第 51 卷 第 5 期：2061-2077 高电压技术 Vol.51, No.5: 2061-2077
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250374

氢能提升火电机组灵活性研究综述及展望

袁铁江[1]，王　康[1]，滕　越[2]，邓占锋[3]
（1. 大连理工大学电气工程学院，大连 116024；2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院，合肥 230601；
3. 北京怀柔实验室，北京 101400）

摘　要：新型电力系统背景下，新能源占比持续攀升，电网灵活性调节需求大幅增加，火电装机占比显著下降，迫使现役火电机组具备更强的调节能力和更高的灵活性。为此，推动火电机组灵活性改造成为提升电力系统调节能力、保障能源安全的关键。氢能具有绿色清洁、长时大规模存储和高能量密度等优势，通过制-储-用氢环节与火电耦合，有望提升火电深度调峰能力、降低碳排放，为火电灵活性改造提供低碳、高效的全新技术路径。结合火电与氢能产业的发展趋势和政策支撑，概述氢能对提升火电灵活性的应用前景。针对储氢耦合火电机组与储电、储热耦合的技术特征进行对比分析，明确储氢耦合优势。基于当前技术条件与需求，探索火电-氢能耦合技术的可行设计方案，重点分析耦合集成过程涉及的结构设计、动态调控和评价机制等关键问题，深入剖析制-储-用氢各环节与火电耦合技术瓶颈，并提出拟解决思路展望，以期为氢能提升火电机组灵活性研究与应用提供参考。
关键词：火电机组；氢能；灵活性改造；深度调峰；电热耦合；集成设计

Review and Prospect of Hydrogen Energy to Enhance the Flexibility of Thermal Power Generating Units

YUAN Tiejiang[1], WANG Kang[1], TENG Yue[2], DENG Zhanfeng[3]
(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Research Institute of Electric Power Science, State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Hefei 230601, China;
3. Beijing Huairou Laboratory, Beijing 101400, China)

Abstract: Under the new power system, the share of renewable energy has significantly increased the demands for grid flexibility regulation, while the decline in thermal power capacity necessitates faster response and greater operational flexibility. Advancing thermal power flexibility transformation has become key to enhancing grid regulation and ensuring energy security. Hydrogen energy, with its advantages of being clean, long-term scalable, and high in energy density, offers a promising solution. By coupling hydrogen production, storage, and utilization with thermal power, deep peak shaving can be enhanced, and carbon emissions can be reduced, providing a low-carbon and high-efficiency pathway for thermal power flexibility transformation. This paper reviews policy trends and industry developments, examines the feasibility and prospects of hydrogen energy in improving thermal power flexibility, and analyzes the advantages of hydrogen storage-thermal power coupling compared to power storage–thermal power and heat storage-thermal power coupling. Unlike power and heat storage, which are limited by short-duration capacity or single-mode regulation, hydrogen storage coupling enables multi-timescale energy buffering, enhances electric–thermal synergy, and improves system scheduling flexibility. Additionally, this paper explores feasible design schemes, and addresses key challenges in structural design, process control, and evaluation mechanisms. Finally,this paper further investigates technical bottlenecks in hydrogen production-storage-use integration,such as energy flow coupling, dynamic matching, and safety constraints,and proposes potential solutions to support research, engineering applications, and large-scale deployment of hydrogen-enhanced thermal power flexibility.
Key words: thermal power generating units; hydrogen energy; flexibility retrofit; deep peaking; electric-thermal coupling; integrated design

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5108-202218280A-2-386-XG)；国家重点研发计划氢能专项(SQ2023YFB4000151)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5108-202218280A-2-386-XG), National Key R&D Programme Special Project on Hydrogen Energy of China (SQ2023YFB4000151).

0 引言

随着能源需求的不断扩大以及化石能源的燃烧，致使环境问题日益凸显，对生活的安全和稳定构成了巨大隐患，提高新能源发电比例成为了改善能源环境的重要举措。为此，我国提出了“双碳目标”，承诺在 2030 年前碳达峰，2060 年前碳中和。据国家能源局统计，截至 2024 年 11 月，我国累计风、光装机容量达到了 131 051 万 kW，超过总装机容量的 40%[1]。然而，高比例新能源具有高随机性和间歇性，新能源消纳形势严峻，致使电力系统对灵活性调节资源的需求愈发迫切[2]。火电作为能源保供的“压舱石”，在我国能源结构中长期占据主导地位，作为传统发电方式，具有高度稳定的发电特性和较强的调节能力，能够作为重要基荷为电力系统提供有效支撑作用[3]。通过灵活性改造技术，火电能够承担更为灵活的负荷调节任务，在有效补偿新能源发电波动性同时减少对环境的污染，因此，火电灵活性改造技术是我国未来长期应对能源低碳转型、提升电力系统灵活性和稳定性的关键举措。

现有火电灵活性改造技术主要包括机组本体改造和耦合储能设备。在机组本体改造方面，通过升级机组内锅炉、汽轮机等设备材料性能，或增加蓄热罐、电锅炉和汽轮机供热技术等辅助设备提高调节性能[4]，但高性能材料的升级受制于系统成本、制造及设备寿命，且面临低负荷稳燃的难题。相比之下，耦合储能设备对机组本体改造要求低，可有效拓展负荷调节范围与响应速率，在提升机组调节能力的同时减少低负荷运行的影响，实现深度调峰与热电解耦。当前，熔盐储热[5-7]、电化学储能[8-9]和压缩空气储能技术[10-11]已在与火电耦合应用中取得突破进展，但仍受储能响应特性、调控方式、能效及经济性约束限制，亟需进一步优化，以支撑更宽调节范围、更长时间尺度的深度调峰需求。

在此背景下，氢储能凭借长周期存储、高能量密度和灵活性调节优势，为火电深度调峰开辟了新的技术路径[12]。氢能与火电机组耦合，不仅能优化供需平衡、降低机组启停频次及燃料消耗，且具备零碳排放潜力。目前，氢储能与火电的耦合技术仍处于探索阶段，面临着集成设计、运行调控和成本限制等挑战，具体表现为：

1）制-储-用氢环节的高成本与综合转换能效是制约其大规模推广的瓶颈。

2）制-储-用氢环节能量转换链路长、耦合结构复杂，氢能与火电实现多环节集成设计难。

3）电-氢-热跨尺度特性增加了火电与氢能系统的动态匹配难度，现有调控策略难以适应复杂耦合特性，缺乏高效协同能量调控机制。

综上，本文探索了一种利用氢能提升火电机组灵活性的新技术路径。通过政策分析与前景研判，论证了氢能耦合火电机组的可行性与战略价值。对比分析各类储能耦合火电的技术特点，探究了氢能在长周期存储、负荷响应速度及深度调峰能力方面与火电耦合的特点优势。围绕氢能-火电耦合系统的集成机理，深入解析其结构参数设计、动态调控机理，剖析了“氢-火”耦合技术的关键制约因素，并提出核心技术的突破方向。

1 氢能-火电耦合技术发展前景

在当前能源结构变革的背景下，火电正由基荷电源向调节电源转型，灵活性改造已成为保障电力系统稳定的关键。氢能技术具备提升火电机组灵活性的基本条件，可通过电-氢-电灵活转化，构建“氢-火”协同调节体系，为火电机组提供更长周期、更大规模的能量调节能力。近年来，国家政策正在加速火电灵活性改造与氢能产业布局，为二者的深度耦合奠定了基础。

1.1 发展趋势

我国煤炭行业在近几年经历多次重大调整后，产量和产能持续提升，为火电行业提供了稳定的燃料保障。据国家统计局数据，自 2017—2024 年以来，我国原煤产量稳步增长，复合年增长率为 4.89%[13]，预计年末总产量将突破 48 亿吨。截止 2024 年 10 月，我国火电累计装机容量达到 142 597 万 kW，约占全国发电总装机的 45%，相比于 2023 年增长了 3 505 万 kW[14]。全国发电装机占比结构如图 1 所示。

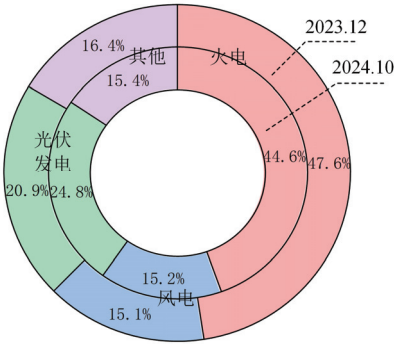


图 1 全国能源装机占比结构

Fig.1 Structure of China’s installed energy capacity

相比于 2023 年，火电装机的整体增长速率有所放缓，但在我国能源结构中的比重仍超过 40%。

随着清洁能源需求的扩大，中国已成为世界上最大的氢气生产国，据中国氢能联盟、华经产业研究院等机构统计的数据显示，截至 2023 年，我国氢气产量高达 3 686 万吨，预计 2024 年将增至 3 695 万吨，未来随着政策及市场的驱动，氢能需求有望持续保持高增。2017—2024 年我国氢能产量统计情况如图 2 所示，整体年产氢量趋于增长。

氢气生产能力的稳步提升为我国氢能产业的未来奠定了坚实基础。根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》[15]预测，2050 年氢能在我国终端能源体系占比至少达到 10%，氢需求量接近 6 000 万吨，若所需氢气全部采用绿电制氢，可减排约 7 亿吨二氧化碳，对于实现深度低碳目标贡献巨大。

相关数据表明，我国火电装机容量稳固，仍占能源结构主导，为氢能耦合提供了广阔应用场景，同时，煤炭供应充足，保障了火电机组的持续稳定运行。此外，我国氢气产量持续增长，已成为全球最大氢气生产国，为火电深度调峰提供充足氢源。在市场需求的驱动下，氢能占终端能源比重将稳步提升，绿色制氢潜力巨大，有望助力氢能耦合火电灵活性改造的实施。

1.2　政策支撑

近年来，中央及地方政府颁布了一系列推动火电灵活性改造的政策方案。2014 年，由环保部、国家发改委和国家能源局联合印发《煤电节能减排升级与改造行动计划》，对煤电行业全面落实“节能、清洁、安全”的能源战略方针、加快升级与改造等提出了具体工作部署，拉开了我国火电灵活性升级改造的序幕[16]。2015 年，三部委联合制定了《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》[17]。2016 年，国家能源局综合司正式下达了《火电灵活性改造试点项目的通知》，结合各地方和电力企业的项目基础，综合考虑项目业主、所在地区、机组类型及容量等因素，确定了丹东电厂等 16 个项目为提升火电灵活性改造的试点项目，并于同年发布了关于第二批试点项目的通知，标志着火电灵活性改造工作的正式实施[18-19]。在后续的几年里，各级政府陆续完善了加快现役火电的灵活性改造进程的相关政策[20-25]，明确提出了发展目标和相关标准的制定计划。火电灵活性改造已成为能源转型和电网稳定的核心举措，也是支撑低碳发展的关键路径。

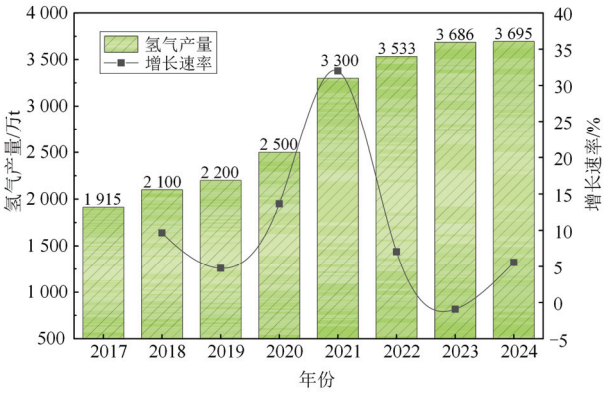


图 2　2017—2024 年全国氢能产量情况

Fig.2　Hydrogen energy production in China from 2017 to 2024

我国是全球氢能利用的大国之一，最早于上世纪 50 年代开始研究氢能，直至“十三五”期间，氢能的政策逐渐增加。2019 年氢能首次被写入政府报告中，提出“推荐充电、加氢等设施建设”[26]，2020 年，多部委联合印发了《关于开展燃料电池汽车示范应用的通知》，丰富了氢能终端的应用场景[27]。2021 年，氢能被正式写入“十四五”规划中，工信部印发的《“十四五”工业绿色发展规划》指出要加快氢能技术创新与基础设施建设[28]，我国氢能技术的发展正式被提上日程。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》出台[29]，确立了发展路径。随后，氢能被纳入《中华人民共和国能源法》[30]，标志着氢能正式进入常规能源的管理体系。当前，随着相关政策逐步落地实施[31-33]，氢能产业在我国已逐渐形成规模化集群，正迈向爆发式增长期，未来有望成为推动能源结构转型的重要支柱。

火电灵活性改造政策明确了深度调峰的需求，推动机组升级以适应大规模新能源并网，为氢能技术的耦合应用提供了场景基础，而氢能产业发展政策加快了产业体系构建，推动了制/储/输/用氢技术的突破，为氢能-火电耦合奠定了资源与技术基础，火电与氢能在相关政策的引导下形成互补格局，为二者的深度融合提供了现实路径。

2　储能耦合火电灵活性提升技术现状

根据能源形态的不同，火电与储能的耦合方式可分为储热和储电两类：其中，储电耦合包括电化学储能和飞轮储能。电化学储能通过锂电池、钠硫电池等高能量密度技术，能够高效存储和快速释放

电能；飞轮储能则利用高速旋转的机械惯性，提供毫秒级响应能力，满足火电机组在动态过程中的快速功率调节需求。储热耦合包括熔盐储热和压缩空气储能技术。熔盐储热通过熔盐介质的高比热容和热稳定性，实现火电机组余热的高效存储与释放，显著提升热能利用率；压缩空气储能则依靠空气压缩与膨胀过程，在负荷波动较大时迅速释放高功率电能，从而增强火电机组的调峰能力。

然而，现有的储能技术主要是通过以电定热实现热电解耦，难以实现与火电机组的电-热深度耦合。相比之下，氢能系统不仅能够实现跨时间尺度的电能灵活转换，在负荷低谷时通过电解水制氢并进行氢气的高压存储，在高峰段采用氢燃料电池或燃氢释放电能，辅助火电机组进行深度调峰，还可通过制-储-用氢多个环节的热循环利用与火电机组实现深度热耦合，提升系统的综合能效。

2.1 储热-火电耦合技术现状

当前，提升储热耦合火电灵活性的研究重点主要集中于提高储热系统的能量密度、热能转换效率以及系统响应速度，从而优化调峰能力，确保火电机组在变工况下的稳定运行。在“低储高发”运行模式下，储热技术通过热能暂存与按需释放的方式，支持火电机组实现灵活调峰。现有储热技术中，熔盐、混凝土[34]及蒸汽储热[35]技术因其高成熟度、热稳定性及高能量转化效率，成为了主流选择。压缩空气储能通过电驱动压缩机将空气压缩至高温高压状态，并结合储热介质存储热量，在负荷高峰时释放压缩空气，经换热器加热后驱动膨胀机发电，其与火电的耦合方式主要是通过热能传递实现，而不直接参与火电本体的热电转换，其本质仍依赖储热与火电深度耦合，

熔盐储热因其大容量、长周期、低成本，且兼顾改变能量的时-空分布特性而受到青睐。如图 3 耦合原理所示，利用高温熔盐介质存储火电余热，通过热交换器完成热量存储与回收，实现热电解耦。现有研究多通过改进其储热构型来提升火电机组的灵活性。Zhu 等[36]提出了一种基于烟气蓄热的熔盐热电一体化集成优化设计方案，在降低锅炉侧损耗的基础上扩大了安全供热范围，电、热调节能力分别提升 13.9%和 65.4%；Chen 等[37]针对 350 MW 机组设计了多级再热蒸汽蓄热系统，增强变工况调峰能力；景浩[38]等针对 1 100 MW 机组，提出蒸汽-烟气逐级加热熔盐储热集成系统，通过对来自热源热量进行分配，弥补了低负荷脱硝效率低的缺点。此外，相关研究在火电-储热耦合系统的优化方面持续深化，通过构建耦合系统的规划模型[39-41]，提出基于调峰需求的储热单元配置方法，并引入智能控制策略[42-43]，优化储/放热换热器及机炉系统的协同调控，进一步提高系统的动态响应速度和运行经济性。

压缩空气储能与火电机组的耦合通过压缩过程中的产热满足热能需求。如图 3 所示，火电机组

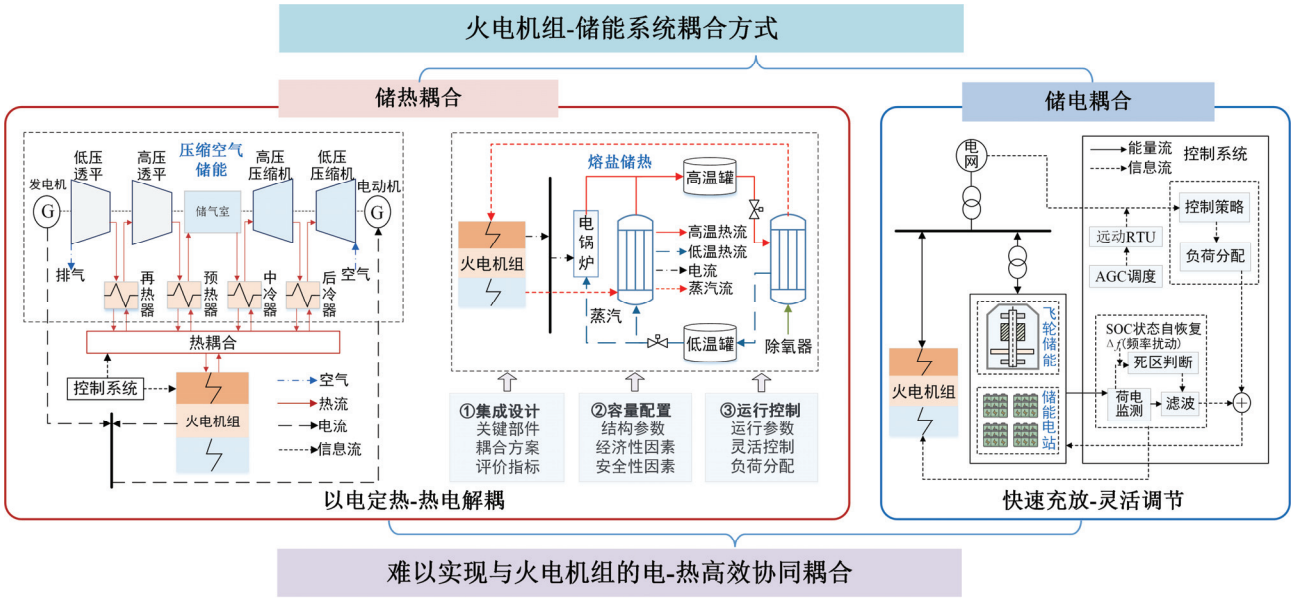


图 3 火电机组-储能技术耦合原理

Fig.3 Principle of thermal unit-energy storage technology coupling

中的汽轮机通过采暖抽汽加热膨胀机入口空气，从而实现热能耦合过程[44]。此外，调整储能过程中压缩空气和冷却水的流量来驱动发电机发电，通过快速释能来辅助系统调峰[45]。当前，火电-压缩空气储能耦合技术研究聚焦于系统能耗优化、关键参数影响及热-电解耦策略。Zhang 等[10]探讨了充注加热与低压抽气优化方案，降低系统能耗；Yan 等[11]提出11 种耦合方案，研究了压缩机进气温度、储气压力和膨胀机温度等关键参数对系统热耦合的影响规律，基于热能耗系数与能源利用率确定最优配置；罗天赐[46]等构建火电-压缩空气耦合系统的全工况特性模型，结合灵敏性分析优化了系统的结构设计。在提升热-电耦合性能方面，常规火电机组的电/热比例调节范围有限，无法高效满足电热需求，部分研究通过优化设计路线[47]与引入辅助设备[48]拓宽负荷调节范围，探索压缩空气与其他类型储热混合储能方案[49]，增强火电灵活性。针对系统安全性、经济性与灵活性的挑战，相关研究[50-53]提出了综合优化方法，为火电深度调峰提供理论支撑。

近年来，我国火电-储热耦合技术已取得突破性进展，江苏国信靖江 350 MW 火电-熔盐改造机组、华能海门百万机组等火电-储热示范项目相继投运。2014 年，江苏常州投运全球首台“非补燃”压缩空气储能电站，并于 2022 年 5 月正式投产，系统能效高达 72%。同年 9 月，中科院工程热物理所自主研发的“百兆瓦级先进压缩空气储能示范电站”成功并网。此后，国家能源集团、中国电建和中国能建等多家单位的项目启动和建设，标志着我国“火电-储热”耦合技术正式步入正轨，处于国际领先地位。

2.2　储电-火电耦合技术现状

电能具备高品质、低损耗且可控的能量属性，火电与储能通过电耦合能够有效提升系统的调节能力。现有技术主要包括飞轮储能和电化学储能，根据耦合方式分为独立和集中式部署。其中，独立部署将电储能作为辅助装置，根据负荷状态灵活调整充放电，集中部署则是将电储能直接集成在火电机组的发电或控制环节，通过协调控制实现灵活性调峰调频，相关研究已取得广泛关注和进展。

火电-储能系统的电耦合原理如图 3 所示，系统由火电机组、储能模块和控制单元 3 部分构成。其中，储能模块(飞轮储能、电池储能)连接至主变高压侧，辅助火电完成自动发电控制(automatic generation control, AGC)功率指令，参与系统的频率调节和功率平衡，弥补火电机组响应速度的不足，提升系统调峰调频能力。

其中，飞轮储能属于机械储能技术，具有短时高功率、长寿命且安全环保[54]等优点，与火电机组的耦合能够减少损耗、促进快速调峰调频。Ji [55]等研究了飞轮储能耦合多种发电系统的调频性能，以山西某 2 台 350 MW 火电机组为例，验证了耦合系统可大幅提高机组 AGC 的调频辅助服务能力，同时保障常规电源与火电的联动；Yang[56]等提出了一种考虑飞轮储能阵列的火电机组协调控制方案，通过构建改进的调频和 AGC 指令，验证了耦合飞轮储能对提高系统运行稳定、灵活的有效性。现有的研究主要集中在优化火电耦合飞轮储能系统的调频控制策略[57-61]和容量配置[62-63]方面，通过高响应速度和短时大功率输出能力，弥补火电在频率调节中动态响应的不足，从而优化系统整体性能。

电化学储能具有响应速度快、循环效率高等优势，主流的储能电池类型有锂电池、铅酸蓄电池、液流电池以及超级电容器。在提升机组灵活性调峰调频相关研究方面，Xie[64]等采用 2 MW/0.5 MWh 的锂离子电池储能系统以满功率补偿出力的方式辅助火电机组参与电网调频，能够提高机组 24%的调频效果；李军徽[65]等提出了适配多种储能电池集群辅助火电调峰的分层优化控制策略，考虑调峰盈余系数和调峰特性差异，确定储能电站的最优出力；肖春梅[66]等以西北某火电厂为例，论述了加装电池储能系统参与 AGC 的调频性能，以获得更长的机组辅助服务里程与调峰收益。程昊文[67]等提出了风光火-储差异化调频策略，以优化电池储能配置，有效增强了电池调频调峰品质。相关研究表明，合理的设计方案与运行调控策略[68–74]能够提升电储能作为一次调频的补充，同时兼顾系统的经济性和新能源消纳，充分发挥“火-储”系统的优势。

当前，美国、德国及澳大利亚等发达国家已广泛实现了火电与规模化储能电站的耦合，随着电储能技术的成熟，我国也加快了火储技术的发展步伐。2021 年 12 月 31 日，国能宁夏灵武公司的 22 MW 级“磁悬浮飞轮储能+火电联合调频”工程并网，标志着我国首个全容量飞轮储能耦合火电项目投运。2023 年 6 月 30 日，华能莱芜电厂 6 MW/50 kWh 飞轮储能+百万千瓦火电机组调频电站并网，推动我国飞轮储能调频技术迈向国际领先。在电化学储能方面，2023 年 4 月 4 日，中国华电朔州建成国内

首个“飞轮+锂电池储能”复合调频项目，由 4 台 500 kW 飞轮与 6 MW 锂电池组成的混储系统，可满足电网高频次、大容量调频需求。2024 年 11 月 29 日，国能宁海电厂 32 MW 电化学储能辅助火电 AGC 调频电站实现全容量并网，进一步提升电网稳定性。

在理论研究与规模化应用步程中，储电-火电耦合技术的核心在于发挥电储能的快速响应能力与高循环效率，通过制定先进的协调控制策略，提升耦合系统频率调节与动态响应能力，以适应在多场景、复杂调峰需求下的灵活调度任务。

2.3 储氢-火电耦合技术现状及优势

随着用电需求增长与负荷特性演变，传统单一储电、储热与火电耦合模式在电-热深度协同方面存在局限性，难以满足新型能源电力系统对高效性和灵活性的需求。

氢能具有物质、能量的双重属性，既能作为清洁能源载体在自然界中广泛存在，又能在能源转换过程中提供高品质的能量，随着技术的进步，目前已在电力、交通、工业和建筑领域得到了广泛的应用，未来将作为能源转型的关键纽带，推动能源系统的绿色可持续发展。氢能具有较高的能量密度和灵活性，作为一种二次能源，氢能的物质属性是连接电-热能量的关键纽带，在火电机组中耦合氢储能系统，能够实现多能源高效协同，不仅能提升火电机组的灵活调节能力和能效水平，还将助力火电快速向低碳清洁化转型，为火电机组的灵活性提升提供了全新技术路径。

氢储能与火电机组的电-热耦合关系如图 4 所示。氢储能系统由制氢、储氢及燃料电池模块组成，通过水电解制氢在低负荷段将富余电能转化为氢气存储，氢气可作为燃料直接掺烧于锅炉中推动蒸汽轮机发电，副产氧气供给火电机组实现富氧燃烧。在高负荷段，氢燃料电池发电辅助火电调峰，并利用余热加热给水，通过热电联供满足热负荷需求。此外，火电机组排放的高温炉渣可为燃料电池提供热源，形成高效的能量循环体系。

火电-储能不同耦合方式的技术特征对比如表 1 所示。分析表明，储电耦合技术具有毫秒级响应与高效充放电特性，能显著提升火电机组功率调节能力，示范条件成熟，但受限于自放电损耗与循环寿命，当前主要以混合储能形式与火电耦合，大规模独立部署仍需在储电设备性能提升与系统优化方面

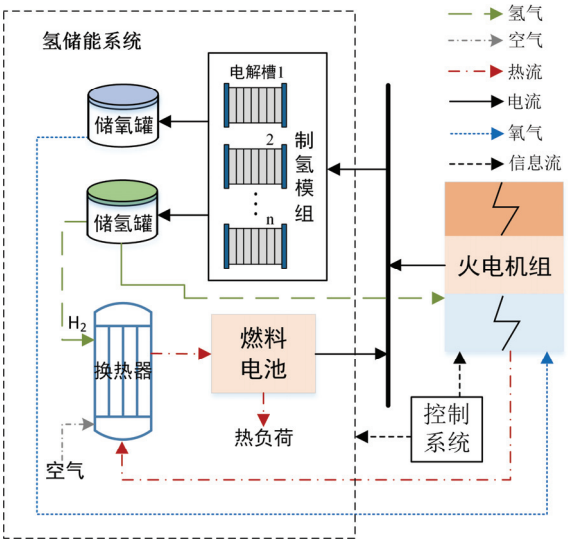


图 4 火电-氢储能耦合关系示意图

Fig.4 Schematic diagram of thermal power-hydrogen storage coupling relationship

表 1 火电-储能不同耦合方式技术分析

Table 1 Technical analysis of different coupling methods of thermal power-energy storage

指标	储电耦合	储热耦合	储氢耦合
储能类型	电化学储能、飞轮储能等	熔盐储热、压缩空气储能等	氢储能
耦合方式	电耦合	热耦合	电-热耦合
响应速度	毫秒级-秒级	熔盐储热：分钟级-小时级；压缩空气：秒级-分钟级	氢储能：秒级-小时级
耦合容量	兆瓦级-数十兆瓦级	百兆瓦级-吉瓦级	兆瓦级-吉瓦级
技术特征	快速响应，适用于辅助火电快速调峰调频	通过热电解耦，实现热能的暂存与释放	电热协同优化，适用于长周期存储与灵活性调峰
技术成熟度	技术成熟度高、示范应用	技术成熟度较高、示范应用	技术成熟度低、理论探索
投资与运维成本	电化学储能：3 000~4 000 元/kW；飞轮储能：6 000~8 000 元/kW	熔盐储热：2 000~4 000 元/kW；压缩空气储能：4 000~7 000 元/kW	氢储能：8 000~12 000 元/kW
优势	响应快、瞬态调节能力强	容量大、成本低、长时稳定	响应快、容量大、周期长
劣势	自放电率高、装机容量受限；储能成本高、循环寿命短	熔盐储热响应速度较慢；压缩空气受地理条件和成本限制	耦合技术尚未成熟系统投运成本高

取得突破。储热耦合中，熔盐和压缩空气储能可提供高品质热能，助力火电机组工质预热及热电联供，

耦合技术已取得关键进展，具备短期规模化应用潜力。但熔盐储热受限于响应速度与材料热稳定性，难以满足快速调峰调频需求，压缩空气储能受地理条件和成本制约，影响其经济性与适用范围。相比之下，氢能不仅可以作为储释电能的载体并且实现热电联供，其本身具有的物质属性还可以通过锅炉掺烧，直接参与火电本体的热电转换，推动汽轮机发电，实现与火电本体的电-热耦合。

储氢耦合技术拥有更丰富的终端应用场景。与储电耦合相比，储氢不仅具备更大规模、长周期的储能能力，可实现跨季节能量调节，还避免了电化学储能的循环寿命限制；与储热耦合相比，相比于储热系统，储氢系统具有更快的秒级调节速度。此外，储氢系统的能量转化链条更长，可通过电解制氢、燃料电池发电和富氧燃烧构建“电-氢-热”深度耦合体系，在实现火电灵活调峰的同时，进一步提升系统综合能效。

尽管氢能与火电的耦合技术仍处于初步阶段，技术成熟度较低且成本高，但随着氢能产业链的逐步完善及相关项目的落地推广，储氢技术在火电机组中的应用场景将不断丰富，将为火电灵活性改造的技术瓶颈突破提供重要的契机。

袁铁江[75]等首次提出了利用氢能提升火电机组灵活性的概念，从耦合机理和综合评估方面对该领域进行了初步探索，为后续研究奠定了理论基础，提供了宝贵的参考与借鉴价值。当前，利用氢能提升火电灵活性的技术探索主要集中在两个方向：一是火电制氢，旨在辅助火电调峰的同时提供一种低成本制氢技术[4,76-78]，以满足氢能终端应用。然而，规模化生产的“灰氢”与我国绿色能源发展的战略目标相悖。因此，利用新能源弃电灵活制备绿氢[79]，成为实现火电减碳的可行技术路线之一；二是将“制氢-储氢-氢电转换”系统视为一种电能存储方式[80-84]，即在低负荷段时由电解槽制氢存入储氢罐中，负荷高峰时由氢燃料电池发电满足灵活性调峰需求，但由于当前氢能设备成本的限制，在规模化应用方面仍受诸多限制。

工程应用方面，氢能技术在国际和国内均已实现了多领域规模化应用，日本作为氢燃料电池汽车的领跑者，推出了丰田 Mirai 和本田 Clarity 等氢燃料车型，德国阿尔斯通公司率先投入使用了氢燃料列车，成为无碳轨道交通的典范，欧洲计划研发零排放氢能的飞机原型机与船舶。我国在氢能方面虽起步较晚，但已逐步建立从制-储-用氢的全产业链，在氢的绿氢制备和利用方面均达到了国际领先水平，新疆、宁夏、内蒙古等地已建成多个超大规模绿氢生产基地，广泛用于化工生产和能源冶炼，同时，多家大型企业正积极探索绿氢在低碳工业的应用。技术进步和基础逐步完善将推动氢能在能源体系中的应用规模不断扩大，并向深度融合发展。通过构建氢能-火电耦合系统，既能推动火电行业的清洁转型，也能为构建低碳、安全、高效的现代能源体系提供有力支撑。

3　火电-氢能耦合关键技术及展望

本章探索了一种火电-氢能耦合结构，旨在探讨各环节的能量转换机制，并通过容量优化配置案例的简要分析，初步论证耦合技术的可行性。其中，制氢环节分析了混联电解槽系统的动态响应能力及其对系统能效的提升作用；储氢环节针对高压储氢过程的温升效应与压缩余热利用问题，探讨了基于余热回收的储氢优化策略；用氢环节介绍了燃料电池发电与锅炉掺氢燃烧两种技术路径对系统能效的影响，为提升火电灵活性和降低排放提供了方案参考。进一步地，从耦合系统的结构设计、动态控制及评价机制方面，揭示了当前火电-氢能耦合技术面临的关键技术挑战，并提出可能的优化路径。

3.1　技术可行性

拟探讨一种风-氢-火耦合系统，结构原理如图5，其核心组成部分包括风力、火力发电系统和氢能系统，风、火发电为氢能系统提供电的来源，氢能系统基于碱性(alkaline, ALK)-质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解槽制氢、高压储氢和PEM燃料电池氢电转换实现能量存储与调配，并通过电堆及辅助设备(balance of plant, BoP)与火电机组耦合，协同优化能量流动与利用效率。该结构虽详细阐述了耦合系统中物质与能量转换的机制，但并非火电与氢能唯一的耦合方案，而是基于当前的技术条件和各组件功能需求所提出的一种可行性设计方案，旨在为该领域的研究和发展提供有价值的参考。

3.1.1　制-储-用氢多环节耦合机理

制氢环节—ALK-PEM 混联制氢提升新能源消纳能力：在制氢与火电的耦合环节，当前研究主要考虑利用高温固体氧化物电解槽(solid oxide electrolyzer, SOEC)制氢技术[85]，SOEC 制氢的副产物氧

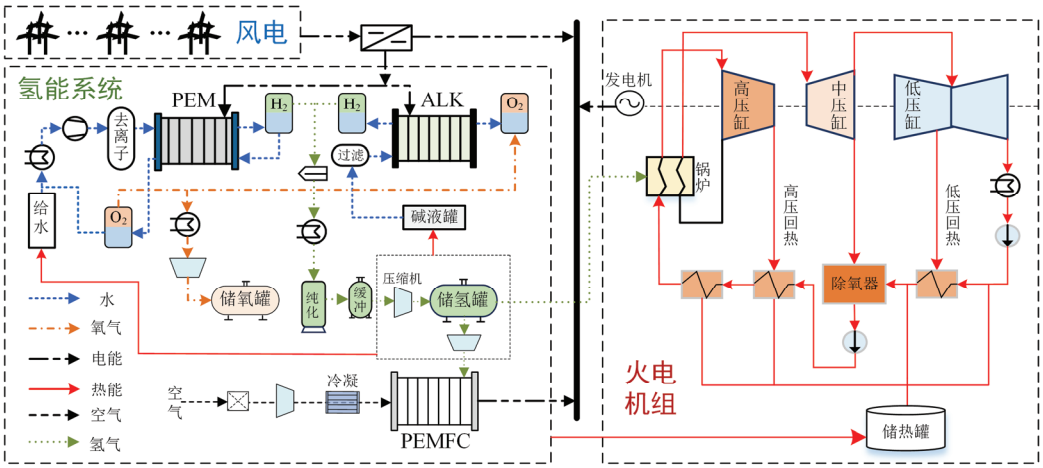


图 5 风-氢-火耦合系统结构原理图

Fig.5 Wind-hydrogen-fire coupling system structure schematic diagram

气可直接通入锅炉助力富氧燃烧[86]，提升燃烧效率。同时，火电机组的高温烟气能为加热 SOEC 提供热源[87]，进一步强化火电与制氢耦合。然而，受限于材料耐受性及高温工况稳定性，SOEC 技术仍处于实验室阶段[88]，短期内难以实现规模化应用。鉴于此，应考虑技术成熟的 ALK、PEM 制氢技术，其中，ALK 和 PEM 电解电堆的气液管理、给水和去离子过程分别由各自辅机实现，而冷凝、纯化和压缩过程均由一套共用 BoP 完成，避免辅机冗余配置。混联制氢系统根据风电功率的波动情况和两类电解槽性能差异，将不同的发电功率频段划分至 ALK 和 PEM 电解电堆阵列中，用于维持制氢系统的高效运行与风电高比例消纳[89]。其中，高功率段、稳定性功率由 ALK 电解电堆承担，低功率、波动性强的功率由 PEM 电解电堆承担，产氢存入储氢罐中供给氢能终端，副产物氧气通入锅炉富氧燃烧。该技术路径下：一方面，富氧燃烧能提高燃烧效率，增强机组深度调峰能力；另一方面，高效混联制氢提供负荷调节手段，使火电机组更好地适配新能源波动，实现高效消纳与灵活运行。

储氢环节—高压存储与余热回收协同优化系统能效：电解制氢后的氢气经高压压缩储存在储氢罐中，现有技术可实现 35~70 MPa 的压力等级[90-91]，确保氢气的长期稳定存储与灵活调配。氢气压缩过程中会释放大量热能[92]，该温度虽不足以直接为火电机组提供高品位热能支撑，但可通过余热回收优化制氢系统的热管理。具体而言，压缩氢气过程中产生的余热可用于加热电解槽给水系统(纯水和碱液)、槽内循环水及冷凝水旁路流[93]，从而降低电解能耗，维持制氢系统的工作温度恒定，并减少对外部热源的依赖。该余热利用策略能够减轻火电机组冷凝水加热系统的负担，优化冷热源匹配，提高系统整体热效率。通过高压储氢与余热回收的协同优化，该耦合机制有望进一步提升能源利用效率，降低系统运行成本，使氢能与火电的耦合更加紧密，为火电机组的灵活运行提供了支撑。

用氢环节—燃料电池发电和掺氢燃烧实现深度调峰：当前，用氢环节在火电调峰中的应用主要通过氢燃料电池发电和掺氢燃烧两种技术手段实现。在氢燃料电池发电方面，氢燃料电池通过在电网负荷高峰时，将储存的氢气转化为电能，快速响应电网需求，并且发电过程中的余热可用于热电联供，提高能源利用效率，当前技术集中在提升燃料电池的转化效率和降低成本来提升耦合效能[93-94]。在掺氢燃烧方面，考虑氢气的高热值，通过将氢气与煤粉或天然气混合，作为补充燃料与传统燃料在火电锅炉中共同燃烧[95]，促进燃料完全燃烧；或基于氢气的快速燃烧特性，通过少量添加氢气来确保低品位燃料的无油点火[96]，从而显著提高燃烧效率和锅炉热效率，实现节能减碳。该技术的关键在于优化氢气与传统燃料的混合比例，确保稳定燃烧并避免设备损伤。上述两种技术方案通过提高火电机组的灵活性、降低排放，为传统火电在可再生能源波动时提供重要调峰支持，助力火电机组在低碳转型中发挥更大作用。

氢气的制备、储存、掺烧和发电技术已相对成熟，且系统能效和减排优势显著。利用新能源电力驱动水电解制氢，能够在解决新能源波动性问题的

同时兼顾能源系统低碳转型。尽管初期投资成本较高，但随着制造业的成熟与关键技术的不断突破，火电-氢能耦合系统的经济性将逐步提升。

3.1.2　案例分析

在耦合设计的基础上，如何优化各部分的容量配置，以实现能量的合理流动和高效利用，在满足用能需求的前提下最大程度地提高火电的灵活调节能力，是未来的研究重点。当前案例简要分析了耦合系统的容量配置结果，旨在体现配置氢能能够提升火电的深度调峰能力，为进一步反映氢能提升火电灵活性的可行性提供理论支撑。

以风-氢-火耦合系统年成本最小为目标，构建含氢能设备投资、运维和排放惩罚成本的容量配置模型：

$$\min C = C_{\text{inv}} + \sum_{t=1}^{24}\left(C_{\text{op}}(t) + C_{\text{carb}}(t) + C_{\text{w_ab}}(t)\right) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{inv}} = {} & c_{\text{el}} P_{\text{EL}}^{\text{N}} C_{\text{RF}}(r, Y_1) + c_{\text{fc}} P_{\text{FC}}^{\text{N}} C_{\text{RF}}(r, Y_3) \\ & + c_{\text{tank}} P_{\text{TANK}}^{\text{N}} C_{\text{RF}}(r, Y_4) + c_{\text{w}} P_{\text{W}}^{\text{N}} C_{\text{RF}}(r, Y_5) \end{aligned} \tag{2}$$

$$C_{\text{RF}}(r, Y) = r(1+r)^{Y_{\text{op}}} / \left((1+r)^{Y_{\text{op}}} - 1\right) \tag{3}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{op}}(t) = {} & c_{\text{w_op}} P_{\text{W}}(t) + c_{\text{el_op}} P_{\text{EL}}(t) + \\ & c_{\text{fc_op}} P_{\text{FC}}(t) + c_{\text{TH_op}} P_{\text{TH}}(t) \end{aligned} \tag{4}$$

$$C_{\text{carb}}(t) = \theta_{\text{carb}} \cdot P_{\text{TH}}(t) \cdot c_{\text{carb_unit}} \tag{5}$$

$$C_{\text{w_ab}}(t) = c_{\text{w_ab}} \cdot P_{\text{W_ab}}(t) \tag{6}$$

式中：C_{inv}、C_{op}、C_{carb}、$C_{\text{w_ab}}$ 分别为风-氢-火耦合系统年总投资、运行、碳排放和弃风惩罚成本；c_{el}、c_{fc}、c_{tank}、c_{w} 分别为碱性和质子交换膜电解槽、燃料电池、储氢罐及风机的单位投资成本，元/kW；C_{RF} 为资本回收系数；$c_{\text{w_op}}$、$c_{\text{el_op}}$、$c_{\text{fc_op}}$、$c_{\text{TH_op}}$ 分别为风机、碱性电解槽、燃料电池及火电机组单位运行成本，元/kW；P_{EL}^{N}，P_{FC}^{N}，$P_{\text{TANK}}^{\text{N}}$，$P_{\text{W}}^{\text{N}}$ 分别为碱性和质子交换膜电解槽、燃料电池、储氢罐及风机的额定容量，kW；$P_{\text{w_ab}}$ 为弃风量；θ_{carb} 为碳排放系数，r 为实际年利率；Y_1—Y_4 分别对应各设备的运行年限；Y_{op} 为系统的运行年限；$P_{\text{TH}}(t)$ 为 t 时刻的火电功率；$c_{\text{carb_unit}}$ 和 $c_{\text{w_ab}}$ 分别为单位碳排放成本和弃风成本。

在风-火联合发电系统功率和运行约束的基础上，加入制-储-用氢能设备的运行约束：

$$P_{\text{W}}(t) + P_{\text{TH}}(t) + P_{\text{FC}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{EL}}(t) \tag{7}$$

$$0.05wP_{\text{EL}} \le P_{\text{EL}}(t) \le 1.2wP_{\text{EL}} \tag{8}$$

$$0.05(1-w)P_{\text{FC}} \le P_{\text{FC}}(t) \le (1-w)\cdot 1.2P_{\text{FC}} \tag{9}$$

$$0.1S_{\text{OCtank}} \le S_{\text{OCtank}}(t) \le 0.9S_{\text{OCtank}} \tag{10}$$

$$0 \le P_{\text{W}}(t) \le P_{\text{W}} \tag{11}$$

$$0.5P_{\text{TH}} \le P_{\text{TH}}(t) \le P_{\text{TH}} \tag{12}$$

式中：P_{load} 为电负荷，单位为 kW；w 为 0-1 变量，代表电解槽和燃料电池的启停状态；S_{OCtank} 为储氢状态，初始值为 60%。

选取某 300 MW 的火电机组，相关参数取值详见文献[12,65,97-102]，基于典型场景，分析在不同风、火装机占比模式下配置氢能系统的性能表现：

(1)模式 1(见图 6)。

该模式火电机组下调至正常调峰下限，剩余风电由电解槽产氢并存入储氢罐中，在负荷高峰 19:00—22:00 时刻利用氢燃料电池调峰，实现了灵活调节。

(2)模式 2(见图 7)。

在该模式下风机容量占比提高，风电出力增大时，火电进入深度调峰，提升了风电消纳空间。同时该模式电解槽调节功率大，使产氧量增加，与空气混合供锅炉燃烧能够维持火电低负荷运行。

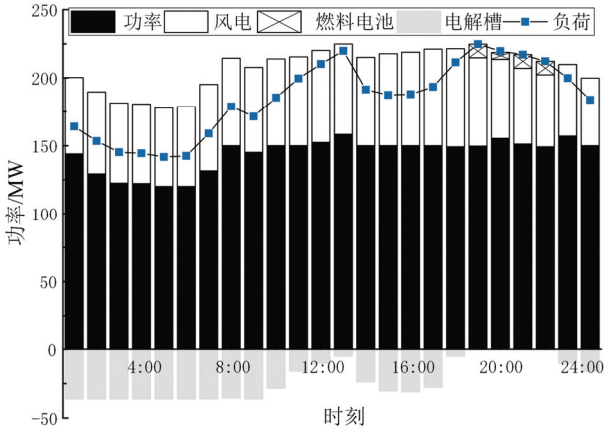


图 6　风、火容量比为 0.2 功率曲线

Fig.6　Power curve when wind and fire capacity ratio is 0.2

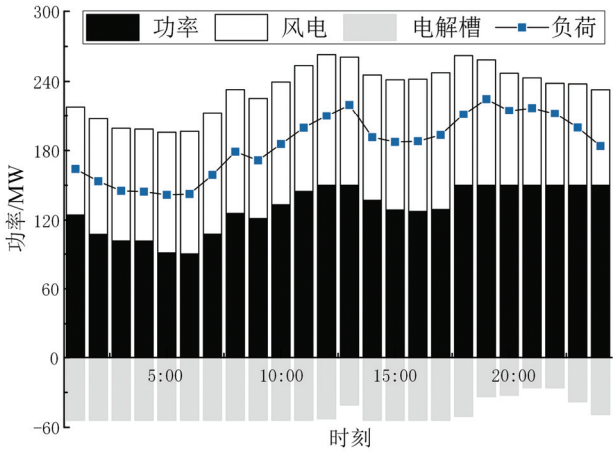


图 7　风、火容量比为 0.4 功率曲线

Fig.7　Power curve when wind and fire capacity ratio is 0.4

两种模式下配置氢能系统均显著提升了火电机组的深度调峰能力，有效缓解负荷波动，增强新能源消纳占比，验证了火电机组耦合氢能系统的技术可行性，为提升火电灵活性与低碳运行提供了支撑。

3.2 关键问题及展望

针对火电-氢能耦合系统面临的多环节能量转换链路复杂、跨尺度动态调控难以及氢能的高成本和低能效等主要技术挑战，本文从综合评价机制、结构设计和动态调控原理 3 个关键方面进行了深入分析，重点探讨了未来研究的重点方向，并展望了相应的技术优化路径，以期为相关领域的发展提供有益的参考。

3.2.1 综合评价机制

制、储和用氢的高成本以及低转换能效是制约氢能在能源系统中的大规模应用与推广的关键。为了克服这一瓶颈，火电机组灵活性改造被作为提升电力系统调峰能力的重要手段。通过对火电与储能耦合系统的性能评估，可以为进一步优化系统的调节能力与经济性提供理论依据。现有研究在火电-储能耦合的经济性评估方面已取得一定进展。李佳佳[50]等建立了考虑投运、收益和碳排放因素的经济性评估模型，探讨了储能利用时长、供能价格及调峰补偿参数对经济性的影响。罗天赐[46]等提出了火电-压缩空气储能耦合系统的热经济性评价指标，分析变工况下系统经济性变化趋势。陈吉玲[103]等评估了压缩空气储能在储释阶段的压缩机效率、空气流速、膨胀机入口温度及空气流量等关键参数对系统能效的影响，评估了不同阶段耦合系统性能。在氢能方面，少数研究初步分析了氢能对辅助火电调峰能力提升[104]、市场交易机制优化[105]及节能减碳效果[79,84]的作用，但评估指标相对单一，且缺少对火电-氢能耦合系统的评价。为此，袁铁江[75]等考虑了经济性、能源利用、双碳目标与可靠性因素，针对“风-氢-火”耦合系统提出了多维评价模型，开展了综合效能评估。然而，现有方法多基于静态成本分析，未充分考虑源-荷波动、燃料成本变化及运行经济性的动态演化，评估结果存在偏差。

氢能系统经济性受设备投资、运维成本及新能源波动性的制约。制氢侧需在提升响应速度与产氢能效的同时，平衡源-荷波动与产氢成本，以优化配置方案。高压储氢环节面临压力等级、能量损耗及供应安全性挑战。用氢端虽可通过储氢缓冲电力波动，与制氢解耦，但在发电、燃氢等不同用氢路径下，仍受系统能效和技术经济性制约。此外，针对机组本身的灵活性改造不仅涉及锅炉负荷调节能力与汽轮机启停响应速度提升，还需评估技改对燃烧效率和运行成本的影响，确保系统整体效益。因此，针对火电-氢能耦合系统的评价体系应涵盖“安全-经济-环保”多个维度，除评估系统整体效能外，还需构建精准的指标体系，具体分析关键环节对系统能效的影响。

氢能提升火电机组灵活性综合评价体系如图 8 所示，安全性方面，应结合电网涉网安全需求，评估机组低负荷稳燃能力、供电可靠性及持续供电能力，确保系统在不同负荷条件下的稳定运行。经济性方面，基于系统效率(产氢速率、热电比、压缩与传热效率、燃烧效率，等)，构建经济性评估模型，量化投运成本、灵活性调节能力及经济收益的动态平衡，为系统投资决策提供科学支撑。环保性方面，综合考虑碳排放、锅炉烟气脱硝效果、大气污染物排放量及新能源利用率，评估耦合系统在污染物减排及新能源消纳方面的贡献。通过该综合评价机制，可全面量化氢能对火电机组灵活性提升的作用。

当前研究主要聚焦于火电-氢能耦合系统的经济性评估，但对关键设备参数、集成设计方案对系统性能的影响研究较为薄弱，无法准确识别影响整体效能的核心要素。此外，氢能系统产业链较长，目前针对氢能与火电耦合系统灵活性提升评估仍停留在探索阶段。未来的研究应深入探讨氢能与火电耦合系统的结构设计及动态调控机制，特别是制氢、储氢、用氢全环节与火电机组在关键组件及物质-能量传递层面的耦合。为了全面优化系统性能，应

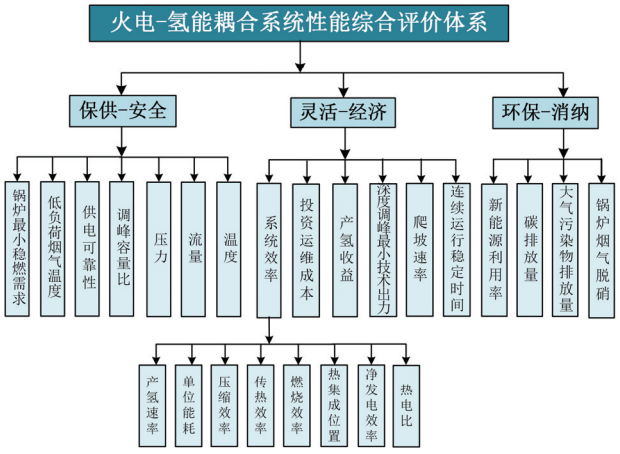


图 8 氢能提升火电机组灵活性综合评价体系

Fig.8 Comprehensive evaluation system for thermal power-hydrogen coupling technology

建立涵盖组件级到系统级的详细指标评价体系，重点分析动态运行条件下关键组件及参数对系统效能的影响，精准且全面量化氢能在提升火电机组灵活性方面的作用，能够为火电-氢能耦合系统的工程设计提供更有效的技术指导。

3.2.2　结构设计

制-储-用氢环节能量转换链路长且耦合结构复杂，使得氢能与火电的多环节集成设计面临重大挑战。目前，火电-氢能耦合系统尚缺乏成熟有效的结构设计方案，氢路结构对系统容量匹配和耦合能效影响机制尚未明确。其中，制氢流程及结构复杂，BoP 设计难以兼顾氢气的高效产出和质量控制。氢气的储输涉及高压匹配、温度调控及能量损耗，存在“能效提升-安全保障-经济可行”的制约。在用氢环节，火电机组多元用氢技术路径循环效率低、耦合设计机理不清晰，锅炉掺氢燃烧改造成本虽低，但氢气燃烧温度高，可加剧设备老化并增加排放；氢燃料电池虽具备高电能转换效率，但与火电适配性存在差异，且投运成本较高，因此，用氢路径的选择面临“能效性-经济性-安全性”矛盾。此外，燃烧、存储与发电设备的参数匹配尚无成熟方案，系统优化缺乏完整技术体系，火电-氢能耦合技术的规划与优化脱离设备本体设计层面，关键参数与系统结构容量配置的映射关系尚未建立，整体技术体系仍处于探索阶段。

为了实现火电-氢能系统的结构优化设计，未来研究应聚焦于关键参数与结构设计之间的映射关系，明确拓扑结构对容量匹配与耦合能效的影响，映射关系如图 9 所示。在不同运行场景下（如新能源富余、稳定供电、低负荷调节），需优化适应源-荷波动的高效制氢路径，开展制氢耦联系统的建模与动态模拟分析，量化关键参数对拓扑结构和容量配置的影响，进一步优化电解槽及 BoP 的结构布局。同时，基于物质-能量交互机理，构建设备、物料与容量参数之间的映射关系，优化制氢、储氢、用氢环节与火电系统的耦合构型，提出系统集成的设计方法。在用氢环节，应深入研究锅炉掺氢燃烧、氢燃料电池发电等技术路径，分析其热效率、净发电量和循环效率等关键技术指标，明确在特定工况下的高效用氢技术路线。基于上述研究成果，应构建兼顾系统能效、安全性与经济性的多目标优化模型，提出火电-氢能耦合系统各模块的容量优化配置方法，为系统能效提升和整体设计提供科学依据。

3.2.3　动态调控

电-氢-热系统的跨尺度特性和变工况条件加剧了火电与氢能系统的动态匹配难度，现有的调控策略难以应对复杂的耦合特性，耦合系统面临多参数协同调控的挑战。其中，电解槽的电流密度和电压波动影响制氢效率，不同类型电解槽在负载适应性和动态响应上存在差异，需协调 BoP 参数优化产氢功率。高压储氢过程涉及温度剧变，需考虑压力等级，由动态调节换热系统匹配压缩机运行模式，维持储氢稳定性和供氢连续性。掺氢燃烧过程需精准控制燃料混合比例与流量，防止燃烧温度失控影响锅炉热效率，而燃料电池用氢方案则依赖换热系统的梯级利用，提高系统整体能效。然而，目前火电-氢能耦合系统的集成控制尚缺乏精细化的参数调控策略和全局优化方法，难以保障各环节在变工况下的协同稳定运行。

针对变工况下火电-氢能耦合系统的动态优化调控，应构建基于动态耦合机理的多环节协同控制策略，如图 10 所示。首先，基于耦合系统各模块及 BoP 物理模型，建立准确反映物质-能量变化的非线性动力学模型，描述温度、压力、流量等关键参数

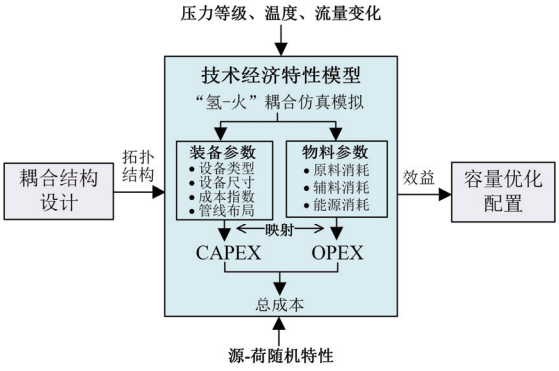


图 9　耦合结构与容量配置的映射关系

Fig.9　Mapping of processes to capacity configurations

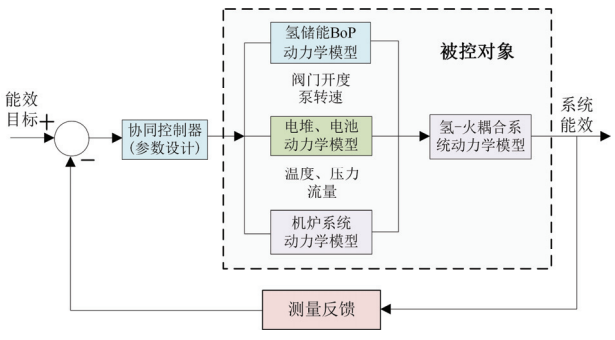


图 10　耦合系统多环节动态控制

Fig.10　Multi-link dynamic control of coupled systems

在不同工况下的动态行为。其次，采用敏感性分析方法，刻画反映耦合系统调节能力的动态运行边界，确保随机变参数条件下的安全稳定运行。考虑氢能系统与机炉系统的接口动态特性，分析电解槽快速响应、压缩机温度-压力耦合调控、掺氢比例-流量动态调节及燃料电池热电功率协同输出等控制需求，提出多变量自适应控制策略，采用协同控制理论，以多环节局部控制实现系统协同优化，确保火电-氢能耦合系统在复杂工况下的安全、高效运行。

4 结论

火电机组作为我国电力体系主体，在新能源发电占比提升和负荷波动加剧的背景下，面临灵活性调节能力不足的严峻挑战。作为一种新兴技术，氢能具备清洁低碳、灵活性转换和跨时空存储等优势，与火电耦合具有广阔的发展前景。为此，本文梳理了火电灵活性改造与氢能产业发展的相关政策及现状，并从技术优势、可行性和关键挑战等方面出发，探索了一种基于氢能提升火电灵活性的方案，为火电灵活性改造提供了新的技术发展路径。

相比于耦合储电、储热模式，火电-储氢系统兼具两者优势：氢能的能量属性赋予其优于储热系统的秒级响应能力，且高能量密度及长周期存储特性的物质属性突破了储电模式的时空局限。同时，氢能可实现与火电机组的电-热高效协同耦合，使储氢成为提升火电机组调节能力、突破灵活性改造瓶颈的关键技术载体。

当前，火电-氢能耦合技术尚处于探索阶段，面临结构设计和系统调控等多重挑战。其中，制-储-用氢环节与火电机组的能量-物质耦合机制尚不清晰，关键技术参数匹配缺乏系统性研究，制约其整体能效提升。氢气存储需在高效转换与安全性之间权衡，涉及压力等级匹配、热管理及能量耗散等技术难题。电解槽动态响应、压缩储氢的温-压协同调控及掺氢燃烧的稳定性优化，均直接影响系统安全性与调节性能。此外，耦合系统在不同用氢路径下也难以兼顾能效、经济性与适配性，尚未形成最优方案。因此，突破安全、经济、消纳的“氢-火”耦合技术，是推动火电灵活性改造的关键。针对上述关键问题及挑战，本文给出了可能的解决思路，以期为火电-氢能耦合系统的设计、运行及产业化应用提供有益借鉴和参考。

参考文献 References

[1] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年 1-11 月份全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2024-12-20)[2024-12-30]. https://www.nea.gov.cn/20241220/73f189cc6e6540caafac2b819623fc08/c. html.
National Energy Administration. National Energy Administration releases national electric power industry statistics for January-November 2024[EB/OL]. (2024-12-20)[2024-12-30]. https://www.nea.gov.cn/20241220/73f189cc6e6540caafac2b819623fc08/c. html.

[2] 李 政，李伟起，张忠伟，等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究[J]. 中国工程科学，2024，26(4)：108-120.
LI Zheng, LI Weiqi, ZHANG Zhongwei, et al. Development strategy of flexible resources in China's power system under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 108-120.

[3] 杜小泽，张 璇，庞力平，等. 燃煤发电机组灵活调峰下机炉安全状态监测与调控研究综述[J]. 中国电机工程学报，2024，44(18)：7178-7199.
DU Xiaoze, ZHANG Xuan, PANG Liping, et al. Review on the monitoring and regulation of boiler and turbine safety states in coal-fired power generation units under flexible peak shaving[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7178-7199.

[4] 马汀山，王 妍，吕 凯，等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报，2022，42(增刊 1)：136-148.
MA Tingshan, WANG Yan, LÜ Kai, et al. Research progress on flexibility transformation technology of coupled energy storage for thermal power units under the “dual-carbon” goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Supplement1): 136-148.

[5] WANG S, LI T X, HAN Z W, et al. Performance assessments on using steam compression to further improve flexibility of a coal-fired power unit coupling with molten salt heat storage[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 118: 116183.

[6] ZHOU X M, ZHANG Z, JIANG Y N. Design and thermodynamic analysis of 1050 MW coal-fired power unit coupled with molten salt thermal energy storage system[J]. Energy, 2025, 320: 135292.

[7] XIE S T, TAN P, YU Z T, et al. Enhancing peak-shaving capacity of coal-fired power plant by coupling molten salt energy storage and steam accumulator[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 117: 116147.

[8] 魏江哲，舒茂龙，陈彦桥，等. 考虑调频资源边际替代的火-储联合系统调频备用配置方法[J/OL]. 储能科学与技术，2024：1-15 [2025-03-24]. https://doi.org/10.19799/j. cnki. 2095-4239.2024.1090.
WEI Jiangzhe, SHU Maolong, CHEN Yanqiao, et al. Frequency regulation reserve allocation method for integrated thermal and energy storage systems considering the marginal substitution[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 2024: 1-15[2025-03-24]. https: //doi.org/10.19799/j. cnki. 2095-4239.2024.1090.

[9] 严干贵，李永越，沙千理，等. 基于改进自适应完备集合经验模态分解的混合储能辅助火电机组调频的协同控制策略[J/OL]. 电网技术，2025：1-12[2025-03-24]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673. pst. 2024.1322.
YAN Gangui, LI Yongyue, SHA Qianli, et al. Co-control strategy for hybrid storage-assisted thermal power unit frequency regulation based on ICEEMDAN decomposition[J/OL]. Power System Technology, 2025: 1-12[2025-03-24]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673. pst. 2024.1322.

[10] ZHANG L, CUI J, ZHANG Y P, et al. Performance analysis of a compressed air energy storage system integrated into a coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113446.

[11] YAN X S, WANG X D, HAN X, et al. Study on the thermodynamic

performance of a coupled compressed air energy storage system in a coal-fired power plant[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107727.

[12] 张　红，袁铁江，谭　捷，等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：83-93.
ZHANG Hong, YUAN Tiejiang, TAN Jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-93.

[13] 国家统计局. 2024 年 11 月份能源生产情况[EB/OL]. (2024-12-16)[2024-12-30]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241216_1957757. html.
National Bureau of Statistics. Energy production in November 2024[EB/OL]. (2024-12-16)[2024-12-30]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241216_1957757. html.

[14] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年 1-10 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2024-11-22)[2024-12-30]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1310787342. htm.
National Energy Administration. National energy administration releases national electricity industry statistics for January-October 2024[EB/OL]. (2024-11-22)[2024-12-30]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1310787342. htm.

[15] 中国氢能联盟. 《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》[EB/OL].[2024-12-30]. https://h5.h2cn.org. cn/26/index. html.
China Hydrogen Energy Alliance. White Paper on China's hydrogen energy and fuel cell industry[EB/OL].[2024-12-30]. https://h5.h2cn.org. cn/26/index. html.

[16] 国家发改委，环保部，国家能源局. 三部委印发《煤电节能减排升级与改造行动计划》[EB/OL]. (2014-09-23)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/xinwen/2014-09/23/content_2754929. htm.
National Development and Reform Commission, Ministry of Environmental Protection, National Energy Administration. Three ministries and commissions issued coal power energy saving and emission reduction upgrade and transformation action plan[EB/OL]. (2014-09-23)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/xinwen/2014-09/23/content_2754929. htm.

[17] 环境保护部，发展改革委，能源局. 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知[EB/OL]. (2015-12-11)[2024-12-30]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170. htm.
Ministry of Environmental Protection, National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the issuance of the work program for the comprehensive implementation of ultra-low emission and energy-saving retrofit of coal-fired power plants[EB/OL]. (2015-12-11)[2024-12-30]. https://www. mee. gov. cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170. htm.

[18] 国家能源局. 国家能源局综合司关于下达第二批火电灵活性改造试点项目的通知　国能综电力[2016]474 号[EB/OL]. (2016-07-28)[2024-12-30]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201608/t20160805_2285. htm.
National Energy Administration. Notice of the comprehensive department of the national energy administration on the issuance of the second batch of thermal power flexibility retrofit pilot projects national energy comprehensive power[2016]No. 474[EB/OL]. (2016-07-28)[2024-12-30]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201608/t20160805_2285. htm.

[19] 国家能源局. 国家能源局综合司关于下达火电灵活性改造试点项目的通知　国能综电力[2016]397 号[EB/OL]. (2016-06-28)[2024-12-30]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201607/t20160704_2272. htm.
National Energy Administration. Notice of the comprehensive department of the national energy administration on the issuance of pilot projects for thermal power flexibility retrofit national energy general power[2016]No. 397[EB/OL]. (2016-06-28)[2024-12-30]. https://zfxxgk.nea.gov. cn/auto84/201607/t20160704_2272. htm.

[20] 国家发展改革委，国家能源局. 国家发展改革委　国家能源局关于开展全国煤电机组改造升级的通知[EB/OL]. (2021-10-29)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/03/content_5648562. htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. National development and reform commission national energy administration's circular on the national coal power generating unit renovation and upgrading[EB/OL]. (2021-10-29)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/03/content_5648562. htm.

[21] 中共中央，国务院. 中共中央国务院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[EB/OL]. (2021-09-22)[2024-12-30]. https://www.mofcom.gov.cn/zcfb/zgdwjjmywg/art/2021/art_dee4aa25a54049d1bd69b6cfff7d195d. html.
The Central Committee of the Communist Party of China, The State Council. Opinions of the State Council of the Central Committee of the Communist Party of China on complete and accurate comprehensive implementation of the new development idea to do a good job in carbon peak carbon neutrality[EB/OL]. (2021-09-22)[2024-12-30]. https://www.mofcom.gov.cn/zcfb/zgdwjjmywg/art/2021/art_dee4aa25-a54049d1bd69b6cfff7d195d. html.

[22] 宁夏回族自治区人民政府办公厅. 转发自治区工业和信息化厅关于实施“四大改造”推进工业转型发展实施方案的通知[EB/OL]. (2021-01-14)[2024-12-30]. https://www.nx.gov.cn/zwgk/qzfwj/202101/t20210114_2570704. html.
General Office of the People's Government of Ningxia Hui Autonomous Region. Forwarded to the Office of Industry and Information Technology of the autonomous region on the implementation of the "four major transformation" to promote the implementation of the program of industrial transformation and development of the notice[EB/OL]. (2021-01-14)[2024-12-30]. https://www.nx.gov.cn/zwgk/qzfwj/202101/t20210114_2570704. html.

[23] 河南省人民政府. 河南省人民政府关于印发河南省“十四五”现代能源体系和碳达峰碳中和规划的通知[EB/OL]. (2022-02-22)[2024-12-30]. https://www.henan.gov. cn/2022/02-22/2402738. html.
The People's Government of Henan Province. Notice of the People's Government of Henan Province on the Issuance of Henan Province's “14th Five-Year Plan” modern energy system and carbon peak and carbon neutral Planning_YuGong_Henan provincial people's government portal[EB/OL]. (2022-02-22)[2024-12-30]. https://www.henan.gov. cn/2022/02-22/2402738. html.

[24] 能源局综合司，发展改革委办公厅，市场监管总局办公厅. 关于进一步提升煤电能效和灵活性标准的通知[EB/OL]. (2022-08-03)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/30/content_5707362. htm.
General Department of Energy Bureau, General Office of Development and Reform Commission, General Office of the General Administration of Market Supervision. Notice on further improving energy efficiency and flexibility standards for coal power[EB/OL]. (2022-08-03)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/30/content_5707362. htm.

[25] 国家发展和改革委员会. 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[EB/OL]. (2024-02-27)[2024-12-30]. https://www.ndrc. gov. cn/xxgk/zcfb/tz/202402/t20240227_1364257. html.
National Development and Reform Commission. Guiding opinions on strengthening capacity building for grid peak energy storage and intelligent dispatch[EB/OL]. (2024-02-27)[2024-12-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202402/t20240227_1364257. html.

[26] 北极星储能网. 两会聚焦丨氢能首次写入政府工作报告！超 20 位代表委员为能源"新宠儿"发声![EB/OL]. (2019-03-19)[2025-03-24]. https：//news. bjx. com. cn/html/20190319/969664. shtml.
Polaris Energy Storage Network. The first time hydrogen was written into the government work report!More than 20 representatives and members of the energy "new favorite" voice![EB/OL]. (2019-03-19)[2025-03-24]. https://news.bjx.com.cn/html/20190319/969664. shtml.

[27] 国家能源局. 关于开展燃料电池汽车示范应用的通知[EB/OL]. (2020-09-21)[2024-12-30]. https://www.nea.gov.cn/2020-09/21/c_139384465. htm.
National Energy Administration. Notice on the demonstration and application of fuel cell vehicles[EB/OL]. (2020-09-21)[2024-12-30]. https://www. nea. gov. cn/2020-09/21/c_139384465. htm.

[28] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发《"十四五"工业绿色发展规划》的通知[EB/OL]. (2021-12-03)[2024-12-30]. https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_4ac49eddca6f43d68ed17465109b6001. html.
Ministry of Industry and Information Technology. Ministry of Industry and Information Technology on the issuance of the "14th five-year plan for green development of industry"[EB/OL]. (2021-12-03)[2024-12-30]. https://wap.miit.gov. cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_4ac49eddca6f43d68ed17465109b6001. html.

[29] 国家发展和改革委员会. 《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》[EB/OL]. (2022-03-23)[2024-12-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038. html?state=123.
National Development and Reform Commission. Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)][EB/OL]. (2022-03-23)[2024-12-30]. https://www.ndrc.gov. cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038. html?state=123.

[30] 王 安. 中华人民共和国能源法[EB/OL].[2025-03-24]. https://www.gov. cn/yaowen/liebiao/202411/content_6985761. htm.
WANG An. Energy Law of the People's Republic of China [EB/OL].[2025-03-24]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content_6985761. htm..

[31] 国家发展和改革委员会. 关于印发"十四五"可再生能源发展规划的通知[EB/OL]. (2022-06-01)[2024-12-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=%26state=123.
National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the "14th Five-Year Plan" for renewable energy development[EB/OL]. (2022-06-01)[2024-12-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=%26state=123.

[32] 国家发展和改革委员会. 关于印发《"十四五"现代能源体系规划》的通知(发改能源〔2022〕210 号)[EB/OL]. (2022-01-29)[2024-12-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016_ext. html.
National Development and Reform Commission. Circular on the issuance of the "14th Five-Year Plan" for a modern energy system (NDRC Energy[2022]No. 210)[EB/OL]. (2022-01-29)[2024-12-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016_ext. html.

[33] 国家标准化管理委员会，国家发展改革委，工业和信息化部，等. 关于印发《氢能产业标准体系建设指南(2023 版)》的通知[EB/OL]. (2023-07-19)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202308/content_6897986. htm.
Standardization Administration of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Notice on the issuance of the guidelines for the construction of a standard system for the hydrogen energy industry (Version 2023)[EB/OL]. (2023-07-19)[2024-12-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202308/content_6897986.htm.

[34] 张显荣，徐玉杰，杨立军，等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J]. 储能科学与技术，2021，10(5)：1565-1578.
ZHANG Xianrong, XU Yujie, YANG Lijun, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermal power-heat storage coupling systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1565-1578.

[35] 苏 鹏，王文君，杨 光，等. 提升火电机组灵活性改造技术方案研究[J]. 中国电力，2018，51(5)：87-94.
SU Peng, WANG Wenjun, YANG Guang, et al. Research on the technology to improve the flexibility of thermal power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 87-94.

[36] ZHU C, ZHANG G M, ZHU K Y, et al. A molten salt energy storage integrated with combined heat and power system: scheme design and performance analysis[J]. Energy, 2024, 313: 133755.

[37] CHEN C X, GE Z H, ZHANG Y J. Study of combined heat and power plant integration with thermal energy storage for operational flexibility[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119537.

[38] 景 浩，王登亮，陈 禄，等. 蒸汽-烟气逐级加热熔盐储热系统耦合燃煤机组的灵活性与热力性能研究[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-12[2024-12-30]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 240623.
JING Hao, WANG Dengliang, CHEN Lu, et al. Research on the flexibility and thermal performance of steam-flue gas step-by-step heating molten salt thermal storage system coupled with coal-fired power plants[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-12[2024-12-30]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 240623.

[39] CHEN X H, OKO E, WU X. Integration and capacity optimization of molten-salt heat storage in coal-fired power plant with carbon capture system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 99: 113363.

[40] 马汀山，王 伟，王东晔，等. 基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究[J]. 热力发电，2023，52(7)：113-118.
MA Tingshan, WANG Wei, WANG Dongye, et al. Research on system design and capacity calculation method for deep peak shaving of coal-fire unit based on molten salt heat storage assistance[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 113-118.

[41] LI B, CAO Y, HE T Y, et al. Thermodynamic analysis and operation strategy optimization of coupled molten salt energy storage system for coal-fired power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121702.

[42] MU Z G, LV Y, JIANG K J, et al. A dynamic nonlinear model for controller design of flue gas-molten salt heat exchanger in flexibility retrofit coal-fired unit[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 101: 113897.

[43] 魏 乐，樊冰芬，张 怡，等. 耦合熔盐储热的火电机组灵活调峰控制策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-13[2024-12-30]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 241471.
WEI Le, FAN Bingfen, ZHANG Yi, et al. Research on flexible peak shaving control strategy of thermal power unit coupled with molten salt heat storage system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-13[2024-12-30]. https: //doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 241471.

[44] 陈来军，梅生伟，王 斌，等. 火电耦合压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报，2024，44(18)：7264-7275.
CHEN Laijun, MEI Shengwei, WANG Bin, et al. An overview and outlook on thermal power unit coupled with compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7264-7275.

[45] 路雪晴. 火电耦合汽驱压缩空气储能系统优化研究与调峰性能分析[D]. 济南：山东大学，2023.
LU Xueqing. Optimization research and peak shaving performance

analysis of coal power coupling steam-driven compressed air energy storage system[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2023.

[46] 罗天赐. 燃煤机组耦合 CAES 系统变工况特性研究[D]. 保定：华北电力大学，2019.
LUO Tianci. Study on characteristics of variable working condition of coal-fired unit coupled CAES system[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2019.

[47] GUO H, WANG X L, HUANG L J, et al. Off-design characteristics of a novel integrated system of coal-fired cogeneration unit and compressed air energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 69: 107944.

[48] PAN P Y, ZHANG M Y, PENG W K, et al. Thermodynamic evaluation and sensitivity analysis of a novel compressed air energy storage system incorporated with a coal-fired power plant[J]. Entropy, 2020, 22(11): 1316.

[49] FU H L, NIŽETIĆ S, PARK J W, et al. Thermodynamic analysis of a combined heating and power plant hybrid with compressed air energy storage and molten salt heat storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113174.

[50] 李佳佳，李兴朔，魏凡超，等. 耦合火电机组的新型压缩空气储能系统技术经济性评估研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(23)：9171-9182.
LI Jiajia, LI Xingshuo, WEI Fanchao, et al. Research on techno-economic evaluation of new type compressed air energy storage coupled with thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9171-9182.

[51] WANG C Y, SONG J W, ZHENG W, et al. Integration of compressed air energy storage into combined heat and power plants: a solution to flexibility and economy[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 290: 117215.

[52] LI J J, LI X S, YAN P G, et al. Thermodynamics, flexibility and techno-economics assessment of a novel integration of coal-fired combined heating and power generation unit and compressed air energy storage[J]. Applied Energy, 2023, 339: 120924.

[53] SHI X P, HE Q, LIU Y X, et al. Thermodynamic and techno-economic analysis of a novel compressed air energy storage system coupled with coal-fired power unit[J]. Energy, 2024, 292: 130591.

[54] 唐西胜，娄彦涛，戴兴建，等. 飞轮储能技术及其构网应用展望[J/OL]. 电力系统自动化，2024：1-13[2024-12-30]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/32.1180. tp. 20241029.1033.002. html.
TANG Xisheng, LOU Yantao, DAI Xingjian, et al. Flywheel energy storage technology and prospect of its grid-forming application[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2024: 1-13[2024-12-30]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/32.1180. tp. 20241029.1033.002. html.

[55] JI W M, HONG F, ZHAO Y Z, et al. Applications of flywheel energy storage system on load frequency regulation combined with various power generations: a review[J]. Renewable Energy, 2024, 223: 119975.

[56] YANG T T, LIU Z Y, ZENG D L, et al. Simulation and evaluation of flexible enhancement of thermal power unit coupled with flywheel energy storage array[J]. Energy, 2023, 281: 128239.

[57] 洪　烽，梁　璐，逄亚蕾，等. 基于机组实时出力增量预测的火电-飞轮储能系统协同调频控制研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(21)：8366-8377.
HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Research on coordinated frequency control of thermal power-flywheel energy storage system based on the real-time prediction of output increment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8366-8377.

[58] 梁　璐，洪　烽，季卫鸣，等. 大规模飞轮储能阵列协同火电机组调频的能量管理系统[J]. 中国电机工程学报，2025，45(7)：2658-2669.
LIANG Lu, HONG Feng, JI Weiming, et al. Energy management system of large-scale flywheel energy storage array coordinated with thermal power unit in frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(7): 2658-2669.

[59] 房　方，刘渝斌，王冰玉，等. 基于 NSGA-Ⅱ的飞轮-火电联合二次调频最优负荷分配策略[J]. 电力系统自动化，2024，48(12)：79-88.
FANG Fang, LIU Yubin, WANG Bingyu, et al. Optimal load allocation strategy of flywheel-thermal power coordinated secondary frequency regulation based on non-dominated sorting genetic algorithm-Ⅱ[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 79-88.

[60] 梁志宏，刘吉臻，洪　烽，等. 电力级大功率飞轮储能系统耦合火电机组调频技术研究及工程应用[J]. 中国电机工程学报，2024，44(21)：8518-8530.
LIANG Zhihong, LIU Jizhen, HONG Feng, et al. Research and engineering application of frequency modulation technology of power-level high-power flywheel energy storage system coupled with thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8518-8530.

[61] 陈　彪，王　玮，高　嵩，等. 基于模糊自适应指令分解的飞轮-火电一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(19)：128-137.
CHEN Biao, WANG Wei, GAO Song, et al. Primary frequency regulation control strategy for flywheel-thermal power joint system based on fuzzy adaptive command decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 128-137.

[62] 陈　彪，王　玮，高　嵩，等. 计及灵活经济环保运行的火电-飞轮储能系统容量配置与调频参数协同优化[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：376-384.
CHEN Biao, WANG Wei, GAO Song, et al. Co-optimization of capacity allocation and frequency control parameters for thermal power-flywheel energy storage system considering flexible, economical and environment friendly operation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 376-384.

[63] 罗耀东，田立军，王　垚，等. 飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J]. 电力系统自动化，2022，46(9)：71-82.
LUO Yaodong, TIAN Lijun, WANG Yao, et al. Coordinated control strategy and optimal capacity configuration for flywheel energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 71-82.

[64] XIE X R, GUO Y H, WANG B, et al. Improving AGC performance of coal-fueled thermal generators using multi-MW scale BESS: a practical application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1769-1777.

[65] 李军徽，潘雅慧，穆　钢，等. 高比例风电系统中储能集群辅助火电机组调峰分层优化控制策略[J]. 电工技术学报，2025，40(7)：2127-2145.
LI Junhui, PAN Yahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimal control strategy for storage cluster-assisted thermal unit peaking in high-ratio wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2127-2145.

[66] 肖春梅. 电储能提升火电机组调频性能研究[J]. 热力发电，2021，50(6)：98-105.
XIAO Chunmei. Research on using electric energy storage to improve frequency regulation performance of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 98-105.

[67] 程昊文，李克成，柳　璐，等. 基于风光火差异化调频策略的电池储能协同优化配置[J/OL]. 上海交通大学学报，2024：1-23[2024-12-30]. https://doi. org/10.16183/j. cnki. jsjtu. 2024.334.
CHENG Haowen, LI Kecheng, LIU Lu, et al. Optimization configuration of battery storage coordinated with differentiated frequency regulation strategy of wind, solar, and thermal power[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024: 1-23[2024-12-30]. https://doi.

org/10.16183/j. cnki. jsjtu. 2024.334.

[68] ZHANG F, HU Z C, MENG K, et al. HESS sizing methodology for an existing thermal generator for the promotion of AGC response ability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 608-617.

[69] SUN E H, SHI J H, ZHANG L, et al. An investigation of battery energy storage aided wind-coal integrated energy system[J]. Energy Engineering, 2023, 120(7): 1583-1602.

[70] 孙培锋，陆王琳，白 鹏，等. 锂电池和超级电容混合储能辅助火电调频技术发展现状和趋势[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：418-429.
SUN Peifeng, LU Wanglin, BAI Peng, et al. Development status and trends of lithium battery and supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power frequency regulation technology[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 418-429.

[71] 王华卫，张 平. 350 MW 级火电机组与电储能联合调频系统设计研究[J]. 电工技术，2019(6)：61-63，117.
WANG Huawei, ZHANG Ping. Design and research on joint frequency modulation system for 350 MW grade thermal power unit and energy storage[J]. Electric Engineering, 2019(6): 61-63, 117.

[72] 刘 闯，孙 傲，王艺博，等. 计及电熔镁负荷与储能联合调峰的电力系统日前-日内联合经济调度方法[J]. 电力自动化设备，2022，42(2)：8-15.
LIU Chuang, SUN Ao, WANG Yibo, et al. Day-ahead and intra-day joint economic dispatching method of electric power system considering combined peak-shaving of fused magnesium load and energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 8-15.

[73] 米 阳，何 进，卢长坤，等. 计及新能源并网的火储联合调峰运行优化研究[J]. 中国电机工程学报，2025，45(5)：1704-1715.
MI Yang, HE Jin, LU Changkun, et al. Research on optimized operation of combined heat and power with energy storage for peak shaving considering renewable energy integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1704-1715.

[74] KOIKE M, ISHIZAKI T, RAMDANI N, et al. Optimal scheduling of battery storage systems and thermal power plants for supply–demand balance[J]. Control Engineering Practice, 2018, 77: 213-224.

[75] 袁铁江，高玲玉，谢永胜，等. 基于氢能的风-火耦合多能系统设计与综合评估[J]. 电力自动化设备，2021，41(10)：227-233，255.
YUAN Tiejiang, GAO Lingyu, XIE Yongsheng, et al. Design and comprehensive evaluation of wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 227-233, 255.

[76] 李京润，杨思宇，刘庆辉，等. 大规模风电耦合火电制氢多情景下不同运行策略分析[J]. 化工学报，2025，76(3)：1191-1206.
LI Jingrun, YANG Siyu, LIU Qinghui, et al. Analysis of multiple operating strategies for large-scale wind power coupled with thermal power for hydrogen production under various scenarios[J]. CIESC Journal, 2025, 76(3): 1191-1206.

[77] 杨建华，刘敦楠，李 华，等. 辅助服务市场下火电制氢项目投资经济性研究[C]//2019 年中国电机工程学会年会论文集. 能源电力期刊集群平台，2019.
YANG Jianhua, LIU Dunnan, LI Hua, et al. Research on investment economy of thermal power hydrogen production project in auxiliary service market[C]//Energy and Power Journal Cluster Platform, 2019.

[78] 曹 炜，钟 厦，王海华，等. 制氢系统参与火电辅助调峰的容量配置优化[J]. 分布式能源，2020，5(2)：15-20.
CAO Wei, ZHONG Xia, WANG Haihua, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen production system participating peak regulation for auxiliary with thermal power plant[J]. Distributed Energy, 2020, 5(2): 15-20.

[79] HE Y, GUO S, DONG P X, et al. Feasibility analysis of decarbonizing coal-fired power plants with 100% renewable energy and flexible green hydrogen production[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 290: 117232.

[80] 朱显辉，胡 旭，师 楠，等. 考虑氢储动态效率的电氢耦合微网长期容量优化[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1128-1139.
ZHU Xianhui, HU Xu, SHI Nan, et al. Long-term capacity optimization of electrohydrogen coupled microgrid considering dynamic efficiency of hydrogen storage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1128-1139.

[81] 吴 珽，何冰琛，张勋奎，等. 荷随源动的电网友好型风光氢储大基地容量优化配置研究[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-12[2024-12-30]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11.2107. tm. 20240613.1024.002. html.
WU Zhen, HE Bingchen, ZHANG Xunkui, et al. Research on capacity optimization allocation of a grid-friendly large energy base containing wind power, photovoltaic and hydrogen energy storage whose load changes with the power supply[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-12[2024-12-30]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11.2107. tm. 20240613.1024.002. html.

[82] 韩 莹，于三川，李荦一，等. 计及阶梯式碳交易的风光氢储微电网低碳经济配置方法[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2523-2533.
HAN Ying, YU Sanchuan, LI Luoyi, et al. Low-carbon and economic configuration method for solar hydrogen storage microgrid including stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2523-2533.

[83] 鲁明芳，李咸善，李 飞，等. 季节性氢储能-混氢燃气轮机系统两阶段随机规划[J]. 中国电机工程学报，2023，43(18)：6978-6991.
LU Mingfang, LI Xianshan, LI Fei, et al. Two-stage stochastic programming of seasonal hydrogen energy storage and mixed hydrogen-fueled gas turbine system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 6978-6991.

[84] 宋 震，张 龙，徐广强，等. 耦合氢储能的火电机组在新型电力系统中的应用研究[J]. 热力发电，2022，51(11)：140-147.
SONG Zhen, ZHANG Long, XU Guangqiang, et al. Application study of thermal power unit coupled with hydrogen energy storage in new type electric power system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 140-147.

[85] 李咸善，杨宇翔. 基于双向电价补偿的含氢储能风电和梯级水电联合优化调度[J]. 电网技术，2020，44(9)：3297-3305.
LI Xianshan, YANG Yuxiang. Optimization dispatching for joint operation of hydrogen storage-wind power and cascade hydropower station based on bidirectional electricity price compensation[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3297-3305.

[86] 孟 明，罗 洋. 基于 AHP-熵权法的综合能源系统多指标评价[J]. 电力科学与工程，2021，37(5)：46-54.
MENG Ming, LUO Yang. Multi-index evaluation of integrated energy system based on AHP entropy weight method[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(5): 46-54.

[87] 刘海镇，徐 丽，王新华，等. 电网氢储能场景下的固态储氢系统及储氢材料的技术指标研究[J]. 电网技术，2017，41(10)：3376-3384.
LIU Haizhen, XU Li, WANG Xinhua, et al. Technical indicators for solid-state hydrogen storage systems and hydrogen storage materials for grid-scale hydrogen energy storage application[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3376-3384.

[88] 许世森，张瑞云，程 健，等. 电解制氢与高温燃料电池在电力行业的应用与发展[J]. 中国电机工程学报，2019，39(9)：2531-2536.
XU Shisen, ZHANG Ruiyun, CHENG Jian, et al. Application and development of electrolytic hydrogen production and high temperature fuel cell in electric power industry[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2531-2536.

[89] 杨馥源，田雪沁，徐 彤，等. 面向碳中和电力系统转型的电氢枢纽灵活性应用[J]. 电力建设，2021，42(8)：110-117.

YANG Fuyuan, TIAN Xueqin, XU Tong, et al. Flexibility of electro-hydrogen hub for power system transformation under the goal of carbon neutrality[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(8): 110-117.

[90] 马榕谷，陈　洁，赵军超，等. 非并网风氢互补系统的容量多目标优化[J]. 太阳能学报，2019，40(2)：422-429.
MA Ronggu, CHEN Jie, ZHAO Junchao, et al. Multi-objective optimization for capacity of non-grid-connected wind/hydrogen hybrid power system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(2): 422-429.

[91] 陈吉玲. 压缩空气储能系统与火电机组耦合方案及其特性研究[D]. 保定：华北电力大学，2021.
CHEN Jiling. Research on coupling scheme and characteristics of compressed air energy storage system and thermal power unit[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2021.

[92] 王文烨，姜　飞，张新鹤，等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J]. 电网技术，2024，48(1)：197-206.
WANG Wenye, JIANG Fei, ZHANG Xinhe, et al. Low-carbon and flexible dispatch of high-proportion wind-photovoltaic multi-energy system with comprehensive utilization of large-scale hydrogen energy[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 197-206.

[93] LAHRICHI A, EL ISSMAELI Y, KALANUR S S, et al. Advancements, strategies, and prospects of solid oxide electrolysis cells (SOECs): towards enhanced performance and large-scale sustainable hydrogen production[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 94: 688-715.

[94] ARSLAN O, ACIKKALP E, GENC G. A multi-generation system for hydrogen production through the high-temperature solid oxide electrolyzer integrated to 150 MW coal-fired steam boiler[J]. Fuel, 2022, 315: 123201.

[95] MANAGE M N, SORENSEN E, SIMONS S, et al. A modelling approach to assessing the feasibility of the integration of power stations with steam electrolysers[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(10): 1988-2005.

[96] XU Y H, CAI S S, CHI B, et al. Technological limitations and recent developments in a solid oxide electrolyzer cell: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 548-591.

[97] 郑　博，白　章，袁　宇，等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化[J]. 中国电机工程学报，2022，42(23)：8486-8495.
ZHENG Bo, BAI Zhang, YUAN Yu, et al. Hydrogen production system and capacity optimization based on synergistic operation with multi-type electrolyzers under wind-solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8486-8495.

[98] 李凡丁. Ⅳ型复合材料高压储氢气瓶力学行为分析及设计方法研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2024.
LI Fanding. Mechanical behavior analysis and design method of type IV hydrogen storage vessel[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2024.

[99] 韩　利，李　琦，冷国云，等. 氢能储存技术最新进展[J]. 化工进展，2022，41(增刊 1)：108-117.
HAN Li, LI Qi, LENG Guoyun, et al. Latest research progress of hydrogen energy storage technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(Supplement 1): 108-117.

[100] ZHANG R N, CAI J Y, ZHANG T, et al. Performance analysis and optimization of a TEG-based compression hydrogen storage waste heat recovery system[J]. Renewable Energy, 2023, 219: 119521.

[101] BANERJEE T, BRAVO J, SARUNAC N, et al. Sustainable energy storage solutions for coal-fired power plants: a comparative study on the integration of liquid air energy storage and hydrogen energy storage systems[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 310: 118473.

[102] MARIN G E, OSIPOV B M, TITOV A V, et al. Gas turbine operating as part of a thermal power plant with hydrogen storages[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(86): 33393-33400.

[103] SINELNIKOV D S. Novel technology of electric combustion of pulverized coal and prospects of its use with small additions of hydrogen to ensure ignition of low-grade fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 95: 957-965.

[104] 张　虹，孟庆尧，王明晨，等. 考虑火电机组参与绿证购买交易的含氢综合能源系统经济低碳调度策略[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(3)：26-35.
ZHANG Hong, MENG Qingyao, WANG Mingchen, et al. Economic and low-carbon dispatch strategy of a hydrogen-containing integrated energy system considering thermal power units participating in green certificate purchase trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 26-35.

[105] 赵　硕，王　勇，汪　鑫，等. 燃煤掺烧氢对燃烧特性影响的试验研究[J/OL]. 洁净煤技术，2024：1-7[2025-04-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676. TD. 20240730.0944.002. html.
ZHAO Shuo, WANG Yong, WANG Xin, et al. Experimental study on the influence of coal/hydrogen co-firing on combustion characteristics[J/OL]. Clean Coal Technology, 2024: 1-7[2025-04-03]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/11.3676. TD. 20240730.0944.002. html.



袁铁江
1975—，男，博士(后)，教授，博导
主要从事电-氢高效转换与互动控制技术，电夹点分析与新型电力系统规划技术，储能与新能源发电并网技术方面的研究工作
E-mail: ytj1975@dlut.edu.cn

YUAN Tiejiang
Post-doctorate
Professor



王　康(通信作者)
1996—，男，博士生
主要从事氢能系统集成设计与过程控制方面的研究工作
E-mail: 72209020@mail.dlut.edu.cn

WANG Kang
Ph.D. candidate
Corresponding author



滕　越
1989—，女，博士，教授级高工
主要从事燃料电池及氢综合利用系统方面的研究工作
E-mail: tengyue@mail.ustc.edu.cn

TENG Yue
Ph.D., Professor



邓占锋
1976—，男，博士，教授级高工
主要从事新型储能及能源转化技术、柔性交流输配电技术方面的研究工作
E-mail: dengzhanfeng@geiri.sgcc.com.cn

DENG Zhanfeng
Ph.D., Professor

收稿日期　2025-03-25　修回日期　2025-04-14　　编辑　陈　蔓