage (CAES) systems: state of the art [M]//CABEZA L F. *Encyclopedia of Energy Storage*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 173-187. DOI: 10.1016/B978-0-12-819723-3.00066-4.
- [77] 郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 等. 压缩空气储能示范进展及商业应用前景综述 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003.
- GUO Z G, MA X Y, LEI J Y, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003.
- [78] 中国科学院工程热物理研究所. 先进压缩空气储能系统理论研究与技术研究成果通过鉴定 [EB/OL]. (2014-04-03) [2024-03-29]. <http://www.china-nengyuan.com/tech/60032.html>.
- Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. The theoretical research and technological development achievements of advanced compressed air energy storage systems have been officially recognized. [EB/OL]. (2014-04-03) [2024-03-29]. <http://www.china-nengyuan.com/tech/60032.html>.
- [79] 清华大学电机工程与应用电子技术系. 清华大学电机系承担的“压缩空气储能发电项目”取得重要进展 [EB/OL]. (2014-11-28) [2024-03-29]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/3879.htm>.
- Department of Electrical Engineering, Tsinghua University. The "Compressed Air Energy Storage Power Generation Project" undertaken by the Department of Electrical Engineering at Tsinghua University has made significant progress [EB/OL]. (2014-11-28) [2024-03-29]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/3879.htm>.
- [80] MEI S W, LI R, XUE X D, et al. Paving the way to smart micro energy grid: concepts, design principles, and engineering practices [J]. *CSEE journal of power and energy systems*, 2017, 3(4): 440-449. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2016.01930.
- [81] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021 年中国储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105.
- CHEN H S, LI H, MA W T, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11(3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105.
- [82] Zhong-Chu-Guo-Neng (Beijing) Technology Co. Ltd. The world's first 300 MW a-caes project has connected to the grid [EB/OL]. (2024-05-04) [2025-08-01]. <https://www.caes.store/newsinfo/7125488.html>.
- [83] 刘亮. 青海大学智慧微能源网的实践与探索 [J]. *中国电力企业管理*, 2017(28): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3361.2017.10.008.
- LIU L. The practice and exploration of the smart micro-energy network at Qinghai University [J]. *China power enterprise management*, 2017(28): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3361.2017.10.008.
- [84] 中国能源建设集团有限公司. 中国能建承建同里综合能源服务中心投运 [EB/OL]. (2018-10-24) [2024-08-20]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c9729104/content.html>.
- China Energy Construction Group Co., Ltd. China Energy Construction Group Co., Ltd. has undertaken the construction of the Tongli Town integrated energy service center and it has been put into operation [EB/OL]. (2018-10-24) [2024-08-20]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c9729104/content.html>.
- [85] 徐怡悦, 晏阳, 周江山. 同里综合能源服务中心工程 [J]. *智能建筑电气技术*, 2023, 17(5): 51-55. DOI: 10.13857/j.cnki.cn11-5589/tu.2023.05.007.
- XU Y Y, YAN Y, ZHOU J S. Tongli comprehensive energy service center project [J]. *Electrical technology of intelligent buildings*, 2023, 17(5): 51-55. DOI: 10.13857/j.cnki.cn11-5589/tu.2023.05.007.
- [86] 中国电力建设集团有限公司. 新华乌什 50 万千瓦/200 万千瓦时构网型储能项目 220 千伏升压汇集站并网带电 [EB/OL]. (2024-10-18) [2024-10-20]. https://www.cpn.com.cn/news/xny/202410/t20241018_1743796.html.
- Power Construction Corporation of China. The Xin Hua Wushi 500 MW/2 GWh grid-connected energy storage project 220 kV booster collection substation has been connected to the grid and is operational [EB/OL]. (2024-10-18) [2024-10-20]. https://www.cpn.com.cn/news/xny/202410/t20241018_1743796.html.
- [87] 邓红双, 景田华. 新华乌什储能项目标准化管理实践 [J]. *中国电力企业管理*, 2025(3): 52-53.
- DENG H S, JING T H. The standardized management practice of the Xinhua Ushu energy storage project [J]. *China power enterprise management*, 2025(3): 52-53.
- [88] 李佳忆. “碳”秘国产最大“骆驼” [N]. *中国核工业报*, 2025-02-19(001).
- LI J Y. Inside China's largest "camel-shaped" energy storage container [N]. *China nuclear industry news*, 2025-02-19(001).

[89] 遂宁市发展和改革委员会. 川内首个压缩空气储能项目将落户船山 [EB/OL]. (2023-12-05) [2024-08-23]. <https://sfzggw.suining.gov.cn/xinwen/show/ca15bfff58ca242ae11a977680659074.html>.
Suining Municipal Development and Reform Commission. The first compressed air energy storage project in Sichuan will be located in Chuanshan [EB/OL]. (2023-12-05) [2024-08-23]. <https://sfzggw.suining.gov.cn/xinwen/show/ca15bfff58ca242ae11a977680659074.html>.

[90] 国家发展改革委. 中新天津生态城建设国家绿色发展示范区实施方案 (2024-2035 年) [EB/OL]. (2024-08-14) [2024-08-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6971015.htm.
National Development and Reform Commission. Implementation plan for the China-Singapore Tianjin Eco-City as a national green development demonstration zone (2024~2035) [EB/OL]. (2024-08-14) [2024-08-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6971015.htm.

作者简介：



王润泽

王润泽（第一作者）
2000-，男，硕士，主要从事综合能源系统研究工作（e-mail）wangrunze2023@163.com。



张新敬

张新敬（通信作者）
1981-，男，研究员，博士生导师，博士，主要从事压缩空气储能、综合能源系统研究工作（e-mail）zhangxinjing@iet.cn。

（责任编辑 徐嘉铖）